

鹿児島湾における超音波散乱層に関する研究^{*1}

松野保久

Studies on the Ultrasonic Scattering Layers in the Kagoshima Bay

Yasuhisa MATSUNO^{*2}

Abstract

It has been confirmed that the 'ultrasonic scattering layers' give significant effects not only upon the biological workings in the formation of fishing ground but upon the planning, researching and using of the various underwater acoustic instruments—those which are concerned with navigation, fisheries and investigations; including oceanic life, oceanophysics, submarine resources, and so on. Owing the fact that the researches of the ultrasonic scattering layers have been performed by the oceanographically advanced countries, a great number of information have been obtained, concerning both biological and physiological issues. However, about such important issues as ① the relationship between the ultrasonic scattering layers and the fisheries, ② composition organisms in the layers, ③ ultrasonic scattering characteristics, and so on, no accurate information have been obtained, yet. Accordingly, with the intention of clarifying the oceanic state as it is, the author carried out some investigations on the Kagoshima bay where no existence of the ultrasonic scattering layers having diurnal vertical migration had been confirmed, yet.

Firstly, some information about the ultrasonic scattering layers were obtained by means of the 50 kHz fish finder—in other words, a number of records were fixed continuously, day and night, on board the Training ship Nansei maru belonging to the Faculty of Fisheries, Kagoshima University, at both the innermost, and the middle, areas of the Kagoshima bay, in the respective seasons of spring, summer, autumn and winter. Both vertical and horizontal tows were carried out by the closing plankton net and the Isaacs-Kidd midwater trawl net for the purpose of ascertaining the composition organisms of each layer. On the other hand, for the elucidation of the ultrasonic scattering characteristics, the scattering strengths of the respective layers were measured, and, in order to ascertain the physical features in the ocean, the vertical distributions of the water temperature from the sea surface to the sea bottom were observed by DBT (digital bathythermo graph); with the performed confirmation of the submarine illumination by an under water illuminometer.

*1 北海道大学審査学位論文 (Thesis submitted for the degree of Doctor of Fishery Science at Hokkaido University, June, 1986)

*2 鹿児島大学水産学部漁船航海学講座 (Laboratory of Fishing Vessel Navigation, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kagoshima, 890 Japan)

The number of the ultrasonic layers having diurnal vertical migration was fixed to be 'three', being unvaried through the whole year, both at the innermost and the middle, areas of the Kagoshima bay. Occasionally, only 'two' layers were recorded during the period from autumn to winter. Although more or less complicated phases were noted in the vertical migrations of the respective layers, in the outlined patterns, a close resemblance was noted. It was ascertained that there was a close relationship between the cause of the vertical migration, the depth where the respective layers were situated, and the degree of the submarine illumination. The optimum submarine illumination was fixed as in the following : the 1st layer, 10^{-7} lux \sim 10^{-9} lux ; the 2nd layer, 10^{-4} lux \sim 10^{-7} lux, and in case of the 3rd layer, 10^0 lux \sim 10^{-2} lux. No direct relationship was noted between the vertical distribution of water temperatures and the cause of vertical migration ; however, the depth of the ultrasonic scattering layer showing no vertical migration agreed quite well with the depth of thermocline. The mean value of the maximum velocity of the vertical migration at each layer was as follows : the 1st layer 2.5 m/min., the 2nd layer 2.0 m/min., and the 3rd layer 0.8 m/min. respectively. The mean value of the scattering strength of each layer was as follows : the 1st layer, -39.1 dB, the 2nd layer, -34.7 dB and the 3rd layer, -36.0 dB. The composition organisms of each layer were as follows : the 1st layer, *Pollichthys maulli*, *Maurolicus japonicus*, *Lophogaster japonicus* ; the 2nd layer, *Bemthosema pterotu*, and the 3rd layer, Pilchard.

Secondly, considerations were made on a measuring theory applicable for the estimation of organism abundance in the ultrasonic scattering layers. With the use of frequency 50 kHz, at the indoor 50 tons water tank of the Kagoshima prefectural cultural fishery center, were carried out 2 sorts of experimental workings : - the measuring of the target strength of one individual in the four kinds of organisms composing the ultrasonic scattering layers, and the workings to examine the influence of the secondary radiation on the scattering strength. The target-movements were processed by a personal computer, with the employment of the general purpose signal analyser in processing the acoustic signal.

Through the considerations of the measurement theory, a formula 8-34 described in the thesis and the approximate expression 8-63 indicated in the following :

$$10 \log n = SV - 10 \log (Tse + n \cdot Tsm^2)$$

were obtained. The target strengths of the individual organisms composing the ultrasonic scattering layers were as follows, respectively : *Bemthosema pterotu*, -48.4 dB, *Pollichthys maulli*, -49.3 dB, *Maurolicus japonicus*, -50.0 dB, and *Lophogaster japonicus*, -52.9 dB. In the target strength pattern, there was a strong similarity between the above mentioned fishes and the crustacea in the roll plane, but in the pitch plane, there was a large difference between these two.

Lastly, the distribution of the organism abundance composing the ultrasonic scattering layers in the Kagoshima bay was estimated by making use of the following three issues, ascertained : namely, ① the target strength of the individual organisms obtained by the measurements in water tank, ② the scattering strength of each ultrasonic scattering layer obtained by the measurements on board the Nansei maru, and ③ the results of the organism collections obtained by towing the Isaacs-Kidd midwater trawl net.

The approximate 'organism abundance' composing the ultrasonic scattering layers (1st layer, 2nd layer) was estimated in all the areas of the Kagoshima bay (excluding entrance area), the results obtained was as it follows : *Bemthosema pterotu* 115,000 tons, *Pollichthys maulli* 6,000 tons, *Maurolicus japonicus* 5,000 tons, and *Lophogaster japonicus* 13,000 tons, with the confirmed result showing 140,000 tons total amount. While the total fish catches by fishermen in all the areas of the Kagoshima bay were noted to be about 3,450 tons. Hence the assumption that, due to the fact that the total abundance of the organisms composing ultrasonic scattering layers was big enough, compared with the total fish catches, the ever lasting importance of the ultrasonic scattering layers in the Kagoshima bay was reasonably confirmed.

目 次

第1章 緒 論	230
第2章 超音波散乱層の記録	233
2.1 観測方法	233
2.2 湾全域における記録	238
2.3 湾奥・湾中央海域における記録	240
2.4 垂直移動速度	255
2.5 散乱強度	258
2.6 超音波散乱層の特異な記録	264
第3章 水温の垂直分布と超音波散乱層の垂直移動	269
3.1 測定方法	269
3.2 結果および考察	269
第4章 海水中の照度と超音波散乱層の垂直移動	274
4.1 観測方法	274
4.2 結果および考察	276
第5章 閉鎖ネットによる超音波散乱層の構成生物の採集	281
5.1 採集方法	281
5.2 結果および考察	281
5.3 超音波散乱層の逃避行動	287
第6章 Isaacs-Kidd 中層トロールネットによる超音波散乱層の構成生物の採集	290
6.1 採集方法	290
6.2 結果および考察	292
第7章 超音波散乱層の水中カメラによる観察	306
7.1 撮影方法	307
7.2 結果および考察	311
第8章 超音波散乱層を構成する生物分布量の測定理論	320
8.1 単体標的の測定理論	321

8. 2	群体標的の測定理論	323
8. 3	標的強度と平均密度	329
第9章	超音波散乱層を構成する生物の密度	334
9. 1	超音波散乱層を構成する生物の単体標的強度測定	334
9. 2	超音波散乱層を構成する生物分布量の推定	347
9. 3	超音波散乱層を構成する生物分布量推定値の検討	353
第10章	総合考察	360
第11章	結 論	367
謝 辞		370
文 献		371

第1章 緒 論

近年、各種の水中音響機器が製作されているが、その情報伝達には主として超音波を使用している。水中における超音波使用を促進させた一つの大きな原因は1912年不沈船と宣伝された英国の豪華客船 Titanic 号がその処女航海途上に北米ニューファンドランド沖で冰山と衝突、1,503名の人命と共に全没した海難事故であった¹⁾。それは船舶の安全航行に幾多の教訓をあたえ、その中でも特に、冰山監視の問題が徹底的に論ぜられ、超音波による冰山探知が検討された。そして1918年、フランスの P. Langevin が超音波を使用して冰山ならびに潜水艦の探知に成功したのが近代的な水中音響機器の幕明けであった²⁾。その後各国における水中音響技術は、第一次世界大戦、第二次世界大戦を通じて軍事技術として発展してきた。一つは、水中にある標的の発見や追跡を行うソナー (SONAR, Sound Navigation and Ranging)、他の一つは、船上において海の深さを知る音響測深機であり、前者は超音波を水平方向に発射し、後者は垂直方向に発射するものである。現在もお潜没中の潜水艦の探知には音響による方法が最も有効であるため、米国、ソ連を始めとする先進諸国では軍事研究の一端として重点的に水中音響技術の研究・開発が行われている。しかしその研究成果についての発表はきびしく規制されているのが現状である³⁾。

漁業関係では1928年頃から北海のトロール漁船で音響測深機が使用された。又1933年イギリスの調査船 Onaway 号⁴⁾がニシン流網漁船団中で中層の魚群によると推定される反響を得、1935年ノルウェーの Oscar Sund⁵⁾が Johan Hjort 号でタラ魚群、つづいてニシン魚群の探知に成功し、始めて音響による魚群探知の実用効果が示された。その後音響測深機によりマイワシ、カタクチイワシ、マグロなど各魚種の探知に成功した⁴⁾。

我国においては、1926年頃実用化された P. Langevin の音響測深機の輸入に始まる外国技術の導入と相まって我国独自の研究・開発が始まった。1929年頃には水産講習所の木村教授により、水中音波を利用しての基礎研究⁶⁾などが行われているが、第二次世界大戦終了までは水中音響技術の研究・開発は主として諸外国同様、軍事的なものであった。しかし第二次世界大戦終戦の年1945年、水中音響機器は航路保安機という名称の音響測深機を除いて全面的に研究・製造・装備が禁止された。1950年この全面禁止は解除されたが、この前1948年

頃から音響測深機が多くのまき網漁船に装備され、イワシなどの魚群探知に利用され始めた。この時期いくつかの魚群探知機製造会社が発足し、その後現在に至るまで数多くの種類の魚群探知機が開発・製造された。当初まき網漁業に使用されイワシ・アジ・サバなど浮魚密集群の探知に、その後トロール漁業における底魚の探知に、そして海洋中、単体で遊泳するサケ・マス・マグロを探知する魚群探知機の開発・製造が行われた。この間水平魚群探知機も各種開発され、まき網漁船に数多く装備されている。そして近年新漁場開拓のための漁業調査および海洋資源調査において real time で魚量を測定することが可能である計量用魚群探知機の出現を見、魚群探知機は漁業に又調査に必要な不可欠の水中音響機器となるに至った。

このような音響測深機、ソナー、および魚群探知機の開発途上において軍事目的、漁業目的の別にかかわらず、当事者の頭を悩ませた現象の一つに phantom bottom (幻の海底) あるいは false bottom (偽海底) などと言われ、その後 DSL (Deep Scattering Layer) と呼ばれた超音波散乱層がある。音響測深機を作動させ海底の像を記録しながら航行中、海底の上方にあたかも第二の海底があるかのような記録がしばしば現れ、航行者を困惑させたのであった。1942年、第二次大戦中、米国スクリップス海洋研究所の三人の物理学者 C. Eyring, R. Christiansen, R. Raitt⁷¹ がカリフォルニア沖合で、軍事研究のため超音波を使用して観測中に、夕方海面に向かって上昇し、朝方下方へ降下する超音波散乱層を発見した。そこで同僚の Johnson⁸¹ がその超音波散乱層を採集網で曳き、動物プランクトンとの関係を示唆した。そしてこの現象を発見者の三人の頭文字をとって E・C・R 現象と呼んだが後に DSL と名付けられた。

その後多くの研究者が音響測深機、魚群探知機を使用してこの DSL の探知および解明に携わった。太平洋海域においては Dietz⁹¹, 坂本ら¹⁰¹, 鈴木・伊藤¹¹¹, Chapman et. al^{121,131}, Percy and Mesecar¹⁴¹, Johnson¹⁵¹, 松野¹⁶¹ など、東シナ海海域においては、西村¹⁷¹, 橋本・西村¹⁸¹, 俵ら¹⁹¹, 松野ら^{201,211,221} など、オホーツク海海域においては、前田ら^{231,241}, 箕田ら²⁵¹ など、大西洋海域においては、Chapman et. al^{121,131}, McElroy and Wing²⁶¹, Colet et. al²⁷¹, Boden²⁸¹, Zahuranec and Pugh²⁹¹, Hargreaves³⁰¹ など、南氷洋海域においては Dietz⁹¹, Herdman³¹¹ など世界の海洋全般にわたって DSL は一層のみならず、二層あるいは時として三層も存在することが確認された。そして各海域において DSL の正体をみきわめるためにプランクトン・ネット、ラバ・ネット、小型中層トロール網などにより構成生物の採集が実施された。その結果多くの場合、橈脚類、オキアミ類、エビ類およびハダカイワシ類などが採集され、DSL と各生物との関係がそれぞれにおいて論ぜられた。又他の方法による DSL 構成生物の確認は、Johnson et. al³²¹ の水中カメラによる撮影および Cousteau³³¹ の潜水艇 Bathyscaphe による人間の目での直接観察の報告もあるが、構成生物がこれら大きな異物の侵入による逃避行動のためか、生物採集の結果とは必ずしも一致していない。又 DSL の日周期垂直移動と水中照度の関係¹¹¹ならびに水温²⁷¹, 密度³¹¹との関係、そして標的強度^{121,151,181,201,261}および標的強度と魚群探知機の周波数の関係^{131,341}について論じた報告もみられる。このように多くの観測から超音波散乱層の起因は、ある種の生物の密集層による生物的要因そして海洋の水温躍層など物理的要因の二つによることが推定された。

我国においては1940年橋本により音響測深機による false bottom (偽海底) が確認され N 層と名付けられたが、この DSL に関する研究は米国、仏国、英国など諸外国に比し、その

取り組み開始は遅れ、橋本らにより1952年頃から始まった³⁵⁾。そして魚群が餌を求めてDSLに集まる記録が得られたことから漁場と密接な関連を持つことが推定された。そこで漁場の適格性および漁場の良否を判断する資料に役立つという観点から底魚^{17), 18)}、マグロ^{36), 37)}、サケ・マス^{23), 38), 39)}との関係について調査・研究が続けられた。特に北太平洋、東シナ海など日本近海における調査が盛んに行われ、前述したように、DSLの構成生物、垂直移動と水中照度との関係および反射損失(散乱強度)について、その他DSLの波動現象に関連して海洋中に起こる短周期の内部波^{19), 21), 22)}などの調査報告がみられる。世界各海域における超音波散乱層の多くの研究や魚群探知機の改良および物理的な水中音響に関する研究の進展⁴⁰⁾にもかかわらず、超音波散乱層の生物的、物理的な解明はまだ不十分な段階である。特に物理的な解明においては、音響機器の設計および信号処理に重大な影響を及ぼす水中音波伝搬に関する次のような問題点についての十分な対策、十分に積み重ねられたデータの入手がまだ満足でないことが最大の原因と思われる。

1) 伝搬速度の問題

Leroyによれば海洋中の音速⁴¹⁾は次式で表わされる。

$$C = 1,492.9 + 3(T - 10) - 6 \times 10^{-3}(T - 10)^2 - 4 \times 10^{-2}(T - 18)^2 + 1.2(S - 35) - 10^{-2}(T - 18)(S - 35) + Z/61$$

ここではCは音速(m/sec.)、Tは水温(°C)、Sは塩分(‰)、Zは水深(m)である。この式からもわかるように海水中の音速は大略1,500 m/sec.と遅く、レーダーに使用している電波の空中における伝搬速度約 3×10^8 m/sec.と比べ1/200,000であり、単位時間に得られる情報に制約がある。

2) 音響屈折の問題

海水中の伝搬速度は上式に示したように水温、塩分濃度、水深によって変化するので水塊の物理的不均質により音波が複雑に屈折する。

3) 音波の反射・散乱・透過・吸収・減衰の問題

音波のエネルギーの海面、海底、魚群その他による反射・透過、気泡層、プランクトン層、超音波散乱層(DSL)などによる散乱・吸収・透過そして海水中の拡散減衰、特に吸収減衰の正確な測定値を得るのが困難である。

4) 海洋中における雑音の問題

波浪、降雨、海中生物、航行船舶その他数多くのものから発せられる各種騒音の物理的解明がまだ不十分である。

ここに示された超音波散乱層による超音波の散乱・吸収・透過の物理的要因、その他日周期垂直移動など生物的要因の問題は、漁業および生物調査の分野のみならず水中音響航法の分野にも大きな影響を及ぼす。船速計(ドップラー・ソナー)⁴²⁾は船から発射された超音波が海底に当り反射して戻ってきた時のドップラー・シフトを計測し、対地速力を得るものである。しかし水深が深い海域においては海底反射を利用することができず、海洋中の超音波散乱層からの反射波によるドップラー・シフトを測定して対水速力を得る。この時超音波散乱層の物理的、生物的特性を充分知っておくことは安全航行の点からも必要なことである。その他測深機、トランス・ボンダー^{43), 44)}、船位保持装置⁴⁵⁾、狭水道航法装置⁴⁶⁾など水中音響航法機器全般に影響を与えるものである。このように超音波散乱層に関する研究は漁業、漁

場調査，生物調査，水中音響航法の全てに通ずる。よってここで，それぞれの分野において現在使用されている音響機器を次に示す^{35), 47), 48), 49), 50)}。

漁業	垂直魚群探知機，水平魚群探知機，探鯨機，ネット・ゾンデ，トロール網監視装置，魚量計，テレサウンダー，水中放声装置
調査 生物 海洋 海底	計量用魚群探知機，ピンガー，潮流計，波高計，音速計，地層探査装置，サイド・ルッキング・ソナー。
音響航法	測深機，船速計（ドップラー・ソナー），トランス・ポンダー，船位保持装置，狭水道航法装置
その他	防衛用ソナー，超音波水中映像装置

上表に示した全ての音響機器の開発・設計・使用に重要な影響を与える超音波散乱層の調査・研究は前述したごとく米国，ソ連，英国，仏国，日本を始めとする多くの国の研究者によって世界の海域において実施されてきた。しかし超音波散乱層の季節毎の各層を構成する生物，漁場・漁獲との関係，散乱特性など重要な問題はいまだ十分に解明されていない。また現在に至る調査海域は太平洋，大西洋に代表される外洋域が全てであった。そこで筆者は超音波散乱層（DSL）の存在すら確認されていなかった閉鎖海域に近い鹿児島湾内において，超音波散乱層の実態を明らかにすることを目的として，魚群探知機を使用し湾内洋上における調査を実施した。超音波散乱層の特性をより多角的に検討するため，魚群探知機で超音波散乱層の昼夜連続記録を得ると同時に，各層の構成生物解明のため閉鎖ネットおよび小型中層トロール・ネットによる生物採集と水中写真撮影，海洋中の物理的環境を把握するため水温測定および照度測定，又超音波散乱特性解明のため各散乱層の散乱強度測定などを実施し総合的考察を行ったものである。

本研究はこのような目的に沿って行われたものであり，漁業，漁場調査，生物調査，水中音響航法など各分野における，物理的，生物的な水中音響に関する研究の進展に役立てることができれば幸いである。

第2章 超音波散乱層の記録

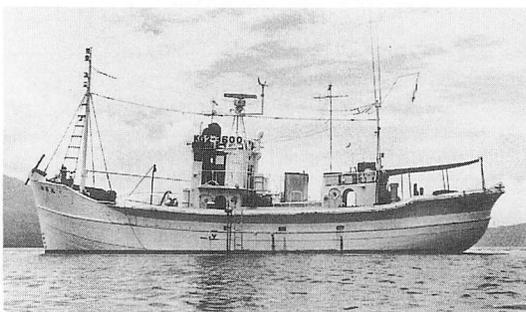
2.1 観測方法

i) 観測船舶・観測海域

鹿児島湾における超音波散乱層の観測には Plate 2-1 に示した三隻の船舶を使用した。A は種子島，屋久島近海でハマチの稚魚（モジャコ）を捕獲する目的で建造され，一般にモジャコ船といわれる船舶で“第5大海丸”（13.8 G. T.）である。この船舶は湾全域にわたる観



A



B



C

Plate 2-1. Photographs showing the Taikai maru No.5 and the Nansei maru.

測に使用した。B, C は鹿児島大学水産学部実習船“南星丸”で、湾奥および湾中央海域における観測に使用した。B は旧南星丸 (44.56 G. T.) で1976年までの観測に、C は現在就航中の南星丸 (82.97 G. T.) で1976年以降の観測にそれぞれ使用した。なお現在の南星丸は1981年に船体中央付近1 mの延長工事を行い総トン数で約8トン増加した。しかしこのことが、本観測に重大な影響を与えたとは考えられない。Fig. 2-1は鹿児島湾全域にわたる超音波散乱層の記録を得るため“第5大海丸”で航走した航跡である。A点より出発しG点で観測を終了した。船位は全てレーダー位置によった。Fig. 2-2は湾奥および湾中央海域に

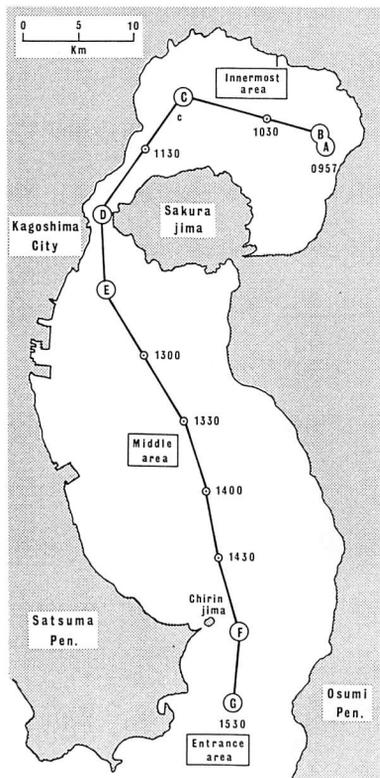


Fig. 2-1. Map showing the track of the observation of the ultrasonic scattering layers by the fishing boat in the Kagoshima bay.
(Time : J. S. T.)

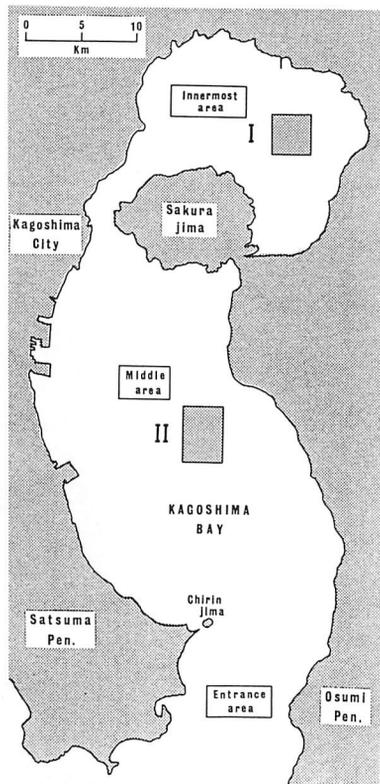


Fig. 2-2. Map showing the areas of observed scattering layers.

おける観測海域を示しており，Ⅰを湾奥海域，Ⅱを湾中央海域とした。湾内における観測は1973年8月，海域Ⅰにおいて実施したのが最初であり，その後機会あるごとに両海域内において観測を行ってきた。海域決定理由は両海域とも水深約200mであること，そして南星丸は昼夜とも錨泊し，特に薄明時および夜間において照度測定等のため止むを得ず作業灯，停泊灯等全ての明かりを消すことがしばしばあること，およびトロール曳きを行うなどの理由から海難事故防止のためできる限り船舶交通量の少ない海域を選定した。

ii)測定器類

超音波散乱層の記録を得るため Plate 2-2に示したように次の魚群探知機を使用した。

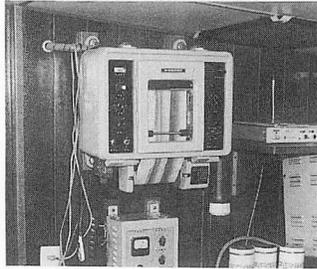
(A) ユニバーサルグラフ FUG-11 型

古野電気株式会社

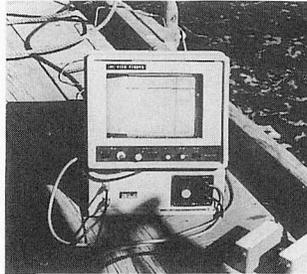
周波数…………… 50 kHz

パルス幅…………… 1.0 m sec.

- 指向特性..... 20° (半減全角)
- 記録紙..... 湿式
- (B) NJA-172B 魚群探知機
- 日本無線株式会社
- 周波数..... 200 kHz
- パルス幅..... 1.0 m sec.
- 指向特性..... 10° (半減全角)



A



B



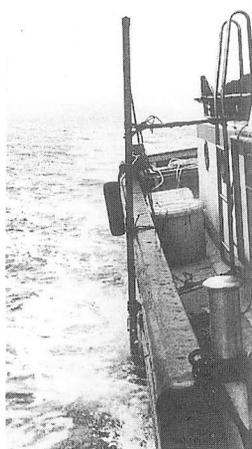
C

Plate 2-2. Photographs showing the fish finders which were used for observation in the Kagoshima bay.

