スプリットビーム方式と小型水槽を用いる小型生物の ターゲットストレングスの測定方法

甘 糟 和 男, 古 澤 昌 彦,* 樊 春 明

(2002年9月9日受付, 2003年1月29日受理)

東京水産大学海洋生産学科

A method for target strength measurement of small-size animals
by split-beam method in small tank

KAZUO AMAKASU, MASAHICO FURUSAWA* AND CHUMING FAN

Department of Marine Science and Technology, Tokyo University of Fisheries, Minato, Tokyo 108-8477, Japan

We developed a precise method for target strength (TS) measurement of small-size animals such as krill in a water tank. The measurement system consists of a 70 kHz split-beam system and a video camera system to observe the orientation of animals. The transducer was set pointing downward on the top of the small tank with a window on one of the side walls for observing orientation. TS measurement and orientation observation are performed simultaneously. This system can avoid external disturbances such as wind and waves and be set up easily for measurements including measurement on board a ship. TS measurement for a physical model (copper cylinder) was conducted and the measured TS was in good agreement with the theoretical result, showing the accuracy of our method. Next, TS measurements of live shrimps were conducted to get detailed TS patterns. We compared the measured results with the theoretical TS patterns and confirmed a reasonable agreement.

キーワード：スプリットビーム方式, 小型水槽, ビデオカメラ, オキアミ類, ターゲットストレングス (TS), TS パターン

ナンキョクオキアミやツノナシオキアミなどのオキアミ類は、魚類や鯨類などの主要な餌生物であり、また海洋の食物連鎖において、植物プランクトンの基礎生産を大型生物へ運ぶという重要な役割を担っている。さらに、オキアミ類は、海洋生態系における重要性だけでなく、釣餌や養殖用の餌などの漁業資源としても重要であり、事実オキアミ類の生産額は毎年多額に昇っている。¹⁾ 本論文における測定対象の小型生物は、主にこのようなオキアミ類である。

このような重要性からオキアミ類の資源調査や生態調査が必要とされている。その調査手法の一つとして、計量魚群探知機（計量魚探機）などを用いた音響的手法が効果的に適用されてきた。例えば、2000年には南極海洋生物資源保存委員会（CCAMLR）によるナンキョクオキアミ資源国際共同調査²⁾が行われた。この国際共同調査においても、計量魚探機を用いた音響資源調査が中心的な調査であった。また、我が国においては、三陸、

常磐沖におけるツノナシオキアミの漁場調査が魚群探知機やソナー等を用いて行われている。^{3,4)}

音響水産資源調査では、得られた音響データ（平均体積散乱強度）を最終的な資源量に換算する際に、1個体あたりの音響反射強度であるターゲットストレングス（TS）が重要なスケールファクタとなる。自然状態では、TSが遊泳姿勢によって変化するので、遊泳姿勢に対して平均したTS（平均TS）が必要となる。正確な平均TSの値を知るには、遊泳姿勢に対するTSの特性（TSパターン）を知る必要がある。

オキアミ類のような小型生物に対するTS測定方法も進歩してきているが、依然としてそのTS測定は難しく、TSパターンの測定例は少ないのが現状である。この理由として以下のような点があげられる。オキアミ類は、1) 寸法が小さく、弱く、骨が無く、形状が複雑であるので、取り扱いが難しく、例えば魚のTS測定のような釣糸による姿勢の制御⁵⁾が難しいこと、2) 小さく、

* Tel : 81-3-5463-0481. Fax : 81-3-5463-0518. Email : frsw@tokyo-u-fish.ac.jp

鰭がないので TS の値が小さいこと, 3) 鰭がなく, 形状が複雑であるので TS パターンが複雑であること, 4) 生きた状態でのサンプルもしくはそれと同等の新鮮なサンプルの入手が難しいこと。

これまでのオキアミ類などを対象とした TS の測定方法は, 以下のように整理できる。1) ネットケージに複数個体を収容して測定するケージ法,⁶⁻⁸⁾ 2) 大型の水槽内に送受波器を設置し, 単一個体を測定する方法,⁹⁻¹⁷⁾ 3) 円筒型のケージ内, もしくは水槽内において, 単一個体を自然に近い状態で測定する方法。¹⁸⁻²⁰⁾

ケージ法は, 複数個体に対して測定を行うことで十分な信号対雑音比 (SN 比) が得られる。また, 姿勢が適当に分散し, 結果的に背方向平均 TS が比較的容易に推定できる。よって便法としては優れている。⁷⁾

