



Title	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
Author(s)	鈴木, 恒由; SUZUKI, Tsuneyoshi; 佐野, 典達 他
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 35(4), 243-253
Issue Date	1984-11
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/23866
Type	departmental bulletin paper
File Information	35(4)_P243-253.pdf



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

鈴木 恒由*・佐野 典達*・飯田 浩二*

Spatiotemporal Structure of Acoustic Scattering Layer
off the East Coast of Oshima Peninsula

Tsuneyoshi SUZUKI*, Noritatsu SANO*, Kohji IIDA*

Abstract

This paper describes the spatiotemporal structures of acoustic scattering layer (DSL) analyzed by acoustic and biological sampling surveys. The surveys were carried out during the R/V "Ushio" cruises in 1983 in a 15 square nautical mile area off the east coast of Oshima Peninsula. The scattering strength of DSL was measured with 50 and 200 KHz echo sounders, while reformed IKMT and Norpac were simultaneously used to sample the biological organisms in the layer.

In the running survey during the daytime, large scale patches of DSL were not encountered. The echograms show the depth and the thickness of DSL are not directly correlated with the bottom features. In the drifting survey at dusk, the maximum speed of upward migration toward the surface was 3 m/min and the volume backscattering strength (S_v) changed over a range from -80 dB to -50 dB. The biological sampling survey by the vertical tows of Norpac suggests the euphausiids of the major zooplankton species are located in the lower part of DSL. As a result of the surveys, the following relation between the biological density (ρ) and S_v was obtained:

$$\log \rho(\text{mg/m}^3) = 0.0253 S_v(\text{dB}) + 3.5608$$

まえがき

海洋における音響散乱層は DSL (Deep Scattering Layer) として古くから知られており、世界中の海域で見られる。DSL は魚群探知機では水深 180-900 m に層状のエコーとなって記録され、水温躍層等の物理的要因の他、その主な構成物が動物プランクトンや小稚魚等の生物群であること、さらにその昼夜間における出現深度に顕著な日周性を有することが明らかになっている¹⁾。しかしながら、DSL 内部の生物学的構造や時空間的挙動については今だ不明な点が多い。著者等は、1983 年の春から秋にかけて、北海道渡島半島東部における DSL の音響学および生物学的特性を解明するため、魚群探知機を用いた DSL の散乱強度の測定を行い、その空間的規模の推定および照度変化にともなう時間的変動を解析し、さらに、プランクトンネットの水平曳、垂直曳による生物採集を行い DSL の生物密度と組成について考察し若干の知見を得たのでここに報告する。

本稿に先だち、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一氏をはじめ乗組員諸氏、ならびに本調査海域の海洋構造について貴重な助言を頂いた同学部海洋学気象学講座助手村上敬氏、多忙なところ採集生物資料の整理に御協力頂いた同学部浮遊生物学講座助手志賀直信氏に深謝の意を表す。

* 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)

調査海域および実験方法

渡島半島東部における DSL は魚群探知機において昼間、水深 100 m 以深の海域で普通に見られ、水深 100-200 m 位に 1 層または 2 層が不規則な波状をしており、海底地形の変化にかかわらず広範囲に分布する。また、DSL は日没頃、徐々に上方へ移動し、日没 30 分もすると完全に表層に達する。この様子は魚群探知機では表面から水深 30 m 付近までの強力な表面残響層として記録される。

本研究は 1983 年 5 月、6 月、8 月、9 月に行ったもので、その調査海域は北緯 41 度 59 分、東経 141 度 18 分および北緯 42 度 2 分、東経 141 度 27 分の 2 点を対角とする長方形で、さらに本海域内の北緯 42 度 0 分、東経 141 度 20 分に定点を設け、海洋観測および生物採集を行った (図 1)。

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して周期的に交替することである²⁾。すなわち、冬季、春季には表層に流水の融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。各調査時の CTD 測定器による定点での水温および塩分濃度の垂直分布図を図 2 に示す。5 月末のものには両水塊の混合状態が、8 月、9 月のものには津軽暖流水の特徴がよく現れている。

調査は北海道大学水産学部調査船うしお丸 (107 吨) を用い、同船装備の記録式魚群探知機 (周波数 200 KHz, パルス幅 1 msec, トランスデューサの半減角 3°, 船底装備) および臨時に装備したカラー魚群探知機 (周波数 50 KHz, パルス幅 0.7 msec, トランスデューサの半減角 20°, 舷側装備) を使用して、DSL の水深、厚さ、散乱強度等を測定した。一方、魚群探知機による観測に先立ち、浮子球 (ハイゼックス, 240 mmφ, $T_s = -26.7$ dB) を用いて船上より垂下させ、その反射の強さを、200 KHz では抵抗減衰器を用いて測定し、50 KHz では、反射信号をデータレコーダに記録して、後に DSL の散乱強度から体積散乱強度 S_v を算出する際のキャリブレーションに用いた。Norpac^{*}) ネット (口径 0.45 m, 側長 1.8 m, 網目合 0.35 mm, 曳網速度 1 m/sec) および改良型 IKMT^{**}) ネット (網口 2.8 m×2.5 m, 網長 17.7 m, 袋網目合 2.0 mm, 曳網速度 1.5 m/sec) で採集された生物は 5% のホルマリン溶液で固定し、後日分類整理のうえ湿重量もしくは個体数を測定した。