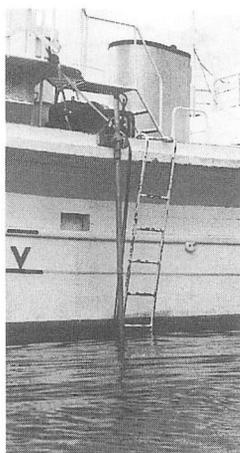
- 記録紙…………… 乾式
- (C) NJA-280 ku 魚群探知機
日本無線株式会社
- 周波数…………… 50 kHz
- パルス幅…………… 1.0 m sec.
- 指向特性…………… 24° (半減全角)
- 記録紙…………… 湿式

(A)の魚群探知機は現在の南星丸に装備されているものであり、(B)の魚群探知機は旧南星丸で、(C)の魚群探知機は現在の南星丸および第5大海丸に積載して観測を実施した。その時の送受波器の装備状況を Plate 2-3に示した。I (第5大海丸)、II (旧南星丸)、III (現在の南星丸) 全て船体中央付近に垂直に装備し、送受波器は水面下それぞれ1.3m, 1.3m, 2.2mに固定した。

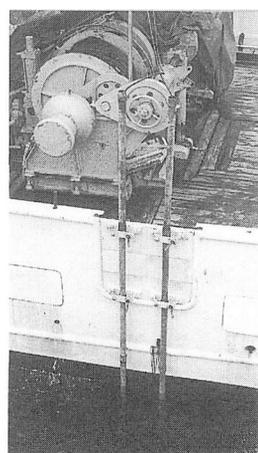
観測海域の鹿児島湾は一般に次の三つの海域に分割される。すなわち鹿児島市と桜島間の水道(以後桜島水道と称する)より北を湾奥海域、南を湾中央海域そして知林島から対岸の大隅半島へ真東に延長した線より湾口までを湾口海域と称する。また鹿児島湾全域の等深線図およびその模式図を Fig. 2-3に示した。これからわかるように湾奥海域と湾中央海域は桜島水道をはさんでそれぞれ海盆を形成している。最深部の水深はそれぞれ約200m, 約220mであり平均水深は両海域とも約110mである。水道は約40mである。湾口海域の最深部の水深は約110m, 平均水深は約70mである。このように鹿児島湾は二つの海盆を有し、南北に細長い特異な海底地形をもつ湾である。



I



II



III

Plate 2-3. Photographs showing the transducer which were installed on board.

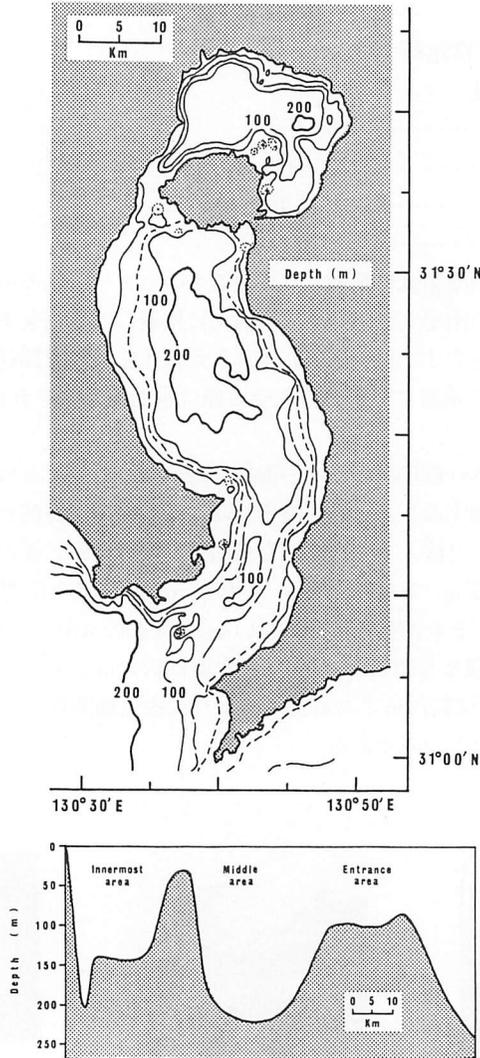


Fig. 2-3. Map showing the bottom topography in the Kagoshima bay.

2. 2 湾全域における記録

1985年7月6日, Fig. 2-1に示した航跡のように, 湾奥から湾中央そして湾口海域に至るまで航走し, その間魚群探知機 (50 kHz) を連続作動させ, 得られた超音波散乱層の記録を Fig. 2-4に示した。両 Fig. 中の A~G は時刻, 船位ともそれぞれ対応する。全航走距離は71km, 平均速度は12.8km/時であった。なお当日の天候は曇りであったが, 雲間からしばしば太陽が出る状態であった。また海況は午前中 very smooth sea であったが13時頃より slight sea に変わった。魚群探知機の測深レンジ, 受信感度つまみ, その他調整つまみ類は全て一定であった。

湾奥海域においては、水深50~100mおよび約150mに（上層，下層，二層）超音波散乱層が全域にわたって記録された。上層については、Fig. 2-1のA点からB点にかけて層の厚さ約10mで、層の中心の水深約55m，85mと二層に分離して記録されたがその他の海域では判然としない。下層はB点付近から水深約200mとなる海域において層の中心の水深約150m，層の厚さ約25mで明瞭に記録されている。その他の水深約150mの海域においては、層の厚さ10~20mでその水深は海底に密着するような形で記録されている。11時40分頃、桜島水道の手前、水深が急激に浅くなる地点において、上層下層ともその層の厚さはそれぞれ約50m，約25mと増加し、又それら記録も濃く記録され、あたかも両層の下辺および上辺が接触するかのごとく記録された。その後水深約40mの桜島水道に至り、両層の記録は消滅した。しかし表層から水深約25mまで黒く記録される傾向がD点付近では特に顕著となり、水深約30mに至っている。桜島水道においては、この時期ハマチ養殖に大被害を与えた赤潮 *Chattonella marina* に続いて *Protogonyalax* sp. および *Prorocentrum sigmoides* が大量発生している矢先であった⁵¹⁾。ここに現れた魚群探知機の表層付近の記録は、この赤潮大量発生と何らかの関係があるものと推察される。

湾中央海域においては、層の中心の水深125~150m，層の厚さ15~30mで一層のみ全域にわたって記録された。桜島水道を過ぎ、水深が100mを越えるE点付近および水深150mに至る12時38分まで超音波散乱層は、表層から水深約25mに至るもの以外記録されていない。そして水深約125mで記録され始め、その後14時40分頃水深が急激に約100mまで浅くなる湾口海域に至るまで連続して記録された。14時25分頃水深約165mで、超音波散乱層の下辺が

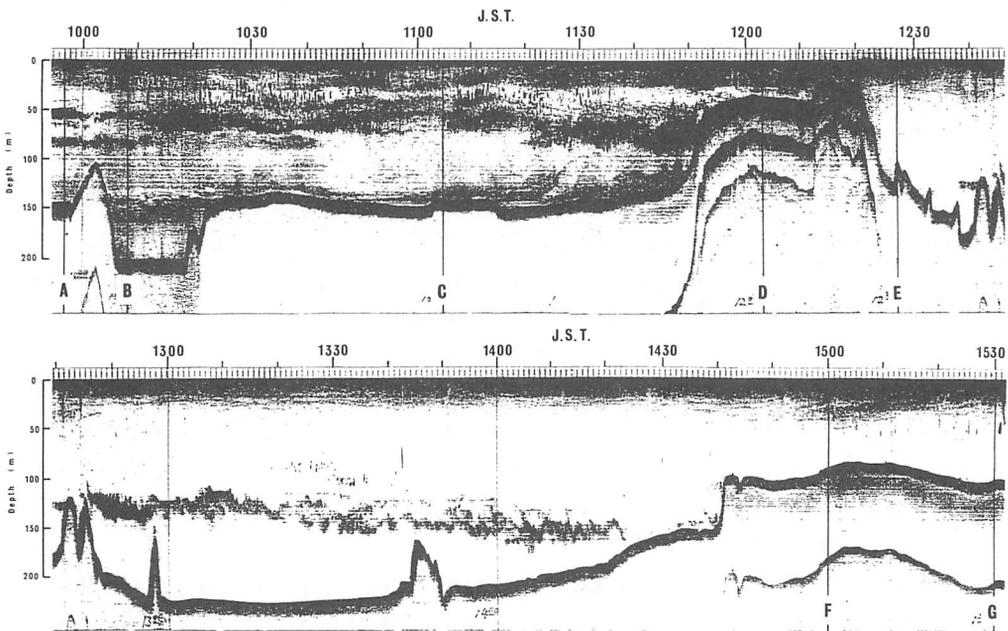


Fig. 2-4. The record of ultrasonic scattering layers by 50 kHz fish finder in the Kagoshima bay on 6th in July, 1985.

海底と接触し、その後水深が浅くなるにもかかわらず超音波散乱層は消滅することなく海底と密着する形で記録された。なお13時20分頃から記録の濃さが薄くなっているが、これは前述したように、海況が very smooth sea から slight sea に変わり、風向は WSW であったことから、船体の Rolling, Pitching などの動揺が影響したものと推定する。これは特にこの海域における地形の影響もあり、13時から14時30分までが最も風の影響を受けた。しかし船体の動揺は最大でも10度を越えることはなかった。

湾口海域においては、表層から水深約30mに至る超音波散乱層のみ記録された。この表層付近から黒く記録される傾向は桜島水道通過時と同様であったが原因は不明である。湾中央海域と湾口海域の境界域において海底に密着して記録された超音波散乱層は、14時40分水深が100mとなるとところで完全に消滅し、その後湾口海域では全く記録されなかった。15時過ぎ水深80m付近の海域で表層の記録が約40mを越える傾向にあるのが目立つのみであった。

このように鹿児島湾全域における50 kHzの魚群探知機による昼間の超音波散乱層の記録を得た。超音波散乱層は湾口海域を除く全ての海域にみられ、特に湾奥海域では二層すなわち層の中心の水深60~75m、層の厚さ25~50mの上層、および層の中心の水深約150m、層の厚さ約25mの下層、湾中央海域では一層すなわち層の中心の水深125~150m、層の厚さ15~30mの超音波散乱層が明確に記録された。

2. 3 湾奥・湾中央海域における記録

超音波散乱層の記録は主として1982年から1985年にかけて50 kHzの魚群探知機(C)を使用して得られたものについて解析を試みた。それらは全て錨泊時の記録である。

垂直移動を行う超音波散乱層の記録は微視的に見れば極めて複雑な様相を呈している。その原因は後にゆずるとして、この節前半では巨視的な立場にたってその季節の変動の有無について検討した。ここに得られた記録全てを示すのは紙面の関係上困難であり、その一例をFig. 2-5に約1/2の縮尺で示した。日出前後の記録は超音波散乱層が鮮明に記録された例であり、日没前後の記録はノイズその他の原因による不鮮明な記録例である。湾奥、湾中央海域とも四季を通じて日周期垂直移動を行う超音波散乱層は二層ないし三層みられ、朝方、日出前に早く下降を始める層から順次第一層、第二層、第三層とした。よって夕方、日没前第三層、第二層、第一層の順に上昇を開始する。魚群探知機により記録されたデータは、デジタイザ(マイタレット-DT1000型:渡辺測器株式会社)を使用し、朝方、夕方など特に垂直移動の変動が大きい時間帯における超音波散乱層を模式図として表した。模式図の時間軸を約1/12に、水深を約9/10に縮小した。これは特に時間経過に伴う垂直移動の変化が強調されて表現できる。以下湾奥および湾中央海域の各季節における超音波散乱層の垂直移動について記す。

2. 3. 1 湾奥海域における記録

湾奥海域における50 kHz魚群探知機により記録された超音波散乱層の春・夏・秋・冬各季節の記録の模式図をFig. 2-6-1, Fig. 2-6-2, Fig. 2-6-3, Fig. 2-6-4にそれぞれ示した。

i) 春

1982年4月22日~24日, 1983年4月26日~28日(Fig. 2-6-1)の記録について解析した。垂直移動を行う層は三層記録された。第一層、第二層は両年同様の傾向であったが、第三層

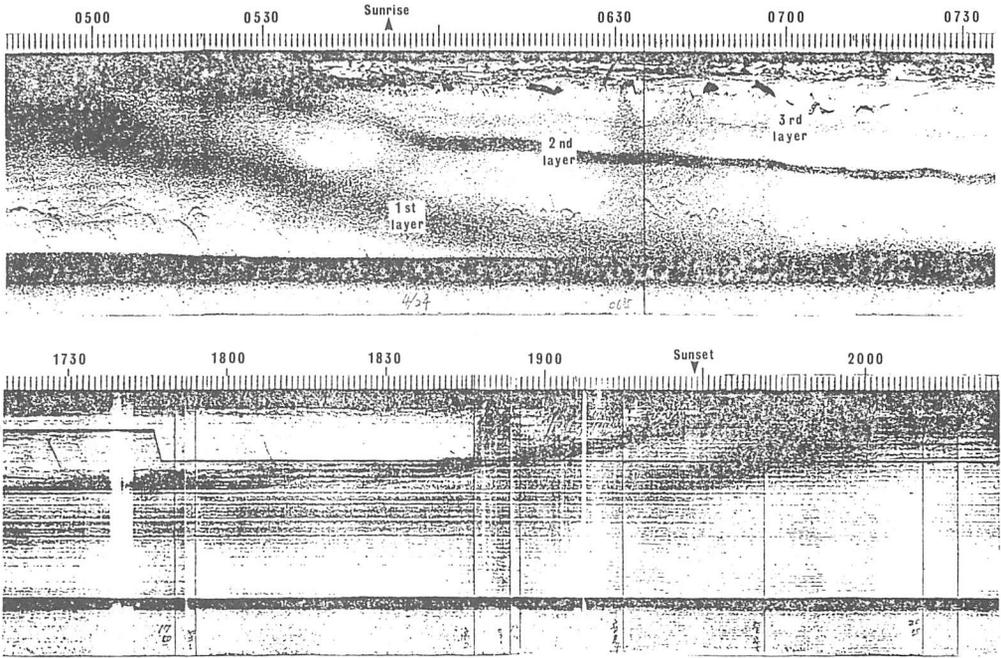


Fig. 2-5. The record examples of 50 kHz fish finder in the Kagoshima bay.
 A : The record on 24th in April, 1982
 B : The record on 11th in July, 1983

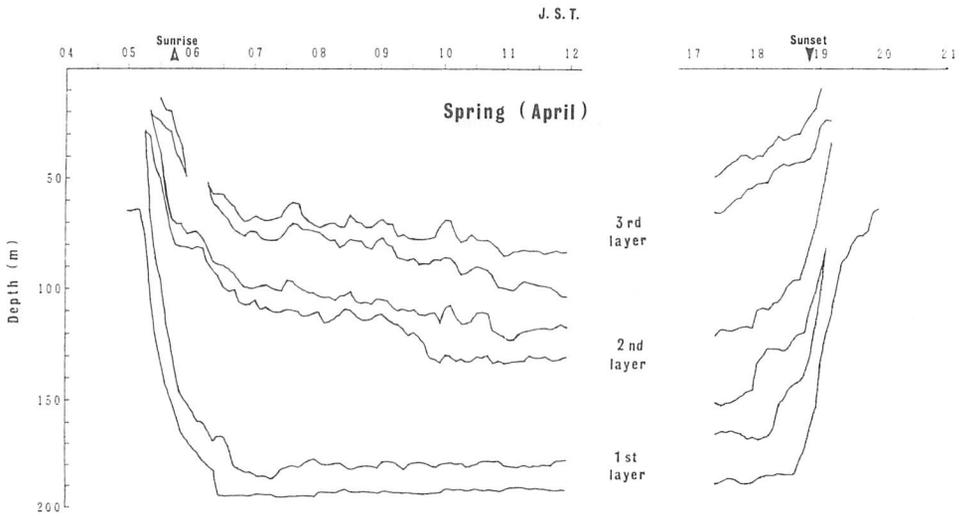


Fig. 2-6-1. Schematic representation of diurnal change of the ultrasonic scattering layers by 50 kHz fish finder in the innermost area of the Kagoshima bay in spring.

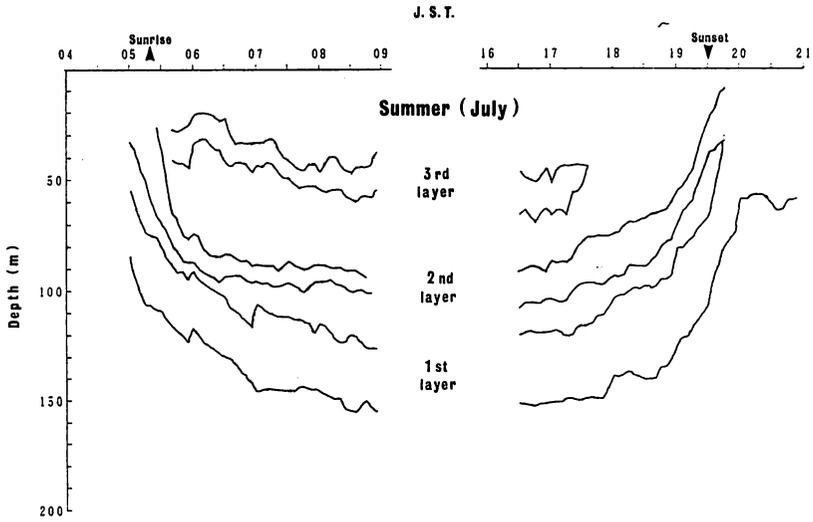


Fig. 2-6-2. Schematic representation of diurnal change of the ultrasonic scattering layers by 50 kHz fish finder in the innermost area of the Kagoshima bay in summer.

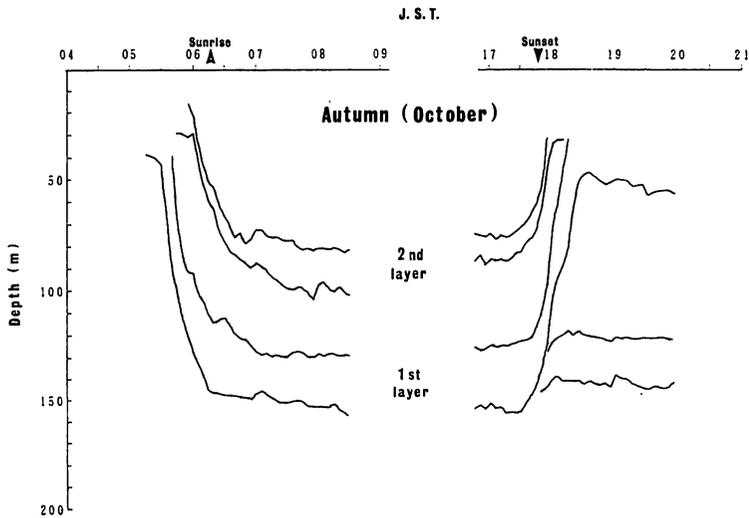


Fig. 2-6-3. Schematic representation of diurnal change of the ultrasonic scattering layers by 50 kHz fish finder in the innermost area of the Kagoshima bay in autumn.

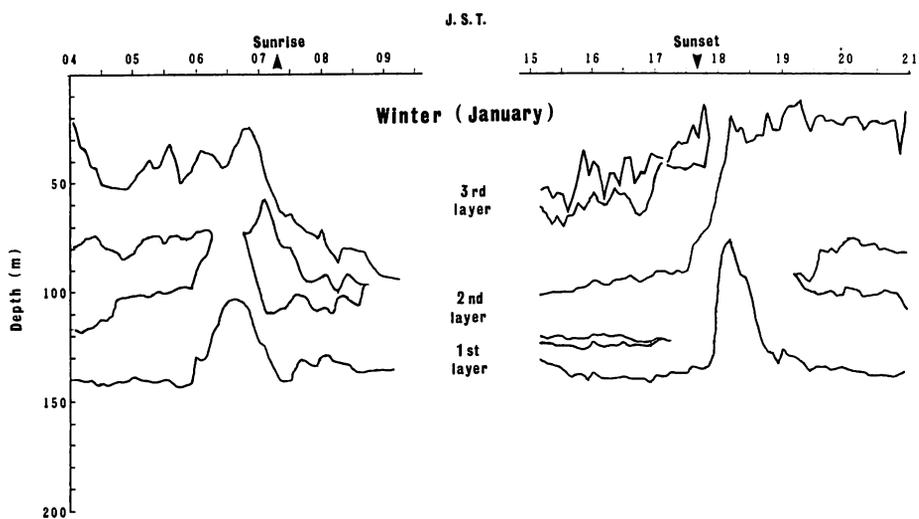


Fig. 2-6-4-a. Schematic representation of diurnal change of the ultrasonic scattering layers by 50 kHz fish finder in the innermost area of the Kagoshima bay in winter.

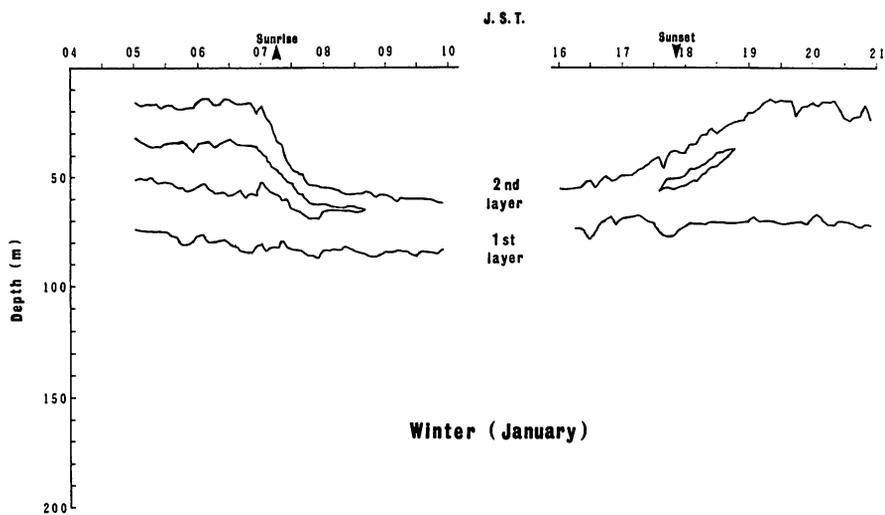


Fig. 2-6-4-b. Schematic representation of diurnal change of the ultrasonic scattering layers by 50 kHz fish finder in the innermost area of the Kagoshima bay in winter.

