

## 理論モデルによるオキアミのターゲットストレングス推定に必要な密度比と音速比の測定

三上尚之, 向井 徹, 飯田浩二

(1999年10月25日受付, 2000年3月2日受理)

### Measurements of Density and Sound Speed Contrasts for Estimating Krill Target Strength Using Theoretical Scattering Models

Hisayuki Mikami,\* Tohru Mukai,\* and Kohji Iida\*

In recent years, acoustic technology has been extensively used for estimating krill abundance. This acoustic assessment is required for precise estimate of target strength (TS) of a krill. However, prediction of the target strength from the theoretical scattering models is generally dependent on the swimming angle, the density and sound speed contrasts between krill and seawater. In these parameters, the density contrasts and sound speed contrasts are known to change during the year. In this study, the seasonal variations of the specific density and sound speed contrasts of *Euphausia pacifica* are presented.

The specific densities of *E. pacifica* were measured in a series of saline or glycerol solutions of different densities. The measurements of the sound speed were performed using T-shaped velocimeter with two transducers mounted at the ends of the horizontal tube.

The specific densities of *E. pacifica* changed about 1% with season. The sound speed contrasts also varied about 3% with season. These seasonal changes yielded difference about 5 dB in target strength of *E. pacifica* calculated from a straight cylinder model.

キーワード：オキアミ, 密度比, 音速比, ターゲットストレングス

近年, 計量魚群探知機を用いて動物プランクトンの資源量を推定する試みがなされている。これは単位体積当たりの反射波強度, すなわち体積後方散乱強度 (SV) を生物の平均ターゲットストレングス (TS) で除して, 単位体積当たりの個体密度を求めるものである。従って, 対象となる生物の TS を正確に知ることは重要であり, この TS 値の誤差が直接, 資源量推定の誤差となる。

現在, 動物プランクトンの TS を把握する方法として, 大きく 2 つの方法が挙げられる。

まず 1 つ目の方法としては, 動物プランクトンの反射波強度を 1 個体毎に実測する方法である。しかし動物プランクトンの場合, そのサイズの微小さに加え, 鯨のような散乱主要因がないため, エコー強度が微弱であり, 実測は容易ではない。

そこで, 盛んに利用されるもう一つの方法が音響理論散乱モデルからプランクトンの TS 推定を行うものであ

る。現在までに数多くの音響理論散乱モデルが発表されている。代表的なものとして, 対象生物の形状を球形で近似した流体球モデル,<sup>1)</sup> シリンダーに近似したストレートシリンダーモデル<sup>2)</sup> や回転楕円体に近似した回転楕円体モデル<sup>3)</sup> などがある。また最近ではストレートシリンダーモデルを変形させた変形シリンダーモデル<sup>4)</sup> や Born 近似<sup>5)</sup> などを用い, より詳細な TS 推定が行えるようになってきた。

これら音響理論散乱モデルの主なパラメータとして, プランクトンの遊泳姿勢角  $\theta$ , 周囲媒質とプランクトン体内の密度の比  $g$ , 周囲媒質の音速とプランクトン体内の音速の比  $h$  などがある。オキアミ類の場合, これらパラメータの測定例としては, ナンキョクオキアミ *Euphausia superba*,<sup>6,7)</sup> *Thysanoessa* 属や *Meganctiphanes norvegica*<sup>8,9)</sup> についてのものがある。なかでも Kogeler *et al.*<sup>9)</sup> は, 密度比  $g$  や音速比  $h$  がサイズや季節等により変化することを報告しており, 同種同体長のオキアミ類

\* 北海道大学水産学部 (Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Minato, Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan).

でも季節等により TS が異なる可能性を示唆している。

一方、日本近海に多く生息しているツノナシオキアミ *Euphausia pacifica* の場合、他のオキアミ類に比べ密度比  $g$ 、音速比  $h$  の測定例がほとんどなく、さらにサイズや季節等による変化を考慮した測定例はない。

そこで本論文は、我が国近海に分布するツノナシオキアミの密度比  $g$ 、音速比  $h$  を測定し、サイズや季節、海域による違いを調べるとともに、その違いが TS 推定にどのような影響を及ぼすか考察することを目的とした。

### 実験方法

測定に用いたツノナシオキアミの採集地点を Fig. 1 に示す。噴火湾々外部の A 地点においては 1998 年 5, 6, 7, 8, 10 月と 1999 年 5, 6, 7, 9 月に北海道大学研究調査船うしお丸 (128 t) を用いて改良型 IKMT<sup>10)</sup> の水平曳によりサンプル採集を行った。また、静内沖の B 地点では、1998 年 12 月に海洋調査船第三開洋丸 (460 t: 日本海洋(株)所属) を用いてボンゴネット<sup>11)</sup> の斜航曳による採集を行った。両地点における曳網は夜間に行ない、採集されたツノナシオキアミは生体サンプルと固定用サンプルに分けた。ここで固定用サンプルは採集後直ちに 10% の中性ホルマリンで固定した。

以後、生体サンプルの体密度は生体密度、固定サンプルのものは体密度と表す。

**体密度の測定** 採集したツノナシオキアミの体密度の測定には、Greenlaw<sup>12)</sup> にならぬ density bottle 法を採用した。これは、溶液の密度を約 0.002 g/cm<sup>3</sup> 間隔にした複数のボトルを用意し、このボトルにツノナシオキアミのサンプルを密度の小さいボトルから順に駒込ピペットで投入する方法である。投入後サンプルが沈んだ最大密

