

制御法を用いたツノナシオキアミ *Euphausia pacifica* のターゲットストレングスの測定

宮下和士*・青木一郎*・飯田浩二**・向井徹**・黄斗湊**

Target Strength measurements of isada krill *Euphausia pacifica* using the cage method

Kazushi MIYASHITA*, Ichiro AOKI*, Koji IIDA**,
Tohru MUKAI**, and Doojin HWANG**

Abstract

In this paper, we measured target strength (TS) of isada krill using the cage method, and compared between theoretical scattering models and the actual measurements. The measurements were made at four frequencies between 25 and 200 kHz by the substitute method using a tungsten carbide calibration ball (diameter, 38.1mm). Preserved krill (average body length, 16.4mm) were arranged at dorsal-aspect in the cage made of nylon line. As the results, the averaged dorsal-aspect TS of isada krill were -58.6dB, -62.7dB, -62.4dB and -60.9dB at 25kHz, 50kHz, 100kHz and 200kHz respectively. The TS values of the actual measurements were larger than those calculated by theoretical scattering models (the differences being 5dB to 30dB at four frequencies). It would be surmised that the differences are lead by the influence of the air bubble on the krill.

1. はじめに

ツノナシオキアミ *Euphausia pacifica* は、北太平洋の亜寒帯および移行帯水域において高い現存量を示し、魚類や鯨類の餌生物として生態系の重要な部分を担っている (TERAZAKI *et al.*, 1986)。本種は、毎年春先になると三陸沿岸に多く分布し、養殖用餌料や遊漁のまき餌用として漁獲されているが、本種の資源管理や漁況予測のためには、現存量を推定することが重要である (宮下ほか, 1995)。このような小型生物の現存量を推定する方法の一つに、計量用魚群探知機を使用した音響推定法がある。この音響推定を行うためには、対象となる生物 (ここではツノナシオキアミ) のターゲットストレングス (以降 TS) を知る必要がある。

現在までに同じオキアミ類で比較的大型のナンキョ

クオキアミ *Euphausia superba* やその他のオキアミ類の TS 測定結果に関しては、国内外で多くの報告がある (NAKAYAMA *et al.*, 1986 ; FOOTE *et al.*, 1990 ; DEMER and HEWITT, 1995 ; PAULY and PENROSE, 1995)。また、オキアミに形状が似たエビ類に関しても多くの報告がある (宮野鼻ほか, 1985 ; CHU *et al.*, 1992)。一方、ツノナシオキアミに関しては RICHTER (1985) や WEIBE *et al.* (1990), GREENLAW (1977) が報告しているのみで、測定例は限られている。そこで本実験では、制御法によるツノナシオキアミの TS 測定を行い理論散乱モデルと比較検討した。

2. 理論および方法

理論

オキアミのような小型生物の単体エコーを測定するのは一般には容易ではない。すなわち単体エコーレベルが低いため、測定においてノイズの影響が大きくなり、その結果 SN 比 (雑音に対する信号の比) が小さくなり高精度の測定が望めなくなる。したがってこのような小型生物の測定は、複数の個体を同時に測るこ

1995年2月16日受理

* 東京大学海洋研究所 Ocean Research Institute, University of Tokyo, Nakano, Tokyo 164, Japan.

** 北海道大学水産学部 Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 041, Japan.

とにより SN 比を大きくし、その値から 1 個体あたりのエコーを算出する方法が最も有効な手段の一つであると考えられる。そこで、本実験では制御法の一つであるケージ法により TS 測定を行った。また TS の算出は、向井 (1994) の方法に従った置換法により行った。以下にその方法を記す。