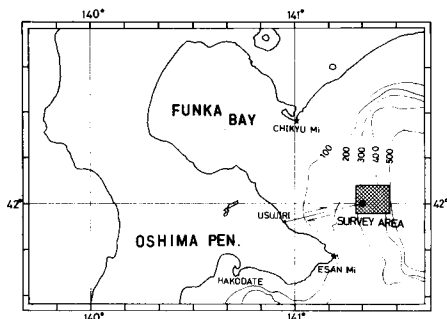


Fig. 1. Acoustic and biological surveys were carried out in a 15 square nautical miles area off the east coast of Oshima Peninsula.

* North Pacific Standard
 ** Isaacs-Kidd Midwater Trawl

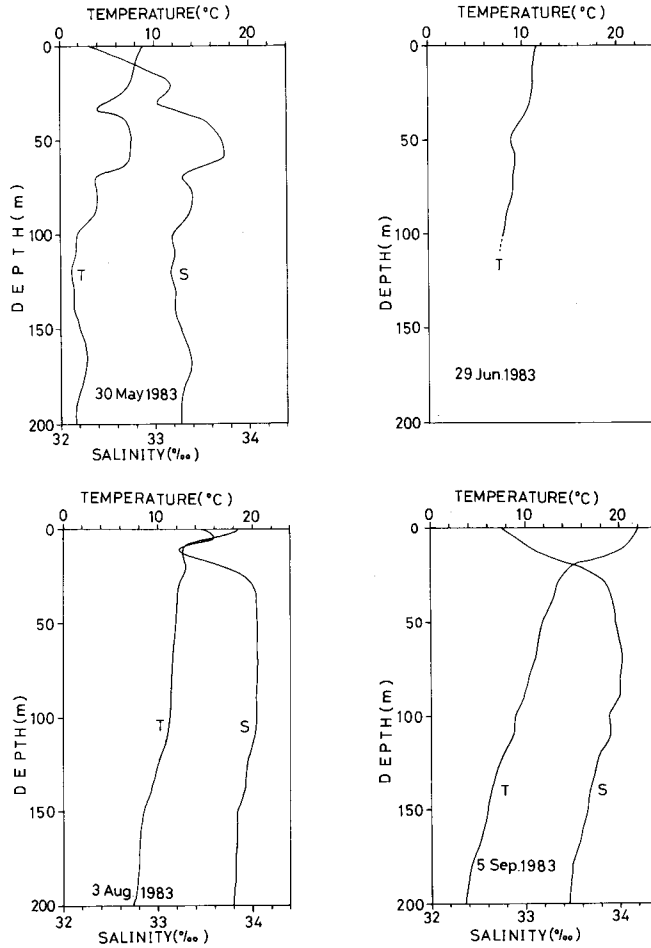


Fig. 2. Vertical profiles of temperature(T) and salinity (S) at the station by CTD measurements. The salinity profile in June was not obtained due to trouble with the apparatus.

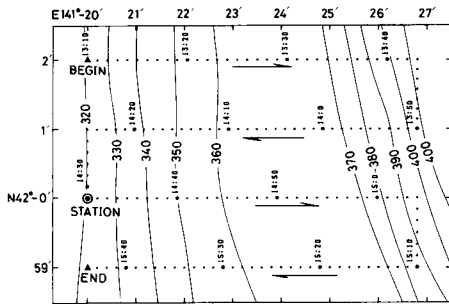


Fig. 3. Course, time, and bottom depth of the running survey with echo sounder during the daytime.

昼間における DSL の分布形態

昼間における DSL の分布形態を解明するため 1983 年 6 月 1 日に調査海域中の南北 3 海里、東西 5 海里の 15 平方海里の海上を航走観測したときの航跡図と通過時刻および魚探記録紙から読み取った水深から描いた等深線図を図 3 に示す。船位測定には Decca システムを用い、船速は 9 Kt で一定値を保つようにした。