度のボトルと、サンプルが浮いた最小密度のボトルの密度の中間値をサンプルの体密度とした。ここで各ボトルの密度の確認には、硝子製浮秤比重計 (Shibata, No. 6, No. 7) を用いた。なお体密度測定に用いたボトルの溶液は、1998 年の噴火湾で採集したサンプルについては NaCl 水溶液<sup>13)</sup> を用い、1999 年の噴火湾および静内沖のサンプルは海水とグリセロールの混合溶液<sup>12)</sup> とした。

以上の測定を生体サンプルとホルマリン固定したサンプルに対して行った。生体密度の測定は、1998 年 10 月以降に噴火湾で採集されたサンプル、および静内沖のサンプルについて行った。これらの生体密度測定は、採集後 48 時間以内にトリカインによる麻酔をした後行った。なお、採集後から測定までの間、サンプルには餌を与えなかった。また体密度測定は、噴火湾において 1998 年 10 月以前に採集されたサンプルについて、固定後それぞれ 4 ヶ月目に行った。

これらの測定に用いた各サンプルは、額角先端から尾節後端までの体長を測定した。

**体内音速の測定** 音速測定は 1999 年に噴火湾で採集されたツノナシオキアミについて Time of flight 法<sup>7-9,12)</sup> で行った。これは、一定距離を超音波が伝搬する時間を計測する方法であり、生物体内の音速を次のようにして求めることができる。

まず、超音波が海水とオキアミの混合溶液を通過する時間を  $T_{total}$ 、海水のみで同じ距離を伝搬する時間を  $T_{sw}$  とし、オキアミ体内を伝搬する時間を  $T_{animal}$  とすると、これらの関係は次式で表される。

$$T_{total} = (1 - V) \cdot T_{sw} + V \cdot T_{animal} \quad (1)$$

ここで  $V$  は混合溶液中におけるオキアミの体積比である。式(1)の  $T_{total}$ 、 $T_{sw}$ 、 $V$  を測定すれば  $T_{animal}$  を求めることができる。また、音速  $C_{sw}$  の海水におけるオキアミ体内の音速を  $C_{animal}$  とすると、これらの関係は以下の式で表される。

$$\frac{C_{animal}}{C_{sw}} = \frac{T_{sw}}{T_{animal}} \quad (2)$$

従って式(1)、(2)からオキアミ体内の音速  $C_{animal}$  を導くことができる。

この方法による音速測定を T チューブ<sup>7-9,12)</sup> を用いて行った。実験装置を Fig. 2 に示す。T チューブの両端には振動子が設置されており、一方の振動子から周波数 400 kHz、パルス幅 5  $\mu$ s の超音波パルスを発射し、反対側の振動子に到達するまでの伝搬時間を水平軸分解能 10 ビットのデジタルオシロスコープ (Kikusui Com7101A) で測定した。一般にオシロスコープの時間軸の精度は良くないと言われているが、本測定では時間軸レンジを 5 M サンプル/s として受波信号を確認した後、ディレイ機能を用いて更に時間軸レンジが 50 M

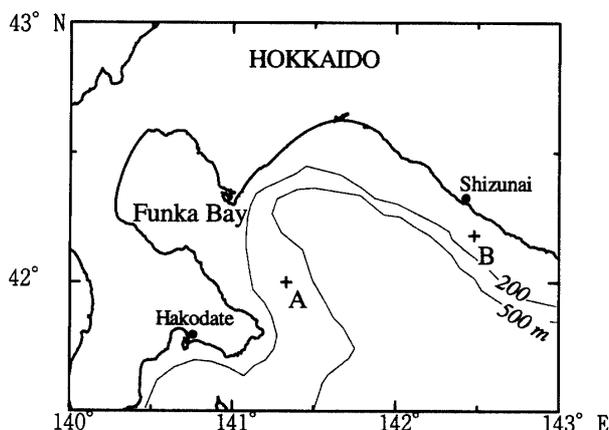
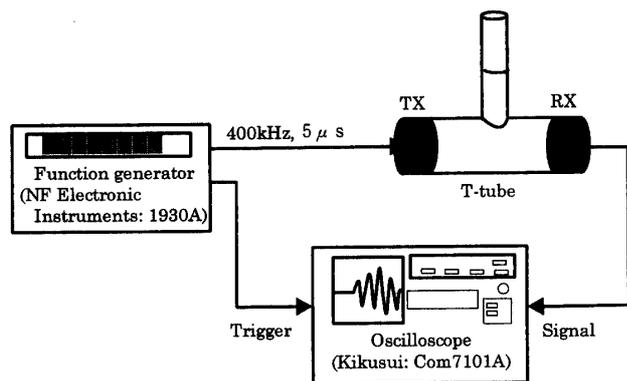


Fig. 1. Sampling sites of krill (*Euphausia pacifica*).

A: Funka Bay, May-Oct., 1998, May-Sep., 1999. B: Off Shizunai, Dec., 1998. Net Samplings were performed at night-time.