他の方法では, 送受波器と測定個体との距離を近くし, 単一個体に対する測定を行う。単一ビームを用いた測定方法⁹⁻¹⁷⁾では, 指向性の影響を除去するために, 測定個体を釣糸でビーム軸に固定する必要があるが, 指向性を補正できるスプリットビーム (SB) 方式やデュアルビーム (DB) 方式を使用した測定方法^{18,19)}では, 測定個体に釣糸を手綱のようにつけ, より自然に近い状態での測定が可能である。単一ビームであっても, デコンボリューション法を用いることにより, 測定個体が自由に遊泳した状態で測定できる方法²⁰⁾がある。

姿勢特性を明らかに出来る方法としては, 単一ビームにより TS 測定を行い, TS 測定中の測定個体の遊泳姿勢をビデオカメラで観測することで, TS パターンを得る方法が報告されている。¹⁵⁾ SB 方式や DB 方式を用いた TS パターンを得る方法は未だ例がない。

測定環境としては, 海中にケージを設置する方法^{6-8,18,19)}では, 風波や潮流といった外乱の影響や他生物の混入による誤差などが避けられないが, 水槽を用いる方法^{9-17,20)}では, その点を回避できる。しかし, もし大型の水槽を用いると, その設置場所が限られ, 活きのよいサンプルが得やすい船上に置くなどの機動的測定が不可能になり, 大量の海水を要し, かつ対象の正確な姿勢観察を行なうのが困難になるといった問題点がある。

そこで, 本研究では, オキアミ類のような小型生物の TS パターンを, 高精度かつ比較的容易に測定できる方法を開発することを目的とする。観測窓が備わった小型の水槽を使用することで, 姿勢観測を精確に行い, かつ, 音響計測との同時計測を容易にする。さらに, SB 方式を使用することで, ビーム軸へ固定する必要を無くし, より自然に近い状態での測定を可能とする。また, SB 方式で得られる測定個体の位置情報は, 姿勢角測定にも用いることで従来の姿勢角測定方法を拡張する。

まず, 小型水槽を用いる高精度 TS パターン計測システムを構築し, 測定方法を確立する。次に, 物理モデル

(銅円筒) を測定対象とした検証実験を行い, 測定方法が妥当であることを確認する。さらに, 本方法を実際に生きた小型生物に適用し, 有効性を検討する。

方 法

計測システムの概要 計測システムの概要を Fig. 1 に示す。計測システムは, SB 方式による音響計測システムと, ビデオカメラによる姿勢観測システムとで構成される。姿勢観測を精確に行い, かつ, 音響計測との同時計測を容易にするために, 観測窓が備わった小型水槽 (1m×1m×1m) を使用した。送受波器は小型水槽上面に下向きに設置した。

後処理の段階で, 音響計測システムと姿勢観測システムの両データを対応させられるように, オシロスコープとビデオカメラの時刻同期を取った。

音響計測システム 一般に TS を測定する場合, 指向性の影響を考慮しなければならない。単一ビームでは, 測定個体を送受波器に対してどの方向にいるのか分からないので, 測定個体をビーム軸に懸垂するなどして, 指向性を考えなくてよいようにする。しかし, オキアミ類などの小型生物では, ビーム軸へ測定個体を固定する難しさがああり, また, 実際にビーム軸にあることを確認する必要がある。さらに, 固定することによって測定個体に不自然さが生じる。例えば, テグスで体のある部分を固縛すれば, そこを中心とする運動しかできなくなる。そこで, 本システムでは, 測定個体をビーム軸に固定する必要のない SB 方式を用いることによってこの制限を緩和し, ビーム内で動ける, より自然に近い状態で, 精確な TS 測定ができるようにした。

Fig. 2 に音響計測システムのブロック図を示す。SB 方式を用いているので, 1つのエコーレベル計測用ビーム (レベルビーム) と, 4つの位相計測用ビーム (位相ビーム) の各信号を処理する必要がある。そのために, 2台のデジタルオシロスコープを使用した。測定個体

Fig. 1. Target strength measurement system using the split-beam method and a small tank.

Fig. 2. Block diagram of the acoustic system.

Table 1. Specifications of the acoustic system.