測定は 1 分おきに行い、DSL 上端、下端、DSL 厚さ、表面水温、空中照度のほかコース、船速、

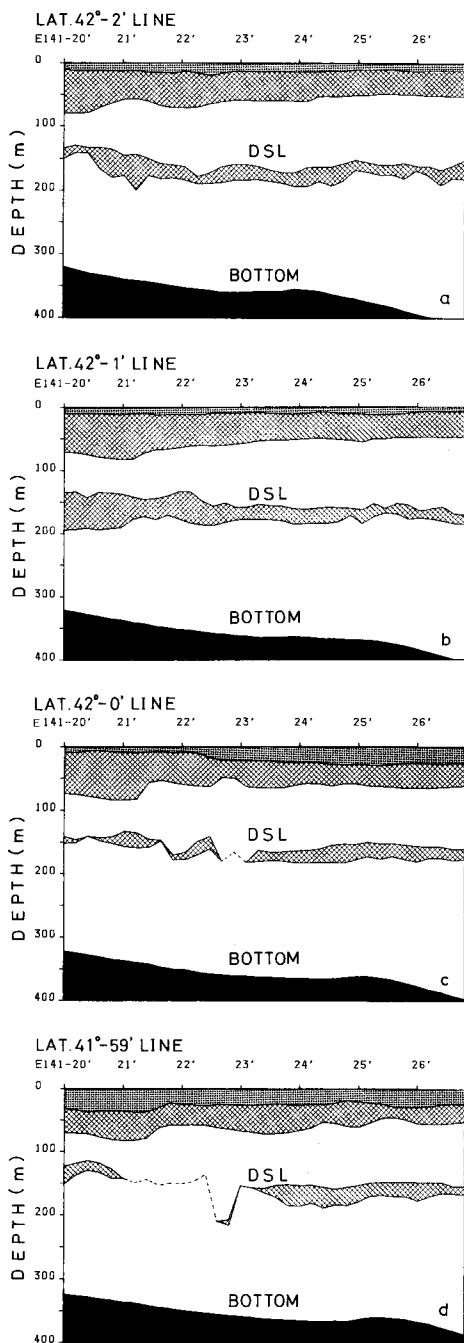


Fig. 4. Schematic echograms of DSL along with the survey lines (Lat. 42°-2'(a), 42°-1'(b), 42°-0'(c), 41°-59'(d)). The broken lines indicate weak scatterings.

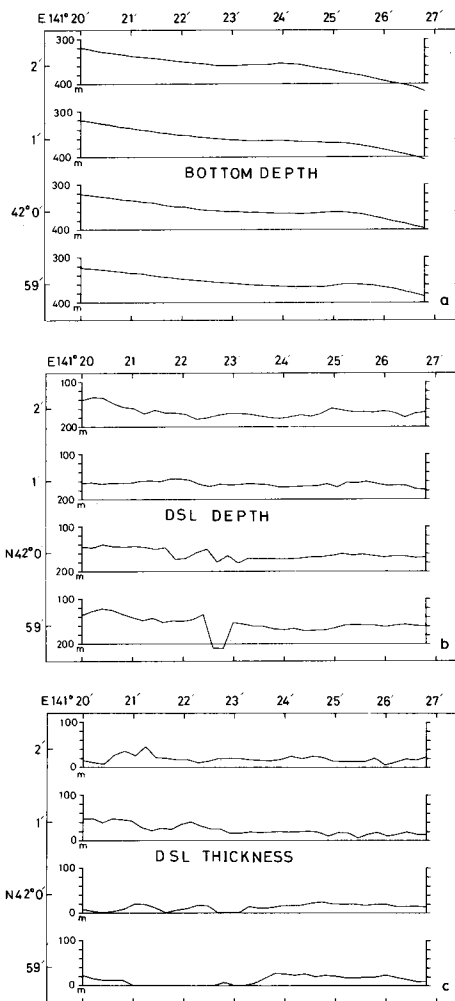


Fig. 5. Horizontal variations of the depth of bottom (a), the depth of DSL (b), the thickness of DSL (c) along with the survey lines.

船位も同時に記録し、抵抗減衰器を用いて DSL の散乱強度を測定した。これらのデータを基に、北緯 42 度 2 分、同 1 分、同 0 分、および北緯 41 度 59 分の各緯度線の魚探記録を模式的に表したのが図 4a-d である。横軸は経度を、縦軸は水深を表わす。図中最上部のエコーは表面残響の最も強力な部分で、その下に連続する残響層を、さらに 100-200 m にあるのが本稿であつかう DSL である。また図

5-aは海底深度の断面を、図5-bはDSLの中央深度の断面を、図5-cはDSLの上端と下端の差、つまりDSLの厚さの断面をそれぞれ表わす。これらと比較すると、海底地形は西側で浅く東側で深くなっているが、DSL厚さにはその影響が認められない。また、DSL厚さは、構成生物の垂直的な広がりを表わすと考えられるが、図5-cにおいてその水平的な分布に注目すると、すくなくとも走査線にまたがるような大規模なパッチは認められない。そこでより近い距離におけるDSL厚さの変動を解析するため連続した3時間余りの1分間ごとのDSL厚さの変化の自己相関分析を行った(図6)。図中aは縦軸にDSL厚さを、横軸に航走距離を取った時系列で、bがその自己相関関数である。相関関数はラグの増加とともに減少し、すくなくとも分析ラグ数(30分間、4海里)内にはピークを持たない。つまり、この程度の距離内にはDSL分布の周期性を持たないことを示している。一方、相関関数がラグ軸と交差する点(ゼロクロス点)はラグ数で13、距離にすると1.9海里であるが、この距離はある地点のDSLの強度の相関のおよぼなくなる距離を表わすから、DSLの分布の水平的規模を示唆していると考えられる。

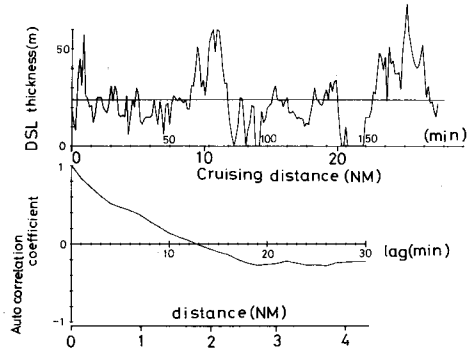


Fig. 6. Time series of the thickness of DSL (upper), and the auto-correlation coefficient (lower).