**Fig. 2.** Instrumentation for sound speed measurement of live krill.

The acoustic pulse of 400 kHz, 5  $\mu$ s was used for the measurement. The T-tube was frequently shaken during the measurement so that the krill would distribute uniformly.

サンプル/sになるまで受波信号部を拡大し、受波の伝搬時間を測定した。また測定中オシロスコープの設定を変えることはなかった。従って、混合溶液中と海水中の伝搬時間の比を求める本測定において測定精度に大きな問題はない。

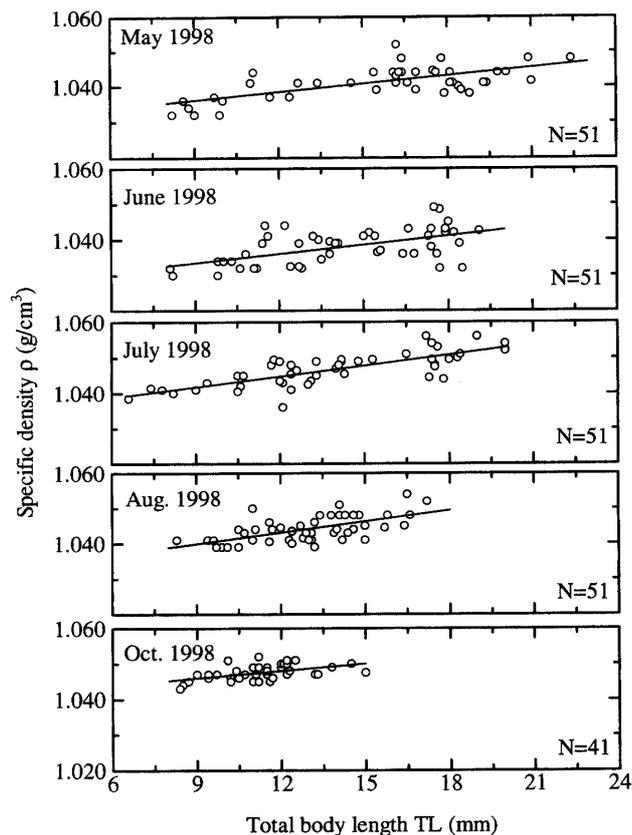
これを、まず海水のみで行い、次に海水とオキアミの混合溶液で行った。このとき可能な限り多くのオキアミを入れ、なるべく均一に分布するようにチューブを攪拌した。これらの測定をチューブ内の水温が変化するときに行ない、最後にチューブ内におけるオキアミの体積を排水法により測定した。また海水の音速  $C_{sw}$  は Mackenzie<sup>14)</sup>の式より求め、それを式(2)に代入することによりツノナシオキアミの音速  $C_{animal}$  を算出した。

## 結 果

**体密度測定** ホルマリンで固定したツノナシオキアミの体密度と体長の関係を各月ごとに Fig. 3 に示す。上から順に 1998 年 5, 6, 7, 8, 10 月であり、いずれの図も横軸は体長  $TL$ (mm)、縦軸は体密度 ( $g/cm^3$ ) である。図中には各々の回帰直線、およびサンプル数  $N$  も示した。また各月における測定個体の体長範囲、平均体長、体密度範囲、平均体密度、および Fig. 3 における回帰式とその決定係数  $R^2$  を Table 1 に示す。

図を見ると、固定されたツノナシオキアミの体密度は体長の増加に伴い大きくなる傾向が見られた。

**生体密度測定** 次に 1998 年 10 月以降に噴火湾で採集された生きているツノナシオキアミの生体密度と体長の関係を Fig. 4 に、また 1998 年 12 月の静内沖のものを Fig. 5 に示す。いずれの図も横軸は体長  $TL$ (mm)、縦軸は生体密度 ( $g/cm^3$ ) であり、各々の回帰直線とサ



**Fig. 3.** The relationship between the specific density and total body length of krill preserved by formalin.

Measurements were performed at four months after net sampling.

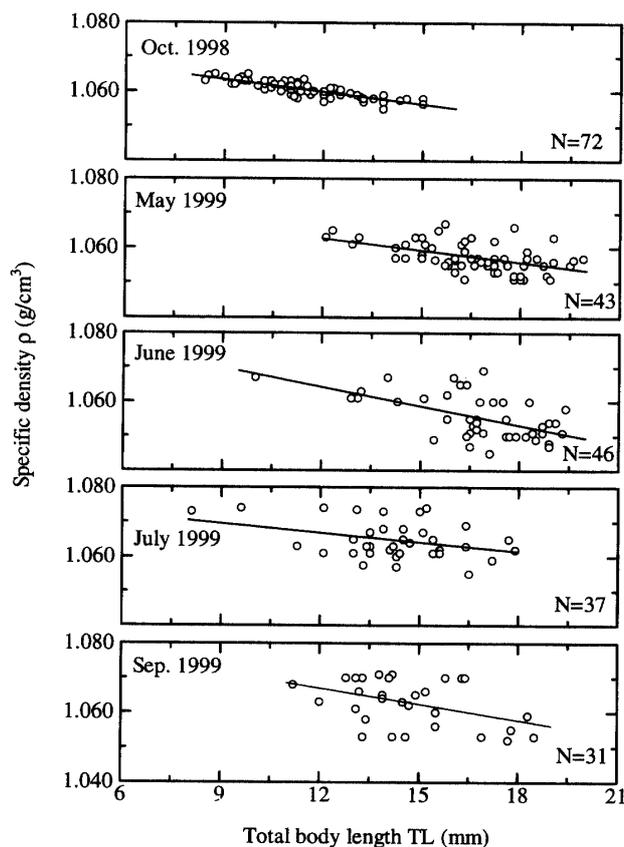
ンプル数  $N$  も示した。また、Fig. 4 は上から順に 1998 年 10 月、1999 年 5, 6, 7, 9 月の結果である。これらの測定個体の体長範囲、平均体長、生体密度範囲、平均生体密度、および回帰式とその決定係数  $R^2$  を Table 2 に示す。