音源から距離 r にある n 個のターゲットからのエコーの強さ I_e はターゲットが音軸上にある場合次式で表わされる。

$$I_e = I_0 \{ \exp(-2\beta r) / r^4 \} n \sigma_{bs} \quad (1)$$

ここで、 I_0 は送波強度、 $\{ \exp(-2\beta r) / r^4 \}$ は距離 r の拡散および吸収減衰、 σ_{bs} は 1 個体のターゲットの後方散乱断面積、 n は個体数である。さらに TS が既知の較正球を用いると (1) 式は、

$$I_{ref} = I_0 \{ \exp(-2\beta r) / r^4 \} \sigma_{bs, ref} \quad (2)$$

となり、(1)、(2) 式から

$$I_e = I_{ref} (n \sigma_{bs} / \sigma_{bs, ref}) \quad (3)$$

が成り立ちターゲットの後方散乱断面積がもとまる。ここで、 I_{ref} は較正球によるエコーの強さ、 $\sigma_{bs, ref}$ は較正球の後方散乱断面積である。また (3) 式を変形しデシベル表記すると、

$$10 \log(n \sigma_{bs}) = TS_n = 10 \log(I_e / I_{ref}) + TS_{ref} \quad (4)$$

となる。ここで得た TS_n は、 n 個体全体の TS を表わしており 1 個体あたりの TS_i との間に以下の関係が成り立つ。

$$TS_i = TS_n - 10 \log n \quad (5)$$

よって、(5) 式よりターゲットであるツノナシオキアミの TS を求めることができる。

測定方法および解析方法

測定実験は、1995年7月28日～8月1日に、北海道亀田郡南茅部町、臼尻漁港内で行った。測定は、臼尻岸壁停泊中の北海道大学調査船うしお丸の左舷側に、はしけ (以降 TS バージとする) を浮かべ固定して行った (Fig. 1)。使用した TS バージの大きさは、4m×4m、浮力は 400kg 以上あり、人間が 4 人程度乗ることができる。このバージの 4 隅から、パイプで組んだ水中フレーム (3m×3m) を 5m 長のワイヤーで吊り下げた。水中フレームには水中 TV カメラを上向きに取り付け、ターゲットの様子を観察した。採用した周波

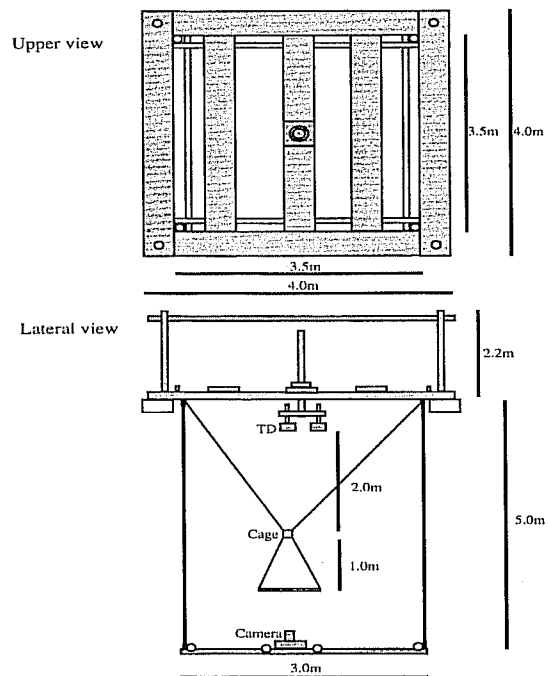


Fig. 1. Arrangement for TS measurements of isada krill.

数のうち、25kHz と 100kHz はうしお丸に装備されたシングルビーム計量魚探システム (Kaijo 製 SR-43)、50kHz はデュアルビームシステム (KODEN 製 CVS 888)、200kHz はシングルビームシステム (JRC 製 JFV-216) を使用した。なお、これらのシステムはそれぞれ独立している。トランスデューサ (以降 TD とする) もまた、それぞれ独立したものを使用した。ここで、TD は、ターゲットの真上に来るように設置しなければならないが、Fig. 1 のように同一円周上にそってそれぞれの TD を固定して円盤を回転させることにより、それを行った。

ツノナシオキアミは、三陸沖で採集したサンプル (平均体長=16.4mm, SD=1.4mm) の中から、無作為に選択して実験に使用した。使用したケージは、Fig. 2 のように、オキアミの胸部に縫針でナイロンテグスを通し、瞬間接着剤で固定したものをナイロンテグス (1号) で作成した 15cm×15cm の正方枠の横糸に結び付けたものである。ここで、オキアミの背方向が上になるようにケージを縦に置き、その上部 2 隅からテグスを取り、TD の真下にくるようにテグスを TS バージに固定した。また、ケージのバランスをとるために下部 2 隅からもテグスを取り 1m の塩化ビニ