Frequency	[kHz]	70
Beam width	[deg]	
Level beam		19.8
Phase beam		11.8
Pulse duration	[ms]	0.3

は遊泳姿勢を時々刻々と変化させるので、2台のオシロスコープをPCによりGP-IBで制御し、データの連続収録を行った。ローパスフィルタはカットオフ周波数を100 kHzとし、雑音を低減した。

Table 1 に使用した音響計測システムの緒元を示す。

一般に、測定個体の体長に対して波長が短い高周波ではTSパターンは鋭く複雑になるため、平均TSの変動も大きくなり、量推定の精度が低くなる。しかし、逆に体長に対して波長が長い低周波ではその変動は小さいが、TSの値そのものが小さくなる。また、極端に低周波になるとレイリー領域となり、TSは体長の6乗に比例するため、正確な体長分布がわかっていないと、TSの推定には大きな誤差を含むことになる。²¹⁾ これまでの、オキアミ類の音響資源調査では国際的に120 kHz（音速1500 m/sとした時の波長1.25 cm）が使用されてきたが、前述した理由により、オキアミ類のサイズに対して波長が短いためにTSの変動が大きい可能性がある。逆に、計量魚探機の標準的な周波数である38 kHz（同3.95 cm）では、オキアミ類の体長に対して波長が長いので好ましくない。そこで、本システムでは以上の点を考慮し、中間的な周波数である70 kHz（同2.14 cm）を使用した。

送受波器には、計量魚探機（㈱カイジョー製KFC-1000型）用のものを使用した。この送受波器は、SB方式以外にDB方式にも対応しており、指向性の異なる狭ビームと広ビームの2種類を実現できる。ビーム幅はそれぞれ、8.4°と19.8°である。通常、狭ビームで送波を行うが、本方法では近距離での計測であるため、狭

Fig. 3. Coherent reduction of noise (b), from original signal (a), to get echo of target animal (c).

ビームでの送波では、測定範囲が狭く、測定個体が移動した時にビームから外れる機会が多い。そこで、広ビームをレベルビームとした。

広ビームで送波を行い、エコーレベルは広ビームで計測し、位相差の測定では、エコーを前後左右に4分割された位相ビームで受波し、前後方向、左右方向の位相差を測定する。

水槽を小型（本研究で用いる水槽は1 m立法）にすると、ビーム幅を広くすることにより水槽内壁からの不要反射が増す。また、近距離での測定のために送波時の残響が問題となる。小型生物のエコーは微弱であるので、これらの不要反射や残響によるノイズにより測定個体のエコーを簡単に確認し取り出すことが出来ない。そこで、ノイズは以下に述べるようにコヒーレント減算²²⁾を行うことにより消去した。Fig. 3(a)のように、収録するエコーは、測定個体のエコーとノイズを含んでいる。そこで、TS測定前、もしくは測定後に、測定個体のない状態でノイズのみを収録しておく（Fig. 3(b)）。後処理で、収録したエコー(a)から測定前（場合によっては後）のノイズ(b)を送波時点を揃えて引くことで、測定個体のエコーのみを得ることができる（Fig. 3(c)）。この図で1.3 ms（深さ97.5 cm）以降は、水槽底の大きなエコーによって対象のエコーは復元できない。

送受信系の較正は, TS 測定前に直径 38.1 mm のタングステンカーバイド製標準球を用いて行った。²³⁾ 標準球の TS は, 水温の測定により音速を求め, 音速と TS の関係から求めた (水温によって変わるが約 -41 dB)。送波音圧, 受波感度, Fig. 2 のフィルタまでの利得の 3 者の積を送受信係数とし, これを較正したところ, 約 50 dB であった。

姿勢観測システム ビデオカメラ (SONY Handycam, DCR-TRV7, 68 万画素, 以下カメラと呼ぶ) は, 観測窓に密着させ, TS 測定中の測定個体の姿勢を録画する。後処理で, 次に述べる姿勢角測定方法により姿勢角を算出する。従来は, カメラに対して測定個体が平行である時しか姿勢角を求めることが出来なかった。そこで, McGehee *et al.* の方法¹⁵⁾ を, SB 方式の特長を活かすことで発展させ, この問題を解決した。

Fig. 4 に示すように, $\vec{a}$ を測定個体の向きを表す頭胸部の末端から目の後端までを結ぶベクトルとする。尾節の先端から目の後端までを結ぶベクトルを $\vec{a}$ とすることも考えられるが, その場合, 腹部を屈曲させた場合とそうでない場合では, $\vec{a}$ が異なり姿勢角の定義があいまいになる。また, $\vec{k}$ を測定個体への音波の入射の波数ベクトルとする。音波の入射方向に対して頭を上げている時を正, 下げている時を負とすると, 姿勢角 θ_i は, 次式で求めることができる。

$$\theta_i = -\frac{\pi}{2} + \cos^{-1} \left(\frac{\vec{a} \cdot \vec{k}}{|\vec{a}| |\vec{k}|} \right) \quad (1)$$

したがって, θ_i を求めるためには $\vec{a}$, $\vec{k}$ が必要である。

まず, $\vec{a}$ を求める。Fig. 5 のように, 送受波器中心を原点とした座標系を X, Y, Z (大文字) で表し, $\vec{a}$ の始点を原点とした座標系を x, y, z (小文字) で表す。SB 方式用の送受波器は, 測定対象の方位を測定する関係で設置方向が重要であり, 前 (fore), 後 (aft), 左 (port), 右 (starboard) の方向が決められている。本システムでは, 図のように X を前方向, Y を右方向となるように設置した。