に変化がみられた。

第一層

夜間層の下辺の水深は約70~80mにあり、日出時前約30~40分に下降を開始する。層の厚さは約40~50mである。日出後約10分、下降開始後約1時間足らずで水深200mの海底に下辺が着底する。夕方離底するのは日没前10~15分であり、日没後約40分以下辺の水深約60mに達し上昇を終了する。

第二層

夜間層の下辺の水深は約20~30mにあり、日出前約10~15分に下降を開始する。層の厚さは約10~20m、昼間層の中心は水深約120mにある。日没前約3~4時間に上昇を開始、日没後約30分以下辺の水深は約30mに達し上昇を終了する。

第三層

1982年と1983年との記録が異なる。1983年の記録を模式図に示した。第二層より記録は少し薄いものの濃く鮮明に記録された。日出前約10~15分に下降を開始、層の厚さは約10~20m、昼間層の中心は水深80~90mにある。上昇は第二層と同様である。この記録に比し、1982年の記録によれば、第三層は記録が非常に薄く夕方近くには消滅している。Fig. 2-5の午前の記録は4月24日のものである。日出時頃第二層の上部に表れ、層の厚さは約10~20mであるが、第二層に比べ明らかにその記録の濃さが薄い。昼間における層の中心は水深約70~80mまで下降するが、その後夕方になって記録は消滅する。

ii) 夏

1982年7月8日~9日、1983年7月11日~13日 (Fig. 2-6-2) の記録について解析した。又1984年8月4日の記録も参考にした。垂直移動を行う層は春と同様三層記録された。

第一層

夜間層の下辺の水深は約50mにあり、日出前約30分に下降を開始する。層の厚さは約20~40m、約4時間後層の中心は水深約140mに達する。日没前約3~4時間に上昇を開始、日没後約30分以下辺の水深は約50mに達し上昇を終了する。

第二層

夜間層の下辺の水深は約20mにあり、日出前約15分に下降を開始する。層の厚さは10~20m、約4時間後層の中心は水深約100mに達する。日没前約3~4時間に上昇を開始、日没後約15分以下辺の水深は約20mに達し上昇を終了する。

第三層

夜間層の下辺の水深は約20mにあり、日出後約20分に記録が現れその直後下降を開始する。層の厚さは約10m、約2~3時間後層の中心は水深約50~60mに達する。日没前約2~3時間に上昇を開始、日没後10~15分以下辺の水深は約20mに達し上昇を終了するが、日没前1~2時間の間に記録が消えてしまう場合が多い。このように記録の濃さは一様に薄い場合が多かったが、1983年7月13日午前の記録のみ第二層と同程度の濃さに記録された。

iii) 秋

1982年10月13日~15日 (Fig. 2-6-3) の記録について解析した。又1981年11月12日~14日、1983年11月18日~20日、1984年11月5日~6日の記録も参考にした。垂直移動を行う層は二層記録された。

第一層

夜間層の下辺の水深は約40mにあり、日出前30～40分に下降を開始する。層の厚さ20～30m、下降開始後約2時間で層の中心は水深約140mに達する。日没前約30分に上昇を開始、日没後約40分で下辺の水深は約40mに達し上昇を終了する。

第二層

夜間の下辺は水深約20mにあり、日出前15～20分に下降を開始、層の厚さ10～20m、下降開始後約2時間で層の中心は水深80～90m付近に達する。日没前約30分に上昇を開始、日没後約15分で下辺の水深約20mとなり上昇を終了する。

10月における超音波散乱層の記録は二層であったが、11月には1981年(12日を除く)、1983年(19日、20日を除く)、1984年において三層記録された。この記録によれば第三層は日出前5～6分頃識別可能な記録として現れ、すぐに下降を開始する。層の厚さは約10m、層の中心の最も深い水深は30～70mで第二層の水深と関連して変化する。多くの場合第三層は第二層の上約20～30mにある。時として40m離れる場合も記録されたが、両者の間隔は大略一定している。昼間記録が消えてしまう場合もある。そのような場合は第二層が上昇を開始した頃再び識別可能な記録として現れ、上昇を開始、日没後約15分で第二層と合併する。しかし1984年においては昼間も消えることなく鮮明に記録された。

iv) 冬

1985年1月18日～19日(Fig. 2-6-4-a)の記録について解析した。又1984年1月26日～28日(Fig. 2-6-4-b)の記録も参考にした。垂直移動を行う層は三層記録された。

第一層

夜間層の下辺の水深は約70～80mにある。日出前40分に下降を開始する。層の厚さ15～35m、下降開始後約40分で層の中心は水深120m付近に達する。日没前約30分に上昇を開始、日没後約40分で下辺の水深70～80mとなり上昇は終了する。

第二層

夜間層の下辺の水深は、第一層と同じく約70～80mにある。日出前約20分に下降を開始、層の厚さ15～30m、下降開始後約2時間20分で層の中心は水深約100m付近に達する。そしてその下辺は第一層と合併しているような記録であった。日没前3～4時間に上昇を開始、日没後約40分で下辺の水深70～80mとなり上昇を終了する。

第三層

午前11時頃記録が現れ、層の厚さは10～20m、層の中心の水深は60～70mである。日没前3～4時間に上昇を開始、日没後約15分で下辺の水深20～30mとなり上昇を終了する。

1985年(Fig. 2-6-4-a)の模式図において、夜間における層の中心の水深が約120mにある超音波散乱層は、日出前の薄明時水深約90mまで上昇、日没後の薄明時には逆に下降している。これは第一層、第二層の記録の濃さに比べて薄く、この現象は他の季節においても時折みられた。1984年(Fig. 2-6-4-a)の模式図において、垂直移動を行う層は二層のみの記録であった。しかも第一層はその垂直移動の変化が極めて緩慢であり、昼間において第一層と第二層とが合併し、その層の厚さは約20m、層の中心は水深約70mと1985年に比し浅い水深に存在した。

湾奥海域における日周期垂直移動を行う超音波散乱層は春・夏・冬において三層、秋において二層観測された。しかしここに示した秋の例は10月の記録であり、11月においては三層観測された。逆に春において二層しか観測されなかった例もある。このように常時記録に現れるのは第一層および第二層の二層であり、第三層はその時の何らかの生物的、物理的な環境要因の変化によって出現しなかったりするものと推察する。

以上鹿児島湾 湾奥海域における各季節、各超音波散乱層の日周期垂直移動の記録について述べたが、これらを Table 2-1-1にまとめて示した。

第一層の垂直移動の型は日出前30～40分に下降を開始、三層の中で最も深い水深まで下降、そして日没前上昇を開始、日没後30～40分で上昇を終了する。層の厚さは四季を通じて30～50mの範囲にある場合が最も多く、秋・冬は薄くなる傾向にあった。夜間における下辺の水深および日中における層の中心の水深は季節により、又同一季節でも観測日により変化がみられた。又上昇開始時刻についても同様であった。

第二層の垂直移動の型は日出前10～20分に下降を開始、昼間第一層と第三層の間に位置し、日没前に上昇を開始、日没後約15分に上昇を終了する。層の厚さは10～20mである。夜間における下辺の水深は20～30mであるが昼間における層の中心の水深は第一層同様一定ではなかった。又上昇時刻についても同様であった。記録には三層の中で最も濃く記録され一見して識別できる特徴をもっている。

第三層の垂直移動の型は夜間の状態から連続して下降開始以後も濃く記録される場合もあるが、多くの場合日出時頃新たな層として第二層の上部に記録され始め数分ないし数十分後次第に記録が濃くなっていく。そして記録が現れた直後から下降を開始する。昼間および日没前記録が不鮮明となり消えてしまう場合もしばしばあった。日没前に上昇を開始、日没後10～15分で上昇を終了する。層の厚さは10～20mである。夜間における下辺の水深は約20mと推定される。昼間における層の水深は三層の中で最も浅いところに位置するがその水深には観測日の違いにより変化がみられる。又上昇開始時刻についても同様であった。第三層は湾奥海域において最も複雑な変化をすることから、その層が現れた時の記録を Fig. 2-7に示した。(A)は1982年4月23日、(B)は1983年4月27日、(C)は1983年7月13日の記録である。(A)は明らかに魚群と推定される記録が06時頃表層にあり08時頃には水深約50mまで下降している。07時頃からわずかに識別可能な層の厚さ10m弱の記録が魚群のすぐ下に現れている。すなわちこの層を追跡するように魚群も下降していると推定される記録である。(B)は07時頃水深約50mに魚群と推定される記録がみられる。それ以後も下降を続けるが08時10分頃以降短周期の上下移動(水深の変化)がなくなっている。(C)は第二層と同程度の濃さで記録された例である。このように記録を解析すれば第三層は表層の魚が魚群を形成していると推察する方が適切な場合が多いと考えられる。

昼間における三層それぞれの水深は一定していないことはすでに述べた。しかし各層間の間隔は略一定している。第一層と第二層の間隔は平均60m(ただし夏は40m)、第二層と第三層の間隔は平均30mであった。

Table 2-1-1. The character of vertical migration of the ultrasonic scattering layers by 50 KHz fish finder in the innermost area of the Kagoshima bay.

	Spring (3 layers)			Summer (3 layers)			Autumn (2 layers or 3 layers)			Winter (2 layers or 3 layers)		
	1st layer	2nd layer	3rd layer	1st layer	2nd layer	3rd layer	1st layer	2nd layer	3rd layer	1st layer	2nd layer	3rd layer
The depth of lower limb in the nighttime	70~80m	20~30m	—	50m	20m	20m	40m	20m	—	70~80m	70~80m	20~30m
The time of descent beginning	30~40min. before SR	10~15min. before SR	10~15min. before SR	30min. before SR	15min. before SR	20min. after SR	30~40min. before SR	15~20min. before SR	5~6min. before SR	40min. before SR	20min. before SR	—
The thickness of layer	40~50m	10~20m	10~20m	20~40m	10~20m	10m	20~30m	10~20m	10m	15~35m	15~30m	10~20m
The depth of layer in the daytime	200m sea bottom	120m	80~90m	140m	100m	50~60m	140m	80~90m	30~70m	120~130m	100~110m	60~70m
The time of ascent beginning	10~15min. before SS	3~4h. before SS	3~4h. before SS	3~4h. before SS	3~4h. before SS	2~3h. before SS	30min. before SS	30min. before SS	30min. before SS	30min. before SS	3~4h. before SS	3~4h. before SS
The time of ascent finish	40min. after SS	30min. after SS	—	30min. after SS	15min. after SS	10~15min. after SS	40min. after SS	15min. after SS	15min. after SS	40min. after SS	40min. after SS	15min. after SS

SR sunrise
SS sunset

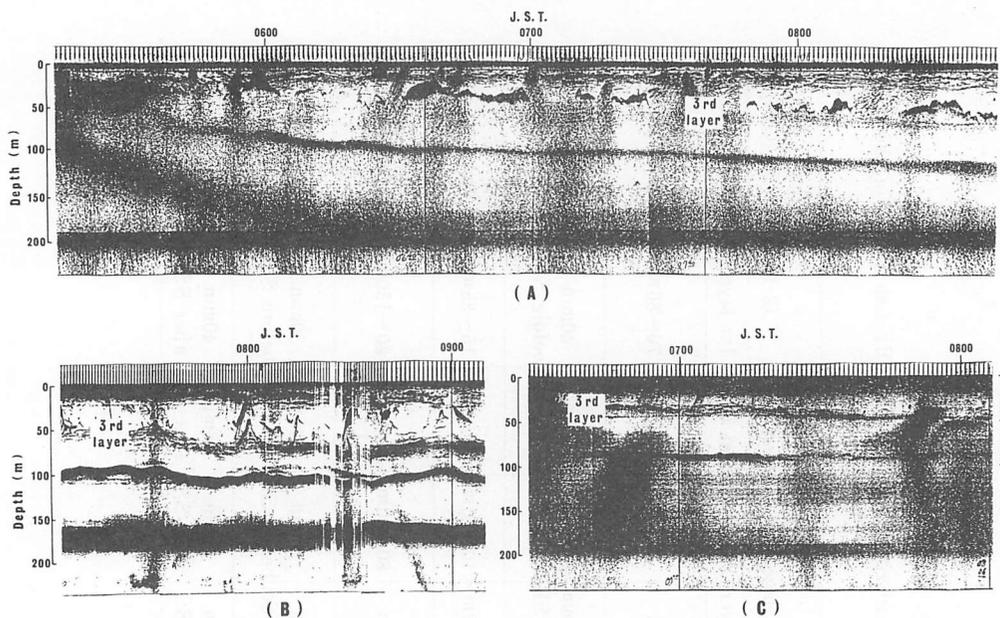


Fig. 2-7. The records of the 3rd layer by 50 kHz fish finder.
 A: The record on 23rd in April, 1982.
 B: The record on 27th in April, 1983.
 C: The record on 13th in July, 1983.

ここで湾奥海域における各超音波散乱層の日周期垂直移動の一年を通じての一般的傾向を示す。

	第一層	第二層	第三層
夜間下辺水深	変化大	20~30m	20m
下降開始時	日出前 30~40分	日出前 10~20分	日出時頃記録 され始めた頃
層の厚さ	30~50m	10~20m	10~20m
昼間の水深	最も深い	第一層と 第三層の間	最も浅い
上昇開始時	日没前 変化大	日没前 変化大	日没前 変化大
上昇終了時	日没後 30~40分	日没後 15分	日没後 10~15分

2. 3. 2 湾中央海域における記録

湾中央海域における50 kHzの魚群探知機により記録された超音波散乱層の春・夏・秋・冬各季節の記録を湾奥海域と同様模式図により Fig. 2-8-1, Fig. 2-8-2, Fig. 2-8-3, Fig. 2-8-4にそれぞれ示した。

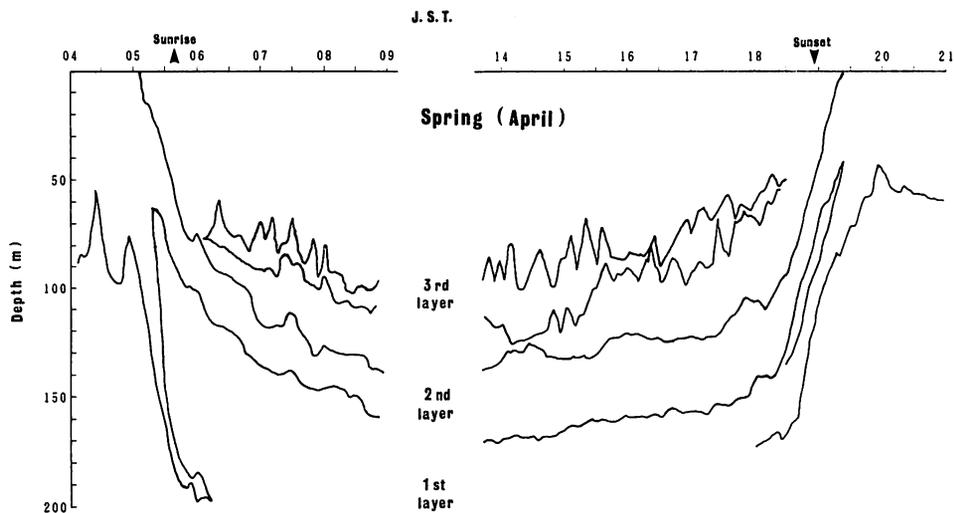


Fig. 2-8-1-a. Schematic representation of diurnal change of the ultrasonic scattering layers by 50 kHz fish finder in the middle area of the Kagoshima bay in spring.

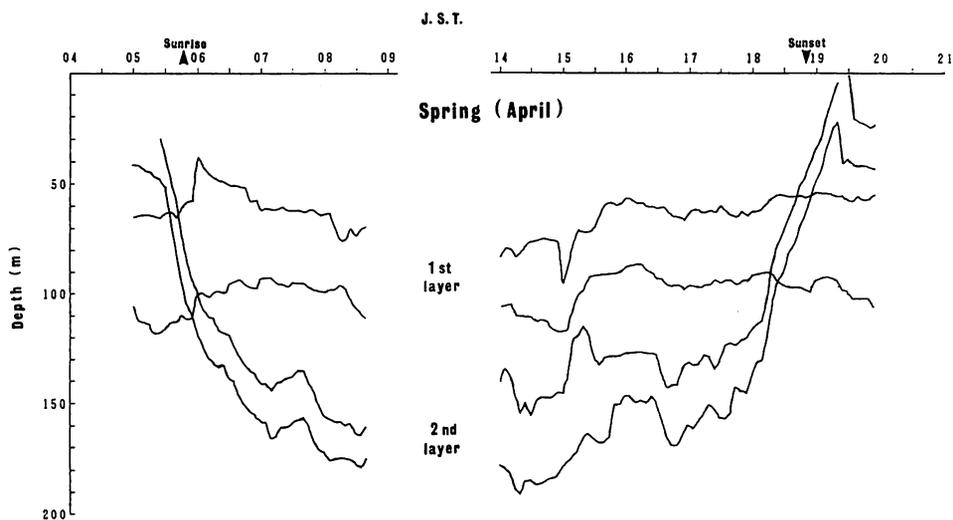


Fig. 2-8-1-b. Schematic representation of diurnal change of the ultrasonic scattering layers by 50 kHz fish finder in the middle area of the Kagoshima bay in spring.

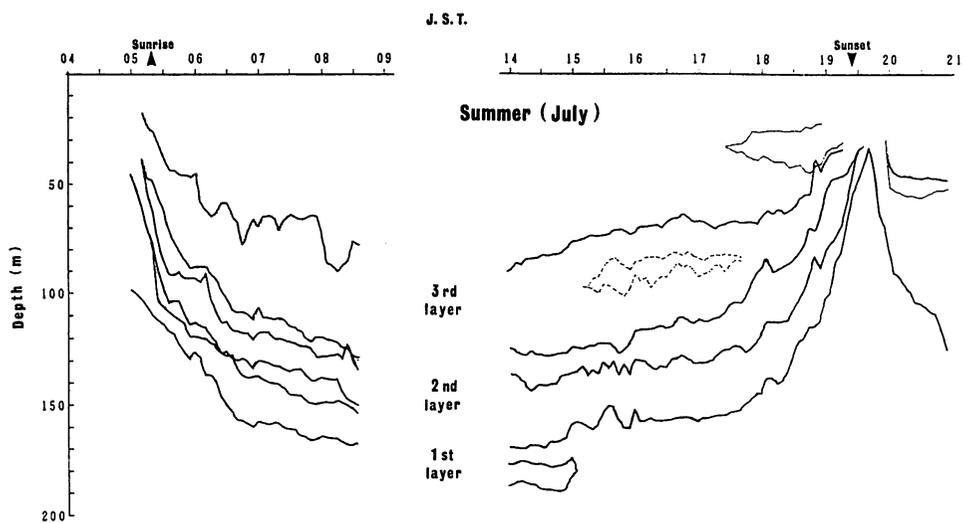


Fig. 2-8-2. Schematic representation of diurnal change of the ultrasonic scattering layers by 50 kHz fish finder in the middle area of the Kagoshima bay in summer.

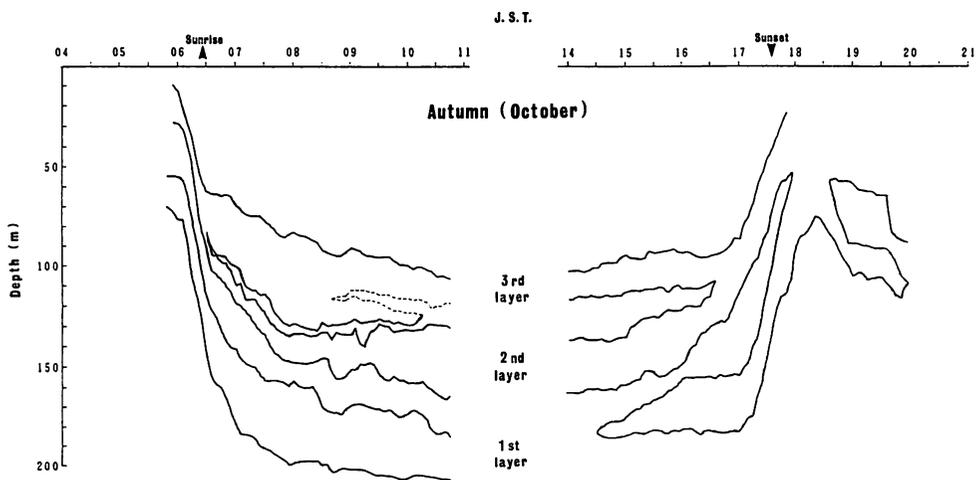


Fig. 2-8-3. Schematic representation of diurnal change of the ultrasonic scattering layers by 50 kHz fish finder in the middle area of the Kagoshima bay in autumn.

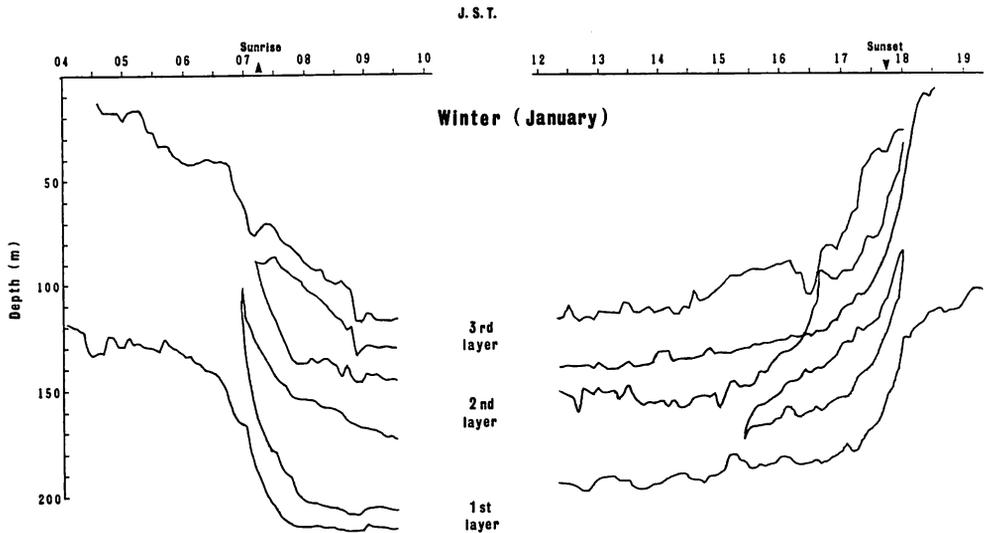


Fig. 2-8-4. Schematic representation of diurnal change of the ultrasonic scattering layers by 50 kHz fish finder in the middle area of the Kagoshima bay in winter.

i) 春

1985年4月25日～27日 (Fig. 2-8-1-a) の記録について解析した。又1984年4月19日～21日 (Fig. 2-8-1-b) の記録も参考にした。垂直移動を行う層は三層記録された。しかし1984年においては二層の記録しか得られなかった。

第一層

夜間層の下辺は水深60～100mにあり、日出前30～40分に下降を開始する。層の厚さは20～40m、昼間は海底に着底した。上昇開始は明確ではなく水深150m付近に第二層の下辺と明確に分離されない状態で層の厚さ約30mで記録に現れ、日没後約1時間でその下辺水深約40mで上昇を終了する。

第二層

夜間層の下辺は水深30～40mにあり、日出前約20分に下降を開始する。層の厚さは20～30m、昼間層の中心は水深約150mである。日没前45分には上昇を開始、日没後約25分に水深約25mに達し上昇を終了する。記録は濃く鮮明であった。

第三層

夜間における水深を記録から読みとることができなかった。日出前第二層が下降を開始した時その上辺に現れ、その後10～15分に第二層と完全に分離し下降する。層の厚さは10～30m、昼間層の中心は水深約100mにある。日没前約45分には上昇を開始し日没後数分で第二層の上辺と合併する。

1985年の観測においては上記したごとく三層記録されたが、1984年4月19日～21日の記録

は二層しか記録されなかった。1984年の記録 (Fig. 2-8-1-b) によれば第一層は辺の輪郭がぼやけて不鮮明であり、層の厚さは30~40m、昼間の層の中心は水深約125mであった。又第二層は濃く鮮明に記録され層の厚さ10~30m、昼間の層の中心は水深170~190mであり、上昇時、下降時とも第一層を突き抜けて垂直移動を行った。この型は他の季節においても湾奥海域においてもみられなかった。

ii) 夏

1984年7月10日~12日 (Fig. 2-8-2) の記録について解析した。垂直移動を行う層は三層記録された。

第一層

特に日出頃の記録が不鮮明であり下降開始時刻は判然としない。しかし日出後1時間~2時間経過後、層の水深150m付近で急に鮮明な記録となる。層の厚さは10~30mである。第一層の上辺は第二層下辺の下約10mにあり、上昇時には第二層に吸収されたような記録となるかもしくは消滅する。

第二層

夜間層の下辺は水深約30mにあり、日出前約20分に下降を開始する。層の厚さは10~20m、昼間層の中心は水深100~140mにある。上昇開始時刻は明確ではないが、日没後約20分に下辺の水深約25mに達し上昇を終了する。この項では図に示さなかったが、11日09時頃、下降中の層の中心水深は125m付近にあるが10時頃急激に上昇を始め水深約90mに達する。昼間におけるこのような急激な現象は過去に例を見ない。この異常ともみえる現象については「第3章 海水中の照度と超音波散乱層の垂直移動」で考察する。

第三層

夜間層の下辺は約30mにあり、日出前約10分に下降を開始する。層の厚さは10~20m、昼間層の中心は水深50~100mにある。上昇開始時刻は第二層同様明確ではない。日没後約10分で下辺の水深は約25mに達し上昇を終了する。なお11日10時頃急激な上昇の記録を見たのは第二層同様であり同じく「第3章 海水中の照度と超音波散乱層の垂直移動」で考察する。

iii) 秋

1984年10月24日~26日 (Fig. 2-8-3) の記録について解析した。垂直移動を行う層は三層記録された。

第一層

夜間の下辺は50~60mにあり、日出前約40分に下降を開始する。層の厚さは30~40mであった。下降開始後約3時間40分で下辺が着底する。着底後層全体が海底に密着し層の記録が消えたかのような場合と、下辺のみ着底し層の厚さ約30mに記録される場合とがみられる。日没前3時間~3時間半に下辺が離底し、日没後35~40分に下辺水深50~60mに達し上昇を終了する。

第二層

夜間層の下辺は約30m付近にあり、日出前20~25分に下降を開始する。層の厚さは約20m、昼間層中心の水深は約150mである。日没後約20分に下辺水深30~40mで上昇を終了する。

第三層

下降開始およびその直後は第二層と合併しており、日出後5~15分に第二層から分離し

数m隔てて存在するか又は第二層の上辺に接触する。よって両層は完全に分離しているとは認め難い点もあり、上部が薄く下部が濃く記録された層の厚さ45~50mの一つの層と判断することも可能と思われる。しかし24日の午後の記録は第二層の上辺と第三層の下辺は約20m離れており両層完全に分離している。日没前50分~1時間半に水深約100mで第二層と合併して上昇、日没後30分で上昇を終了する。

iv) 冬

1985年1月23日~25日 (Fig. 2-8-4) の記録について解析した。垂直移動を行う層は三層記録された。

第一層

夜間層の下辺は90~100mにあり、日出前約35分に下降を開始する。層の厚さは20~25m、下降開始後約1時間で下辺が着底する。昼間における状態は、海底に密着するような記録、下辺は海底に着底し層の厚さ5m程度になる記録、層全体が海底から離れている記録が得られた。日没前45分頃上昇を開始、その後上昇終了と推定される頃記録は水深約100mまで濃く記録され、その時刻を明確にすることはできなかった。

第二層

夜間第一層とともに水深90~120mまで濃く記録され、層の下辺を知ることはできない。日出前25分に下降を開始する。層の厚さは20~30m、昼間層の中心は水深約160mにある。日没前2時間15分には上昇を開始、日没後約35分で上昇を終了する。

第三層

第二層の中心が約120mまで下降した日出数分後、水深約80mに層が記録される。当初層の厚さは約10mであるがその後しだいに厚くなり約1時間後に20~30mとなる。昼間における層の中心は水深約130mである。日没前1時間15分頃上昇を開始するが上昇終了前記録が薄くなり終了時の判定は困難であった。

湾中央海域における日周期垂直移動を行う超音波散乱層は四季を通じて三層記録された。ただし1984年4月19~21日、1985年10月22日~24日は二層のみの記録であった。

以上鹿児島湾中央海域における各季節、各超音波散乱層の日周期垂直移動の記録について述べたが、これらを Table 2-1-2 にまとめて示した。

第一層の垂直移動の型は日出前35~40分に下降を開始、三層の中で最も深い水深まで下降する。層の厚さは30~40mである。日没前1時間~3時間に上昇を開始し日没後約40分で上昇を終了する。しかし1984年の春は他の季節と比べ全く異質な型を示したし、夏においては昼間その記録が消滅するなどの現象がみられ複雑な様相を呈した。

第二層の垂直移動の型は日出前約20分に下降を開始、昼間第一層と第三層の間に位置する。日没前急激な上昇を開始し、日没後20~40分には上昇を終了する。層の厚さは10~30mである。夜間における下辺の水深は20~30mであった。記録は常に濃く記録された。

第三層の垂直移動の型は日出後5~15分に第二層から分離又はその時点で新しく層が発生するような記録となり、層の厚さ10~20mで下降する。他の層に比べて層全体の短時間における上下運動が激しく湾奥海域における第三層の特徴と一致する。そして最も浅い水深に位置する。日没前上昇を開始し、日没後10~20分で上昇を終了する。夜間における下辺の水深

Table 2-1-2. The character of vertical migration of the ultrasonic scattering layers by 50 KHz fish finder in the middle area of the Kagoshima bay.