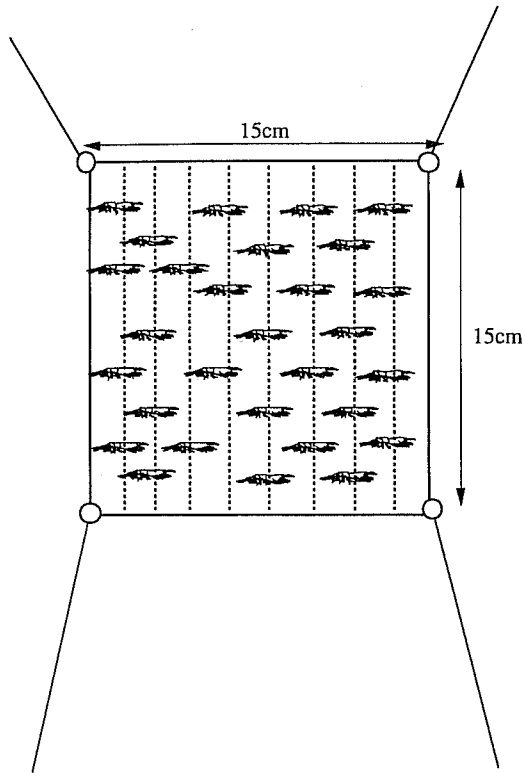


Fig. 2. Cage used for TS measurements of isada krill.

ルパイプの両端にそれをくくりつけた。以上のようなケージを個体数別に複数作成し（ケージ内個体数は $n = 20, 40, 49, 60$ の4ケース）、それらをTDの真下2mに来るようにそれぞれについて固定し、TS測定を行った。なお、以上の条件下ではいずれの場合もケージは半減角内にある。システムの較正は、古澤ほか(1995)の報告に従い、直径38.1mmのタングステンカーバイト球を用いて行った。測定した音響データはデータレコーダ（25kHzと100kHzはビデオレコーダ、SONY製、50kHzと200kHzはビデオレコーダXR-310、TEAC製）に収録し、後日解析を行った（Fig. 3）。

Fig. 3に解析装置のブロックダイヤグラムを示す。収録したアナログデータを再生し、FFTアナライザーでその波形を確認する。波形が安定した時点から1ping毎に約100pingsの音圧データを検出し、そのデータはA/Dコンバータを通してパソコンに転送しフロッピディスクに蓄積される。フロッピディスクに収録された音圧データから、1ping毎にオキアミの反射部分を抽出しその波形の2乗積分を行い、その値をサンプリング回数で平均したものをエコーの強さとし

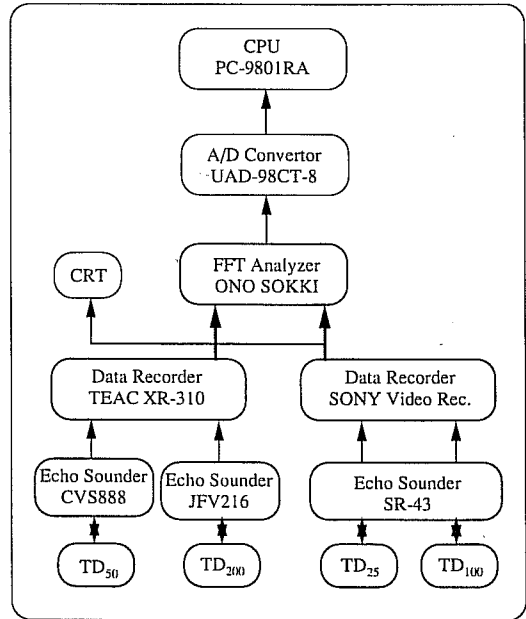


Fig. 3. Block diagram of TS measurement system.