カメラは, カメラ軸が Z 軸 (ビーム軸) に対して垂直となるように, YZ 面上の -Y 方向へ向けて設置する。カメラ軸からのずれによる画像の大きさの違いは検知できない程度であったので, 歪みもほとんどないと考えられる。測定個体からカメラまでの距離を考える場合は, カメラ軸と y 軸が一致しているものとして考えるが, この誤差は最大で -2% である。

xz 面に投影された $\vec{a}$ の成分 $(a_x, 0, a_z)$ は画像から確認できる。画像上でこの成分を $(a_{xv}, 0, a_{zv})$ とする。測定個体からカメラまでの距離が測定個体の動きによって変化するので, a_{xv} , a_{zv} の値も変化する。ビーム軸に測定対象がある場合を基準とすると, この変化はビーム軸からカメラまでの距離 Y_v に対する測定個体からカメ

Fig. 4. Definition of the orientation angle θ_i ($\vec{a}$: body orientation vector, $\vec{k}$: incident wave number vector).

Fig. 5. Geometrical view of the measurement system. Details are given in the text.

ラまでの距離 $(Y_v - Y_t)$ の比で表すことができる。よって, 次式により実際の a_x , a_z を求める。

$$a_x = a_{xv} \left(\frac{Y_v - Y_t}{Y_v} \right) S \quad (2)$$

$$Y_t = r \sin \theta \sin \phi \quad (3)$$

ここで, Y_v はビーム軸からカメラまでの距離, Y_t は XZ 面から $\vec{a}$ の始点までの距離である。 Y_v は, あらかじめ計測しておくことで求め, 32.5 cm であった。 Y_t は SB 方式により測定個体の位置 (r, θ, ϕ) が分かるので, (3) 式により求まる。また, S はビーム軸における単位画素あたりのサイズであり, ビーム軸に銅円筒 (長さ 3.0 cm, 直径 0.4 cm) をカメラに対して平行に吊るし, その画像から 0.0441 cm/pixel となった。 a_z を求める場合は, (2) 式において, 添え字の x を z とすればよい。

a_y は, $\vec{a}$ が xz 面に投影された直線と $\vec{a}$ とがなす角度を β とすると次式より求まる。

$$a_y = |\vec{a}| \sin \beta \quad (4)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}{|\vec{a}|} \right) \quad (5)$$

$|\vec{a}|$ は、実際に頭胸部の長さを計測することで求まる。
以上の3成分により $\vec{a}$ が求まる。

$\vec{k}$ は、SB方式により位置角 (θ, ϕ) が分かるので、
下式により各成分が求まる。

$$\vec{k} = |\vec{k}| \begin{pmatrix} \hat{k}_x \\ \hat{k}_y \\ \hat{k}_z \end{pmatrix} = |\vec{k}| \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで、 λ を波長として $|\vec{k}| = 2\pi/\lambda$ である。

以上により、 $\vec{a}$, $\vec{k}$ が求まるので、(1)式によって θ_i が求まる。これと、SB方式により得られるTS値を組み合わせて、TSの θ_i 特性、すなわちTSパターンが得られる。

測定方法の検証 理論によってTS計算が可能な物理モデルを測定対象としたTS測定を行うことにより、測定方法が妥当であるかを検証した。物理モデルには、銅製の円筒(長さ3.0 cm, 直径0.4 cm)を用いた。銅は、標準球の材質としても用いられており、^{24,25)} 材質が錆びにくく、純粋であり、有限円筒散乱の理論モデル²⁶⁾の計算に必要なパラメータも既知である。²⁵⁾ Table 2 に使用した物理モデルの緒元を示す。

銅円筒に釣糸を接着し、あらゆる傾角で懸垂しTS測

定を行った。測定の際には、せっけん水で表面を拭い、気泡が付着しないように注意した。

小型生物のTS測定 構築した計測システムおよび測定方法を小型生物に対して適用し、オキアミ類のようなTSの小さい小型生物のTSパターンが得られるかを検証した。

最初の試みとして、2000年12月17日、浮遊性のエビであるトガリサクラエビ *Sergia creber* のTS測定を行った。トガリサクラエビは、東京水産大学練習船青鷹丸にて、IONESS (Intelligent Operative Net Sampling System, 網口面積1 m²)により相模湾の水深約400~600 mから採集した。採集後、生きた状態のまま東京水産大学の研究室に持ち帰り、即座に4個体のTS測定を行った。測定個体は、ビーム内の適当な位置にとどまるように釣糸によって簡単に拘束するのみで、自ら浮遊、遊泳し、姿勢を変化させた。次に、2001年10月には、東京水産大学練習船海鷹丸に計測システムを積み込み、RMT (Rectangular Midwater Trawl, 網口面積8 m²)により採集した浮遊性エビ類のTS測定を行った。

