



Title	計量魚探を用いた渡島半島東部における音響散乱層の生物密度の推定について
Author(s)	滝口, 直之; TAKIGUCHI, Naoyuki; 鈴木, 恒由 他
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 39(2), 115-123
Issue Date	1988-05
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/23994">https://hdl.handle.net/2115/23994</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	39(2)_P115-123.pdf



計量魚探を用いた渡島半島東部における音響散乱層の  
生物密度の推定について

滝口直之\*・鈴木恒由\*  
佐野典達\*・飯田浩二\*

Acoustic Estimation of Zooplankton Density of Acoustic  
Scattering Layer off the East Coast  
of Oshima Peninsula

Naoyuki TAKIGUCHI\*, Tsuneyoshi SUZUKI\*, Noritatsu SANO\*  
and Kohji IDA\*

Abstract

Acoustic sampling is a useful technique for gathering biomass data from all depths and over wide areas. In addition, acoustic surveys may also help us to estimate ocean productivity.

This paper describes the relationships between biological density of zooplankton and acoustic volume back scattering strength ( $S_v$ ). The surveys were carried out during the R/V "Ushio-maru" cruises in 1987 at 42°00'N 141°20'E off the east coast of Oshima peninsula. The volume back scattering strength measurements of the acoustic scattering layer (SL) were conducted at two frequencies, 28.5 kHz and 96.2 kHz with an echo integrator. The biological sampling survey by the modified IKMT (Isaacs-Kidd Midwater Trawl net) suggests that euphausiids are the major zooplankton species of the SL in July and August.

As a result of the surveys, the following regression relationships between zooplankton density  $\rho$  (mg/m<sup>3</sup>) and volume back scattering strength  $S_v$  (dB) were obtained;

$$28.5 \text{ kHz: } S_v(\text{dB}) = 9.31 \log \rho - 81.1$$

$$96.2 \text{ kHz: } S_v(\text{dB}) = 5.01 \log \rho - 67.6$$

The trend of the regression equation at 28.5 kHz was similar to the theoretical equation,  $S_v(\text{dB}) = 10 \log \rho + B$ .

The July  $S_v$  value of 96.2 kHz was higher by about 4.7 dB than the 28.5 kHz value. This phenomenon was examined by the empirical scattering model of Kristensen (1986).

結 言

海洋における音響散乱層 SL (Acoustic Scattering Layer) は魚群探知機によって層状のエコーとなって記録され、世界中の海域で観測されている。北海道渡島半島東部の水深 300 m-400 m の海域においても動物性プランクトンによって構成される SL が観測される。また SL は昼夜間の出現深度に顕著な日周運動をすることが知られており、本海域においても昼間には水深 150 m-200 m に SL が観測され、それが夜間には水深 20 m~30 m まで上昇する。さらに日没時にみられ

\* 北海道大学水産学部漁業測器学講座  
(Laboratory of Instrument Engineering for Fishing, Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

る垂直移動の速度は毎分 3 m に達することが報告されている<sup>1)</sup>。

また SL 内部及びその周辺には SL の構成生物であるオキアミ類などを捕食するスケソウダラ等の稚魚、未成熟魚の存在も確認されており、SL の生物密度、分布の規模を知ることは、それらを捕食対象とするその海域における生物の生産力の把握の基礎資料となる。

魚群探知機を用いた音響学的推定法の利点は、生物量あるいは生物の密度などの情報を瞬時に、そして時空間的に連続観測ができることである。さらに、魚群から反射されるエコーには魚種、体長、密度など多くの情報が含まれている。本研究は二周波の計量魚探を用いて SL の音響反射率である体積後方散乱強度 ( $S_v$ ) を測定し、プランクトンネットによる生物採集も同時に行って、両者の関係を考察した。

### 調査海域

調査は 1987 年 4, 6, 7, 8 月に北緯 42 度 00 分、東経 141 度 20 分、水深約 300 m の海域において北海道大学調査船うしお丸 (107 トン) を用いて行った (図 1)。

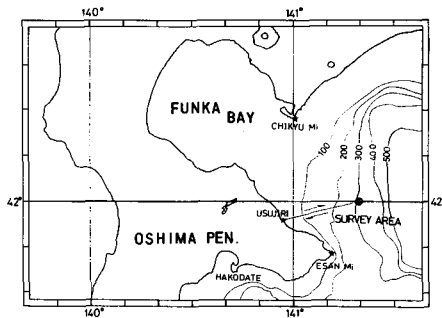


Fig. 1. Map showing the area surveyed during the study (42°00'N, 141°20'E).