	Spring (2 layers or 3 layers)			Summer (3 layers)			Autumn (3 layers)			Winter (3 layers)		
	1st layer	2nd layer	3rd layer	1st layer	2nd layer	3rd layer	1st layer	2nd layer	3rd layer	1st layer	2nd layer	3rd layer
The depth of lower limb in the nighttime	40~100m	25~40m	—	—	25~30m	25~30m	50~60m	30m	—	90~100m	—	—
The time of descent beginning	30~40min. before SR	20min. before SR	5~10min. before SR	—	20min. before SR	10min. before SR	40min. before SR	20~25min. before SR	5~15min. after SR	35min. before SR	25min. before SR	—
The thickness of layer	20~40m	20~30m	10~30m	10~30m	10~20m	10~20m	30~40m	20m	10~20m	20~25m	20~30m	10~30m
The depth of layer in the daytime	200m sea bottom	150m	100m	180m	100~140m	50~100m	205m sea bottom	150m	110m	215m sea bottom	160m	130m
The time of ascent beginning	—	45min. before SS	45min. before SS	—	—	—	3h. 30min. before SS	3h. before SS	1h. 30min. before SS	45min. before SS	2h. 15min. before SS	1h. 15min. before SS
The time of ascent finish	60min. after SS	25min. after SS	5~6 min. after SS	—	20min. after SS	10min. after SS	35~40min. after SS	20min. after SS	30min. after SS	—	35min. after SS	—

SR sunrise
SS sunset

は第二層と同様20～30mであった。昼間における三層それぞれの水深は四季を通じて一定していない。又第一層と第二層および第二層と第三層が互いに層の上辺と下辺の接触および層そのものが合併するような現象もみられた。又第一層は海底に達し、層全体が海底に密着するような記録もみられた。

ここで湾中央海域における各超音波散乱層の日周期垂直移動の一年を通じての一般的傾向を示す。

	第一層	第二層	第三層
夜間下辺水深	変化大	20～30m	20～30m
下降開始時	日出前 35～40分	日出前 20分	日出後5～15分頃 記録され始めた時
層の厚さ	30～40m	10～30m	10～20m
昼間の水深	最も深い	第一層と 第三層の間	最も浅い
上昇開始時	日没前 変化大	日没前 変化大	日没前 変化大
上昇終了時	日没後 40分	日没後 20～40分	日没後 10～20分

2. 4 垂直移動速度

超音波散乱層の記録から、湾奥海域および湾中央海域の季節ごと各層の垂直移動速度を求めた。両海域とも各層の一般的な垂直移動速度の変化は次のようである。下降速度は下降開始直後の日出前後に最大値を示し、その後ゆるやかに下降、昼間はある一定の水深で停止する。上昇速度は上昇開始後暫くゆるやかな速度であるが、層の水深が浅くなるに従い速くなり、そして日没前後に最大値を示す。

Table 2-2に春・夏・秋・冬における各層の数回にわたる観測例の日出没前後における最も大きな垂直最大移動速度（下降最大速度、上昇最大速度）を示した。Aは湾奥海域、Bは湾中央海域である。

I) 湾奥海域

i) 春

垂直最大移動速度は第一層、第二層、第三層の順に大きな値を示した。下降速度、上昇速度の差は第二層が最も大きく0.8m/分、第三層が0.1m/分、第一層は同じ値を示した。これら垂直最大移動速度は観測年により、その速度に変動があったので1982年、1983年における下降、上昇最大移動速度の平均値を次に示す。単位はm/分である。

	第一層		第二層		第三層	
	下降	上昇	下降	上昇	下降	上昇
1982年	1.5	2.5	1.7	1.6	0.3	0.3
1983年	3.3	3.1	2.3	1.8	0.8	0.7

各層全て1983年における値が大きくなった。又第一層の値の変化は他の層に比べ顕著であった。

ii) 夏

垂直最大移動速度は第二層, 第一層, 第三層の順に大きな値を示した。第二層の下降速度が最も大きな値を示した。下降速度, 上昇速度の差は第二層が最も大きく0.7m/分, 第一層0.5m/分, 第三層は同じ値を示した。

次に春と同様に1982年, 1983年における下降, 上昇最大移動速度の平均値を示す。単位はm/分である。

	第一層		第二層		第三層	
	下降	上昇	下降	上昇	下降	上昇
1982年	1.0	1.4	2.0	1.0	0.5	0.4
1983年	0.6	1.0	0.1	1.0	0.3	0.4

各層1982年の値が大きくなる傾向にあった。

iii) 秋

垂直最大移動速度は第一層, 第二層, 第三層の順に大きな値を示した。第一層の下降速度が最も大きな値を示した。下降速度, 上昇速度の差は第一層1m/分, 第二層0.9m/分であった。

1983年10月の観測がないので両年の比較をすることはできないが, 1983年11月, 1984年11

Table 2-2. The maximum velocity of vertical movement of ultrasonic scattering layers.

A : In the innermost area of the Kagoshima bay.

B : In the middle area of the Kagoshima bay.

A

	1st layer		2nd layer		3rd layer	
	descent	ascent	descent	ascent	descent	ascent
Spring	3.6	3.6	2.7	1.9	1.0	0.9
Summer	1.5	2.0	3.0	1.7	0.6	0.6
Autumn	4.0	3.0	1.8	2.7	(0.5)	(0.7)
Winter	1.4	2.4	1.2	1.1		0.3

(Unit m/min.)

B

	1st layer		2nd layer		3rd layer	
	descent	ascent	descent	ascent	descent	ascent
Spring	4.0	2.2	1.3	1.7	0.3	0.4
Summer	2.0	2.7	2.3	2.6	0.8	0.9
Autumn	2.5	2.9	2.8	2.6	2.0	1.4
Winter	2.4	2.4	2.5	2.8	0.5	1.0

(Unit m/min.)

月の観測があるのでその下降、上昇最大移動速度の平均値を次に示した。単位はm/分である。

	第一層		第二層		第三層	
	下降	上昇	下降	上昇	下降	上昇
1982年(10月)	3.7	2.6	1.5	2.3	0.5	0.6
1983年 1984年(11月)	0.5	2.0	0.5	0.7	0.5	0.2

第一層の下降速度および第二層の上昇速度に大きな相違がみられた。

iv) 冬

垂直最大移動速度は第一層、第二層、第三層の順に大きな値を示した。第一層の上昇速度が最も大きな値を示した。下降速度、上昇速度の差は第一層1m/分、第二層0.1m/分であった。

次に1984年、1985年における下降、上昇最大移動速度の平均値を示す。単位はm/分である。

	第一層		第二層	
	下降	上昇	下降	上昇
1984年	0.1	0.2	0.6	0.3
1985年	1.4	2.4	1.2	1.1

II) 湾中央海域

i) 春

垂直最大移動速度は第一層、第二層、第三層の順に大きな値を示した。第一層の下降速度が最も大きな値を示した。下降速度、上昇速度の差は第一層が最も大きく1.8m/分、次に第二層0.4m/分、第三層0.1m/分であった。

次に1984年、1985年における下降、上昇最大移動速度の平均値を示す。単位はm/分である。

	第一層		第二層		第三層	
	下降	上昇	下降	上昇	下降	上昇
1984年	2.3	2.2	0.1	0.1		
1985年	2.7	1.7	1.2	1.8	0.3	0.3

ii) 夏

垂直最大移動速度は第一層、第二層、第三層の順に大きな値を示した。第一層の上昇速度が最も大きな値を示した。下降速度、上昇速度の差は第一層が最も大きく0.7m/分、第二層0.3m/分、第三層0.1m/分であった。

次に1984年、1985年における下降、上昇最大移動速度の平均値を示す。単位はm/分である。

	第一層		第二層		第三層	
	下降	上昇	下降	上昇	下降	上昇
1984年	1.9	1.5	1.5	0.9	0.7	0.9
1985年	1.7	2.7	2.0	2.0	0.4	

iii) 秋

垂直最大移動速度は第一層、第二層、第三層の順に大きな値を示した。下降速度、上昇速度の差は第三層が最も大きく0.6m/分、第一層0.4m/分、第二層0.2m/分であった。

次に1984年、1985年における下降、上昇最大移動速度の平均値を示す。単位はm/分である。

	第一層		第二層		第三層	
	下降	上昇	下降	上昇	下降	上昇
1984年	2.2	2.1	1.4	2.0	2.0	1.4
1985年	2.1	2.7	2.7	2.6		

iv) 冬

垂直最大移動速度は第一層と第二層が最も大きく、かつ両者大略同じ値を示した。第三層が最も小さな値であった。下降速度、上昇速度の差は第二層が最も大きく1.0m/分、次に第一層、第二層とも0.4m/分であった。

次に1985年、1986年における下降、上昇最大移動速度の平均値を示す。単位はm/分である。

	第一層		第二層		第三層	
	下降	上昇	下降	上昇	下降	上昇
1985年	2.4	2.0	2.3	2.0	0.5	0.9
1986年	2.2	2.2	1.5	2.5		0.9

2.5 散乱強度

散乱強度 S_v (Scattering strength) は次のように定義される⁵²⁾。

$$S_v = I_{\text{scat}} / I_i \quad (2-1)$$

ここで

I_{scat} : 単位体積 (1 m³) から音源方向に単位距離 (1 m) の点の散乱波の強さ

I_i : 単位体積 (1 m³) への入射波の強さ

これを dB で表現すれば

$$SV = 10 \log S_v \quad (2-2)$$

散乱方向が音源方向すなわち後方である時特に後方散乱強度といい、本論で示す超音波散乱層の散乱強度とはこの後方散乱強度を示している。標的強度 T_s (Target strength) は次のように定義される。

$$T_s = I_r / I_i \quad (2-3)$$

ここで

I_r : 標的の仮想中心から音源方向に単位距離 (1 m) の点の反射波の強さ

I_i : 標的への入射波の強さ

これを dB で表現すれば

$$TS = 10 \log T_s \quad (2-4)$$

ここに示した散乱強度と標的強度は同一のパラメータであり、散乱強度は現象が散乱である場合の単位体積の標的強度と等価である。

海洋において超音波散乱層の散乱強度を直接測定するのは非常に困難であるため、置換法が用いられ、一般にはマージン・テスト⁵³⁾と称せられている。

2. 5. 1 測定方法

置換法による散乱強度の測定は、オシロスコープにより標的の反射電圧を測定して求めるのが最も精度がよいとされている。しかし南星丸において超音波散乱層からの反射信号をオシロスコープにより観察したところ、信号の電圧変動が大きく、又オシロスコープ上の信号と魚群探知機に記録される信号とを対比させることが困難であった。よって洋上においてしばしば採用される魚群探知機の記録紙上の記録が、感度目盛りを下げることによって消える時の目盛りを読み取り散乱強度を求めた。又その時の置換に用いる基準標的は鉄球および海底を用いた。

このマージン・テストによる散乱強度の全ての測定は南星丸が錨泊中に行ったので、走航による減衰、雑音等に対する配慮は除去することができた。測定値の精度に影響を与えるものは次のような事項が考えられる。

- ①湿式記録紙を使用したので記録紙の乾燥度合い。
- ②魚群探知機のペン圧
- ③電源電圧の安定度・雑音
- ④超音波散乱層の記録が消えたか否かの判断（個人誤差）
- ⑤受信機感度変化特性曲線の精度
- ⑥記録が消えた時の感度目盛りの読みの精度
- ⑦置換に用いた鉄球および海底の標的強度の値

以上①～⑦各問題について次のような配慮，検討を加えてできる限り精度の良い散乱強度測定が可能となるよう考慮した。①は新しい記録紙を用いるように、②、③については常に適正であるか点検するよう配慮した。④は異なる二人の観測者が測定を行なったが、何回も反復練習を行ない個人誤差が大きくなるよう務めた。⑤は魚群探知機の製造会社に依頼して当該魚探機による精密な受信機感度変化特性曲線を得た。⑥は魚探機の増幅回路を通さず精密に較正された減衰器の外部使用により記録紙上の記録を消した時の読みを用いるのが良い方法とされているが、この使用魚探機には Plate 2-4 に示した Potentiometer (20Hp-10s,

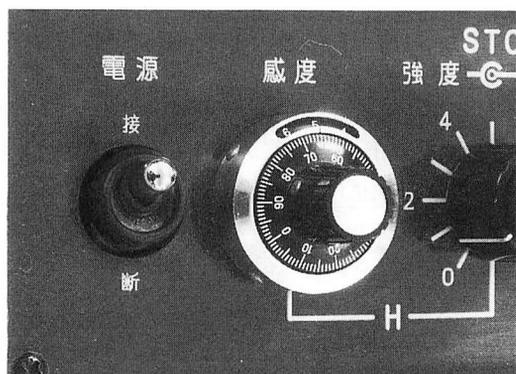


Plate 2-4. Photograph showing the sensitivity scale which used a potentiometer.

3 kΩ) を取りつけた。この抵抗器は 0 ~ 1,000 まで 1 刻みに目盛りがあり、精度よく感度目盛りを読み取ることが可能となった。⑦の鉄球は高炭素クロム鋼 (比重 7.78) 製のボールベアリング (直径 100mm) を用いた。このボールベアリングは寸法、形状に関する誤差は ± 0.05mm 以下であり、入射方向による標的強度の変化は無いものとみなした。この標的強度は次式により求めた⁵⁴⁾。

$$TS = 20 \log [|(\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2) / (\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)| \cdot a / r_1] \quad (2-5)$$

ここで TS …………… 標的強度 (dB)

ρ_1 …………… 海水の比重

c_1 …………… 海水中の音速 (m/秒)

ρ_2 …………… 鉄球の比重

c_2 …………… 鉄球中の音速 (m/秒)

a …………… 曲率半径 (cm)

r_1 …………… 標的から音源方向への単位距離 (100cm)

ρ_1 1.025, c_1 1,480, ρ_2 7.78, c_2 5,180, の各数値を代入して鉄球の標的強度を -26.7 dB と求めた。次に測定海域の海底の底質は泥であった。これは揚錨時、錨に付着してくる泥によって確認した。そして鉄球および海底のマージン・テストを実施して海底の反射強度を次のように測定した。

湾奥海域		湾中央海域	
水深	反射強度	水深	反射強度
192m	-11.9 dB	212m	-12.2 dB
196m	-12.3 dB	207m	-11.8 dB
200m	-12.0 dB	221m	-12.1 dB
201m	-11.8 dB	219m	-11.7 dB
200m	-12.2 dB	216m	-11.6 dB
200m	-12.5 dB	220m	-12.4 dB

この結果湾奥海域の平均値は -12.11 dB, 湾中央海域の平均値は -11.96 dB であったので両海域とも海底の反射強度を -12 dB とした。

その他問題となる伝搬損失は拡散損失と吸収損失に分けることができる。拡散損失は伝搬距離を r とすれば $20 \log r$ の割合で大きくなる。吸収損失は幾つかの実験式が発表されており、いずれの実験式を使用するかによってかなりの誤差が表れる。例えば、使用周波数 50 kHz, 水深 200m においては約 3.5 dB の違い⁵⁴⁾がでてくることに注意しなければならない。本論文においては、吸収係数 α の決定に次式を用いた⁵⁵⁾。

$$\alpha = 43.5 f^2 / (7,000 + f^2) + 0.00033 f^2 \quad (\text{dB/km}) \quad (2-6)$$

ただし f は使用周波数 (kHz) である。

2. 5. 2 測定結果

各層別のマージン・テストの結果を Fig. 2-9-1, Fig. 2-9-2, Fig. 2-9-3, Fig. 2-9-4 に示した。Fig. 中各プロットされた点からそれぞれ完全反射曲線に至る長さに相当する dB が散乱強度となる。これら各層別に平均値を求めて Table 2-3 に示した。

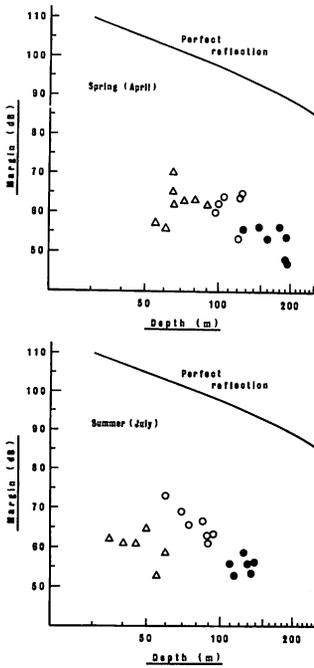


Fig. 2-9-1. The results of the margin test of scattering layers by 50 kHz fish finder in the innermost area of the Kagoshima bay.
 ●...1st layer
 ○...2nd layer
 △...3rd layer

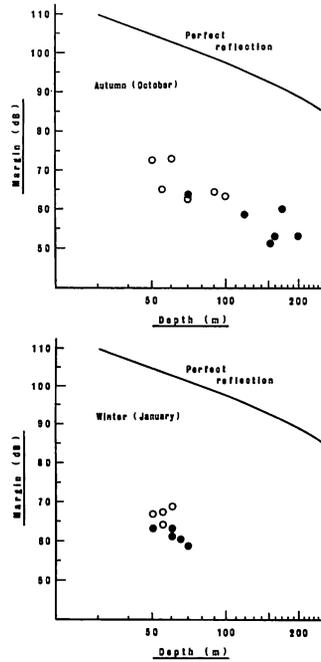


Fig. 2-9-2. The results of the margin test of scattering layers by 50 kHz fish finder in the innermost area of the Kagoshima bay.
 ●...1st layer
 ○...2nd layer
 △...3rd layer

I) 湾奥海域

i) 春

散乱強度は第二層，第三層，第一層の順に大きな値を示した。しかし第三層は1982年の測定では-45.3 dB と小さな値を示した。第一層と第二層の差は3.2 dB，第二層と第三層との差は1.6 dB であった。

ii) 夏

散乱強度は第二層，第一層，第三層の順に大きな値を示した。第一層と第二層の差は5.7 dB，第二層と第三層の差は11.4 dB であった。

iii) 秋

散乱強度は第二層が第一層より2.1 dB 大きな値を示した。又1983年，1984年の11月には第三層の記録が現れ，その散乱強度は-36.1 dB であった。

iv) 冬

散乱強度は第二層が第一層より4.4 dB 大きな値を示した。

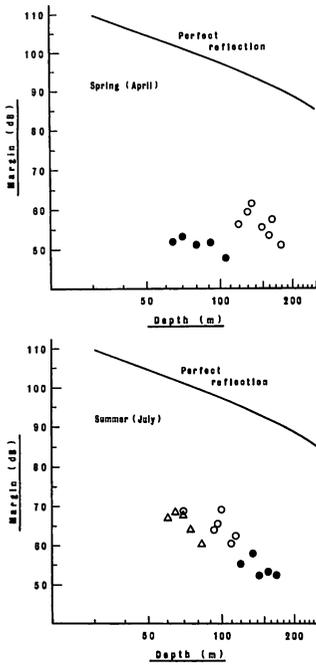


Fig. 2-9-3. The results of the margin test of scattering layers by 50 kHz fish finder in the middle area of the Kagoshima bay.
 ●...1st layer
 ○...2nd layer
 △...3rd layer

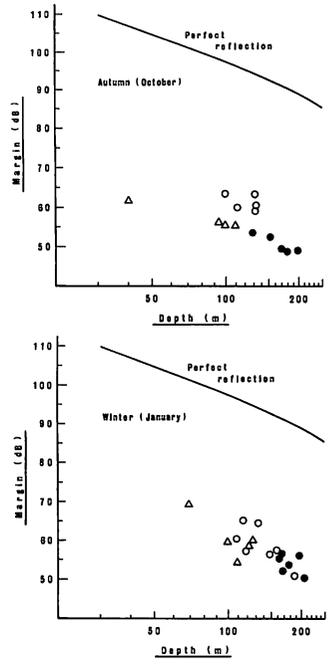


Fig. 2-9-4. The results of the margin test of scattering layers by 50 kHz fish finder in the middle area of the Kagoshima bay.
 ●...1st layer
 ○...2nd layer
 △...3rd layer

湾奥海域における散乱強度は一年を通じて、第二層が最も強く、その平均値は-35.0 dB、第一層の平均値は-38.7 dBであった。しかし第三層については4月11日にみられるように表層魚が群を形成するような記録がみられた。そしてこの層の両季節の散乱強度平均値は-36.3 dBであり第二層と略同じ値を示した。各季節における特徴は顕著でないが、冬季において第一層、第二層とも他の季節より約2 dB値が小さくなる傾向がみられた。

II) 湾中央海域

i) 春

散乱強度は第二層が第一層より12.1 dB 大きな値を示した。

ii) 夏

散乱強度は第二層、第三層、第一層の順に大きな値を示した。第一層と第二層の差は6.2 dB、第二層と第三層の差は2.3 dBであった。

iii) 秋

散乱強度は第二層が最も強く、第一層、第三層の順に大きな値を示した。第一層と第二層の差は7.0 dB、第二層と第三層の差は8.5 dBであった。

Table 2-3. The scattering strength of the ultrasonic scattering layers by 50 kHz fish finder.

A : In the innermost area of the Kagoshima bay.

B : In the middle area of the Kagoshima bay.

A

	1st layer	2nd layer	3rd layer
Spring	-38.1	-34.9	-36.5
Summer	-39.8	-34.1	-45.5
Autumn	-36.9	-34.8	
Winter	-41.2	-36.8	
The mean value	-38.7	-35.0	

(Unit dB)

B

	1st layer	2nd layer	3rd layer
Spring	-48.8	-36.7	
Summer	-39.0	-32.8	-35.1
Autumn	-41.0	-34.0	-42.5
Winter	-36.4	-35.0	-36.5
The mean value	-39.5	-34.4	-37.1

(Unit dB)

iv) 冬

散乱強度は第二層が最も強く、第一層、第三層は略同じ値を示し、第二層との差はそれぞれ1.4 dB, 1.5 dBであった。

湾中央海域における散乱強度は一年を通じて第二層が最も強く、その年平均値は-34.4 dBであった。第一層は春においてその値は最も小さく、冬最大値を示した。第一層、第三層の年平均値はそれぞれ-39.5 dB, -37.1 dBであった。

湾奥海域、湾中央海域両海域とも第二層の散乱強度が最も強い傾向にあった。しかし各層とも顕著な季節変化はみられなかった。ただ湾奥海域においては冬季、湾中央海域では春季その値が小さくなる傾向にあった。散乱強度の測定誤差を考慮し、より正確な値を得るため、各層毎の測定は数回行った。その測定値の偏差は Fig. 2-9に示したように数 dB に及ぶ例がしばしばみられた。これは測定誤差のみではなく、超音波散乱層が垂直移動を行う時、その層を構成する生物の群密度が時間経過とともに変動しているものと推察される。

2. 6 超音波散乱層の特異な記録

各季節に記録された代表的な超音波散乱層の垂直移動は「2. 3 湾奥・湾中央海域における記録」の項において模式図として表わした。しかし各層の垂直移動を行なう状態は非常に複雑な様相を呈しており、同季節においても全く同一の垂直移動を常に繰り返しているわけではない。よってこの項では異質な垂直移動の記録例を示した。

I) 下降時の記録

Fig. 2-10の A は1982年5月24日、湾奥海域における記録である。一つの層から波状的に急降下が繰り返され、やがて完全に二つの層に分離する例である。

この日の日出時刻は05時16分である。水深50mにあった超音波散乱層は日出後30分の05時46分に第一陣が、その後06時33分までの47分間に10分の間隔を置かず8~10回急降下が繰り返され、06時14分頃、一つの層であったものが完全に二つの層に分離し、その後昼間ずっと二層に分離したままであった。この時の垂直最大移動速度は約10m/分に達し、Table 2-2に示したどの値よりも大きかった。

Fig. 2-10の B は1984年7月12日湾奥海域における記録である。表層から波状的に急降下したのもに加え、非常に厚い層を形成するが、間もなく層の厚さは約1/4位となる。層を構成する生物と推察されるものが、この層を離れて下層へあるいは上層へ垂直移動したと推察される記録が無いにもかかわらず、その層の厚さが薄くなった例である。

日出前約15分に下降を開始した層は、表層から1分を過ぎない間隔で波状的に急降下することにより、その層の厚さは約35mとなった。しかし下降開始後約25分でそれは10m以下と急激に層の厚さは減少した。この時厚い層の散乱強度は-36.5 dB、薄い層の散乱強度は-33.0 dBであった。このことから層の厚さが薄くなったのはこの層を構成する生物がより濃密に凝集したためと推定される。なお水深65m付近の横線は別目的で水中音響測定に使用した水中マイクロホンからの反射記録である。

II) 上昇時の記録

Fig. 2-11の A は1982年10月14日湾奥海域における記録である。上の層が鮮明に三日月状に記録された例である。

Fig. 2-11の B は1984年7月12日湾中央海域における記録である。上の層が波状に記録された例である。

III) その他の記録

Fig. 2-12は1982年4月23日湾奥海域における記録である。これは湾奥海域特有の記録であり、Fig. 2-11の A にある17時30分頃海底から垂直に立ち昇っている記録と同種のものである。これは地元漁業従事者がいう“タギリ”現象の記録である。この現象は鹿児島湾 湾奥海域だけにみられるもので海底噴気孔からガス（主として二酸化炭素）が噴出することを言っている。この噴気孔ガスの気泡は南星丸錨泊中、過去何回となく目撃することができた。船上からの観察によれば、水面まで上昇した気泡の直径は数mmから大きくて2cm程度で海面直径10~20m程度の水域に無数に出てくるといふ場合が多かった。この噴気孔ガスが紙面一杯に記録され目的とする記録がマスクされる現象がみられた。このようにタギリ現象は魚群探知機の記録として特異なパターンを示し、この記録の収集、解析により、新たな海底火山

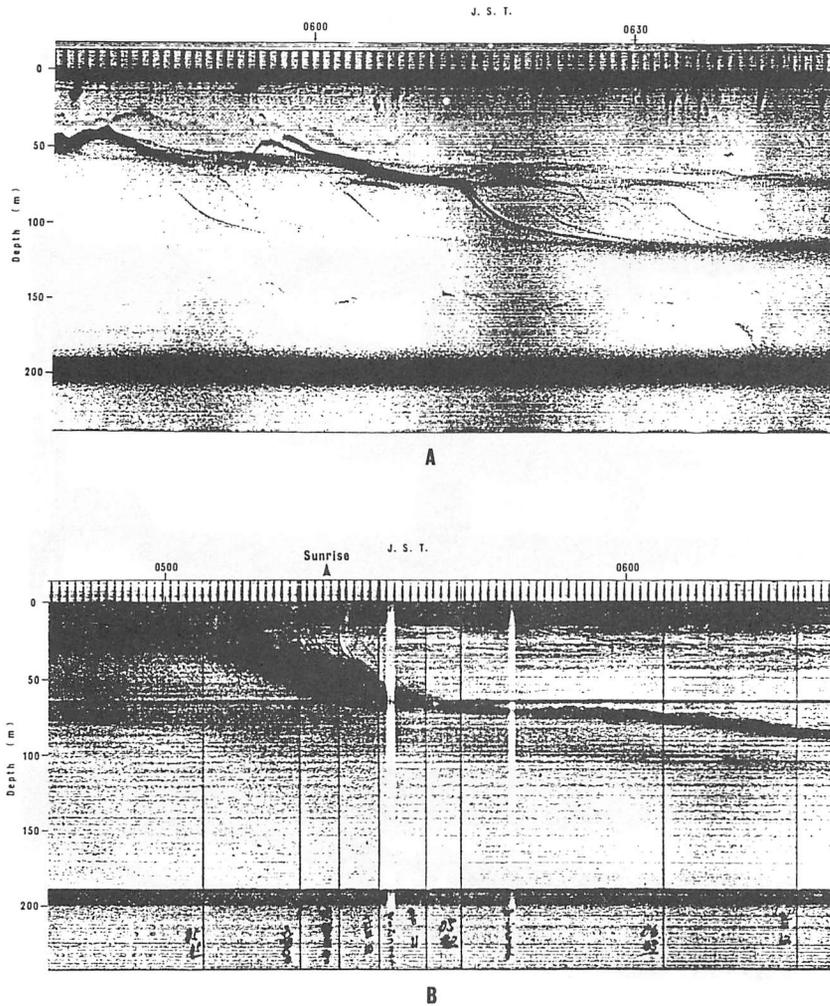


Fig. 2-10. The peculiar record by 50 kHz fish finder when the ultrasonic scattering layers were descending.