日没時における DSL の垂直移動と生物的特徴

日没時における DSL の顕著な垂直移動は良く知られているが、その詳細については不明な点が多い。1983年8月3日には定点付近で漂流観測を行い DSL の垂直移動を 50 KHz のカラー魚探を用いて、その魚探信号波形を磁気テープレコーダに連続記録し、同時に空中照度の測定を行った。磁気テープから再生した魚探記録を図7に示す。日没15分前(18:41, 照度 1000 lux)頃から、それまで水深 120 m 付近に安定に分布していた DSL が徐々に上昇し始め、日没5分前(18:49, 600 lux)頃から更に上昇を速めてほぼ等速度で移動し、日没30分後(19:24, 2.8 lux)には完全に表層に達し、水深の安定した表面残響層となる。この時の上昇速度は上昇初期に毎分 1 m 程度のものが上昇後期には毎分 3 m 程になる。図中水深 50 m の線状のエコーは水中照度計で、日没時の水深 50 m における水中照度は 1 lux 程度であった。表面の逆三角形の強力なエコーは平行して行った Norpac ネットの垂直曳を示す。

DSL の垂直移動に際し、一般的に上昇とともにその散乱強度を増すと言われるが、記録紙上の発色の度合は使用魚探の TVG 特性に大きく依存するので、不完全な TVG を使用した魚群探知機の記録紙の発色濃度の違いから散乱強度の比較をすることは適当ではない。そこで、体積散乱強度 S_v ($S_v = 10 \log sv$) をもって散乱強度の比較を行った。 S_v は以下の様に定義され、距離減衰を補正するための適当な TVG 処理とトランスデューサの指向性利得の補正を行って得られる。

$$S_v = \frac{I_r}{I_o} \cdot \frac{r^4}{e^{-2\beta r}} \cdot \frac{1}{\frac{c\tau}{2} \cdot r^2 \cdot \psi} \quad (1)$$

ここで I_o は音源から音軸上で 1 m 離れた点における送波強度、 I_r は受波強度、 r はトランスデューサから散乱体までの距離、 c は音速、 β は吸収減衰係数、 τ はパルス幅、 ψ は等価ビーム幅