本海域の海洋構造の特徴は低温低塩分の親潮系水と高温高塩分の津軽暖流水とが年間を通じて周期的に交替することである。すなわち冬季、春季には表層に流水の融氷水もしくは融雪による陸水を多く含む親潮系水がこの海域に流入し大部分を占める。初夏には津軽暖流水が分布範囲を広げ始め、秋季にはそれまで滞在していた親潮系水と交替する<sup>2)</sup>。

観測は SL の垂直移動が始まる日没約 1 時間前から日没後約 4 時間程の間に行った。この間、調査船設備の計量魚探 (海上電機製 KFC-200, 周波数 28.5 kHz, 96.2 kHz, パルス幅 1 msec) を使用し、エコーインテグレートタの出力から SL の音響体積後方散乱強度 ( $S_v$ ) を測定した。さらにこれと平行して IKMT ネットによる水平曳を繰り返し、その採集量から SL の生物密度を求め  $S_v$  値との関係を求めた。

### 音響体積後方散乱強度 ( $S_v$ ) の測定

SL のように散乱体が高密度に分布する場合、散乱体群からのエコーは、パルス殻体積中の個々の散乱体からのエコーの総和として得られる (図 2)。SL を構成する散乱体がランダムでかつ広範囲に分布しているものとする、音源から距離  $r$  にある散乱体群からのエコー強度  $I_e$  は次式で表される<sup>3)</sup>。

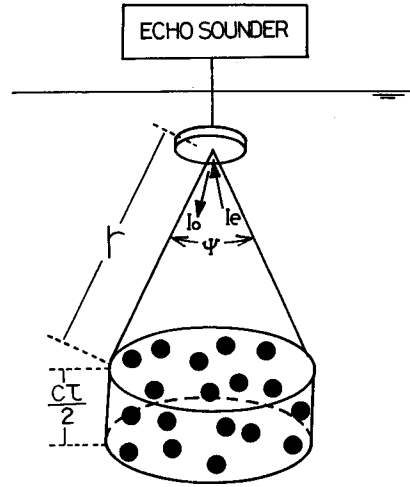


Fig. 2. Reflection of an echo sounder pulse by a multiple target.

$$I_e = I_o \cdot \frac{\exp(-2\beta r)}{r^4} \cdot v \cdot n \langle \sigma_{bs} \rangle \quad (1)$$

ここで  $I_o$  は送波強度,  $\exp(-2\beta r)/r^4$  は距離  $r$  の伝搬過程における拡散及び吸収減衰,  $v$  はパルス殻体積,  $n$  は散乱体の密度,  $\langle \sigma_{bs} \rangle$  は散乱体の平均後方散乱断面積である。またパルス殻体積  $v$  はビーム幅  $\psi$ , 距離  $r$ , パルス幅  $\tau$ , 音速  $c$  を用いて次式で表される。

$$v = c\tau/2 \cdot r^2 \psi \quad (2)$$

従って (1) 式と (2) 式から単位体積当りの後方散乱係数が求まる。

$$n \langle \sigma_{bs} \rangle = \frac{I_e}{I_o} \cdot \frac{r^2}{\exp(-2\beta r)} \cdot \frac{2}{c\tau} \cdot \frac{1}{\psi} \quad (3)$$

一方, 平均体積後方散乱強度  $S_v$  は次式で定義される。

$$S_v [\text{dB}] = 10 \log n + 10 \log \langle \sigma_{bs} \rangle \quad (4)$$

従って (3) 式をデシベル表記すると,

$$S_v = EL - SL + (20 \log r + 2\alpha r) - 10 \log (\Psi \cdot c\tau/2) \quad (5)$$

ただし, エコーレベル  $EL = 10 \log I_e$ , ソースレベル  $SL = 10 \log I_o$ , 吸収減衰係数  $\alpha = 10 \log \exp(\beta)$  である。(5) 式の第 3 項目は距離  $r$  をパラメータとする伝搬減衰であるが,  $r$  は音波の伝搬時間  $t$  の関数でもある。従ってこの拡散, 吸収減衰は, 時変増幅回路を用いて補正することができ, これを TVG (Time Varied Gain) 補正という。他のパラメータ, すなわち  $SL, \Psi, c, \tau$  等はシステムに依存するから予め知ることができる。従って  $20 \log r + 2\alpha r$  の特性の TVG を有する魚探を用いてエコーレベル ( $EL$ ) を測定すれば  $S_v$  を求めることができる。