- A: The record on 24th in May, 1982
 B: The record on 12th in July, 1984

の発見，地殻変動あるいは火山活動の予知に利用できるものと考えられる。

Fig. 2-13は1975年3月30日06時から06時40分の間，鹿児島大学実習船かごしま丸（1,038 G. T.）により湾口海域から湾中央海域に向けて約12ノットの速力で航行中得られた記録である。魚群探知機は Ground Ace FTG 222-A 型（古野電気株式会社），周波数は200 kHzであった。この記録は Fig. 2-14に示したように筆者が東シナ海において魚群探知機の記録として得た超音波散乱層の内部波型波動記録²²⁾のパターンと酷似している。水深約100mの湾口海域海底近くに C タイプ，水深約150~200mの湾中央海域には B タイプおよび C タイプ

イブが記録された。この日の日出は06時10分、月齢17.1で月没07時44分であった。又満潮は08時35分で、この魚群探知機記録時の潮流は北流すなわち湾口海域から湾中央海域へ方向（記録紙の左から右方向へ）、約0.5～1ノットの流速であったと推定される。

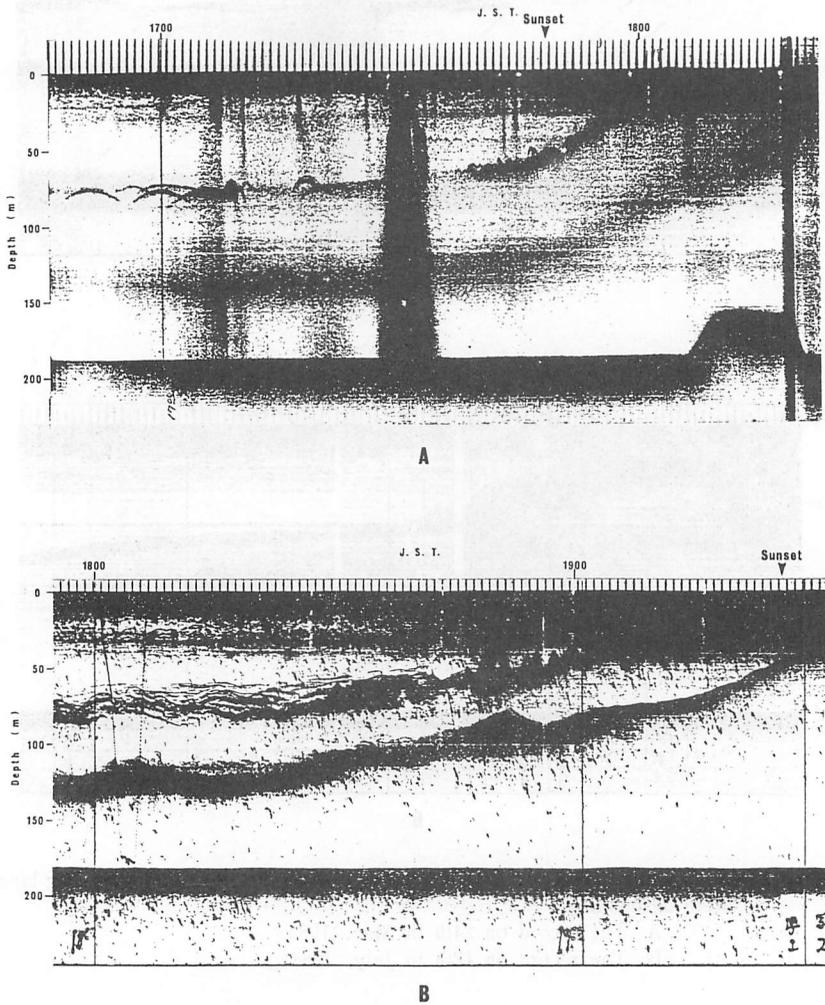


Fig. 2-11. The peculiar record by 50 kHz fish finder when the ultrasonic scattering layers were ascending.

A: The record on 14th in October, 1982

B: The record in 12th in July, 1984

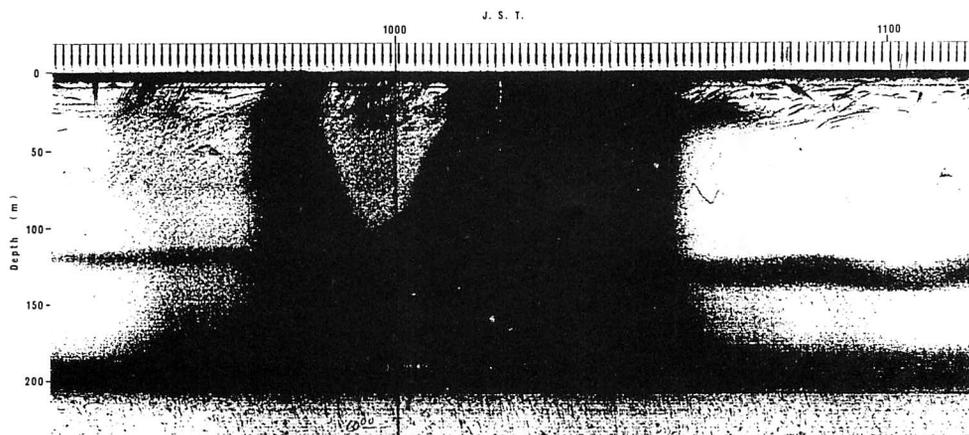


Fig. 2-12. The peculiar record by 50 kHz fish finder when the phenomenon of "Tagiri" was occurred on 23rd in April, 1982.

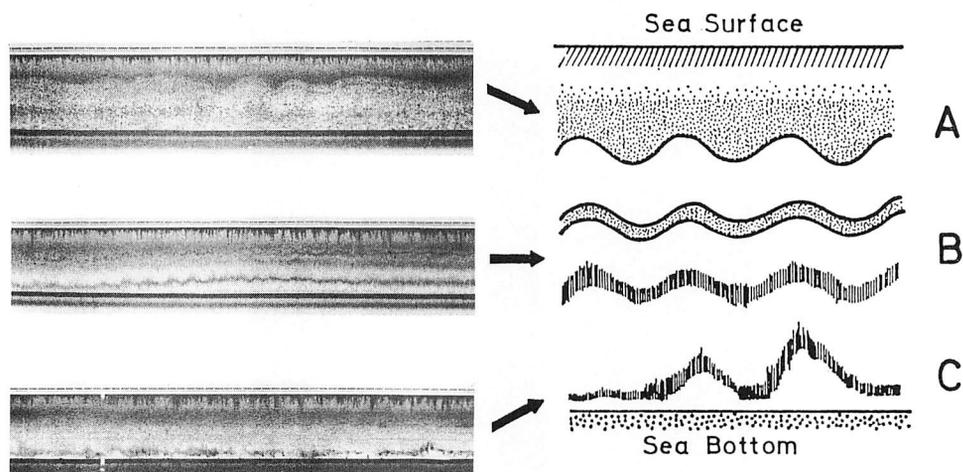


Fig. 2-14. Schematic diagram showing three Internal Wave types of the ultrasonic scattering layers.

- Type A: near sea surface
- Type B: intermediate depth
- Type C: near sea bottom

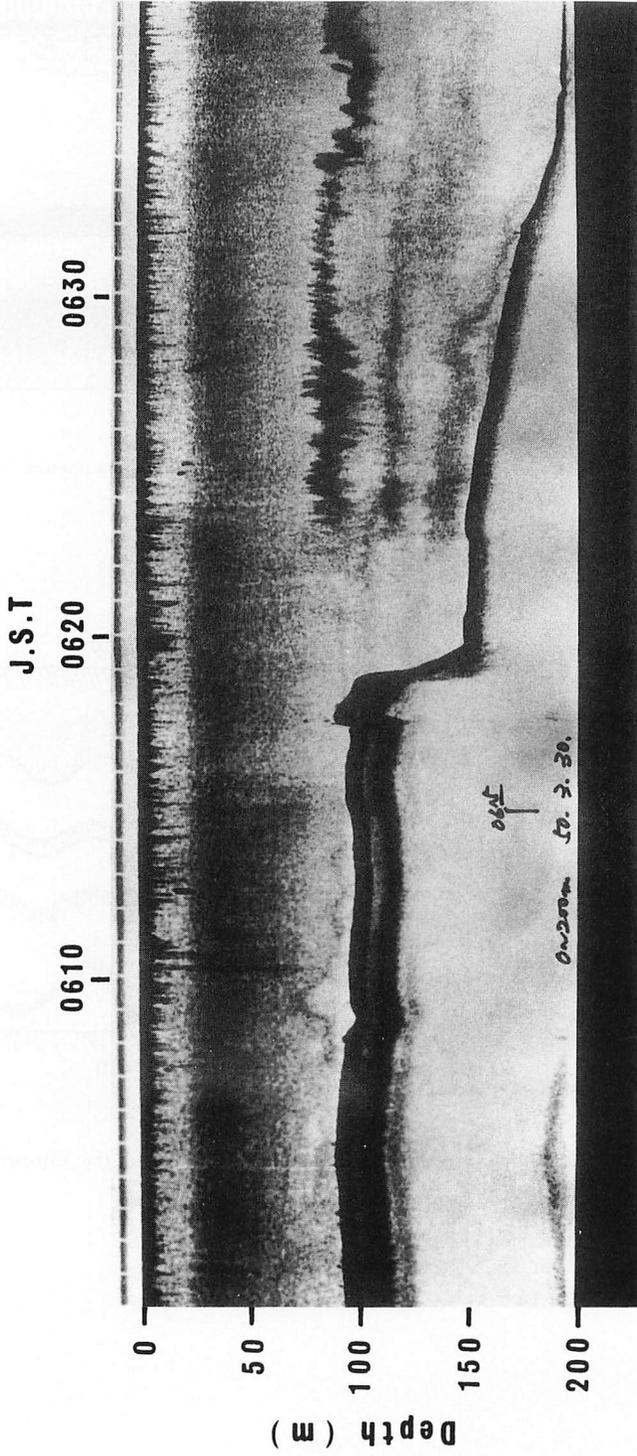


Fig. 2-13. The record of internal wave type of the ultrasonic scattering layer by 200 kHz fish finder installed on the Kagoshima maru in the entrance area of the Kagoshima bay on 30th in March, 1975.

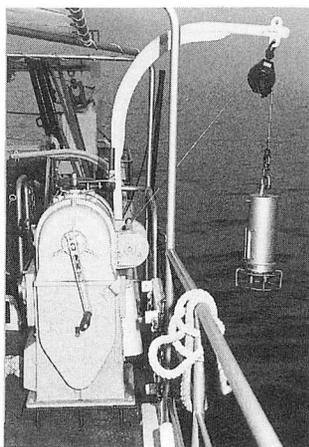
第3章 水温の垂直分布と超音波散乱層の垂直移動

3.1 測定方法

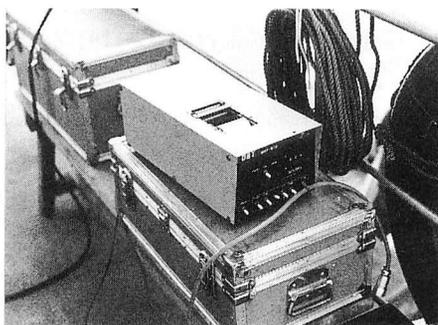
水中における垂直温度変化は Plate 3-1に示した DBT (MOX-BT2, 環境計測システム株式会社) により, 湾中央海域において06時から21時まで3時間間隔で, 四季を通じて測定を行った。

3.2 結果および考察

Fig.3-1-1, Fig.3-1-2, Fig.3-1-3, Fig.3-1-4にそれぞれ1984年4月20日, 7月11日, 10月26日, 1985年1月24日の測定結果を示した。



A



B

Plate 3-1. Photographs showing the DBT.

A: Marine observation 500m Winch and the DBT sensor

B: DBT recorder

i) 4月

表面水温は19℃～20℃にあり、水温躍層は大略50～60m付近にある。躍層以深では14℃前後で一定値を示している。

ii) 7月

表面水温は28℃～29℃にある。水深80～100mまで円弧を描くように水温は変化するが、それ以深では16℃前後で一定値を示している。

iii) 10月

表面水温は23℃～24℃にある。この月は特に躍層が顕著であり、水深50～60m, 100～110mと二ヶ所みられる。水深110m以深では15℃前後で一定している。

iv) 1月

表面水温は15.2℃～15.5℃にあり、躍層はみられず、海底に至るまで約15℃で一定している。

各季節とも水温垂直分布の一日における時間経過に伴う変化は少ない。しかしそれぞれの季節において超音波散乱層の日周期垂直移動は「1. 3 湾奥・湾中央海域における記録」に示したように顕著である。このことから、水温の垂直分布と超音波散乱層の垂直移動との関係は少ないと考えられる。しかし Fig. 3-2に示したように水温躍層の付近に垂直移動を行わない散乱層が記録された。Fig. 3-2-1の A は1984年4月20日04時頃の記録と06時の水温垂直分布を示している。水深55m付近で白く抜け、60～85mに超音波散乱層が記録されている。この水深付近に躍層が存在した。B は同年7月11日22時頃の記録である。水深80～100mに超音波散乱層が記録されている。水温垂直分布は水深約100mまで若干波を打ちながら円弧を描くように変化している。Fig. 3-2-2の A は1984年10月26日03時頃、B は同年10月26日08時30分頃の記録である。03時頃水深80～85m, 100～110mに顕著な超音波散乱層の記録が表れている。躍層は水深55～60m付近, 90～100m付近にみられる。03時頃の記録では水深70m付近まで黒く記録された。しかし日出とともに超音波散乱層が下降したため08時30分頃には黒く記録された水深は約50mとなった。このため水深60～65mにマスクされていた超音波散乱層の記録が出現した。09時の水温垂直分布によればこの水深と一致するところに躍層がみられた。又これら超音波散乱層の記録の濃さは時間の経過とともに薄くなっている。

このように水温躍層の存在する水深と略一致する水深に超音波散乱層の記録が現れた。これは四季を通じて(冬季を除く)しばしば記録され、昼間より夜間に多くみられた。すなわち日没時超音波散乱層が水面付近まで上昇した後、それ以前何も記録されていなかった水深に散乱層が記録され始め、夜間長い周期で数mの上下動はみられるものの略一定水深で記録される。そして日出後、超音波散乱層が下降すると層の厚さおよび記録の濃さ両者共に薄くなるか又は同記録が消滅してしまう場合が多くみられた。その一例を Fig. 3-3に示した。A は1982年10月13日湾奥海域における記録である。垂直移動を行なう超音波散乱層が日没頃、水面付近まで上昇してくるまでは水深50～60mにおいて散乱層は存在しなかった。しかし上昇を終了した18時35分頃から水深50mおよび60m付近に超音波散乱層が出現した。B は1983年11月19日湾奥海域における記録である。この記録には水深60mに懸垂した水中マイク

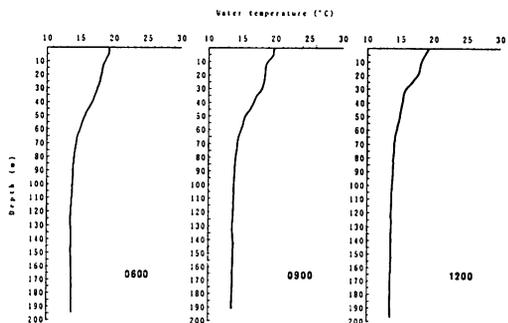


Fig. 3-1-1. The vertical distribution of water temperature in the middle area of the Kagoshima bay on 20th in April, 1984.

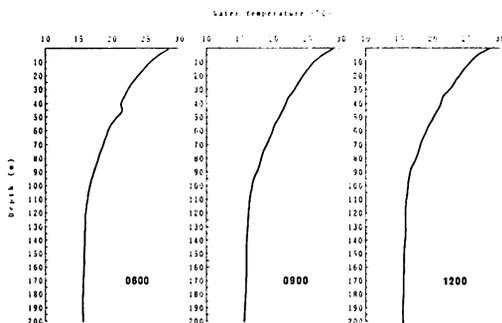
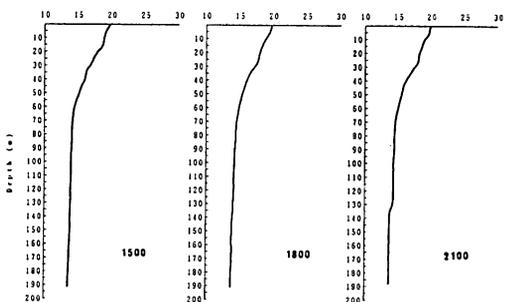


Fig. 3-1-2. The vertical distribution of water temperature in the middle area of the Kagoshima bay on 11th in July, 1984.

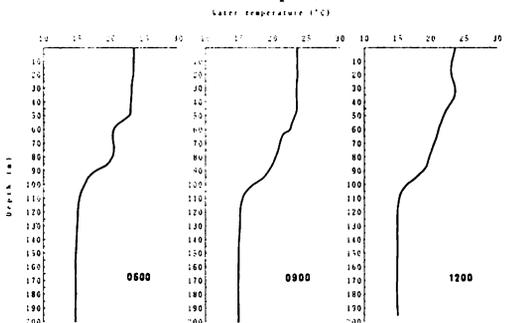
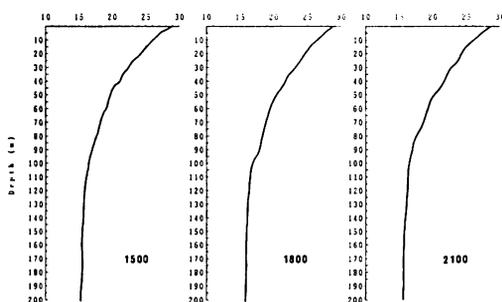


Fig. 3-1-3. The vertical distribution of water temperature in the middle area of the Kagoshima bay on 26th in October, 1984.

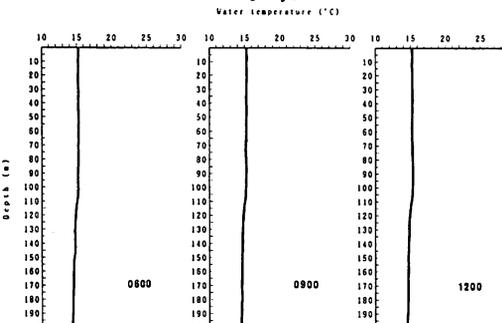
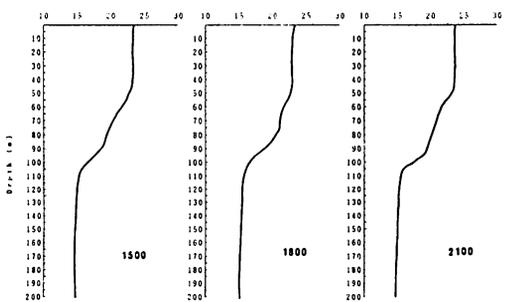
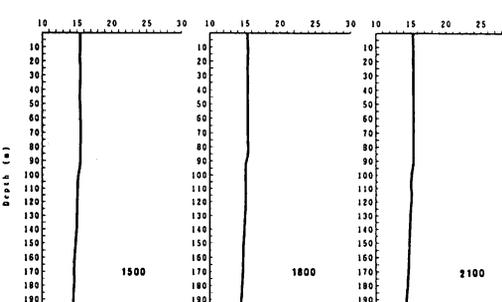


Fig. 3-1-4. The vertical distribution of water temperature in the middle area of the Kagoshima bay on 24th in January, 1985.