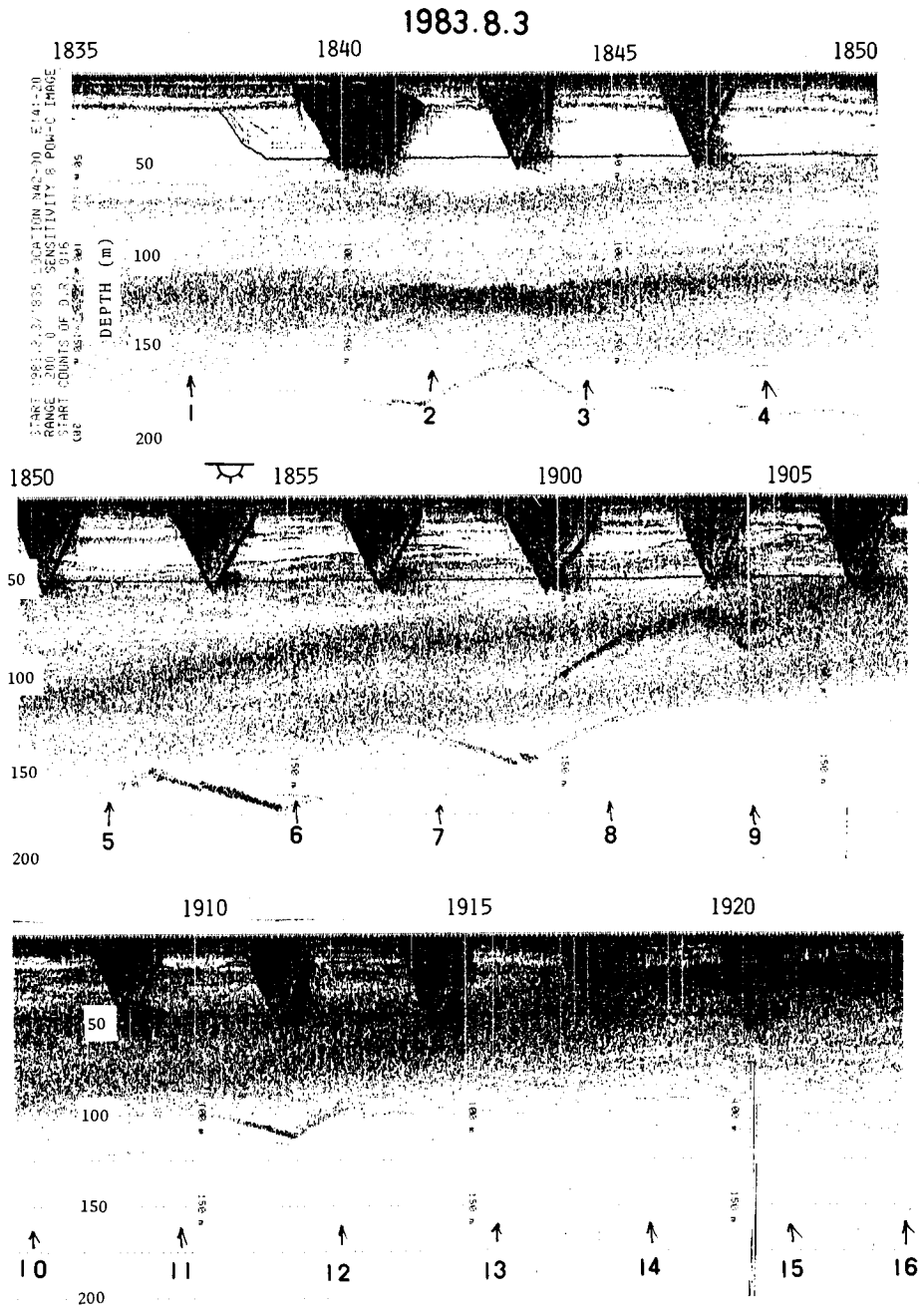


Fig. 7. The 50 KHz echograms showing the upward migration of DSL at dusk. The V-shaped echoes are from the tows of Norpac. The line echo in 50 m is from the underwater photometer.

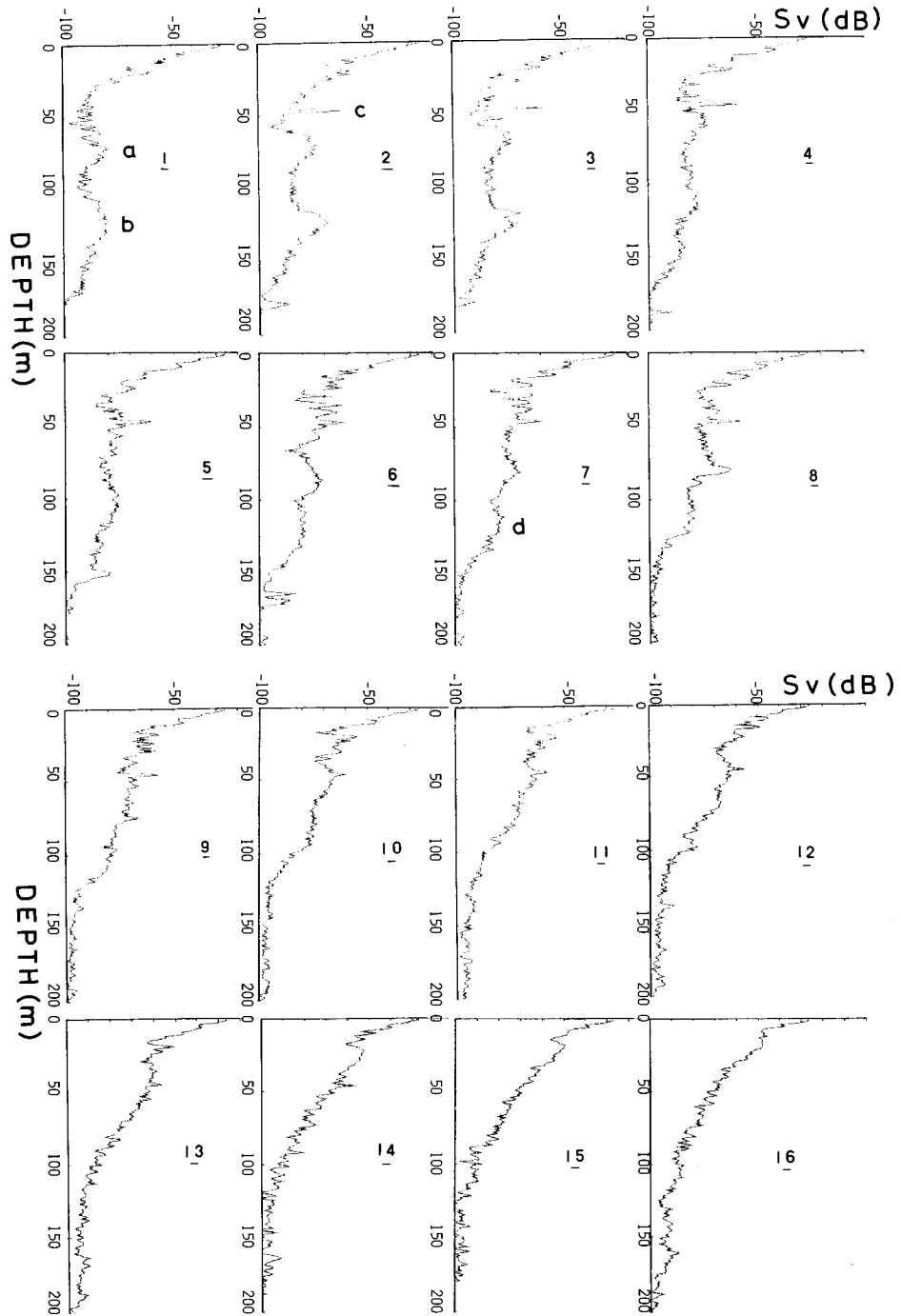


Fig. 8. Vertical profiles of the volume backscattering strength(S_v) of the upward migrating DSL in 50 KHz. The numbers in figure correspond to those in Figures 7 and 10.