ところで, 今まで述べてきたように, 体積後方散乱強度 ( $S_v$ ) は単位体積当りの個体数, すなわち個体数密度  $n$  の関数であるが, これと同様に単位体積当りの重量, すなわち重量密度  $\rho (\text{mg}/\text{m}^3)$  の関数としても表すことができる。

$$S_v [\text{dB}] = 10 \log \rho + B \quad (6)$$

ここで、 $B$  は  $\rho$  が  $1 \text{ mg/m}^3$  の時の体積後方散乱強度である。

IKMT ネットによる生物採集と分布密度の推定

SL 内の生物採集は、IKMT ネット (図 3) を用いて 3 knot の船速で約 10 分間水平曳した。また SL の中心層を曳網できるように魚探とネットモニターで曳網深度を監視しながら、トロールウインチのワイヤー長を調整した。

各月の採集された動物性プランクトンの組成を図 4 に、オキアミ類 (*Euphausia pacifica*, *Thysanoessa longipes*) の体長分布を図 5 に示す。時期的な特徴として 4, 6 月はかいあし類 (*Calanus cristatus*) が 26% から 66% と比較的多く、また 7, 8 月はオキアミ類が 99% を占めた。

各曳網毎の生物密度は次のようにして求めた。すなわち One-meter リング (図 3) の中心にフロメータを固定し、袋網を外した状態で一定時間曳網する。この時のリングを通った流水量を船速、ワープ長、曳網時間を考慮して計算し、フロメータ 1 回転当りの流水量  $K$  を求める。従って袋網を接続したときの曳網濾水量はフロメータの回転数に  $K$  を乗じて求められる。生物密度の算出は、採集生物の全湿重量をフロメータから求めた濾水量で除し、これを生物密度 ( $\text{mg/m}^3$ ) とした<sup>1)</sup>。

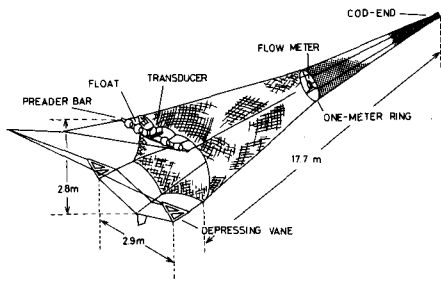


Fig. 3. Schematic diagram showing the modified IKMT (Isaacs-Kidd Midwater Trawl net).

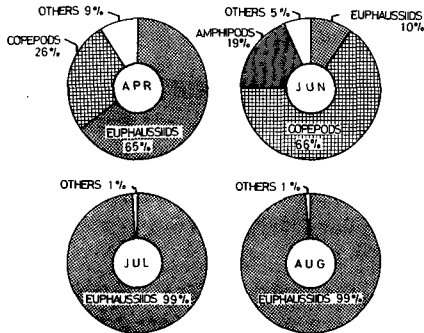


Fig. 4. Species composition of the catch by modified IKMT.

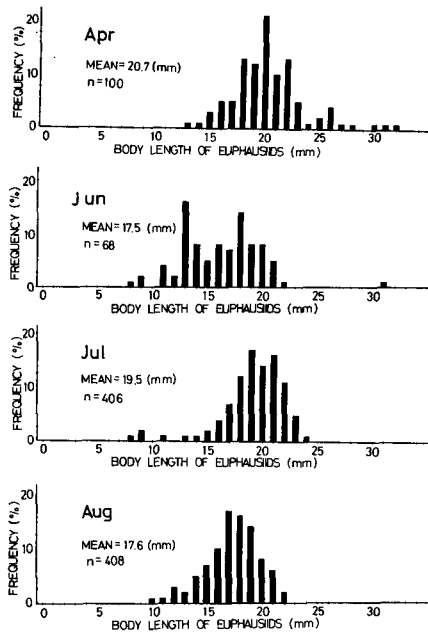


Fig. 5. Size-class distribution and mean body length of euphausiids.