た。較正球のエコーの強さもまた同様にして得て、置換法によりオキアミのTSを求めた。

3. 結果と考察

Table 1に解析結果を示す。ここで TS_n は、(4)式における測定個体全体を1つのターゲットとして求めたターゲットストレングスを示しており、 TS_i は、(5)式における1個体あたりのターゲットストレングスを示している。次にTable 1を基に TS_n とケージ内個体数との関係をFig. 4にプロットし、それぞれの周波数毎に直線回帰を行った。しかし有意な回帰式は得られなかった。Fig. 5は TS_i と周波数の関係を個体数別にプロットしたもので、その TS_i の範囲は25kHzで $-60.2\text{dB} \sim -55.0\text{dB}$ 、50kHzで $-68.0\text{dB} \sim -59.9\text{dB}$ 、100kHzで $-65.2\text{dB} \sim -60.2\text{dB}$ 、200kHzで $-67.8\text{dB} \sim -53.1\text{dB}$ であった。

それぞれの周波数におけるTSの平均値を求めると、25kHzで -57.4dB 、50kHzで -63.5dB 、100kHzで -61.7dB 、200kHzで -57.4dB であった。これらの値はいずれもGREENLAW (1977) が報告している周波数100kHzにおける体長23mmのツノナシオキアミの値 ($-74\text{dB} \sim -78\text{dB}$) よりも大きな値を示した。次にこれらの平均値と理論散乱モデルとの比較検討を行った。モデルはストレートシリンダーモデル (STANTON,

Table 1. Summary for TS measurements using the cage method.

Number of krill in cage n	25kHz TS_n (dB)	50kHz TS_n (dB)	100kHz TS_n (dB)	200kHz TS_n (dB)
20	-42.0	-55.0	-47.2	-40.1
40	-41.9	-48.7	-45.3	-47.0
49	-41.1	-43.0	-48.3	-40.6
60	-42.4	-48.1	-43.7	-50.0

Number of krill in cage n	25kHz TS_i (dB)	50kHz TS_i (dB)	100kHz TS_i (dB)	200kHz TS_i (dB)
20	-55.0	-68.0	-60.2	-53.1
40	-57.9	-64.8	-61.4	-63.0
49	-58.0	-59.9	-65.2	-57.5
60	-60.2	-65.9	-61.5	-67.8
Average	-57.4	-63.5	-61.7	-57.4

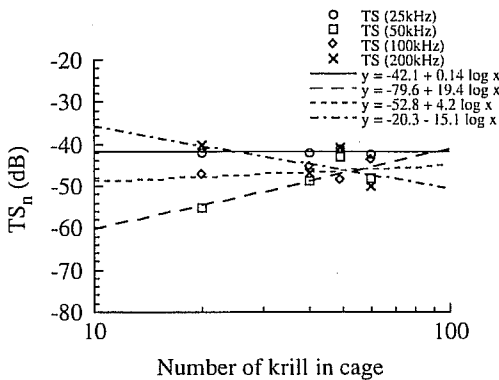


Fig. 4. Measured TS_n of isada krill by number of krill in the cage.

1988) とハイパス球モデル (JOHNSON, 1977) を使用した。ここで、等価半径 a と体長 L との関係式は GREENLAW (1977) が報告したものを使用した。Fig. 6 は実測した基準化 TS と理論散乱モデルによる波数と半径の積 (以降、無次元化周波数 ka とする) に対する基準化 TS を示している。すべてのデータで、実測値のほうが理論値よりも大きい値を示した。ここで、理論値よりも実測値が著しく大きかったことに関してはいくつかの原因が考えられる。特に 200kHz に関しては、 $n=20$ 個体の場合の TS_n が $n=40$, $n=60$ 個体の場合よりも個体数が少ないにもかかわらず極端に大きかった。これは港内での TS 測定であるためケージに何らかが一時的に付着したために起こったことも考えられるが、それを確認することはできなかった。さら

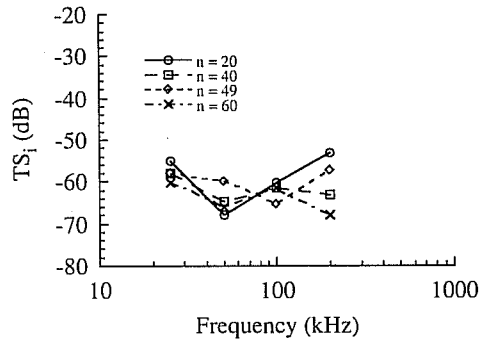


Fig. 5. Measured TS_i of isada krill at four frequencies.