しかし、これらの測定値と後述する理論モデルによるTSパターンとの比較では良い一致が見られず、約10 dBの差が生じた。これは、測定個体に気泡が付着していたためと考えられた。さらに、オキアミ類や浮遊性エビ類は、水温変化に対して弱く、サンプリングネットにより採集する過程において多くが死亡してしまい、十分な量の海産の生きた小型生物を採集することは難しかった。以上のように、極力迅速に生きた小型生物を陸上の研究室に運ぶ方法、および、船上に水槽を含む計測システムを搭載する方法により、小型生物のTS測定が可能であることは確認できたが、一方で、気泡によると考えられる誤差対策、活きのいいサンプルを豊富に得る方法の課題が残った。

そこで、測定対象として、体の肉質や形状がオキアミ類に類似している淡水産の小型エビであるスジエビ *Palamon paucidens* を生きた状態で用いた。Table 3 に各個体の体長、測定日、測定時の水温と音速、淡水の密度、理論モデルの計算に必要な媒質と体内との音速比お

Table 2. Parameters used in the copper cylinder model calculations.

Measurement date	11/28/2000
Material	Copper
Shape	Finite straight cylinder
Length [cm]	3.0
Diameter [cm]	0.4
Longitudinal wave sound speed ²⁵⁾ [m/s]	4760.0
Transverse wave sound speed ²⁵⁾ [m/s]	2288.5
Density of copper ²⁵⁾ [g/cm ³]	8.947
Water temp. [°C]	14.5
Sound speed of water [m/s]	1483.2
Density of water [g/cm ³]	1.000

Table 3. Parameters used in the shrimp model calculations

No.	Body length [cm]	Measurement date	Water temp. [°C]	Sound speed of water [m/s]	Density of water [g/cm ³]	Sound speed contrast	Density contrast
A	3.40	11/29/2001	16.8	1471.3	1.000	1.0335	1.0626
B	4.00	12/02/2001	17.8	1474.6	1.000	1.0312	1.0626
C	3.83	12/03/2001	19.2	1479.1	1.000	1.0281	1.0626
D	3.49	12/04/2001	20.0	1481.6	1.000	1.0264	1.0626
E	3.58	12/06/2001	20.0	1481.6	1.000	1.0264	1.0626
F	3.20	12/08/2001	19.0	1478.5	1.000	1.0285	1.0626

よび密度比を示した。

今回、スジエビの音速比と密度比は求めなかった。そこで、Foote のナンキョクオキアミについての実測値²⁷⁾を、スジエビの TS 測定時における淡水の音速と密度の条件に換算して用いた。Foote はナンキョクオキアミの音速比を 1.0279 と報告している。²⁷⁾ 文献より測定時の海水の音速は 1479.3 m/s であるので、体内音速は 1520.6 m/s と計算される。そこで、スジエビの TS 測定時における淡水の音速とナンキョクオキアミの体内音速との比を求め、Table 3 の音速比とした。それぞれの音速比が異なるのは、測定時の水温によって、水槽中での音速が異なっていたためである。また、ナンキョクオキアミの密度比は 1.0357 と報告されている。⁶⁾ 前述した体内音速測定時の水温、塩分濃度より、海水の密度を 1.0260 g/cm³ とすれば、体内密度は 1.0626 g/cm³ である。スジエビの TS 測定は淡水で行っているため、淡水の密度を 1.000 g/cm³ とし、その比を密度比とした。淡水の密度は一定と考えたので、密度比はすべての個体において 1.0626 とした。

使用した理論モデルは、DWBA (Distorted Wave Born Approximation) 変形円筒モデル^{15,28,29)}である。この理論モデルは、散乱体の形状を円筒薄片のつながりとして考える。Table 3 に示した物理パラメータ以外に、各円筒の半径とその中心座標がモデル計算に必要となる。この形状データは、測定中の測定個体がカメラに対して平行になった時に撮影された、やや体を曲げた横向きの典型的な姿勢の時のビデオ画像から求めた。円筒半径は横向きのもの、すなわち体高から求めた。また、観察によれば、ロール方向の運動はせず、ほぼ脚側は下を向いていた。