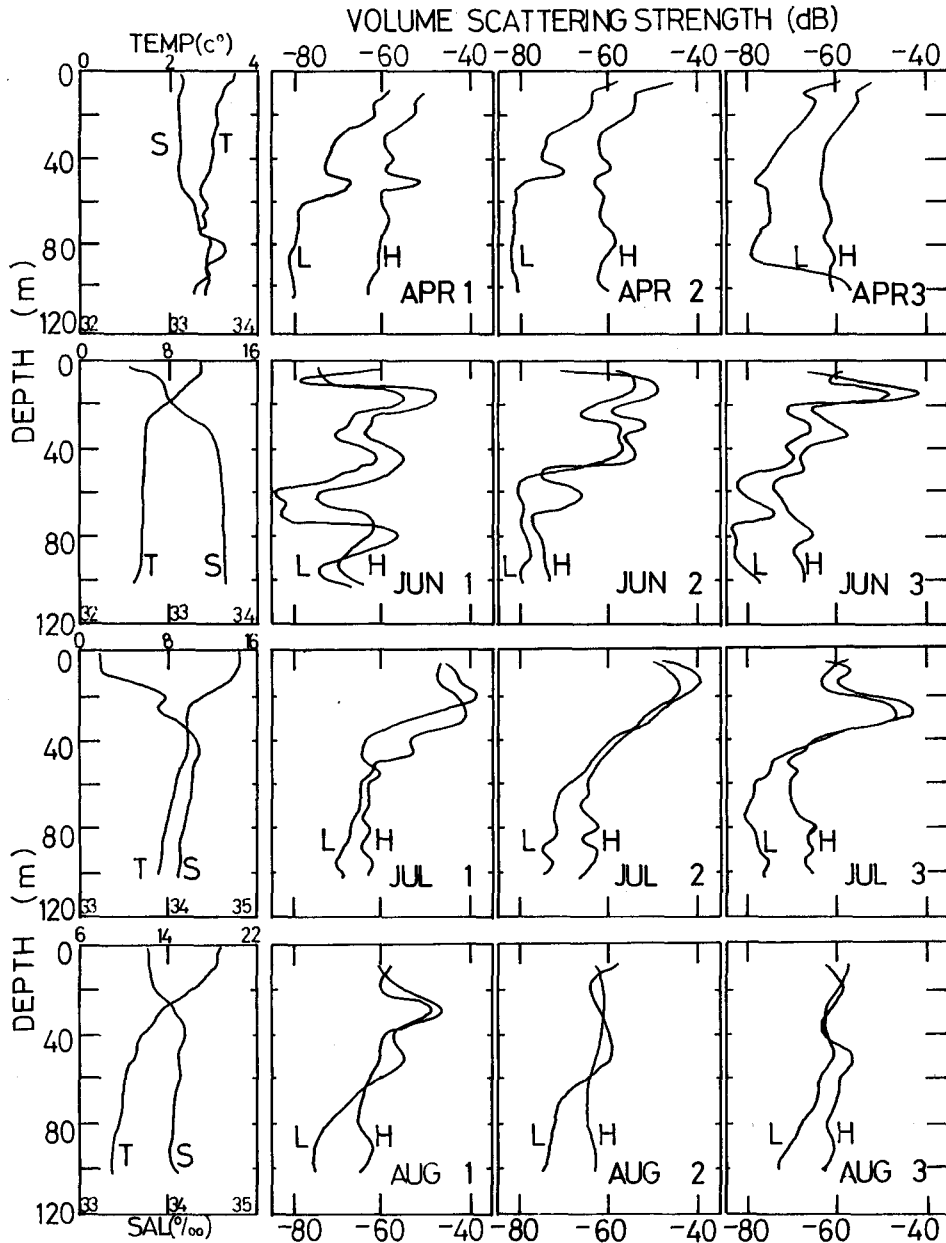


Fig. 6. Vertical profiles of temperature, salinity and volume back scattering strength ( $S_v$ ). T: temperature, S: salinity, L: 28.5 kHz, H: 96.2 kHz  
(Note difference in temp. and sal. scales)