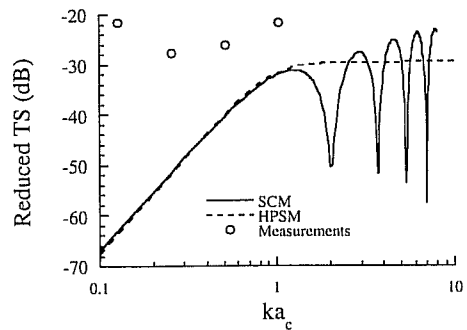


Fig. 6. Reduced TS for dorsal-aspect of isada krill calculated by theoretical scattering models. Plots are averaged measured TS of isada krill at 4 frequencies.

にストレートシリンダモデルで 200kHz は TS の極小の位置にあり TS の値の変化が大きい領域あることから広い範囲に TS の値が分散した可能性もある。

全周波数において理論値よりも実測値が著しく大きかった原因として考えられるものの一つに、理論モデルに使用する物理パラメータである散乱体と海水の密度比 g と音速比 h の決定の問題がある。ツノナシオキアミに関しては GREENLAW (1977) が、ナンキョクオキアミに関しては FOOTE (1990) がこれらの物理パラメータを測定しているが、オキアミに関する密度比 g と音速比 h の報告はそれ以外にはなく、今回理論計算に使用した GREENLAW (1977) のものが本実験においてそのまま使用できるかどうかの検証は十分に行えなかった。ただ、FOOTE (1990) と GREENLAW (1977) が報告したオキアミの密度比 g と音速比 h との間の差は小さく、2~3dB 程度であるのでこれらのパラメータだけが誤差要因であるとは考えにくい。

そこでもう一つの大きな原因の一つに考えられるのは、ターゲットに気泡が付着しているかどうかという問題がある。気泡は、密度比 g と音速比 h が、オキアミなどのターゲットと比較して非常に大きいため微小なものでもその影響は大きいと考えられる。本実験を行うにあたり、ケージ(含オキアミ)を洗剤(台所用合成洗剤)に浸けて可能な限り気泡の除去を行い、さらにケージを沈める作業を行っている間にも気泡がケージ(含オキアミ)に付着しないように十分に注意したので、ここまでの過程での気泡の付着は少ないと考えられる。しかしながら、海水中に存在する気泡が実験中に付着した可能性が残されている。そしてその結果、TSが理論値よりも大きくなったと判断できる。しかし、どの程度付着していたかもまた確認することはできなかったので厳密な補正は不可能であった。一方で FOOTE (1980) によれば、同体型の魚類は鰾の有無でその TS が 8~14dB 異なることが報告されている。すなわち、この報告は気泡の有無が TS に大きく影響することを示しており、オキアミなどの動物プランクトンに関してもその理論を当てはめ気泡の補正を行えば、理論モデルに近似すると考えられる。また、マイクロネクトンなどの鰾を持つ小型生物の理論モデルの一つに共振モデル (WESTON, 1967 ; URICK, 1985) があるが、気泡が付着したターゲットの場合にもこのモデルは使用することができる。そこで、オキアミ 1 個体に半径 0.5mm の気泡が付着していると仮定した場合の TS をこの共振モデルを用いて計算すると、25kHz で -65.5dB, 50kHz で -65.9dB, 100kHz で -66.0dB, 200kHz で -66.1dB となり、全周波数においてこの計算値と今回のオキアミの TS の実測値の差は

2.4dB~8.7dB であった。すなわち、この理論曲線は実測値に近似していることからオキアミに対する気泡の付着が示唆される。したがって、付着した気泡を除いたものが真の TS であるといえるが、気泡のサイズが不明なためその補正は難しい。以上から今後はオキアミなどの小型生物の TS を測定する場合、気泡の影響を受けない条件下で TS を測定する必要がある。例えば、実験室で制御が可能な海水無響水槽を使用して精密な実験を行うことにより実現すると考えられる。