測定個体の懸垂方法を Fig. 6 に示す。釣糸を手綱のようにつけ測定中にスジエビがビームから大きく外れてしまうことがないようにすると、スジエビは底生性であるので、水槽底へ向かう行動をとる。そこで、腹脚を切断し、遊泳能力を低下させ、姿勢を意図的に変化できるように頭胸部と腹部に釣糸を結び付けて懸垂した。これらの前後 2 本の釣糸による制御は、スジエビが底生性であるが故にやむなく行ったが、オキアミ類の場合は 1 本の釣糸を手綱のように使用して、より自然に近い状態で測定できる。この点は、前述したトガリサクラエビなどによる洋上実験で確かめてある。スジエビの位置はビーム軸から 3 から 4° 以内に入るようにした。

小型生物の TS 測定において、気泡の付着による影響は大きく、誤差要因の一つである。^{7,8)} そこで、本測定時には気泡が付着しないように細心の注意を払い、以下のことを行った。1) 釣糸を測定個体に接着させるのではなく結んだ、2) 結ぶための一連の作業を水の中で行った、3) 測定開始前に気泡が付着していないことを確認

Fig. 6. Suspension method of a live shrimp.

し、付いていた場合には取り払ってから測定を開始した。

結 果

銅円筒の測定値と理論モデルによる TS パターンを Fig. 7 に示す。測定値と理論値の相関係数 R は 0.96 であった。測定値と理論モデルによる TS パターンがよく一致していることが確認できる。これにより姿勢の測定精度も高いことが検証された。

スジエビ 6 個体の測定値と DWBA 変形円筒モデルによる TS パターンを Fig. 8 に示す。測定値と理論値の相関係数 R を図中に示した。個体 B の 0.70、個体 C の 0.58 以外は 1 に近い値を示した。

個体 A は、幅広い θ_t で測定値が得られ、理論値とよく一致した。 θ_t が $-20^\circ \sim -30^\circ$ の範囲で測定 TS が最も低くなるが、これも理論モデルによる TS パターンとよく一致している。個体 B の測定値は、全体的にモデルと類似した TS パターンが得られたが、部分的に測定値が理論値よりも大きい結果となった。個体 C は測定できたデータ数が少なく、全体的に理論値より過大となった。しかし、 θ_t が $10^\circ \sim 30^\circ$ にかけての TS 値の変化は、理論値とはほぼ一致している。個体 D, E は、相関係数がそれぞれ 0.96, 0.94 と大きく、理論値と大体において一致しているが、姿勢を意図的に変化できなかったため、 θ_t が負となる範囲で測定値が得られなかった。個体 F は、幅広い θ_t で測定値が得られ、個体 A ほどではないが理論値ともほぼ一致している。

Fig. 7. Results from measurements and model calculation of TS pattern for copper cylinder (3.0 cm long, 0.4 cm diameter). Physical parameters are listed in Table 2. Correlation coefficient, R , between measurement and model calculation is shown.

Fig. 8. Results from measurements and DWBA-based deformed cylinder model calculations of TS pattern for River shrimp (*Palamon paucidens*). Correlation coefficients, R , between measurement and model calculation are shown.

考 察

銅円筒を用いた測定方法の検証では、相関係数も 0.95 であり、測定値と理論モデルによる TS パターンがよく一致していることから、測定方法が妥当であることを確認できた。

スジエビ 6 個体を用いた TS 測定では、詳細な TS パターンが得られ、また、測定値と理論値がほぼ一致した。小型生物の TS と姿勢を精密に測定し、TS パターンを得るための本計測システムおよび測定方法は有効であることを確認した。

測定値と理論値が正確には一致しない理由として、測定個体に付着した取り切れなかった気泡による影響、理論モデルの計算に用いた音速比と密度比が実際とは異なっている可能性、腹部の屈曲に伴う TS 変化などが考えられる。

気泡の付着による影響に関しては、測定時には気泡が付着しないような対策をし、細心の注意を払ったが、付着していた可能性は拭いきれない。しかし、今回の結果における測定値と理論値との差は、前述したトガリサクラエビの測定結果ほどは大きくはなかった。よって、気泡が付着していた可能性は残るものの、気泡が付着しないようにするためにとった対策は有効であり、今後の TS 測定の際は同等以上の細心な対策をとる必要がある。

音速比、密度比に関しては、個体 A, F の測定値と理論値がほぼ一致していることもあり、これらが大きく実際と異なっていたとは考えにくい。測定個体の体内密度と体内音速を精密に調べることで、より正確な理論モデルの計算を行うことができる。

オキアミ類やエビ類は、腹部の屈曲に伴い TS が変化する。実際に個体 F では、測定中に腹部を屈曲させることがあった。 θ_i が $-20^\circ \sim -30^\circ$ 付近における測定値と理論値の不一致は、腹部の屈曲によるものと考えられる。この点は理論モデルによって確かめた。³⁰⁾