Fig. 4 をみると噴火湾におけるツノナシオキアミの生体密度は、いずれの月も体長の増加に伴って減少する傾向が見られ、Fig. 5 の静内沖のサンプルについても同様の傾向が見られた。

**体内音速測定** 測定された音速比の結果を各月、各水温ごとに Table 3 に示す。表には測定時の水温と、海水音速に対するツノナシオキアミの音速比、および T チューブ内におけるサンプルの体積比  $V$ (%)を示した。次に、これら各月毎の平均音速比とその標準偏差、測定時の塩分、および測定に用いたサンプルの平均体長、標準偏差、体長範囲を Table 4 に示す。Table 4 を見ると計測された平均音速比は各々の月で異なっていたが、特に 9 月の音速比は他の月に比べ 3% 程度減少していた。

**Table 1.** Total body length  $TL$ , specific density  $\rho$ , and linear regression of preserved *E. pacifica*

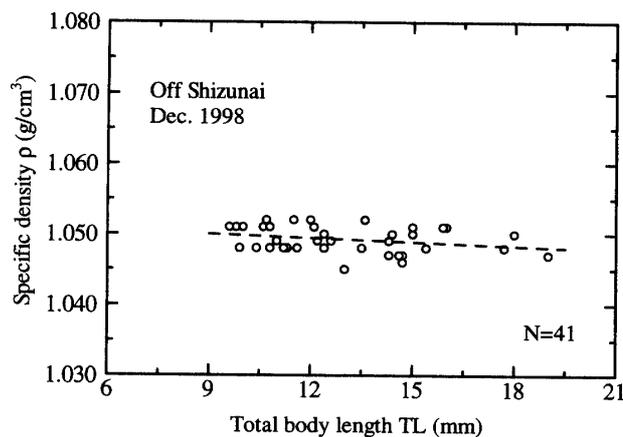
	Total body length $TL$ (mm)		Specific density $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )		$\rho = a \cdot 10^{-3} TL + b$		
	Range	Average	Range	Average	$a$	$b$	$R^2$
May 1998	8.2–22.4	15.2	1.032–1.052	1.041	0.8	1.029	0.468
June 1998	8.1–19.1	14.1	1.030–1.049	1.038	0.8	1.027	0.277
July 1998	6.6–20.0	14.0	1.036–1.056	1.047	1.0	1.033	0.619
Aug. 1998	8.3–17.2	13.4	1.039–1.054	1.044	1.0	1.031	0.371
Oct. 1998	8.4–15.0	11.8	1.043–1.052	1.048	0.7	1.040	0.232

**Fig. 4.** The relationship between the specific density and total body length of live krill collected in Funka Bay.

Measurements were performed within 48 hours after net sampling.

### 考 察

**体長による体密度の変化** Fig. 3 の固定したツノナシオキアミの体密度測定結果は、Fig. 4, 5 の生きているサンプルの測定結果と異なり、体密度が体長と共に増加する傾向を示した。この傾向に関して Kils<sup>15</sup> は窒素固定した *M. norvegica* において同様の傾向が見られたことを報告している。この原因として、固定した生物と生体では、脂質含有量（湿重量もしくは乾重量に対する脂

**Fig. 5.** The relationship between the specific density and total body length of live krill collected in Off Shizunai.

Measurements were performed within 48 hours after net sampling.

質の割合、%) が異なることや、サンプルの破損による影響などが挙げられる。また、本測定ではサンプル固定に中性ホルマリンを用いたが、このホルマリンによる影響も大きいと思われる。Richter<sup>16</sup> はホルマリン固定した動物プランクトンの重量や体積は、生きている時よりも 40% 程度減少することを指摘しており、また Greenlaw<sup>12</sup> はツノナシオキアミの体密度がホルマリン固定することにより 2% 程度減少することを報告している。以上のことから、固定したサンプルの体密度測定結果から正確な生体密度を把握することは困難であると考えられる。

次に、Fig. 4, 5 において生きているツノナシオキアミの生体密度は、体長の増加に反して減少する傾向を示したが、Kogeler *et al.*<sup>9</sup> は、*Thysanoessa* 属や *M. norvegica* を対象とした測定において同様の傾向が見られたことを報告している。そこで Fig. 6 において本実験で得られた結果と過去の測定例の比較を行った。この図において横軸は体長、縦軸は生体密度である。図は 1998 年 10 月と 1999 年 7 月の噴火湾および静内沖における