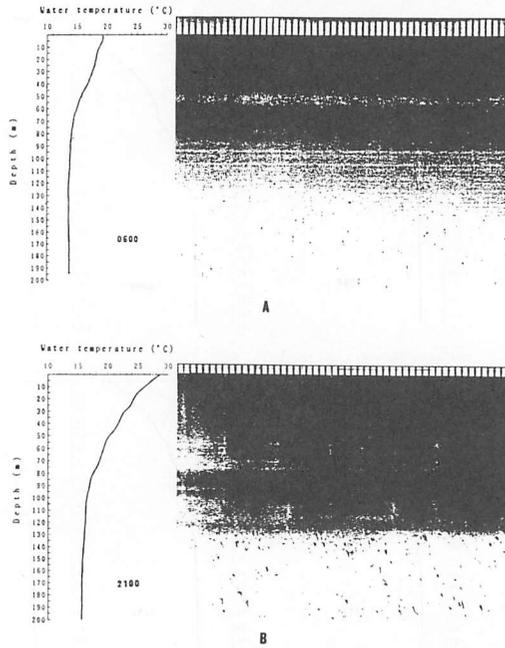


Fig. 3-2-1. The effect of the vertical distribution of water temperature upon the record of ultrasonic scattering layer by 50 kHz fish finder.
A: On 20th in April, 1984 B: On 11th in July, 1984

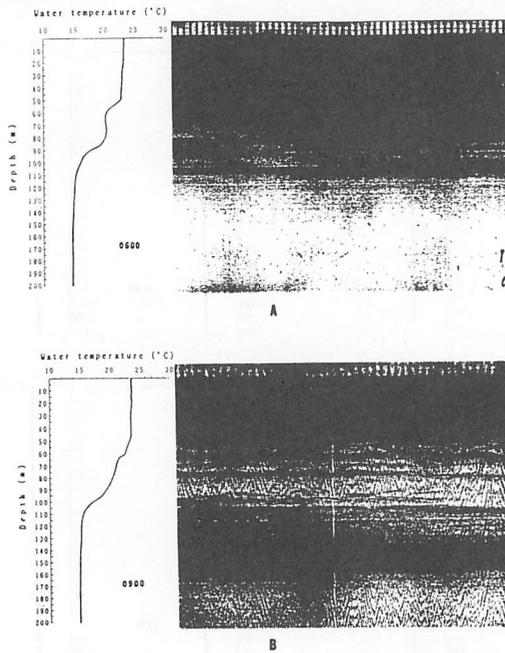


Fig. 3-2-2. The effect of the vertical distribution of water temperature upon the record of ultrasonic scattering layer by 50 kHz fish finder.
A: On 26th in October, 1984 B: On 26th in October, 1984

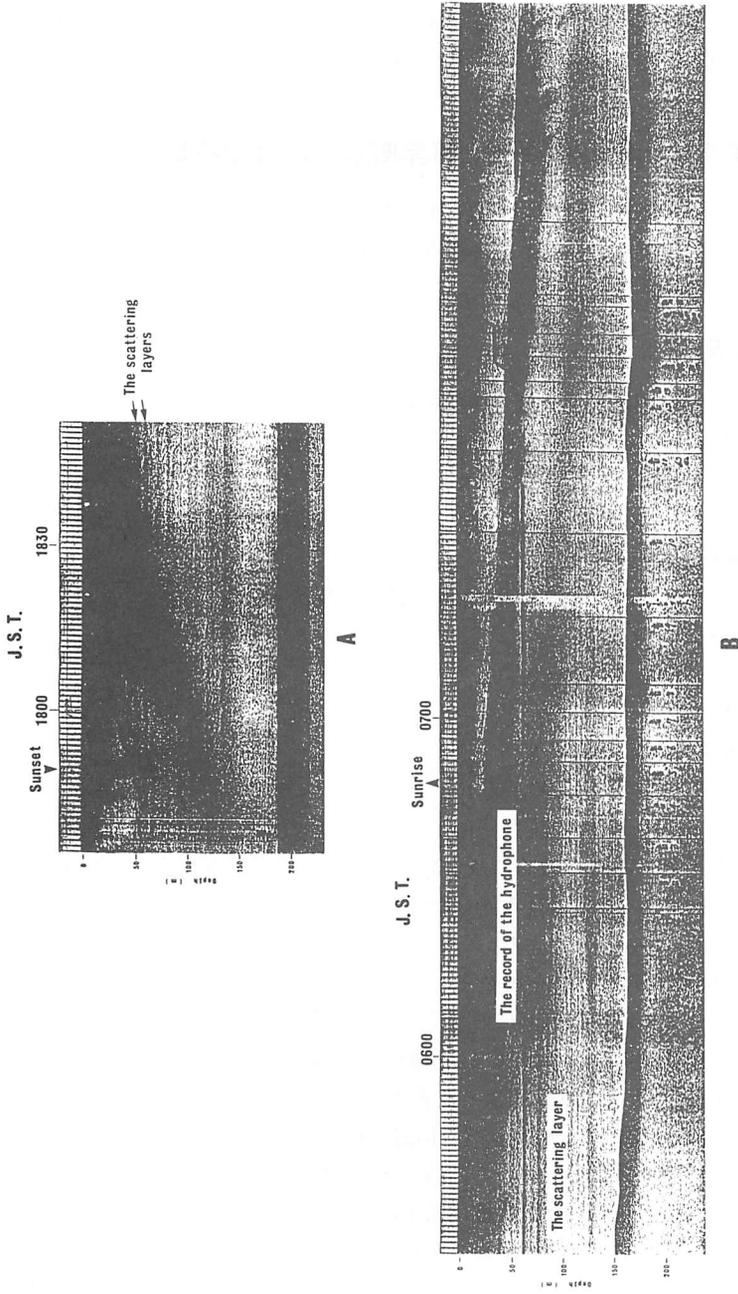


Fig. 3-3. The comparison between the record of the ultrasonic scattering layer by 50 kHz fish finder that vertical migration was unrecognizable and its record after sunrise.

A: The record in the innermost area of the Kagoshima bay on 13th in October, 1982.

B: The record in the innermost area of the Kagoshima bay on 19th in November, 1983.

ロホンが濃く記録されている。夜間超音波散乱層は水深約75mに現れているが、日出後超音波散乱層が下降した後の07時20分以降その記録は消滅した。水温躍層と関連する超音波散乱層、すなわち水深60~70m付近に記録された散乱層の夜間における散乱強度は、測定値に数dBのバラツキがあったがその平均値は-43.2 dBであり、又昼間における散乱強度は、測定値のバラツキ1 dB以下で、平均値-59.9 dBであった。

第4章 海水中の照度と超音波散乱層の垂直移動

海洋中における照度は超音波散乱層の垂直移動に深く関連するとの報告がある^{11), 56), 57), 58)}。しかしこれらは外洋域の観測であることから湾内での超音波散乱層との関連について水中照度の測定を行ない考察した。

4.1 観測方法

この測定に使用した空照度計および水中照度計をPlate 4-1に示した。Aは空照度計、B, C, Dは水中照度計でCは受光部、Dは指示器、Bはケーブルである。

i) 空照度計

デジタル照度計 1M-2D
東京光学機械株式会社
測定範囲 …………… 0.1~199, 900 lux (10倍フィルター使用)
測定誤差 …………… ±5%

ii) 水中照度計

光電池照度計 SPI-9W
東京光学機械株式会社
測定範囲 …………… 0.1~300,000 lux
測定誤差 …………… ±10%以下

海中の照度は深さとともに指数函数的に減少し次式によって表わされる。いま深さ Z_1 における光りの強さが I_1 、深さ Z_2 における光りの強さを I_2 とすれば

$$K = 2.3026 \cdot (\log I_1 - \log I_2) / (Z_2 - Z_1) \quad (4-1)$$

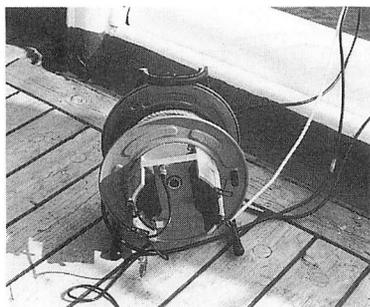
この式⁵⁹⁾において K は鉛直消衰係数を表わす。深さ 0 m すなわち水面における上向き照度を空照度計により、そして任意の水深における上向き照度を水中照度計により測定すれば消衰係数を求めることができる。ここで海水が水面から海底まで光学的に一樣であると仮定すれば、任意の照度 I の水深 D は次式によって表される。

$$D(m) = 2.3026 \cdot \{ \log(\text{水面における照度}) - \log I \} / K \quad (4-2)$$

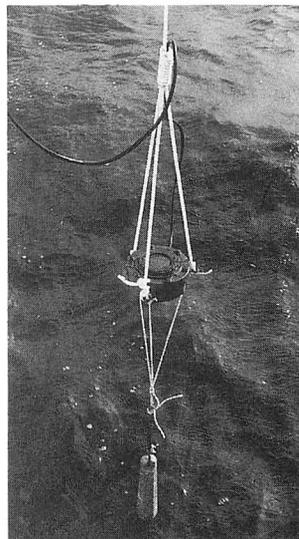
以上のことから日没時頃は5分間隔で、その他は30分間隔で空中および水中における上向き照度を同時に測定した。水面における照度は船上における空照度と等しいものと仮定し、又水中照度は水深20mに受光部を置き測定した。特に日没時の測定にあたっては作業灯、停泊灯その他灯火類は全て消灯した。又日中においては水中照度計の受光部が船体の影に入らぬよう充分注意した。



A



B



C



D

Plate 4-1. Photographs showing the aerial illuminometer (A) and the underwater illuminometer (B, C, D).

4. 2 結果および考察

湾中央海域における1984年4月, 7月, 10月, 1985年1月, 湾奥海域における1984年8月, 11月の照度測定およびその時の超音波散乱層の同時記録したものを Fig. 4-1-1, Fig. 4-1-2, Fig. 4-1-3 に示した。消衰係数は湾中央海域において0.13~0.17, 湾奥海域においては0.15~0.2の範囲にあり湾中央海域の方がその値は小さい傾向にあった。又湾中央海域の4月は他の季節に比べて小さな値を示したが季節的な傾向を見出すことはできなかった。

I) 湾中央海域

湾中央海域における各季節別の水中照度と超音波散乱層の垂直移動との関係について検討する。

i) 春

第一層は昼間 $10^0 \sim 10^{-2}$ lux の間にあった。

第二層は昼間 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ lux の間に存在し, 夕方 10^{-5} lux から 10^{-1} lux まで急激に上昇した。

1984年4月における超音波散乱層の垂直移動は Fig. 2-8-1-b に示したように特異な例であるため, 第一層の存在する照度は以下に示す他の季節と異なっている。

ii) 夏

第一層は昼間 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ lux の間にあった。

第二層は昼間 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ lux に存在し, 夕方 10^{-5} lux から 10^{-1} lux まで急激に上昇した。

第三層は昼間 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ に存在し, 上昇するにつれ $10^0 \sim 10^{-2}$ へ移行した。

iii) 秋

第一層は日出頃 10^{-3} lux から 10^{-7} lux まで急激に下降し, 昼間は $10^{-7} \sim 10^{-9}$ lux に存在した。日没頃 10^{-7} lux から 10^{-2} lux まで急激に上昇した。

第二層は日出頃 10^{-3} lux から 10^{-5} lux まで急激に下降し, 昼間は $10^{-4} \sim 10^{-6}$ lux に存在した。日没頃 10^{-5} lux から 10^{-1} lux まで急激に上昇した。

第三層は日出頃 10^{-1} lux から 10^{-3} lux まで下降し昼間は $10^{-2} \sim 10^{-3}$ lux の間に存在した。日没頃 10^{-3} lux から 10^{-1} lux まで急激に上昇した。

iv) 冬

第一層は日出頃 10^{-5} lux から 10^{-9} lux まで急激に下降し昼間 10^{-9} lux 付近にあった。又第一層は第二層と接触あるいは合併したような記録もあり, その時は $10^{-6} \sim 10^{-8}$ lux に存在するものと推定される。日没頃 10^{-7} lux から 10^{-3} lux まで急激に上昇した。

第二層は日出頃 10^{-2} lux から 10^{-6} lux まで下降し昼間は $10^{-5} \sim 10^{-7}$ lux に存在した。日没頃 10^{-4} lux から 10^{-2} lux まで上昇した。

第三層は日出頃 10^{-2} lux から 10^{-4} lux まで下降し昼間は $10^{-2} \sim 10^{-4}$ lux の間に存在した。日没頃 10^{-2} lux から 10^0 lux まで急激に上昇した。

II) 湾奥海域

次に湾奥海域における1984年8月と11月の測定結果について検討する。

i) 夏

昼間第一層は $10^{-4} \sim 10^{-7}$ lux の間に, 第二層は $10^0 \sim 10^{-2}$ lux の間, 第三層は $10^0 \sim 10^1$

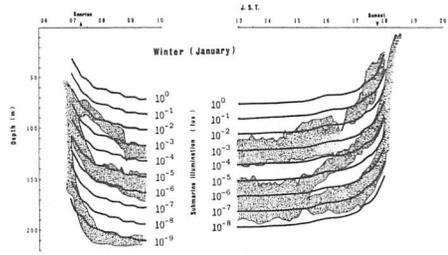
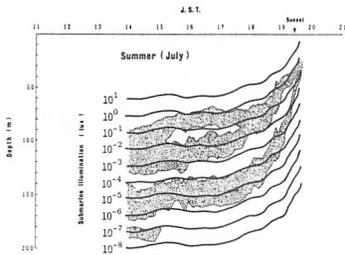
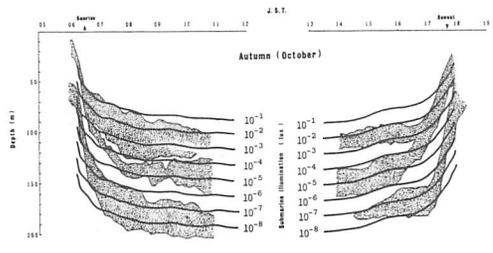
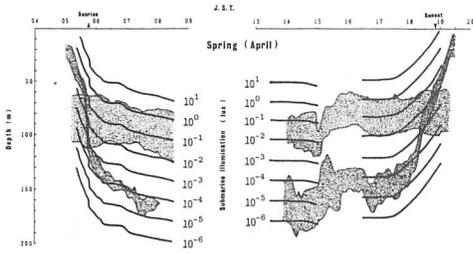


Fig. 4-1-1. The relationship between the ultrasonic scattering layers and submarine illumination in the middle area of the Kagoshima bay in spring and summer, 1984.

Fig. 4-1-2. The relationship between the ultrasonic scattering layers and submarine illumination in the middle area of the Kagoshima bay in autumn and winter, 1984, 1985.

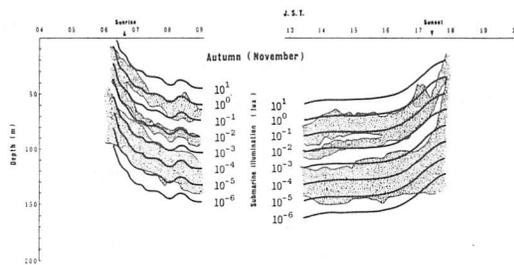
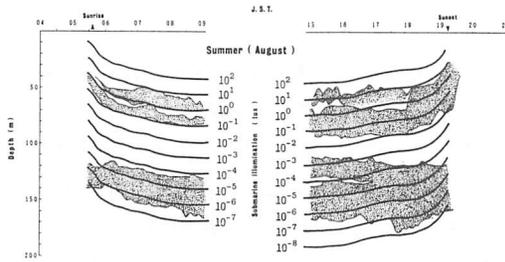


Fig. 4-1-3. The relationship between the ultrasonic scattering layers and submarine illumination in the innermost area of the Kagoshima bay in summer and autumn, 1984.

lux の間に存在した。第一層はほとんど垂直移動はなかった。しかし第二層、第三層とも水中照度の変化と対応している。

ii) 秋

昼間第一層は $10^{-4} \sim 10^{-6}$ lux の間、第二層は $10^{-2} \sim 10^{-3}$ lux の間、第三層は $10^0 \sim 10^{-2}$ lux の間に存在した。日没頃第一層は 10^{-5} lux から 10^{-1} lux まで、第二層、第三層は 10^{-2} lux から 10^0 lux まで急激に上昇した。

全測定を通じて日没前後に水中照度は急激な変化があり、昼間はその日の雲量によって大きく左右されたものの略一定の値を示した。超音波散乱層の垂直移動は日没前後に最大であり昼間は略一定の水深にあることから水中照度は散乱層の垂直移動に大きく関係するものと推定される。しかし日没前後における散乱層の垂直移動の変化は図に示したように、水中照度の変化より大きな場合が多くみられた。すなわち日出頃においては水中照度のより小さな値の方向へ急激に下降し、日没頃においてはより大きな値の方向へ急激に上昇する。その水中照度の差は $10^2 \sim 10^5$ lux に達した。

昼間超音波散乱層の存在する水中照度は大きく次のように分類することができた。

- (A) $10^0 \sim 10^{-2}$ lux の範囲に存在する層
- (B) $10^{-2} \sim 10^{-4}$ lux の範囲に存在する層
- (C) $10^{-4} \sim 10^{-7}$ lux の範囲に存在する層
- (D) $10^{-7} \sim 10^{-9}$ lux の範囲に存在する層

(A)と(B)又は(C)と(D)の各層はしばしば接触あるいは合併するかのような記録が、また(B)と(C)の層も頻度は少ないが接触する記録がみられた。

以上水中照度と超音波散乱層の垂直移動との関係について述べたが、さらに Fig. 4-2に示した1984年7月11日の結果について考察する。

この日は日出前から曇りの天気、日出後の06時15分頃には太陽を全く見るのできない厚い雲で全天覆われた。さらに10時に激しい雨となり、筆者の目にも空が一段と暗くなった事を感じることができた。その後一日中雨は小康状態を続けた。

水中照度は曇天であったため海中全体が暗く小さな値を示した。日出により水中照度は次第に大きな値を示したが、雨が降り出した10時に極小値がみられた。この日超音波散乱層は三層出現し、各層とも日出前後に下降している。しかし07時30分および10時に超音波散乱層も水中照度の変化に関連して上昇を行なっている。この垂直移動は第二層、第三層において顕著であり、第一層は緩慢であった。特に第二層の上辺は 10^{-4} lux にあったが10時には 10^{-3} lux まで上昇している。そしてその後再び 10^{-4} lux まで下降している。このように超音波散乱層の垂直移動は日没頃のみ見られる現象ではなく昼間においても水中照度に変化があれば、それに応じて垂直移動を行なうことが確認された。又日没時の散乱層の垂直移動の変化は水中照度の変化より大きな傾向にあった。この現象は昼間においても同様の傾向がみられた。

夜間における水中照度は月の光りの強さによって左右される。そこで超音波散乱層の垂直移動への月の影響について検討した。

Fig. 4-3の A は1984年7月10日湾中央海域における記録である。超音波散乱層は日没後

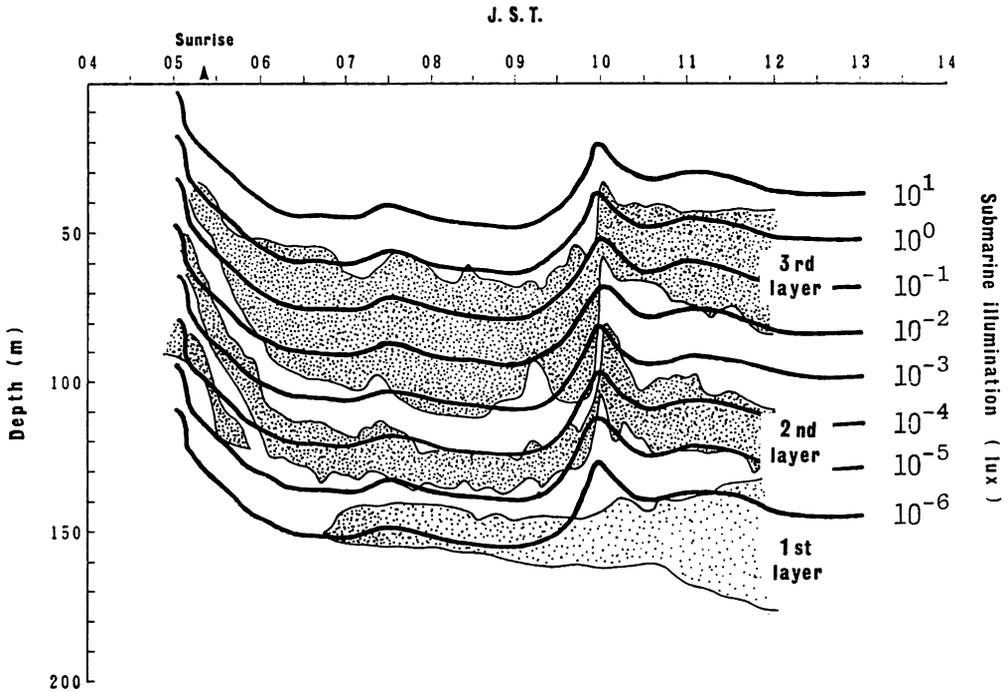


Fig. 4-2. The relationship between the ultrasonic scattering layers and submarine illumination in the middle area of the Kagoshima bay on 11th in July, 1984.

数分でその下辺は水深約50mに達している。その後日没後約20分、19時45分頃その下辺が下降を開始している。一度上昇した散乱層が日没後下降を開始する原因は、水温の垂直分布に急激な変化が無いことから照度に関するものと推察される。しかしこの日の日没以降の照度測定資料が無いので、月の各時刻における高度を計算により求め、時間軸を超音波散乱層の記録と同じに取り示した。この日の天候は晴、日没時刻19時26分、月齢10.9、月出時刻17時23分、正中時刻22時09分であった。この図により月の高度の増加に伴い散乱層の下辺の水深が増加していることがわかる。このことから、この層が日没後であるにもかかわらず下降する現象は月の光りによる水中照度の増加が原因であると推定される。Fig. 4-3の B は1975年8月29～30日湾奥海域において、旧南星丸により200 kHz 魚群探知機を使用して得られた記録である。月出前の29日20時頃は、超音波散乱層は完全に上昇を終了しており、その記録は水面から水深約30mまで黒く記録されている。一方、月出後の30日03時頃の記録は、散乱層の上辺および下辺の境界が明白ではないが約5～10m層全体が下降しているのがわかる。この日は快晴で午前3時頃には月齢21.5の月が高度約40度で輝いていた。この記録からも、一度上昇を完了したと思われる超音波散乱層は月出により再び水中照度が増加すると下降する現象がみられた。Fig. 4-4は1982年4月23日湾奥海域における記録である。この日の日没は18時52分であった。月齢は28.6であり、月出05時40分、月没18時35分であったため夜間は月明かり無しの暗夜であった。超音波散乱層は日没後約40分で上昇を終了し、その下辺

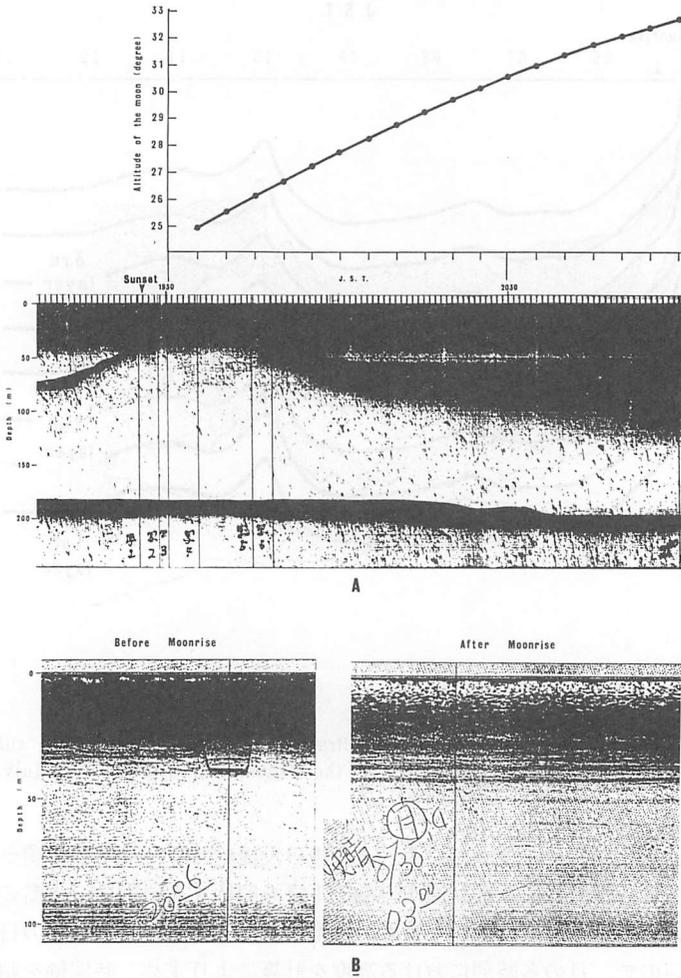


Fig. 4-3. The relationship between descending behavior of ultrasonic scattering layers and the moon light.

A: The record on 10th in July, 1984

B: The record on 30th in August, 1975

は水深約30mにあり、夜間その水深に変化はなかった。この三例の記録から、夜間において、超音波散乱層の存在する水深は、月齢、月の高度等によって左右される水中照度と関係あることが推定される。

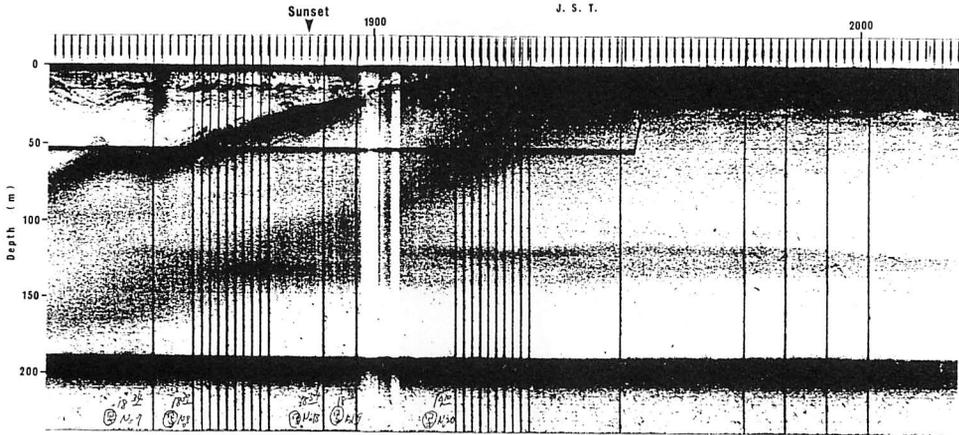


Fig. 4-4. The record of the ultrasonic scattering layers by 50 kHz fish finder after sunset without the moon light on 23rd in April, 1982.

第5章 閉鎖ネットによる超音波散乱層の構成生物の採集

超音波散乱層は水温躍層等の物理的要因と、ある種の生物の群集すなわち生物的要因によって起こるものと推察される^{11), 60), 61)}。又散乱層の垂直移動の原因は水中照度との関係がみられた。このことから鹿児島湾内における垂直移動を行う超音波散乱層はある種の生物群で構成されているものと推察される。そこで各層の構成生物を明らかにすることを目的として垂直曳きプランクトン・ネットによる生物採集を行った。

5. 1 採集方法

Plate 5-1に示す垂直曳閉鎖ネット（改良丸特ネット、口径45cm、網目0.33mm）を使用し、湾奥海域においては1977年7月20日～21日、10月3日～4日、湾中央海域においては1977年7月21日～22日、10月4日～5日に生物採集を実施した。この時使用した魚群探知機はPlate 2-2のA（ユニバーサルグラフ FUG-11型：古野電気株式会社）で周波数は50 kHzであった。

曳網水深の決定は、魚群探知機の記録を監視しながら、超音波散乱層が記録された水深と記録されない水深の各層を曳網した。このことにより各散乱層の構成生物の相違および散乱層が記録されない層との比較ができることを期待した。

採集プランクトンの同定ならびに沈殿量の測定は海洋生物学講座の協力を得て行った。

5. 2 結果および考察

湾奥海域、湾中央海域における垂直曳閉鎖ネットによる曳網水深、プランクトン沈殿量、プランクトンの同定結果およびそれぞれの水塊1 m³あたりの個体数を Table 5-1, Table

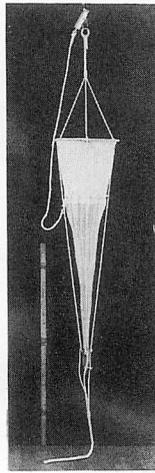


Plate 5-1. Photograph showing the closing net.