個体 B の 30° 付近の不一致は、頭胸部方向からの入射であるので腹部の屈曲によるものとは考えにくい。この原因は、現段階では明らかにできなかった。

本方法の一つの特長は小型水槽を用いることである。これにより、風波や潮流といった外乱の影響や他生物の混入を回避でき、姿勢の観察を精度高く行え、装置の設置を容易に行うことが可能になった。また、水槽は調査船等に積み込むことのできる大きさであり、生物を採集し、生物が弱る前に、静かな湾内、岸壁などに停泊している際に、船上において TS 測定を行うことが可能になった。

本研究では、SB 方式と小型水槽を用いた小型生物の TS の測定方法を開発した。本方法は、SB 方式を小型

水槽において使用し, 正確かつ容易な測定ができるという, 従来の測定方法にはない新しい方法である。また, ビーム幅の拡大や SB 方式の特長を生かした姿勢角測定方法により, ほとんどすべての測定データを使用できる。

今後は, 本計測システムおよび測定方法を用い, 南極海に生息するナンキョクオキアミ, 日本近海におけるツノナシオキアミ等の TS 測定を行い, 詳細な TS パターンを測定する。また, オキアミ類よりもさらにサイズが小さいカイアシ類など, 釣糸などによる制御が難しい小型生物の TS 測定への応用が期待できる。

以下に研究結果をまとめる。

- 1) 観測窓が備わった小型水槽を用いることで, 姿勢観測を精確に行い, かつ, 音響計測との同時姿勢計測が容易な方法とした。また, 活きのよいサンプルの得られる船上での測定が可能である。
- 2) スプリットビーム (SB) 方式を用いるために, 精確なターゲットストレングス (TS) 測定を行うことができ, ビーム軸に束縛する必要がないことから, 自然に近い状態での測定が可能になる。オキアミ類などの制御の難しい小型生物に対して有効であり, 従来より自然に近い状態での TS 測定が可能になった。また, SB 方式の特長を指向性補正だけでなく, 姿勢角測定にも生かすことで, McGehee *et al.* の姿勢角測定方法¹⁵⁾を拡張した。
- 3) ビーム幅を広くすることで, 測定個体が移動した時にビームから外れることを少なくした。ビーム幅の拡大に伴う不要散乱波は, コヒーレント減算により消去できた。
- 4) 銅円筒を用いた測定方法の検証実験により測定方法が妥当であることを確認した。
- 5) 生きた状態のスジエビを用いた TS 測定では, 詳細な TS パターンが得られた。測定値と理論値がほぼ一致し, 小型生物の TS 測定に有効であることを確認した。

謝 辞

東京水産大学海洋環境学科の石丸隆教授, 東京水産大学練習船海鷹丸の小池義夫船長, 同じく青鷹丸の峰雄二船長 (現神鷹丸船長) および乗組員の方々には, 小型生物の採集, 船上での実験に際し, ご協力, ご助言を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。東京水産大学大学院 (当時) の浜田光利氏には, 本研究を進めるにあたりご指導とご協力を頂きました。深く感謝申し上げます。その他多くの方々のご協力を仰ぎました。心より感謝致します。