**Table 2.** Total body length  $TL$ , specific density  $\rho$ , and linear regression of fresh *E. pacifica*

	Total body length $TL$ (mm)		Specific density $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )		$\rho = a \cdot 10^{-3} TL + b$		
	Range	Average	Range	Average	$a$	$b$	$R^2$
Funka Bay							
Oct. 1998	8.4-15.0	11.4	1.055-1.065	1.061	-1.2	1.074	0.675
May 1999	12.1-19.9	16.2	1.051-1.067	1.059	-1.2	1.078	0.369
June 1999	10.0-19.4	16.7	1.045-1.069	1.056	-1.8	1.086	0.337
July 1999	8.1-17.9	14.3	1.055-1.074	1.065	-0.9	1.078	0.126
Sep. 1999	11.2-18.5	14.8	1.052-1.071	1.063	-1.5	1.085	0.177
Off Shizunai							
Dec. 1998	9.6-19.0	13.0	1.045-1.052	1.049	-0.2	1.052	0.078

**Table 3.** Sound speed contrasts of *E. pacifica* to surrounding sea water in various temperature

temp (°C)	sound speed contrasts $h$					
	May $V=26\%$	June $V=45\%$ $V=26\%$		July $V=23\%$	Sep. $V=43\%$ $V=30\%$	
8.0		1.043				
9.0		1.041	1.044			
9.5		1.039	1.041			
10.0		1.038	1.037			
10.5		1.037	1.032			
11.0		1.036	1.035			
11.5	1.039	1.034	1.038			
12.0	1.039	1.035	1.034			
12.5	1.042	1.033	1.031			
13.0	1.043	1.030	1.028			
13.5	1.044	1.029	1.025			
14.0	1.044	1.032	1.030			
14.5	1.045	1.029	1.031			
15.0	1.047	1.027	1.028			
15.5	1.044	1.029				
16.0	1.044	1.030			1.010	
16.5					1.011	1.010
17.0						1.011
17.5						
18.0				1.054		
18.5				1.056		
19.0				1.043		
19.5				1.042		
20.0				1.036		

$V$  shows volume fraction of krill (%)

ツノナシオキアミの回帰直線に加えて, Kogeler *et al.*<sup>9)</sup> が報告した *Thysanoessa* 属, *M. norvegica* の測定結果を示したものである。また Foote<sup>7)</sup> が算出した体長 31 mm のナンキョクオキアミの値も示した。図中実線はツ

ノナシオキアミ, 点線は *Thysanoessa* 属, 破線は *M. norvegica* の回帰直線であり, 黒丸はナンキョクオキアミのものである。この図からオキアミ類のいずれの種も回帰直線の傾きは多少異なるものの, 体長増加に反して

**Table 4.** Total body length and averaged sound speed contrasts of *E. pacifica*

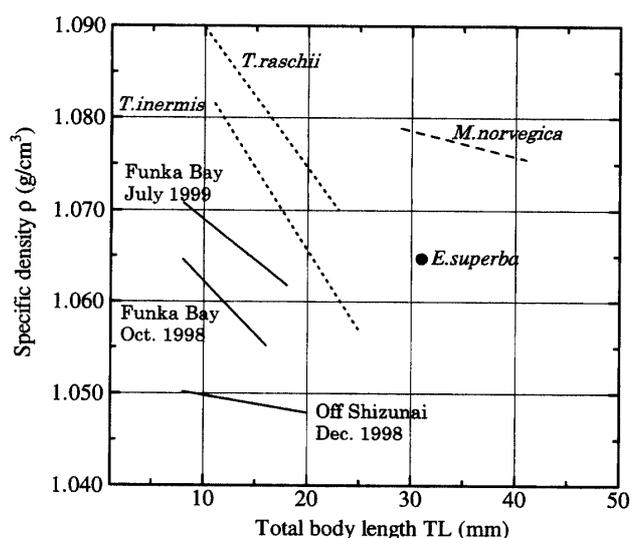
Funka Bay 1999	Number of specimens <i>N</i>	Total body length (mm)			Salinity (PSU)	Sound speed contrast	
		Average	SD	Range		Average	SD
5 May	1728	16.0	2.8	8.3–24.2	32.1	1.043	0.0029
10 June	3056	14.6	3.1	6.6–22.0	32.7	1.034	0.0049
22 July	1440	15.5	2.2	7.0–20.5	33.2	1.046	0.0076
2 Sep.	4608	11.8	1.6	7.0–15.7	33.4	1.011	0.0005

*N* shows total number of measured specimens

生体密度が減少する傾向が顕著に見られる。この傾向に関して *Thysanoessa* 属や *M. norvegica* の場合、脂質含有量が寄与していると言われている。Falk-Peterson<sup>17)</sup> は *T. inermis*, *T. raschii*, *M. norvegica* の3種について脂質含有量を測定しているが、その結果3種とも体長の増大にともなう脂質含有量の増加が見られた。従って体長が大きい程比重の小さい脂肪を多量に含むことから、上記3種は体長の増加にともない生体密度が減少するものと考えられる。また、ツノナシオキアミも体長が大きいほど脂質含有量が多い<sup>18)</sup> といわれており、各月ごとの体長による生体密度変化は脂質含有量による影響と考えられる。