で送受共用のトランスデューサの場合は、その指向性関数を $b(\theta, \varphi)$ とすると

$$\Psi = \int_0^{4\pi} b^2(\theta, \varphi) d\Omega \quad (2)$$

なる値であり、円形平面アレイの場合、半減半角 $y(\text{deg})$ と Ψ の間には次の関係がある³⁾。

$$10 \log \Psi = 20 \log y - 31.6 \quad (3)$$

また、 S_v は単標的に対しては、その定義から単標的の反射強度を表わす定義量である標的強度 T_s と等価であるので、別に行った T_s 既知の反射球による置換法を用いて S_v を算出した。すなわち標的強度が T_{s_0} ($T_{s_0} = 10 \log t_{s_0}$) なる反射球を船上から音軸上に添って垂下させ、トランスデューサから r の距離での受波強度が I'_r だったとすると

$$I'_r = I_0 t_{s_0} \frac{e^{-2\beta r}}{r^4} \quad (4)$$

上式を整理して1式に代入して次式を得る。

$$sv = \frac{I_r}{I'_r} t_{s_0} \frac{1}{\frac{c\tau}{2} \cdot r^2 \cdot \Psi} \quad (5)$$

ところで受波強度 I_r , I'_r は受波信号電圧 e_r , e'_r の2乗に比例するから

$$sv = \left(\frac{e_r}{e'_r} \right) t_{s_0} \frac{1}{\frac{c\tau}{2} \cdot r^2 \cdot \Psi} \quad (6)$$

デシベル量で表現すると

$$S_v[\text{dB}] = 20 \log \left(\frac{e_r}{e'_r} \right) + T_{s_0} - 10 \log \left(\frac{c\tau}{2} r^2 \right) - 10 \log \Psi \quad (7)$$

この様にして Norpac ネットの各垂直曳 (0-50 m) における約 1 分間の魚探信号波形の平均から、各水深における S_v を求めその推移を図示したのが図 8 である。図中 1-16 の番号は図 7 および図 10 における番号に対応する。1 の a は第一層、b は第二層の DSL を表わし S_v の最大値はいずれも -80 dB 程度である。2 の c は水中照度計のエコーである。DSL は時間とともに上昇し 6 では S_v が -70 dB 程度に達する。7 の d は新たに出現した第三層の DSL を表わす。さらに上昇を続け 15, 16 では水深 20 m 程のところに全層が集中し安定する。このときの最大 S_v は -50 dB 程に達する。したがって確かに DSL の S_v はその上昇とともに増加するが、これは昼間 100 m 以深の幅広い層に低密度に分布していた生物が日没後表層付近に極端に集中するためと解釈される。

つぎに、Norpac ネットの垂直曳で採集された生物資料を整理した結果、体長 1 mm 以下のかいあし類 (*Acartia clausi* GIESBRECHT, *Clausocalanus arcuicornis* (DANA), *Paracalanus parvus*

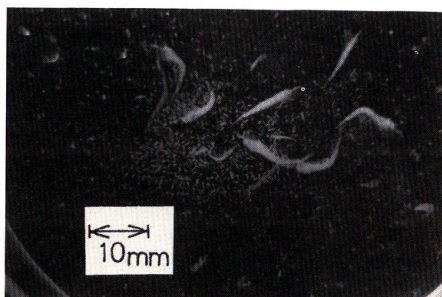


Fig. 9. A photograph of zooplanktons sampled by the vertical tow of Norpac.

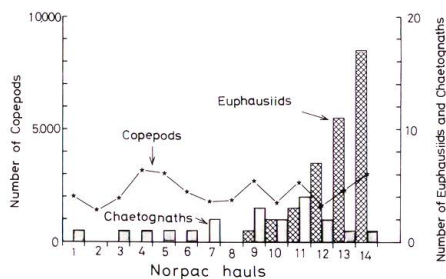


Fig. 10. Variation in the number of zooplanktons in continuous Norpac hauls.

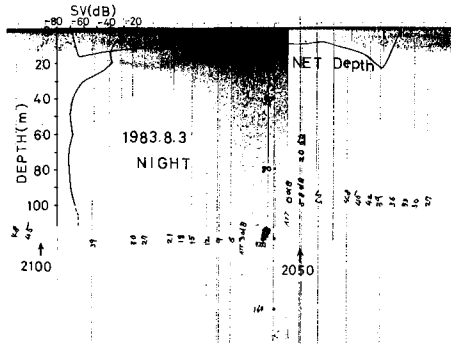


Fig. 11. The 200 KHz echogram of DSL after the upward migration in nighttime. IKMT were towed in the layer for 10 minutes. The value of S_v was measured using attenuator and the vertical profile is shown in the figure.