文 献

- 1) Nicol S, Endo Y. Krill fisheries of the world. *FAO Fish. Tech. Pap.* 1997; **367**: 1-100.
- 2) 永延幹男, 川口 創, 亀田卓彦, 高尾芳三, 井口直樹. 1999/2000 年開洋丸南極海オキアミ生態系調査. 遠洋 2000; **106**: 18-22.
- 3) 宮城県水産研究開発センター. オキアミ通報第 1~3 報. 平成 11 年度漁海況調査報告書, 宮城県水産研究開発センター, 宮城. 2000; 181-185.
- 4) 安藤隆二, 横須賀功, 豊島征司. ツノナシオキアミの漁期前・漁期中漁場調査. 茨城県水産試験場事業報告平成 12 年度, 茨城県水産試験場, 茨城. 2001; 103-112.
- 5) Sawada K, Miyano Y, Ishii K. Precise target strength pattern measurement in an indoor tank. *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)* 1997; **18**: 231-238.
- 6) Foote KG, Everson I, Jonathan L, Watkins JL, Bone DG. Target strengths of Antarctic krill (*Euphausia superba*) at 38 and 120 kHz. *J. Acoust. Soc. Am.* 1990; **87**: 16-24.
- 7) 宮野鼻洋一. 魚のターゲットストレングスの特性に関する研究. 博士論文, 東京水産大学, 東京. 1992.
- 8) 宮下和士. 音響的手法を用いた動物プランクトンの分布および量推定に関する研究. 博士論文, 東京大学海洋研究所, 東京. 1996.
- 9) Greenlaw CF. Backscattering spectra of preserved zooplankton. *J. Acoust. Soc. Am.* 1977; **62**: 44-52.
- 10) Kristensen Å. Acoustic classification of zooplankton. PhD Thesis, The University of Trondheim, Trondheim. 1983.
- 11) Chu D, Stanton TK, Wiebe PH. Frequency dependence of sound backscattering from live individual zooplankton. *ICES J. Mar. Sci.* 1992; **49**: 97-106.
- 12) Stanton TK, Wiebe PH, Chu D, Benfield MC, Scanlon L, Martin L, Eastwood RL. On acoustic estimates of zooplankton biomass. *ICES J. Mar. Sci.* 1994; **51**: 505-512.
- 13) Stanton TK, Chu D, Wiebe PH. Acoustic scattering characteristics of several zooplankton groups. *ICES J. Mar. Sci.* 1996; **53**: 289-295.
- 14) Stanton TK, Chu D, Wiebe PH, Benfield MC, Scanlon L, Martin L, Eastwood RL. Sound scattering by several zooplankton groups. I. Experimental determination of dominant scattering mechanisms. *J. Acoust. Soc. Am.* 1998; **103**: 225-235.
- 15) McGehee DE, O'Driscoll RL, Traykovski LVM. Effects of orientation on acoustic scattering from Antarctic krill at 120 kHz. *Deep-Sea Research II* 1998; **45**: 1273-1294.
- 16) Traykovski LVM, O'Driscoll RL, McGehee DE. Effect of orientation on broadband acoustic scattering of Antarctic krill *Euphausia superba*: Implications for inverting zooplankton spectral acoustic signatures for angle of orientation. *J. Acoust. Soc. Am.* 1998; **104**: 2121-2135.
- 17) Lavery AC, Stanton TK, McGehee DE, Chu D. Three-dimensional modeling of acoustic backscattering from fluid-like zooplankton. *J. Acoust. Soc. Am.* 2002; **111**: 1197-1210.
- 18) Wiebe PH, Grenne CH, Stanton TK, Burczynski J. Sound scattering by live zooplankton and micronekton: Empirical studies with a dual-beam acoustical system. *J. Acoust. Soc. Am.* 1990; **88**: 2346-2360.
- 19) Demer DA, Martin LV. Zooplankton target strength: Volumetric or areal dependence?. *J. Acoust. Soc. Am.* 1995; **98**: 1111-1118.
- 20) Pauly T, Penrose JD. Laboratory target strength meas-

- urements of free-swimming Antarctic krill (*Euphausia superba*). *J. Acoust. Soc. Am.* 1998; **103**: 3268-3280.
- 21) Furusawa M, Miyonohana Y, Arijima M, Sawada Y. Prediction of Krill Target Strength by Liquid Prolate Spheroid Model. *Fisheries Science* 1994; **60**: 261-265.
- 22) Ding L. Direct laboratory measurement of forward scattering by individual fish. *J. Acoust. Soc. Am.* 1997; **101**: 3398-3404.
- 23) 古澤昌彦, 宮野鼻洋一, 澤田浩一, 高尾芳三. 計量魚群探知機の較正方法. 水産工学研究所技報 1995; **15**: 9-37.
- 24) Foote KG, Knudsen HP, Vestnes G, MacLennan DN, Simonds EJ. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: A practical guide. *Int. Coun. Explor. Sea Coop. Res. Rep.* 1987; **144**: 1-69.
- 25) Foote KG. Optimizing copper spheres for precision calibration of hydroacoustic equipment. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982; **71**: 742-747.
- 26) Stanton TK. Sound scattering by cylinders of finite length. II. Elastic cylinders. *J. Acoust. Soc. Am.* 1998; **83**: 64-67.
- 27) Foote KG. Speed of sound in *Euphausia superba*. *J. Acoust. Soc. Am.* 1990; **87**: 1405-1408.
- 28) Chu D, Foote KG, Stanton TK. Further analysis of target strength measurements of Antarctic krill at 38 and 120 kHz: Comparison with deformed cylinder model and inference of orientation distribution. *J. Acoust. Soc. Am.* 1993; **93**: 2985-2988.
- 29) Stanton TK, Chu D, Wiebe PH. Sound scattering by several zooplankton groups. II. Scattering models. *J. Acoust. Soc. Am.* 1998; **103**: 236-253.
- 30) 甘糟和男, 古澤昌彦, 谷 智明, 樊 春明. オキアミ類の体屈曲に伴うターゲットストレングスの変化. 海洋音響学会講演論文集 2002: 25-28.