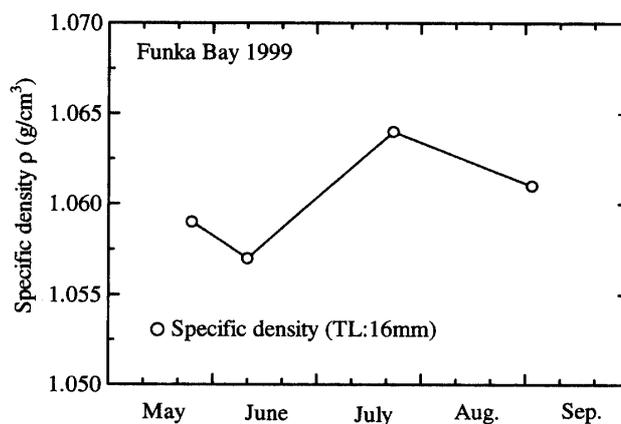
**種、海域による生体密度の違い** Fig. 6 において同体長でも *Thysanoessa* 属の方がツノナシオキアミよりも生体密度は大きく、特に体長 10 mm の静内沖のツノナシオキアミと *T. raschii* では生体密度が約 0.04 g/cm<sup>3</sup>、密度比 *g* に換算した場合 4% 程度異なっていた。さらに同体長のツノナシオキアミでも噴火湾の方が静内沖より 0.6~1.7% 程度、生体密度が大きいことがわかった。このことからオキアミ類の生体密度は種、海域により異なることがわかったが、その中でも種による生体密度の違いは大きいと思われる。そこで音響調査を行うにあたっては、対象となる種の密度比を適確に把握する必要があるだろう。

**季節による生体密度の変化** 海域、種、測定手法が同じである 1999 年噴火湾において各月毎に算出された回帰式をもとに、体長 16 mm のツノナシオキアミの生体密度を推定し、その季節的変動を検討した。その結果を Fig. 7 に示す。図の横軸は月、縦軸は生体密度 (g/cm<sup>3</sup>)、である。図を見ると同体長のツノナシオキアミでも、その生体密度は春季から夏季にかけて約 1% 増加している傾向が見られる。このように同種同海域でも春季に生体密度が減少した要因として、産卵期における脂質含有量の増加が考えられる。日本海産のツノナシオキアミの脂質含有量は春季の方が秋季より多く、この違いは春季のツノナシオキアミが産卵に備え脂質の蓄積を行っているためといわれている。<sup>18)</sup> 噴火湾でも例年春季に産卵が



**Fig. 6.** Comparison of specific density for five different krill species.

Regression lines of *T. inermis*, *T. raschii*, and *M. norvegica* were calculated by Kögeler *et al.*,<sup>9)</sup> and the data of *E. superba* was cited from Foote.<sup>7)</sup>



**Fig. 7.** Seasonal variations of specific density for live krill of 16 mm in total body length.

行われることから、生体密度の変動は産卵期の脂質含有量増加によるものと考えられる。従って音響を用いた資源量調査を行う場合、産卵時期の密度比は他の時期と異

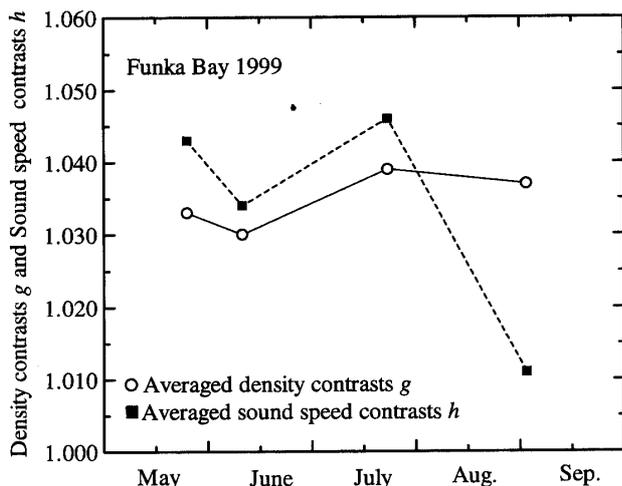


Fig. 8. Seasonal variations of averaged sound speed contrasts and averaged density contrasts of live krill collected in Funka Bay.

Averaged density contrasts were calculated by the density of the ambient seawater.

なるので注意が必要である。

**体内音速** 噴火湾におけるツノナシオキアミと海水の音速比の季節変動を調べた。その結果を Fig. 8 に示す。図には平均音速比とともに、Table 2 に示した平均生体密度をサンプル採集時の海水の密度で除した平均密度比も示した。図の横軸は月、縦軸は音速比または密度比である。図をみると平均音速比は平均密度比と同じような増減の傾向をみせている。しかしながら7月から9月にかけて平均音速比は、平均密度比よりも激しく減少する傾向を見せ、その減少率は約3%であった。このことに関して、音速比は密度比同様に脂質含有量の影響を受けているのか、もしくは何らかの変動要素があるのかは更なる検討が必要である。