結果および考察

各月の  $S_v$  の鉛直プロファイルおよび CTD 観測による水温、塩分濃度の分布図を図 6 に示す。6 月と 7 月は  $SL$  からのエコーが強く、エコーのピークは水温躍層付近にあることが認められた。また二周波間での比較では、 $S_v$  は各月の測定を通して概して高周波の方が高かった。しかしこの周波数による差は月によって異なり、4 月では全ての水深ではほぼ同程度であるが、7 月では  $S_v$  値が高い範囲 (約 -60 dB 以上) では二周波間の差は小さく、また  $S_v$  値が低い範囲 (-60 dB 以下) では差が大きいという現象がみられた。6 月のデータでは 4 月と 7 月の中間的な傾向であった。この周波数による違いの理由として、散乱体の周波数特性による影響があげられる。すなわち図 4 に示したように、各月によって散乱体の種や体長組成が異なるため、散乱体であるプランクトンの後方散乱断面積  $\langle \sigma_{bs} \rangle$  の周波数特性が現れる可能性がある。

次に IKMT ネットによって採集された生物湿重量とフローメータから求めた濾水量から算出した生物密度の結果を表 1 に示す。表から各月の生物密度は 7 月が最大であり  $S_v$  値の測定結果 (図 6) と一致している。IKMT から求めた生物密度  $\rho(\text{mg}/\text{m}^3)$  と曳網時に測定した  $S_v(\text{dB})$  の関係を図 7 に示す。両者の関係から次の回帰式 (実線) を得た。

$$28.5 \text{ kHz: } S_v = 9.31 \log \rho - 81.1 \quad (r=0.82) \quad (7)$$

$$96.2 \text{ kHz: } S_v = 5.03 \log \rho - 67.6 \quad (r=0.75) \quad (8)$$

また図 7 における破線は散乱強度が生物密度に比例するという体積散乱理論 (式 (6)) に基づく回帰直線を示す。

低周波 (式 (7)) における相関係数は  $r=0.82$  と高く、また回帰直線の傾きも理論値 10 に近い値となった。一方高周波 (式 (8)) における相関係数は  $r=0.75$  と低周波よりも低く、また回帰直線の傾きも 5.03 と理論値 10 の約半分であった。この原因は前述のように  $S_v$  値が低い場合は、高周

Table 1. Sampling effort during the study by modified IKMT and zooplankton density.

Date	Sample No.	Net Depth (m)	Total Weight (gr)	Water Volume (m <sup>3</sup> )	Zooplankton Density (mg/m <sup>3</sup> )
4/27	1	50	150.0	732.5	204.8
6/08	2	150	17.0	1106.3	15.3
	3	170	4.0	1213.3	3.3
	4	30	14.6	1022.8	14.3
	5	25	1190.0	1053.2	1130.0
	6	15	1870.0	954.7	1960.0
7/07	7	30	2863.0	1460.9	1959.0
	8	20	10120.0	1406.6	7194.0
	9	10	1541.0	1303.5	1182.0
8/11	10	5	164.0	880.3	186.3
	11	35	251.0	1223.7	205.1
	12	25	68.0	991.2	68.6
	13	15	314.0	1194.9	262.8
	14	8	303.0	1137.9	266.3
	15	35	36.1	914.6	39.5

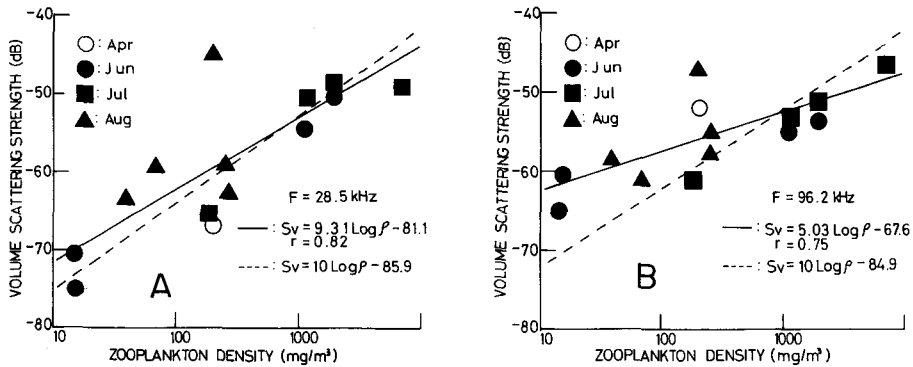


Fig. 7. The relationship between zooplankton density  $\rho$ ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) and volume scattering strength  $S_v$ (dB). (A): 28.5 kHz, (B): 96.2 kHz

波の  $S_v$  値が低周波より高く、また  $S_v$  値が高い場合は两周波間の差が小さいことによるものである (図 7)。

さらに IKMT の漁獲効率も問題となる。つまり小さなプランクトンは網目をすり抜けやすく、散乱断面積が大きい大型のプランクトンや魚は逃避して採集しづらい。これらは結果的に  $S_v$  と  $\rho$  の相関を悪くする要因となる。