5-2に示した。又両海域における超音波散乱層の模式図にプランクトン・ネットの曳網時刻および水深を、そしてその各曳網層における採集プランクトンの沈殿量を Fig. 5-1-1, Fig. 5-1-2に示した。

採集されたプランクトンには多くの種類の植物プランクトンも含まれていた。しかし植物プランクトンはそのものの活動(運動)により大幅な垂直移動を短時間に行うとは考えられないことから、同定の対象は動物プランクトンのみに限定した。しかしプランクトンの沈殿量には植物プランクトンの容積も当然含まれている。両海域において採集された動物プランクトンの主なものは橈脚類, 枝角類, 矢虫, 尾虫類, 多毛類であった。特に橈脚類, 枝角類が1977年7月, 10月ともに卓越した。

I) 湾奥海域

i) 7月

曳網した各層(1)~(6)はそれぞれ沈殿量において有意の差が認められた。すなわち昼間16時前後垂直移動を行う三層それぞれについて曳網を実施したが, (1)は 2.264 ml/m^3 , (2)は 0.849 ml/m^3 , (3)は 0.293 ml/m^3 であり, その沈殿量は橈脚類の個体数との関係がみられた。18時40分頃超音波散乱層が記録されない層(4)について20mの曳網を実施した。この結果沈殿量も 0.094 ml/m^3 と少なく又動物プランクトンの個体数も少なかった。垂直移動を行う超音波散乱層が上昇を終了した夜間21時過ぎ, 各層の合併層(5)とそれ以外の層(6)を曳網した。この結果, 各層の合併層の沈殿量は 1.446 ml/m^3 , それ以外の層は 0.243 ml/m^3 であった。特にこの合併層(5)において昼間あまりみられなかった枝角類が $1,523 \text{ 個体/m}^3$ と多獲された。しかし他の層(6)においては捕獲されなかった。すなわち超音波散乱層内においてはプランクトン量は多く, それ以外の層においてはプランクトン量は少ない傾向にあった。

Table 5-2. Plankton was collected with a vertical closing net (modified Marutoku net) at the middle area of the Kagoshima bay in July and October, 1977.

No.	Time (J.S.T.)	Layer of collection Depth (m)	Settling volume (ml/m ³)	Number of Individuals (inds/m ³)					
				Copepoda	Cladocera	Chaetog- natha	Appendi- cularia	Poly- chaeta	others
1	09:40	0~125	0.503	1,329	189	25	6	7	44
2	09:25	125~155	0.063	4		3			1
3	09:13	155~200	0.196	46	1				8
4	15:35	0~130	1.590	975	278	27	15	16	35
5	15:25	130~170	0.047	16					1
6	15:15	170~200	0.168	38					4
7	19:02	0~50	1.220	1,890	467	37	36	19	72
8	18:52	50~100	0.214	475		6		4	47
9	18:41	100~150	0.163	300		3		2	21
10	21:20	0~40	0.613	215	1,737	58	24	28	160
11	21:07	40~140	0.088	30	1	6		1	8
12	20:58	140~200	0.293	191	14	3	15		13
13	09:25	0~30	0.356	610	47	34	23	3	86
14	09:15	30~80	0.113	73	2	7	4	1	10
15	18:43	0~50	0.226	78	18	6	8	1	7
16	18:35	50~100	0.126	36	31	15	1	1	5

July

October

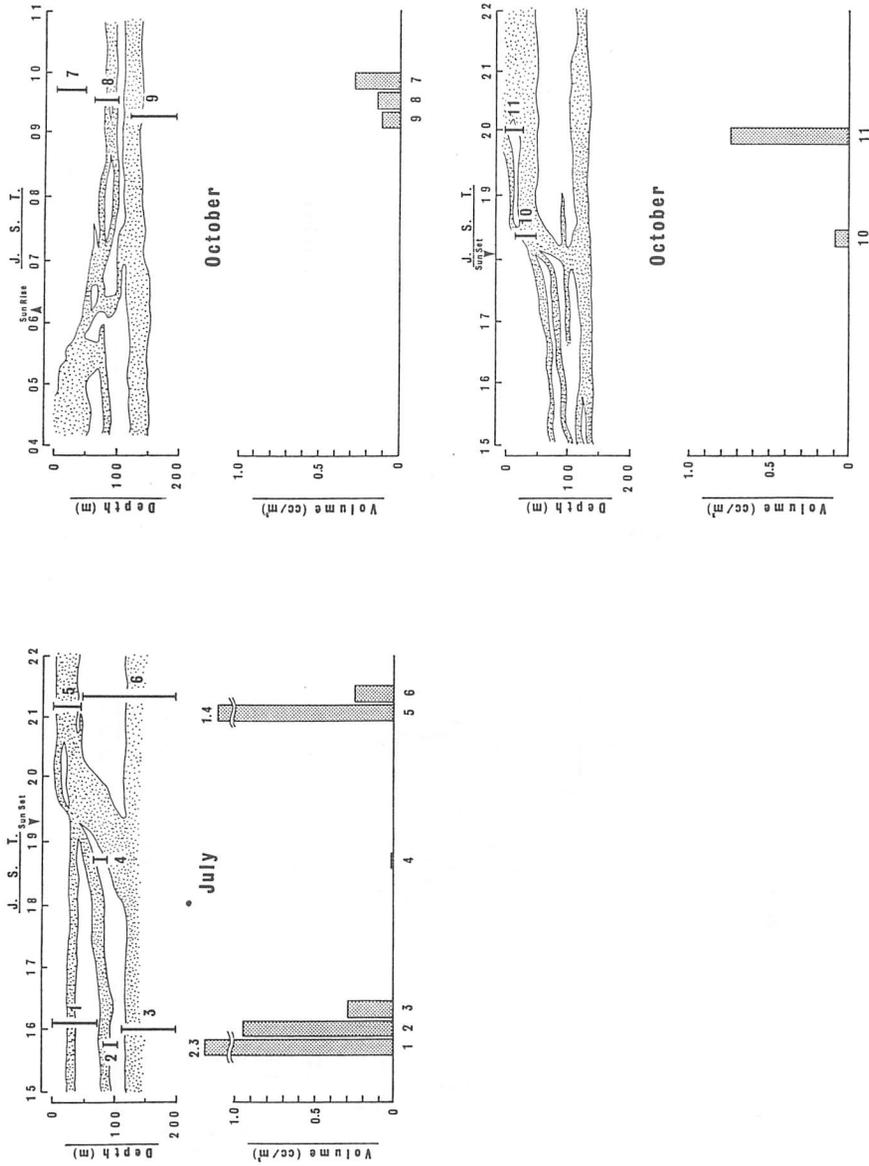


Fig. 5-1-1. Schematic representation of the plankton net towing depth and its settling volume at innermost area of the Kagoshima bay in July and October.

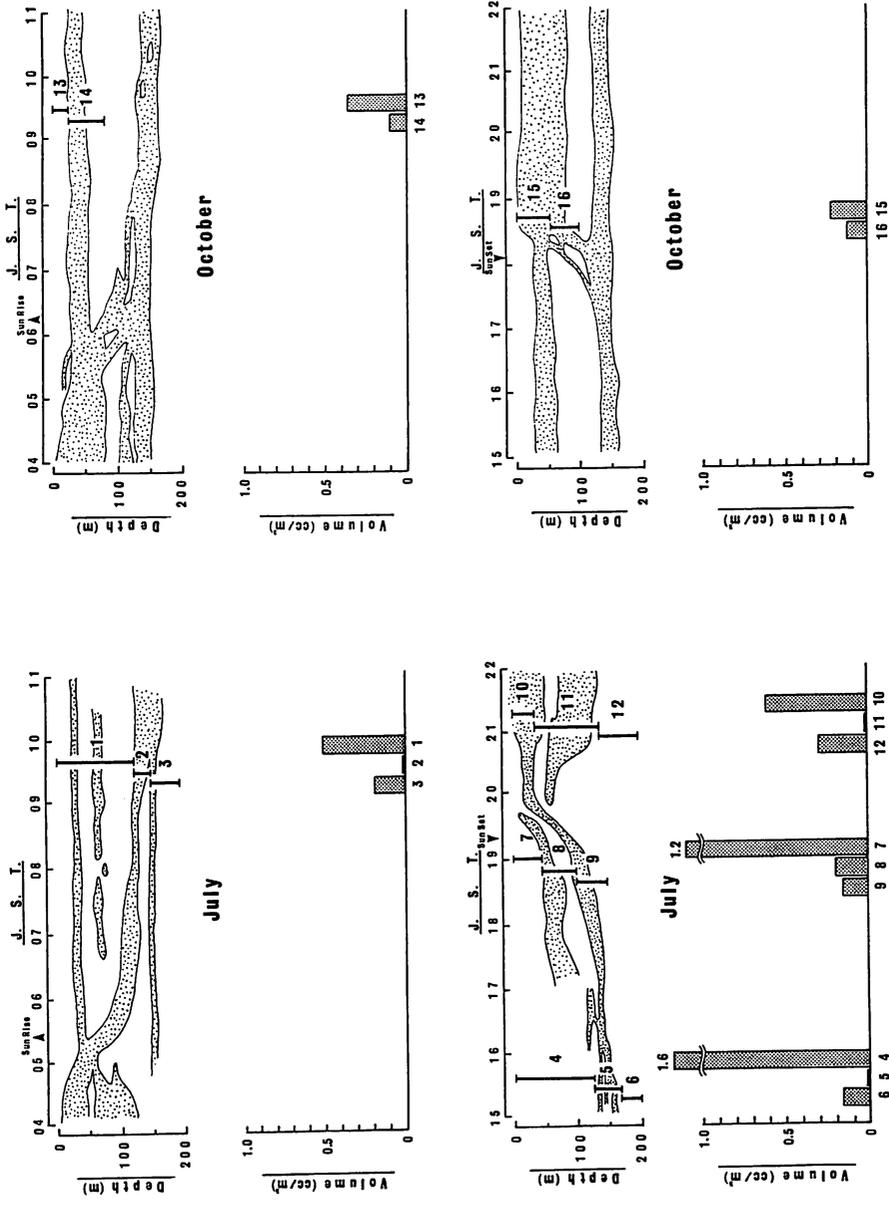


Fig. 5-1-2. Schematic representation of the plankton net towing depth and its settling volume at middle area of the Kagoshima bay in July and October.

ii) 10月

09時15分から09時40分にかけて(7)~(9)の層を曳網した。その結果は超音波散乱層が記録されなかった(7)の沈殿量が 0.277 ml/m^3 と最も多く、次いで(8)(9)の順であった。次に夕方、日没後すぐの18時20分頃上昇中の各層の合併層(10)を30mにわたって曳網した。その結果沈殿量は 0.105 ml/m^3 であった。又20時頃超音波散乱層が記録されていない水深(11)を30mにわたって曳網した。その結果沈殿量 0.734 ml/m^3 を得た。沈殿量に関して(11)は(10)の約7倍にも及んだ。しかも橈脚類、枝角類ともに(10)よりはるかに多い個体数が捕獲された。この月においては、散乱層とそれ以外の層におけるプランクトン量は7月の結果と逆転した。すなわち水深が深くなるにつれてプランクトン量が減少している傾向にあった。

II) 湾中央海域

i) 7月

超音波散乱層の内を曳網したのは(1)(2)(5)(8)(9)(10)(11)でありそれぞれの数値は Table 5-2に示した。(1)は散乱層外も多く曳網したにもかかわらず 0.503 ml/m^3 と(10)に次いで沈殿量は多かった。これらの平均値は 0.242 ml/m^3 であった。散乱層以外でその上部を曳網したのは(4)(7)で、沈殿量の平均値は 1.405 ml/m^3 であった。又下部を曳網したのは(3)(6)(12)であり、その平均値は 0.219 ml/m^3 であった。この結果、プランクトン沈殿量は超音波散乱層より水深の浅い層、超音波散乱層内、超音波散乱層より水深の深い層の順に多い傾向にあった。又超音波散乱層内においても水深の浅いものほど沈殿量が多く、又橈脚類、枝角類の個体数も超音波散乱層より水深の浅い層に多い傾向がみられた。これは特に昼間、夜間の相違はなかった。すなわち水深が深くなるにつれてプランクトン量が減少している傾向がみられた。

ii) 10月

10月においては資料が少ないが、やはり超音波散乱層とそれ以外の層における顕著な相違はみられず、水深が深くなるに従いプランクトン量が減少している傾向にあった。

以上垂直曳き閉鎖ネットによる生物採集の結果について示した。超音波散乱層のプランクトン量はそれ以外の層より当然多いものと推察していたが、湾奥海域における7月の観測以外この推察があてはまるとは考えにくい。又湾奥海域の7月の結果も、水深が深くなるほどプランクトン量が少ない傾向も合わせ持っている。しかしこのプランクトン量と水深との関係も、プランクトンの沈殿量、個体数のバラツキも大きく普遍的なものとは言い難い。

5. 3 超音波散乱層の逃避行動

この一連の生物採集を実施している時、偶然に魚群探知機により超音波散乱層とプランクトン・ネットの同時記録を得た。その時の記録を Fig. 5-2に示した。この時使用した魚群探知機は Plate 2-2の B (NJA-172B：日本無線株式会社) に示した機種で周波数200 kHzであった。

超音波散乱層の上昇に伴い下層の散乱層の生物採集をするため、プランクトン・ネットを海中に入れた。すると上層の散乱層の記録が消滅し、下層の記録も層の厚さが薄くなり消滅寸前になった。その後二分間ほどして散乱層が再び記録され始めたので、それが濃く記録されるのを待ってプランクトン・ネットを曳き上げた。この超音波散乱層のプランクトン・

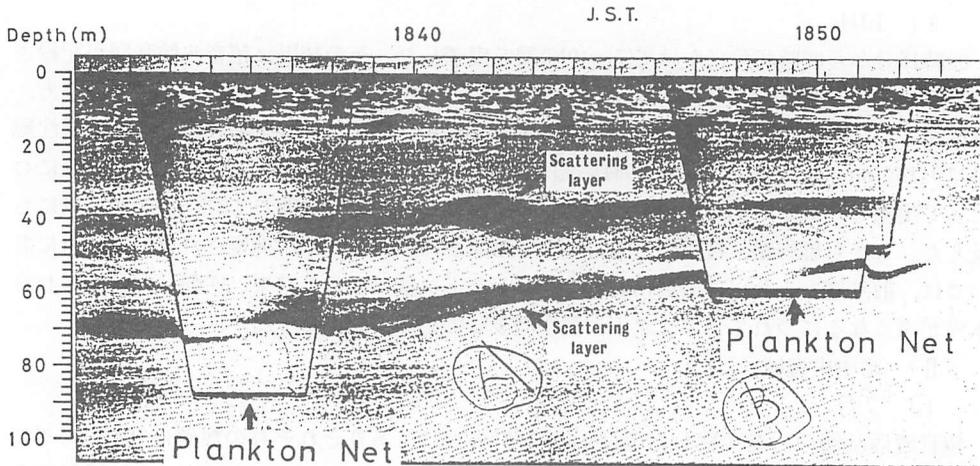


Fig. 5-2. The record of the ultrasonic scattering layers by 200 kHz fish finder which avoided the plankton net.

ネットに対する逃避行動と判断される記録が、偶然に起こったものか確認するため、18時46分再びネットを投下した。するとやはり前回同様の記録を得た。この魚群探知機の指向角(半減全角)は 10° である。上層の記録は完全に消滅していることから、この層の構成生物はプランクトン・ネットから少なくとも3.5m以上の距離逃避したものと推定される。下層は記録が消えるまでに至らなかったものの層の厚さも極端に薄くなっていることも考え合わせ、二層いずれも口径45cmのプランクトン・ネットではこれらの層を構成する生物の捕獲は非常に困難であるとの結論に達した。この事実から前項で論じたところの超音波散乱層内とそれ以外の層において、散乱強度が大きく異なるにもかかわらず、プランクトン・ネットによる生物採集では、有意の差がみられなかった事実と関係づけられる。Fleminger and Clutter⁶²⁾は水槽における実験ではあるが、橈脚類やアミ類のような小さなプランクトンでも、瞬間的にかなりの速さで泳ぐことができるので、網からの逃避行動があるため、網口の大きさや曳網速度が採集量に大きく影響すると報告している。すなわち、この種のプランクトン・ネットでは、垂直移動を行う超音波散乱層を構成する生物を捕獲することができなかったと推定される。

このような超音波散乱層の記録の消滅現象は、プランクトン・ネット以外の自然現象の中でも見ることができた。その時の記録を Fig. 5-3に示した。これは1984年4月13日湾中央海域における記録である。この日の日出前約30分、超音波散乱層は通常の下降運動に入ったが、05時41分頃何かの原因により水深約50mから層全体が急降下を開始し、記録も薄れ約10分後の06時頃水深120m付近に再び出現した。この時の下降最大速度は約10m/分に達する。この時記録には06時01分から06時11分にかけて水面付近から水深50m付近まで正体不明の記録がある。この下降最大速度は約33m/分に達し、その記録の濃さから相当大型の遊泳速度の速い生物であると推定され、超音波散乱層を構成する生物は、この生物群に追われて逃避したものと推察される。この逃避行動は再び08時頃記録が消滅するという形で現れた。09時10

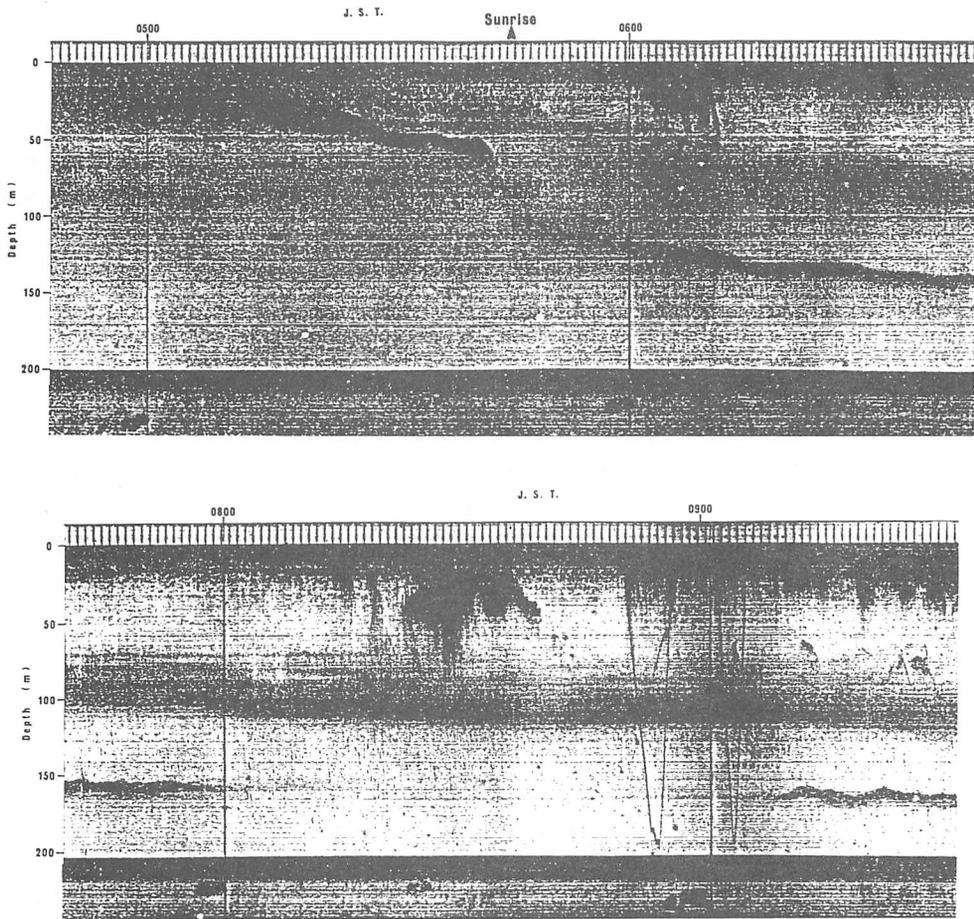


Fig. 5-3. The record of avoidance behavior of the ultrasonic scattering layer (2nd layer) by 50 kHz fish finder in the middle area of the Kagoshima bay on 19th in April, 1984.

分まで約1時間10分の間この超音波散乱層は消滅した。この原因は08時30分前後に水面付近から水深75m付近まで記録された前回と同様の生物群からの逃避行動によるものと推察される。なお09時前後の垂直的な直線の記録は水温測定のために投下されたDBTセンサーの記録である。このように逃避行動は、記録の消滅および急降下現象の二つの型に分類できた。前者にはFig. 5-2の上層の記録およびFig. 5-3の08時から09時の記録が相当し、超音波散乱層を構成する生物は水平方向に逃避したものと推定される。後者にはFig. 5-2の下層の記録およびFig. 5-3の日出時頃の記録がそれに相当し、散乱層の構成生物は垂直方向に逃避したものと推定される。そしてそれは水深の浅い方向ではなく深い方向への逃避であった。

第6章 Isaacs-Kidd 中層トロールネットによる 超音波散乱層の構成生物の採集

超音波散乱層を構成する生物の採集に垂直曳き閉鎖ネットを使用した。しかし採集結果より、その構成生物を推定することができなかったこと、および魚群探知機の記録より、垂直移動を行う超音波散乱層はプランクトン・ネットから逃避する行動をとることが判明したので、遊泳速度の速い生物も捕獲することが可能である水平曳きの Isaacs-Kidd 中層トロールネットの使用を試みた。

6.1 採集方法

Fig. 6-1に Isaacs-Kidd 中層トロールネットを示した。潜行板およびスプレッダー・バーの長さは3 m、網の長さは19 mである。船速2.5ノットでの曳網中の網口高さは1.6 mであった。曳網中の網深さは Plate 6-1に示したネット・レコーダーにより知ることができ、超音波散乱層の深さは Plate 2-2の C に示した魚群探知機 (NJA-280ku: 日本無線株式会社) により知ることができた。両者により網深さが常に目的とする超音波散乱層の深さと一致するよう曳網用ワイヤーロープの長さを調節した。ネット・レコーダーの性能を次に示す。

FNR-200M II	古野電気株式会社
記録方式	…… マルチペン記録方式
記録紙	…… 湿式・紙幅150mm
最小探知距離	…… 約1.5m
測定精度	…… $\pm 1\%$ (深度)
信号伝達距離	…… 2,000m

Isaacs-Kidd 中層トロールネットはオープンネットであることから、超音波散乱層が三層記録される場合、最も深い水深に存在する第一層を曳網しようとするれば、その層より浅いところに存在する第二層、第三層の内を、網を降ろす時と揚げる時の二回必ず通過することになる。よって第一層を目的としてその水深を曳網した場合、採集された生物には第二層、第三層を構成する生物群が含まれることになる。又第二層を曳網する場合も前記の理由から第三層を構成する生物が混獲されることになる。最上層にある第三層を曳網する時は他の散乱層構成生物は混獲されない。曳網は全採集を通じて日没前後超音波散乱層が上昇してくる頃実施した。網深さおよび目的とする散乱層の深さはネット・レコーダー、魚群探知機により知ることができるが、網の深さを散乱層の深さに一致させて曳網するのは困難であった。それは超音波散乱層の層の厚さが10~20 mと薄く、かつ上昇しているため時々刻々その水深が変化するので、長時間目的とする層のみ曳網することには熟練を要した。

各層の曳網開始時刻は全ての場合について第三層が最も早く、次に第二層、第一層の順であった。

湾奥海域における生物採集は1981年~1985年、湾中央海域においては1984年~1985年にかけて行った。

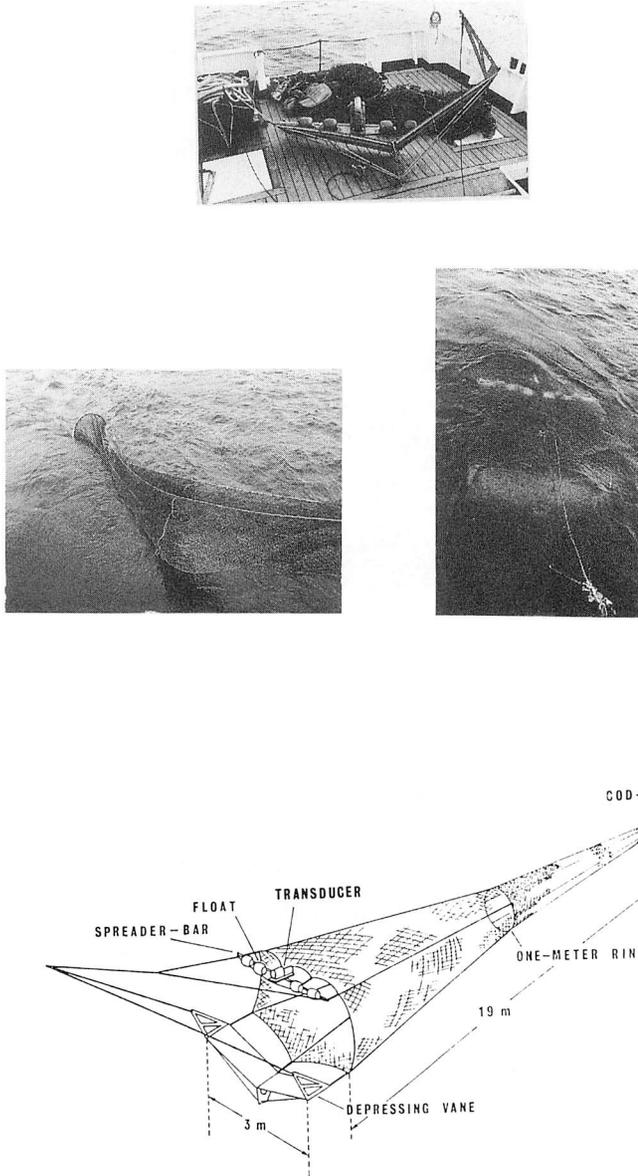
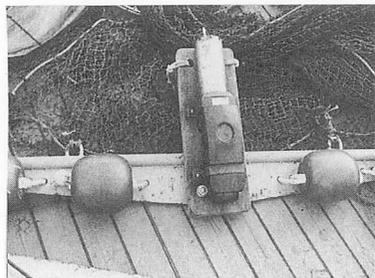
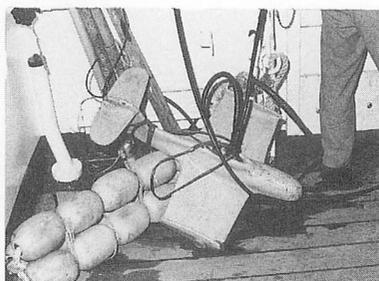


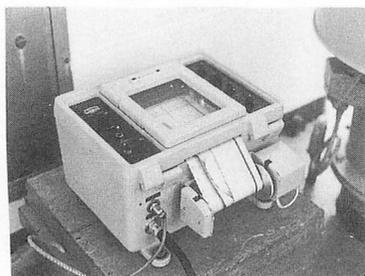
Fig. 6-1. Photographs and schematic diagram showing the Isaacs-Kidd midwater trawl net.