4. 謝辞

本実験を進めるにあたりご協力下さった北海道大学水産学部調査船うしお丸船長、大越金蔵船長ならびに乗組員諸氏に深く感謝する。また、実験の補助に協力してくれた北海道大学水産学部漁業測器学講座の学生諸氏にも深く感謝する。

5. 文献

- CHU, D., T. K. STANTON and P. H. WEIBE (1992) Frequency dependence of sound backscattering from live individual zooplankton. ICES J. mar. Sci., 49, 97-106.
- DEMER, D. A. and R. P. HEWITT (1995) In situ target strength measurements of Antarctic zooplankton (*Euphausia superba* and *Salpa thompsoni*) at 120 and 200kHz, corroboration of scattering models, and a statistical technique for delineating species. ICES International Symposium on Fisheries and Plankton Acoustics, Book of Abstracts., 79.
- FOOTE, K. G. (1980) Importance of the swimbladder in acoustic scattering by swimbladdered fish. J. Acoust. Soc. Am., 67, 2084-2089.
- FOOTE, K. G., I. EVERSON, J. L. WATKINS and D. G. BONE (1990) Target strengths of Antarctic krill (*Euphausia superba*) at 38 and 120kHz. J. Acoust. Soc. Am., 87, 16-24.
- FOOTE, K. G. (1990) Speed of sound in *Euphausia superba*. J. Acoust. Soc. Am., 87, 1405-1408.
- 古澤昌彦・宮野鼻洋一・澤田浩一・高尾芳三 (1995) 計量魚群探知機の較正方法. 水産工学研究所技報 (漁船工学), 15, 9-37.
- GREENLAW, C. F. (1977) Backscattering spectra of preserved zooplankton. J. Acoust. Soc. Am., 62, 44-52.
- JOHNSON, R. K. (1977) Sound scattering from a fluid sphere revisited. J. Acoust. Soc. Am., 61, 375-377.
- 宮下和士・青木一郎・稲垣正 (1995) 音響推定におけるツノナシオキアミの遊泳姿勢に関する研究. 水産海洋研究, 59, 235-240.
- 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. 水産工学研究所技報, 漁船工学, 6,

- 111-122.
向井 徹 (1994) 魚体の超音波反射特性におよぼす鰭と姿勢の影響に関する基礎的研究. 北海道大学学位論文.
- NAKAYAMA, K., K. SHIRAKIHARA and Y. KOMAKI (1986) Target strength of krill in situ at the frequency of 200kHz. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue., **40**, 153-161.
- PAULY, T. J., and J. D. PENROSE (1995) Laboratory and field measurements of the acoustic target strength of free swimming Antarctic krill. ICES International Symposium on Fisheries and Plankton Acoustics, Book of Abstracts., 88-89.
- RICHTER, K. E. (1985) Acoustic scattering at 12 MHz from individual zooplankters and copepod populations. Deep-Sea Research, **32**, 149-161.
- STANTON, T. K. (1988) Sound scattering by cylinders of finite length. I. Fluid cylinders. J. Acoust. Soc. Am., **83**, 55-63.
- TERAZAKI, M., D. KITAGAWA and Y. YAMASHITA (1986) Occurrence of *Euphausia pacifica* HANSEN (Crustacea : Euphasiacea) with spermatophore in the vicinity of Otsuchi, northeastern Japan. Nippon Suisan Gakkaishi., **52**, 1355-1358.
- URICK, R. J. (1985) 水中音響の原理 (土屋 明訳). 共立出版, pp 414.
- WEIBE, P. H., C. H. GREENE, T. K. STANTON and J. BURCZYNSKI (1990) Sound scattering by live zooplankton and micronekton : Empirical studies with a dual-beam acoustical system. J. Acoust. Soc. Am., **88**, 2346-2360.
- WESTON, D. E. (1967) Sound propagation in the presence of bladder fish. In V. E. Albers, ed., Underwater Acoustics, **2**, 55-88.