今回帰式を用いて  $S_v$  値から平均生物密度を求めるために、式 (7), (8) を変形して次式を得る。

$$\rho [\text{mg}/\text{m}^3] = 10^{((S_v + 81.1)/9.31)} \quad (28.5 \text{ kHz}) \quad (9)$$

$$\rho [\text{mg}/\text{m}^3] = 10^{((S_v + 67.6)/5.03)} \quad (96.2 \text{ kHz}) \quad (10)$$

従って厚さ  $h$  の層の平均生物密度  $\langle \rho \rangle$  は (9), (10) 式より

28.5 kHz:

$$\begin{aligned} \langle \rho \rangle &= \frac{1}{h} \int_0^h \rho dh \\ &= \frac{1}{h} \int_0^h 10^{((S_v + 81.1)/9.31)} dh \end{aligned} \quad (11)$$

96.2 kHz:

$$\langle \rho \rangle = \frac{1}{h} \int_0^h 10^{((S_v + 67.6)/5.03)} dh \quad (12)$$

Table 2. The estimated zooplankton density calculated from Eq. (11)-(12).

Date	Depth (m)	Estimated Density ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) (28.5 kHz)	Estimated Density ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) (96.2 kHz)
4/27	0-50	61.9	35.4
6/06	0-50	353.0	429.7
7/07	0-50	1000.0	1080.0
8/11	0-50	634.0	275.9

上式を用いて  $S_v$  値から推定した各月の水深 0 m~50 m までの平均生物密度を表 2 に示す。推定した平均生物密度は、4 月から 7 月にかけて高くなり、8 月になると減少している。このことは、親潮系水と津軽暖流水の交替、つまり生産力の高い親潮系水と、それに比べて生産力の低い津軽暖流水との交替によく一致しているものと考えられた。

また、二周波間の差は 4 月から 7 月にかけてはよく一致していたが、8 月では大きかった。この原因は 8 月の魚探の記録を見ると、 $SL$  の分布が一様でなく、パッチ状に分布しているために  $S_v$  値の測定結果に誤差が生じたものと考えられた。

次に図 6 に示すように、 $SL$  の両周波数間における  $S_v$  値のピークの差が、散乱体である動物性プランクトンの周波数特性によるものではないかと考え検討した。尚、この散乱特性には種の違いによるものと、同一種における体長の周波数特性の 2 つが考えられる。ここでは同一種における体長の周波数特性について考察し、計算にはオキアミ類が 99% を占め、生物密度も最も高かった 7 月のデータを用いた。

Kristensen (1986)<sup>4)</sup> はオキアミ類の音響散乱を流体球モデルを用いて解析し、その後方散乱断面積  $\sigma_{bs}$  を周波数  $f$  の関数として表した。

$$\sigma_{bs}(f) = C \frac{a^2}{[(f_0/f)^2 - 1]^2 + \delta^2} d(f, a, \psi) \quad (13)$$

ここで  $C$  は音響インピーダンスのパラメータ、 $a$  はオキアミの等価半径、 $f_0$  は共振周波数、 $\delta$  は共振時のダンピング定数、 $d$  は散乱指向特性、 $\psi$  はオキアミのピッチ角である。また  $C$  は Rayleigh zone では音速比  $h$  と密度比  $g$  のみで近似できる。

$$C = 4 \left( \frac{1 - gh^2}{3gh^2} + \frac{1 - g}{1 + 2g} \right)^2 \quad (14)$$

$f_0$  および  $\delta$  は Kristensen の実験結果から次式を用いた。

$$f_0 = c/4\pi a \quad (15)$$

$$\delta = 0.5 \quad (16)$$

また  $a$  についてはオキアミ類の体長を  $TL$  とすると、

$$a = 0.136 TL^{1.05} \quad (17)$$

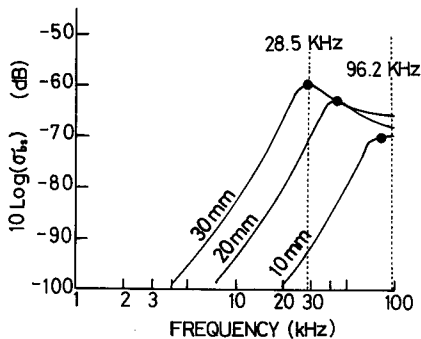


Fig. 8. The back scattering cross section versus frequency of 10 mm, 20 mm, and 30 mm body length euphausiids calculated from Eq. (13)-(18).