(*Claus*), *Pseudocalanus* sp., *Calanus tenuicornis* DANA), 体長 10 mm 程度のやむし類 (*Sagitta elegans*) とおきあみ類 (*Euphausia pacifica*) であった (図 9)。やむし類およびおきあみ類は、夜間引き続いて行われた IKMT ネットで採集されたものと比べると小型であり、Norpac ネットの口径の小さいこと、曳網速度の小なること、網目合の小なることから、大型の動物プランクトンが逃避したためと推測される。したがって、これらの分布密度の定量的な評価はできないが各曳網時の組成を DSL の垂直移動と比較すると興味深い。図 10 は各曳網における組成の変化を示すが全曳網を通じてかいあし類の出現個体数は比較的安定しているが、やむし類については 11 回目にピークを有し、おきあみ類については 9 回目以降その出現頻度が急に大きくなる。また、DSL の上部が水深 30-40 m に達し完全に曳網範囲に入っているにもかかわらずおきあみ類の出現がないこと、さらに DSL の下部が曳網範囲に入ると急激におきあみ類の出現個体数が増加することを考え合わせると、かいあし類は DSL の主要構成生物ではないこと、やむし類は DSL 上部に、おきあみ類は DSL 下部に多く分布し上昇してくるのではないかと推測される。

夜間における DSL の生物的特徴と散乱強度

日没時の垂直移動が完了すると DSL は表層から水深 30 m までの強力な表面残響層を形成する。そこで、DSL の主要な構成生物であるおきあみ類の定量採集を目的として IKMT ネットによる水平曳を行い、採集生物重量を求めた。さらに同時に取得した 200 KHz の魚探記録および網深さ計の記録 (図 11) から曳網水深における S_v 値を積算し、 S_v と生物密度との関係をみた。

DSL 内の生物密度と超音波散乱強度は理論的に、以下のように関係づけられる。すなわち、いま魚探ビームと超音波パルス幅でつくられる同一のパルス殻体積中における散乱因子が均一で、かつランダムに分布する場合、各散乱因子からの散乱波の合成波は散乱音圧の合成としてではなく、散乱強度の合成となる。したがって、散乱因子の分布密度 ρ (g/m^3) と各散乱因子の平均標的強度 t_s 、および体積散乱強度 sv の関係は

$$sv = \rho \ t_s / w \quad (8)$$

あるいは

$$S_v [\text{dB}] = T_s [\text{dB}] + 10 (\log \rho - \log w) \quad (9)$$

と表わされ sv は ρ に比例する。但し w は散乱因子の個体平均重量 (g) である。 S_v (dB) は抵抗減衰器と魚探記録から次のようにして求めた。まず $T_s = -26.7$ dB の反射球を船上より垂下させ水深 r (m) における記録紙上の発色しきい値 S_{0r} (dB) を抵抗減衰器の読みから求める。つぎに同様に水深 r (m) における DSL の発色しきい値 S_{1r} (dB) を求め、その差 S_{sr} (dB) を得るとすると S_{vr} (dB) は

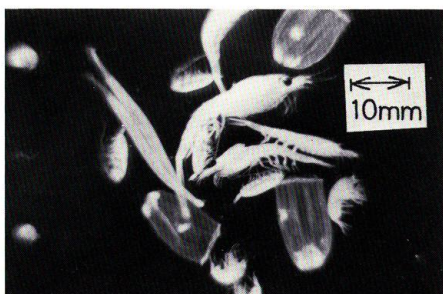
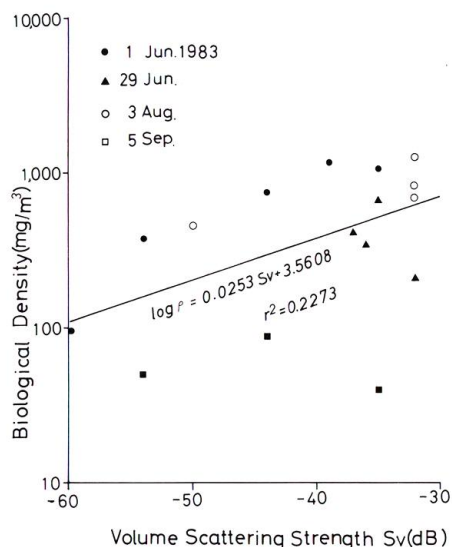


Fig. 12. A photograph of zooplanktons sampled by the midwater trawl of IKMT.