T チューブを用いた測定法においては、チューブ内におけるサンプルの均一な分布とチューブ内の体積比  $V$  の正確な把握が重要である。<sup>7-9)</sup> さらに音速の測定精度の向上のためには、体積比を変えて測定することが必要である。これに関して Foote<sup>7)</sup> は体積比を 29~40%、Kogeler *et al.*<sup>9)</sup> は最大 65% まで変化させ実験を行っている。本測定において体積比は 26~45% であるものの、多くても月に 2 種類の体積比でしか音速測定は行っておらず、今後その考慮が必要であろう。また Ye and McClatchie<sup>19)</sup> は、波長や対象生物の密度比などを考慮し、より正確に音速比を推定する方法を提示している。今後は、この理論に基づいた検討も行う必要があるだろう。

密度比  $g$ 、音速比  $h$  の違いが TS 推定におよぼす影響過去に発表された多くの論文ではツノナシオキアミの密

度比、音速比として Greenlaw<sup>12)</sup> による値が用いられている。<sup>8,20)</sup> そこで、Greenlaw による値と本研究で得られた値を用いて音響理論散乱モデルから TS を推定し、それらの比較を行った。

今回採用した音響理論散乱モデルは 1988 年に Stanton<sup>2)</sup> が発表したストレートシリンダーモデルである。これはプランクトンを円柱形とみなしたもので、その後方散乱断面積  $\sigma_{bs}$  は次式で示される。

$$\sigma_{bs} = \left( \frac{L}{\pi} \right)^2 \left\{ \frac{\sin(kL \sin \theta)}{kL \sin \theta} \right\}^2 \left| \sum_{m=0}^{\infty} b_m (-1)^m \right|^2 \quad (4)$$

ここで  $L$  は体長、 $k$  は波数、 $\theta$  は遊泳姿勢角であり、 $b_m$  は次式で示される。

$$b_m = -\frac{\varepsilon_m}{1 + iC_m} \quad (5)$$

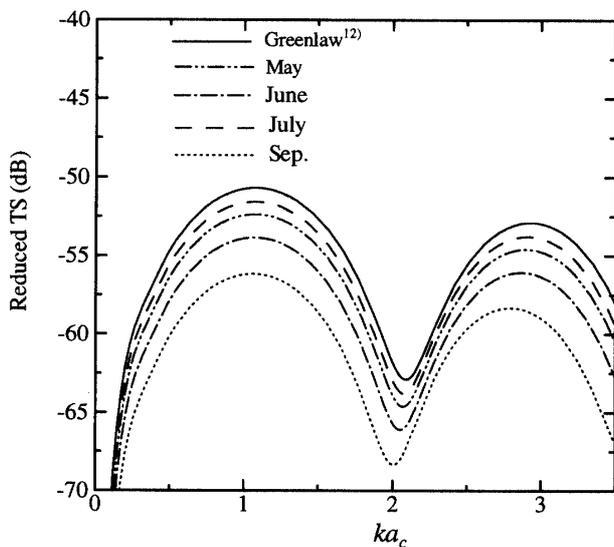
$\varepsilon_m$  はノイマン関数で、 $m=0$  のとき  $\varepsilon_m=1$ 、 $m>0$  のとき  $\varepsilon_m=2$  である。また、 $C_m$  は次式で示される。

$$C_m \equiv \frac{\frac{[J'_m(K^*a_c)N_m(Ka_c)]/[J_m(K^*a_c)J'_m(Ka_c)]}{-gh[N'_m(Ka_c)/J'_m(Ka_c)]}}{[J'_m(K^*a_c)J_m(Ka_c)]/[J_m(K^*a_c)J'_m(Ka_c)] - gh} \quad (6)$$

ここで  $g$  は  $\rho^*/\rho$ 、 $h$  は  $c^*/c$ 、 $K$  は  $k \cos \theta$ 、 $K^*$  は  $k^* \cos \theta$  であり、 $\rho$  は海水の密度、 $c$  は海水中の音速、 $\rho^*$  は生物の密度、 $c^*$  は生物体内での音速、 $k^*$  は生物体内での波数である。また、 $J$  は第 1 種ベッセル関数、 $N$  は第 2 種ベッセル関数、 $a_c$  はシリンダー半径である。今回の TS 推定に用いた密度比  $g$ 、音速比  $h$ 、および平均遊泳姿勢角  $\theta$  とその標準偏差を Table 5 に示す。ここで各月の平均密度比は Fig. 8 と同様に平均生体密度をサンプル採集時の海水の密度で除したものである。また、いずれの場合も遊泳姿勢角は Miyashita *et al.*<sup>20)</sup> に従った。以上のパラメータを用いてモデルから推定した TS を Fig. 9 に示す。この図において縦軸は体長で規準化した TS であり、横軸は無次元化周波数  $ka_c$  である。この図から全  $ka_c$  領域において、各パラメータを用いて算出された 5 つの TS 曲線は、各々が明確に異なっているのがわかる。TS が最も大きく算出されるのは Greenlaw の値を用いた場合であり、逆に最も TS が小さく算出されるのは噴火湾 9 月のパラメータを用いた場合であった。両者間で TS は最大約 6 dB 異なっており、また同じ噴火湾でも月によっては最大約 5 dB 変化することがわかった。音響資源量調査において、TS における 3 dB の差は、推定される資源量に 2 倍もしくは 2 分の 1 の過大過小評価を生む<sup>21)</sup> ことから、この TS の差による影響が大きいことは明確である。このことからツノナシオキアミの資源量を音響的に推定する場合、同じ海域であっても調査時期に応じて、その密度比、音速比を考慮する

**Table 5.** Physical parameters used in calculating TS by the theoretical model

	density contrast $g$	sound speed contrast $h$	swimming angle $\theta_{deg}^{20}$	
			Average	SD
Greenlaw <sup>12)</sup>	1.043	1.052	36.9	12.9
May 1999	1.033	1.043	36.9	12.9
June 1999	1.030	1.034	36.9	12.9
July 1999	1.039	1.046	36.9	12.9
Sep. 1999	1.037	1.011	36.9	12.9

**Fig. 9.** Change in reduced TS normalized by total body length (m) calculated in relation to the difference of  $g$  and  $h$ .