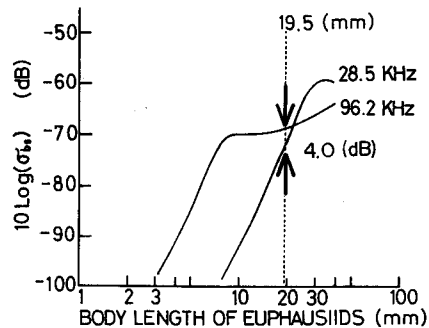


Fig. 9. The back scattering cross section versus body length of euphausiids calculated from Eq. (13)-(18) at 28.5 kHz and 96.2 kHz.

で示される。散乱体の指向特性  $d$  は  $f$ ,  $TL$ ,  $\psi$  の関数であり、

$$d(f, TL, \psi) = \left( \frac{\sin[\pi(TL/\lambda)\sin\psi]}{\pi(TL/\lambda)\sin\psi} \right)^2 \quad (18)$$

で示されるが  $\psi \approx 0$  (rad) と仮定すると  $d=1$  となる。式(13)~(18)を用いて  $\sigma_{bs}(f)$  を計算した結果を図8に示す。図中の●は各体長における共振点である。図は測定周波数の範囲(28.5~96.2 kHz)においてオキアミ類の  $\sigma_{bs}$  が  $TL=10$  mm では単調増加を、 $TL=30$  mm では単調減少を、そして  $TL=20$  mm では共振特性を有することを示している。そこで周波数を 28.5 kHz および 96.2 kHz に固定し、 $\sigma_{bs}$  を  $TL$  の関数として表した(図9)。図から  $\sigma_{bs}$  の周波数間の差は  $TL$  により変化することがわかる。 $TL$  の値を7月に採集したオキアミ類の平均体長 19.5 mm とすると両周波数間の差は 4.0 dB となる。実際の  $S_v$  値のピークの差の平均は 4.7 dB であったから流体球モデルによる値と比較的一致しているといえる。従って、 $S_v$  値の二周波間の差が周波数特性によるものであるとすると、 $S_v$  値の差から  $SL$  内のオキアミの平均体長、あるいは平均散乱断面積の推定が可能になると考えられる。

## 要 約

著者らは渡島半島東部の海域で観測される  $SL$  の生物密度を推定するために、計量魚探を用いた  $S_v$  値の測定と、IKMT ネットを用いた生物採集を行い次の知見を得た。

- 1) IKMT ネットにより求めた生物密度  $\rho$  (mg/m<sup>3</sup>) と  $S_v$  値の間には次の回帰式を得た。

$$28.5 \text{ kHz: } S_v(\text{dB}) = 9.31 \log \rho - 81.1 \quad (r=0.82)$$

$$96.2 \text{ kHz: } S_v(\text{dB}) = 5.03 \log \rho - 67.6 \quad (r=0.75)$$

- 2) 生物密度が最も高く構成生物の 99% 以上がオキアミ類であった7月の  $S_v$  値は高周波が低周波よりも平均 4.7 dB 高かった。Kristensen の流体球モデルを用いて計算したところ、この差は 4.0 dB となり、 $S_v$  値の周波数による差はオキアミ類の体長変化にともなう平均散乱断面積  $\langle \sigma_{bs} \rangle$  の周波数特性によるものと考えられた。

本稿をまとめるに当たり、実験に多大な御協力を頂いた北海道大学水産学部調査船うしお丸船長松島寛治氏をはじめ乗組員諸氏に感謝する。

## 文 献

- 1) 鈴木恒由・佐野典達・飯田浩二 (1984). 渡島半島東部における音響散乱層の時空間的挙動について, 北大水産彙報, **35**, 243-253.
- 2) 大谷清隆・木戸和男 (1980). 噴火湾の海洋構造, 北大水産彙報, **31**, 84, 114.
- 3) Bureczynski J. (1982). Introduction to the use of sonar systems for estimating fish biomass, *FAO fish. Tech. Pap.*, 191.
- 4) Åge Kristensen (1986). Acoustic estimation of size distribution and abundance of zooplankton, *J. Acoust. Soc. Am.* **80**, 601-611.