Fig. 13. The relation between biological density ρ and S_v . The regression line $\log \rho = 0.0253 S_v + 3.5608$ was obtained with the coefficient of determination $r^2 = 0.2273$.



$$Sv_r [\text{dB}] = Ss_r - 10 \log V_r = Ss_r - 10 \log \left(\frac{c\tau}{2} \cdot r^2 \right) - 10 \log \Psi \quad (10)$$

ただし、 V_r はパルス殻体積 (m^3) である。

ここに本実験で使用した条件 ($c = 1490 \text{ m/sec}$, $\tau = 1 \times 10^{-3} \text{ sec}$, $y = 3^\circ$) を 3 式および 10 式に代入すると Sv_r (dB), すなわち Sv の垂直分布が得られる。さらにこの分布を基に、曳網水深における Sv 値を積算して平均し Sv (dB) を得る。この方式の特長は測定が容易な上使用魚探の TVG 特性が不明であっても、標準反射球を用いて相対的に距離減衰補正ができることである。

IKMT ネットによる曳網は、1983 年 6 月から 9 月までに 24 回行い、そのうち流量計のキャリブレーションの 7 回および網形状異常の 1 回を除く計 16 回分のデータについて解析を行った。曳網水深は 0-60 m の範囲でなるべく一定に保ち、船速は 3 knot で 10 分間曳網した。採集生物は時前に行われた Norpac ネットの垂直曳のものとは比べると一般に大型であり、その内訳はおきあみ類 (*Euphausia pacifica*), 硬水母類 (*Aglantha digitale*), かいあし類 (*Calanus cristatus*), やむし類 (*Sagitta elegans*), 端脚類 (*Parathemisto japonica*), 翼足類 (*Limacina helicina helicina*), およびスケトウダラ等の稚魚であった(図 12)。时期的な特徴は、5 月および 6 月ではおきあみ類が 60-90% を占め、続いて硬水母類が 10-20%, 稚魚とかいあし類が 10% 以下で、他は僅少であった。8 月および 9 月ではおきあみ類が 95% 以上を占め、他は硬水母類であった。また 6 月を境におきあみ類の体長が変化し、6 月で 20 mm 程度のものが、8、9 月には 10 mm 程度になったのが大きな特徴である。

つぎに、曳網水深における生物分布密度を次の様にして求めた。まず IKMT の身網と袋網の接続部の中心に流量計を固定し、袋網をはずした状態で一定時間曳網する。この時の接続断面を通った流量を、船速、ワーブ長、曳網速度を考慮して計算し流量計 1 回転当りの流量 K を求める。したがって袋網を接続したときの曳網ろ過水量は流量計の回転数に K を乗じて求められる。さらに、後に測定した採集生物の全湿重量を曳網ろ過水量で除し、これをもって生物分布密度 (mg/m^3) とした。各曳網についてこれらの値を求め、先に述べた方法による平均 Sv 値との関係をプロットしたのが図 13 である。回帰式は図中に示すように

$$\log \rho \text{ [mg/m}^3\text{]} = 0.0253 S_v \text{ [dB]} + 3.5608 \quad (11)$$

となり、この回帰式のあてはまりの良さを表わす決定係数 r^2 は 0.2273 となった。相関の低い原因はいろいろ考えられるが、抵抗減衰器を用いた S_v 値測定の精度を向上させること、IKMT ネットの特性や漁獲性能を十分検討し定量採集の精度を高めることが今後の課題であろう。

要 約

渡島半島東部の水深 300-400 m の海域において DSL の時空構造を解明するため、魚群探知機を用いた音響調査とプランクトンネットを用いた生物調査を行った。

調査海域における 15 平方海里の昼間の航走観測の結果、その水平的な分布は海底地形の影響を受けていないこと、また南北数海里にまたがるような大規模なパッチはなくその出現に周期性を持たない。しかし、自己相関分析の結果から一つの DSL の水平的規模が 1.9 海里程度であると推測される。

日没時に、DSL は顕著な垂直移動を行ない、その上昇速度は上昇初期に毎分 1 m、後期には毎分 3 m 程で日没 30 分後には水深 20-30 m に達し安定する。この時の体積散乱強度 S_v は上昇初期に -80 dB 程度で後期には -50 dB 程度まで増加する。また、このときの Norpac ネットによる反復垂直曳の結果から、かいあし類は DSL の主要構成生物ではないこと、主要構成生物と考えられるおきあみ類は DSL 下部に多く、やむし類は DSL 上部に分布するのではないかと推測される。

夜間、強力な表面残響層を形成する DSL の主体はおきあみ類でその S_v 値と IKMT ネットによる水平曳の結果から、生物分布密度 ρ と S_v の間に $\log \rho \text{ (mg/m}^3\text{)} = 0.0253 S_v \text{ (dB)} + 3.5608$ なる回帰式を得たが、相関はよくなく、抵抗減衰器を用いた S_v の測定方法、IKMT ネットによる生物群の定量採集の精度を向上させる必要があると思われる。

文 献

- 1) 鈴木恒由・伊藤 準 (1967). 北西部太平洋水域における DSL について—I. (垂直移動・水中照度およびプランクトン量などについて). 日水誌, **33**, 325-337.
- 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) Urick, R.J. (1967). Principles of Underwater Sound for Engineers. 342 p. McGraw-Hill, Inc., New York.