Reduced TSs were calculated by Stanton's straight cylinder model. The parameters shown in Table 5 were used for calculation.

必要があるだろう。

### 謝 辞

本研究を進めるにあたりご協力、御助言いただいた東京大学海洋研究所 町田龍二氏に感謝申し上げます。また、試料の採集に際し、労を願った北海道大学調査船うしお丸、日本海洋株式会社海洋調査船第三開洋丸の乗組員諸氏に感謝いたします。

### 文 献

- 1) V. C. Anderson: Sound scattering from a fluid sphere. *J. Acoust. Soc. Am.*, **22**, 426-431 (1950).
- 2) T. K. Stanton: Sound scattering by cylinders of finite

- length. I. Fluid cylinders. *J. Acoust. Soc. Am.*, **83**, 55-63 (1988).
- 3) M. Furusawa, Y. Miyanoana, M. Arijji, and Y. Sawada: Prediction of krill target strength by liquid prolate spheroid model. *Fisheries Sci.*, **60**, 261-265 (1994).
- 4) Z. Ye and M. Furusawa: Modeling of target strength of swimbladder fish at high frequencies. *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, **16**, 371-379 (1995).
- 5) D. Chu, K. G. Foote, and T. K. Stanton: Further analysis of target strength measurements of Antarctic krill at 38 kHz and 120 kHz: Comparison with deformed cylinder model and inference of orientation distribution. *J. Acoust. Soc. Am.*, **93**, 2985-2988 (1993).
- 6) Y. Endo: Orientation of Antarctic krill in an aquarium. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **59**, 465-468 (1993).
- 7) K. G. Foote: Speed of sound in *Euphausia superba*. *J. Acoust. Soc. Am.*, **87**, 1405-1408 (1990).
- 8) Å. Kristensen and J. Dalen: Acoustic estimation of size distribution and abundance of zooplankton. *J. Acoust. Soc. Am.*, **80**, 601-611 (1986).
- 9) J. W. Kögeler, S. Falk-Petersen, Å. Kristensen, F. Pettersen, and J. Dalen: Density- and sound speed contrasts in sub-arctic zooplankton. *Polar Biol.*, **7**, 231-235 (1987).
- 10) K. Iida, T. Mukai, and D. J. Hwang: Relationship between acoustic backscattering strength and density of zooplankton in the sound-scattering layer. *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 507-512 (1996).
- 11) K. Sherman and K. A. Honey: Size selectivity of the gulf III and bongo zooplankton samplers. *ICNAF Res. Bull.*, **8**, 45-48 (1971).
- 12) C. F. Greenlaw: Backscattering spectra of preserved zooplankton. *J. Acoust. Soc. Am.*, **62**, 44-52 (1977).
- 13) C. Kitajima, Y. Yamane, S. Matsui, Y. Kihara, and M. Furuichi: Ontogenetic change in buoyancy in the early stage of red sea bream *Pagurus major*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **59**, 209-216 (1993).
- 14) K. V. Mackenzie: Nine-term equation for sound speed in the oceans. *J. Acoust. Soc. Am.*, **70**, 807-812 (1981).
- 15) U. Kils: Preliminary data on volume, density and cross section area of Antarctic krill, *Euphausia superba*. *Meeresforsch.*, **27**, 207-209 (1979).
- 16) K. E. Richter: Acoustic scattering at 1.2 MHz from individual zooplankters and copepod populations. *Deep-Sea Research*, **32**, 149-161 (1985).
- 17) S. Falk-Petersen: Ecological investigations on the zooplankton community of Balsfjorden, northern Norway: seasonal changes in body weight and the main biochemical composition of *Thysanoessa inermis* (Krøyer), *T. raschii* (M.sars), and *Meganycitiphanes norvegica* (M.sars) in relation to environmental factors. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **49**, 103-120 (1981).
- 18) 鹿山 光, 池田康行, 小牧勇藏: 海産動物プランクトンの脂質, とくに甲殻類におけるワックス・エステル分布と *In Vivo* 生合成について. *油化学*, **25**, 329-334 (1976).
- 19) Z. Ye and S. McClatchie: On inferring speed in aquatic organisms. *J. Acoust. Soc. Am.*, **103**, 1667-1670 (1998).
- 20) K. Miyashita, I. Aoki, and T. Inagaki: Swimming behaviour and target strength of isada krill (*Euphausia pacifica*). *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 303-308 (1996).
- 21) 飯田浩二: 魚のターゲットストレングス研究の現状と展望. *海洋音響学会誌*, **15**, 207-218 (1988).