A



B



C

Plate 6-1. Photographs showing the set of the net recorder

A: Transducer B: Receiver C: Recorder

6. 2 結果および考察

湾奥海域，湾中央海域において Isaacs-Kidd 中層トロールネットにより採集された生物の主たるものは Plate 6-2-1と Plate 6-2-2に示した。魚類および甲殻類の種類を次に示す。

魚類

- i) イワハダカ *Bemthosema pterotu*
(はだかいわし目，はだかいわし亜目，はだかいわし科)
- ii) ヨウジエン *Pollichthys maulli*
(にしん目，わにとかげぎす亜目，よこえそ科)

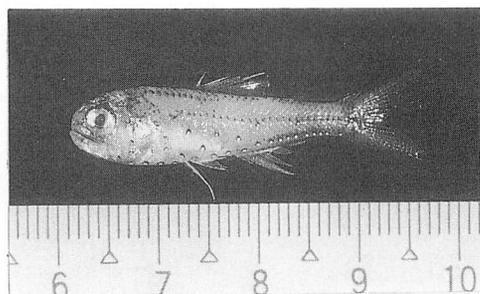
iii) キュウリエソ *Maurolicus japonicus*
(にしん目, わにとかげぎす亜目, よこえそ科)

甲殻類

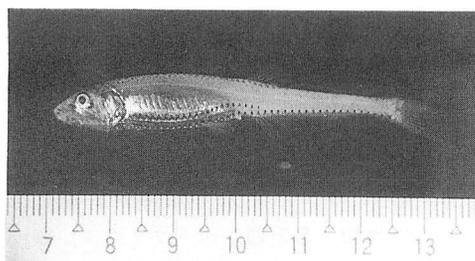
i) アミ *Lophogaster japonicus*
(あみ目, あみ亜目, あみ科)

ii) オキアミ Euphausiids
(おきあみ目, おきあみ科)

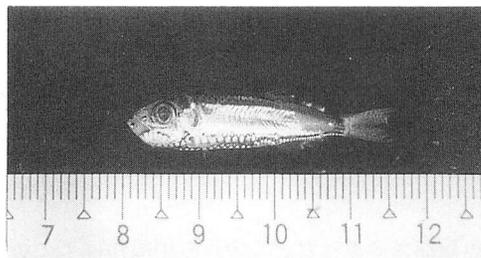
iii) エビ 種名不明



Bemthosema pterotu

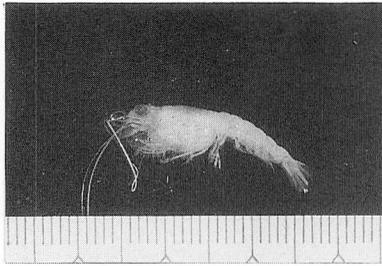
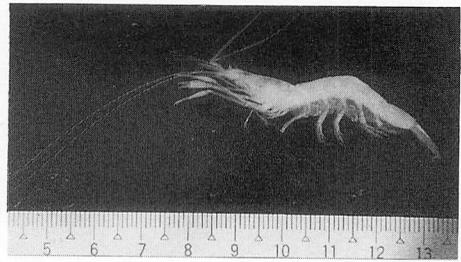


Pollichthys maulli

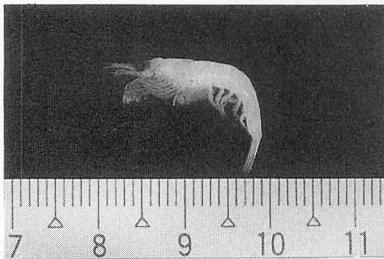


Maurolicus japonicus

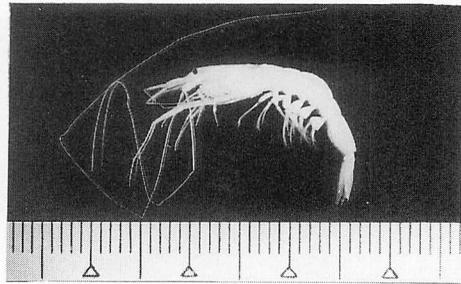
Plate 6-2-1. Photographs showing the collected main species of fish by Isaacs-Kidd midwater trawl net in the Kagoshima bay.

*Lophogaster japonicus*

Shrimp



Euphausiids



Shrimp

Plate 6-2-2. Photographs showing the collected main crustacea by Isaacs-Kidd midwater trawl net in the Kagoshima bay.

これらの他に魚類は、サイウオ (*Eregmaceros japonicus*), トカゲエソ (*Saurida elongata*) の成魚, およびウスハダカ (*Myctophum orientale*), ウルメイワシ (*Etrumeus micropus*), イワハダカ (*Bemthosema pterotu*), キジハダ, ヒメジ, サバ等の仔魚を採集した。プランクトン類は橈脚類, 枝角類, 矢虫類, 尾虫類, 多毛類, ノープリウス, 棘皮 (幼), フジツボ (幼), 卵, オキアミ (幼), エビ (ゾエア), クモヒトデ, 介形類, 端脚類, 放散虫, 二枚貝 (幼), 巻貝 (幼), レプトン, ヒドロクラゲその他のクラゲ等が採集された。

I) 湾奥海域における採集結果

湾奥海域における春・夏・秋・冬の生物採集結果を Table 6-1-1, Table 6-1-2, Table 6-1-3, Table 6-1-4に種類およびその個体数と体長を示した。体長は、「第9章 超音波散乱層を構成する生物の密度について」で個体の標的強度を議論するためこの章においても全長 (total length) を示した。又 Fig. 6-2-1, Fig. 6-2-2, Fig. 6-2-3, Fig. 6-2-4に個体数の割合を円グラフに示した。

i) 春

第一層は甲殻類78%, 魚類22%であった。このうち甲殻類はアミが98%, 魚類はキュウリエソが82%, イワハダカ, ヨウジエソがそれぞれ16%, 2%を占めた。

第二層は魚類91%, 甲殻類9%であった。このうち魚類はイワハダカが100%, 甲殻類はエビ, オキアミがそれぞれ59%, 41%を占めた。

第三層は曳網を行ったが採集生物は無であった。

Table 6-1-1. Composition of the trawl catch with Isaacs-Kidd midwater trawl net in the innermost area of the Kagoshima bay in spring.

		1st layer		2nd layer	
		individual number	total length (mm)	individual number	total length (mm)
Fishes	<i>Bemthosema pterotu</i>	42	35	1,170	35
	<i>Pollichthys maulli</i>	6	50		
	<i>Maurolicus japonicus</i>	224	35		
Crustacea	<i>Lophogaster japonicus</i>	972	21		
	Euphausiids	13	17	47	14
	Shrimp	5	55	68	42
Others	Acalephae	7		2	

Table 6-1-2. Composition of the trawl catch with Isaacs-Kidd midwater trawl net in the innermost area of the Kagoshima bay in summer.

		1st layer		2nd layer		3rd layer	
		individual number	total length (mm)	individual number	total length (mm)	individual number	total length (mm)
Fishes	<i>Bemthosema pterotu</i>	220	35	680	34	12	19
	<i>Pollichthys maulli</i>	34	52	64	56		
	<i>Maurolicus japonicus</i>	1	35	3	37	9	30
Crustacea	<i>Lophogaster japonicus</i>	1,545	18	2	19	3	19
	Euphausiids	81	15	36	15		
	Shrimp	2	52				
Others	Acalephae	1					

Table 6-1-3. Composition of the trawl catch with Isaacs-Kidd midwater trawl net in the innermost area of the Kagoshima bay in autumn.

		1st layer		2nd layer	
		individual number	total length (mm)	individual number	total length (mm)
Fishes	<i>Bemthosema pterotu</i>	41	35	83	34
	<i>Pollichthys maulli</i>	73	53		
	<i>Maurolicus japonicus</i>	14	35	4	35
Crustacea	<i>Lophogaster japonicus</i>	86	19		
	Euphausiids	80	16	53	15
	Shrimp				
Others	Acalephae	19		33	

Table 6-1-4. Composition of the trawl catch with Isaacs-Kidd midwater trawl net in the innermost area of the Kagoshima bay in winter.

		1st layer		2nd layer	
		individual number	total length (mm)	individual number	total length (mm)
Fishes	<i>Bemthosema pterotu</i>	3	31	34	32
	<i>Pollichthys maulli</i>	1	45	4	46
	<i>Maurolicus japonicus</i>	31	30	3	33
Crustacea	<i>Lophogaster japonicus</i>	26	21	4	18
	Euphausiids				
	Shrimp				
Others	Acalephae	8		4	

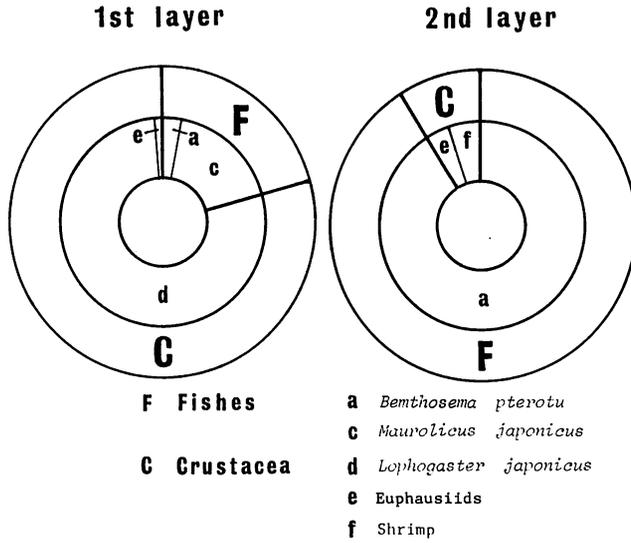


Fig. 6-2-1. Circle graphs showing the ratio of the number of individuals of collected micronekton by the Isaacs-Kidd midwater trawl net in the innermost area of the Kagoshima bay in spring.

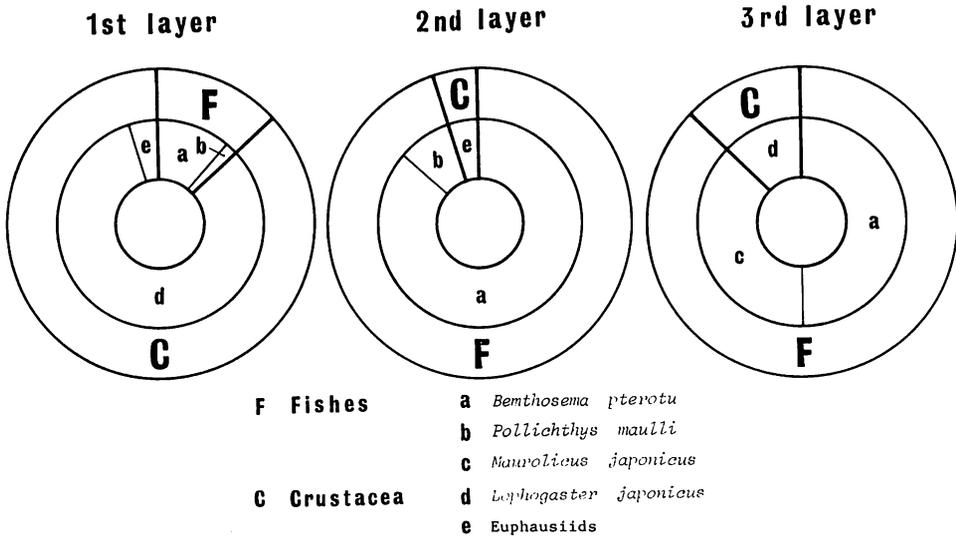


Fig. 6-2-2. Circle graphs showing the ratio of the number of individuals of collected micronekton by the Isaacs-Kidd midwater trawl net in the innermost area of the Kagoshima bay in summer.

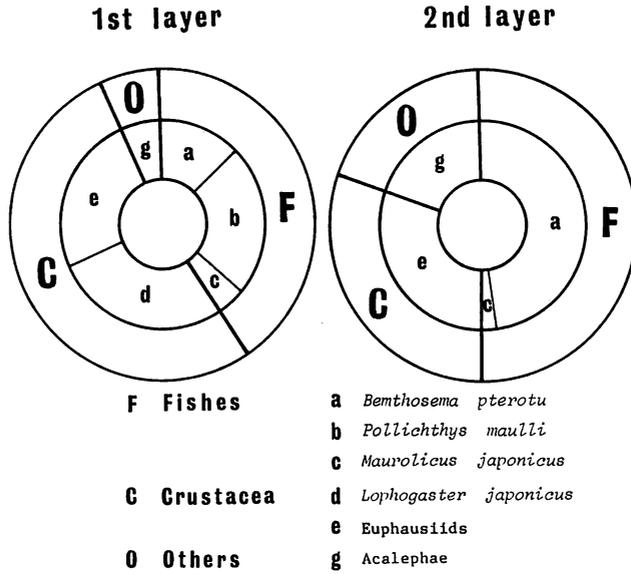


Fig. 6-2-3. Circle graphs showing the ratio of the number of individuals of collected micronekton by the Isaacs-Kidd midwater trawl net in the innermost area of the Kagoshima bay in autumn.

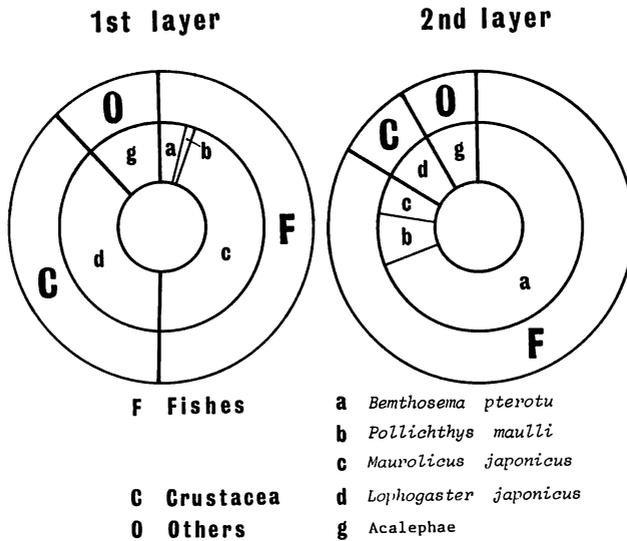


Fig. 6-2-4. Circle graphs showing the ratio of the number of individuals of collected micronekton by the Isaacs-Kidd midwater trawl net in the innermost area of the Kagoshima bay in winter.

ii) 夏

第一層は甲殻類86%，魚類14%であった。このうち甲殻類はアミが95%，オキアミ5%であった。魚類はイワハダカ，ヨウジエソがそれぞれ86%，14%を占めた。

第二層は魚類95%，甲殻類5%であった。このうち魚類はイワハダカが91%，ヨウジエソが9%を占め，甲殻類は沖アミが95%を占めた。

第三層は魚類88%，甲殻類12%であった。しかし採集個体数がそれぞれ21，3と少なく，この採集生物が第三層を構成していると推定するのは困難である。

iii) 秋

第一層は甲殻類53%，魚類41%，クラゲ6%であった。このうち甲殻類はアミ，オキアミがそれぞれ52%，48%を占め，魚類はヨウジエソ，イワハダカ，キュウリエソがそれぞれ57%，32%，11%を占めた。

第二層は魚類50%，甲殻類31%，クラゲ19%であった。このうち魚類はイワハダカ，キュウリエソそれぞれ95%，5%を占め，甲殻類はオキアミが100%を占めた。

iv) 冬

第一層は魚類51%，甲殻類38%，クラゲ11%であった。このうち魚類はキュウリエソが90%を占め甲殻類はアミが100%を占めた。

第二層は魚類84%，甲殻類8%，クラゲ8%であった。このうち魚類はイワハダカが83%を占め，甲殻類はアミが100%を占めた。

II) 湾中央海域における採集結果

湾中央海域における春・夏・秋・冬の生物採集結果を Table 6-2-1, Table 6-2-2, Table 6-2-3, Table 6-2-4に種類およびその個体数と平均体長を示した。体長の表示は湾奥海域と同様である。又 Fig. 6-3-1, Fig. 6-3-2, Fig. 6-3-3, Fig. 6-3-4に個体数の割合を円グラフに示した。

i) 春

第一層は魚類68%，甲殻類32%であった。このうち魚類はイワハダカ，ヨウジエソがそれぞれ65%，35%を占め，甲殻類はアミ，オキアミがそれぞれ96%，4%を占めた。

第二層は甲殻類79%，魚類21%であった。このうち甲殻類は99%アミが占め，魚類はイワハダカが98%を占めた。

第三層はアミが略100%であった。

ii) 夏

第一層は甲殻類92%，魚類8%であった。このうち甲殻類はアミが99%を占め，魚類はヨウジエソが96%を占めた。

第二層は甲殻類88%，魚類12%であった。このうち甲殻類はアミが99%を占め，魚類はイワハダカが100%を占めた。

第三層は曳網を行ったが採集生物は無であった。

iii) 秋

第一層は魚類66%，甲殻類33%，その他1%であった。このうち魚類はイワハダカが97%を占め，甲殻類はアミ，オキアミがそれぞれ88%，12%を占めた。

第二層は甲殻類79%，魚類20%，その他1%であった。このうち甲殻類はアミ，オキアミ

Table 6-2-1. Composition of the trawl catch with Isaacs-Kidd midwater trawl net in the middle area of the Kagoshima bay in spring.

		1st layer		2nd layer		3rd layer	
		individual number	total length (mm)	individual number	total length (mm)	individual number	total length (mm)
Fishes	<i>Bemthosema pterotu</i>	134	30	195	32	1	29
	<i>Pollichthys maulli</i>	72	43	3	35	3	35
	<i>Maurolicus japonicus</i>						
Crustacea	<i>Lophogaster japonicus</i>	92	20	740	20	1,488	20
	Euphausiids	4	17	6	18		
	Shrimp						
Others		2		3	1		

Table 6-2-2. Composition of the trawl catch with Isaacs-Kidd midwater trawl net in the middle area of the Kagoshima bay in summer.

		1st layer		2nd layer	
		individual number	total length (mm)	individual number	total length (mm)
Fishes	<i>Bemthosema pterotu</i>	3	30	125	33
	<i>Pollichthys maulli</i>	75	35		
	<i>Maurolicus japonicus</i>				
Crustacea	<i>Lophogaster japonicus</i>	929	20	939	20
	Euphausiids	6	18	14	20
	Shrimp	1	55		
Others		5			

Table 6-2-3. Composition of the trawl catch with Isaacs-Kidd midwater trawl net in the middle area of the Kagoshima bay in autumn.

		1st layer		2nd layer	
		individual number	total length (mm)	individual number	total length (mm)
Fishes	<i>Bemthosema pterotu</i>	555	19	48	38
	<i>Pollichthys maulli</i>	6	52		
	<i>Maurolicus japonicus</i>	10	37		
Crustacea	<i>Lophogaster japonicus</i>	247	16	162	19
	Euphausiids	35	11	25	18
	Shrimp				
Others		7		2	

Table 6-2-4. Composition of the trawl catch with Isaacs-Kidd midwater trawl net in the middle area of the Kagoshima bay in winter.

		1st layer		2nd layer		3rd layer	
		individual number	total length (mm)	individual number	total length (mm)	individual number	total length (mm)
Fishes	<i>Bemthosema pterotu</i>	879	35	58	35	2	35
	<i>Pollichthys maulli</i>	96	45				
	<i>Maurolicus japonicus</i>						
Crustacea	<i>Lophogaster japonicus</i>	517	18	832	20	40	20
	Euphausiids	61	18	400	17	51	17
	Shrimp						
Others	* <i>Eregmaceros japonicus</i> ** Acalephae	* 10		** 600	55		

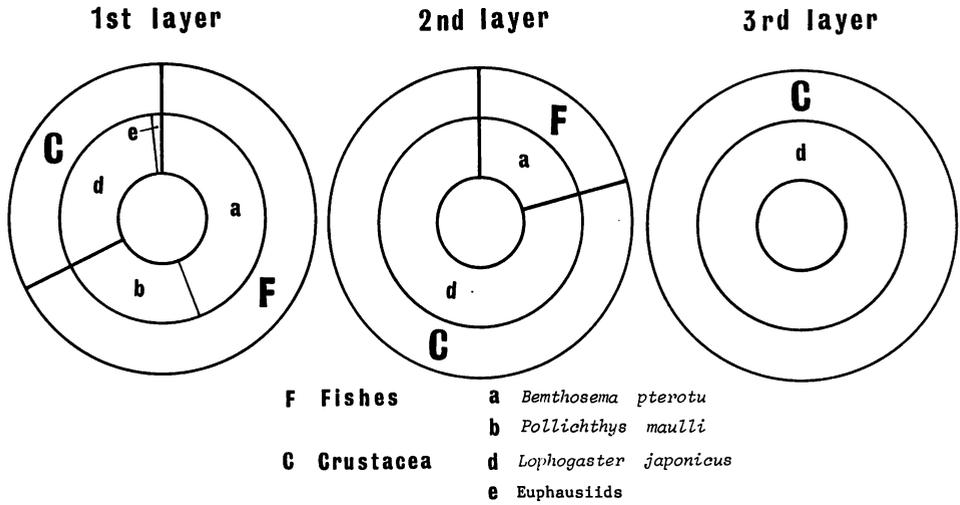


Fig. 6-3-1. Circle graphs showing the ratio of the number of individuals of collected micronekton by the Isaacs-Kidd midwater trawl net in the middle area of the Kagoshima bay in spring.

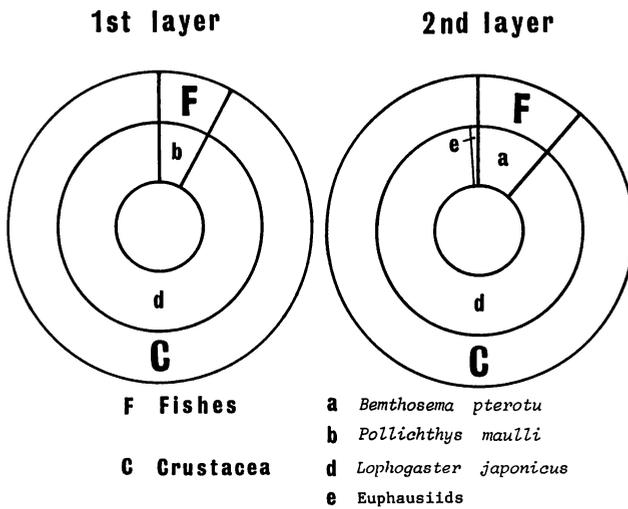


Fig. 6-3-2. Circle graphs showing the ratio of the number of individuals of collected micronekton by the Isaacs-Kidd midwater trawl net in the middle area of the Kagoshima bay in summer.

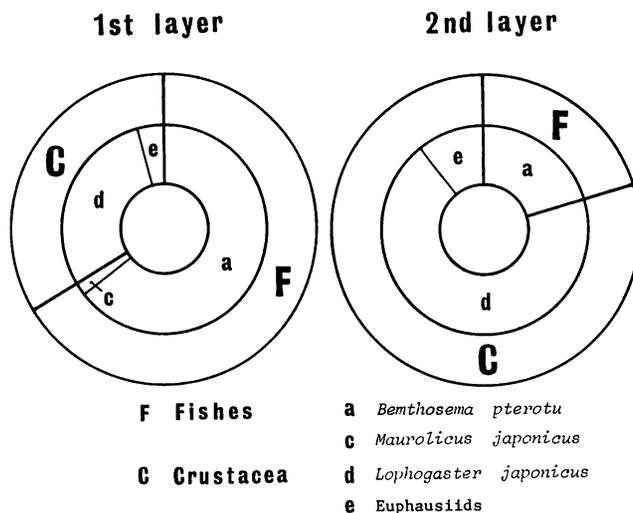


Fig. 6-3-3. Circle graphs showing the ratio of the number of individuals of collected micronekton by the Isaacs-Kidd midwater trawl net in the middle area of the Kagoshima bay in autumn.

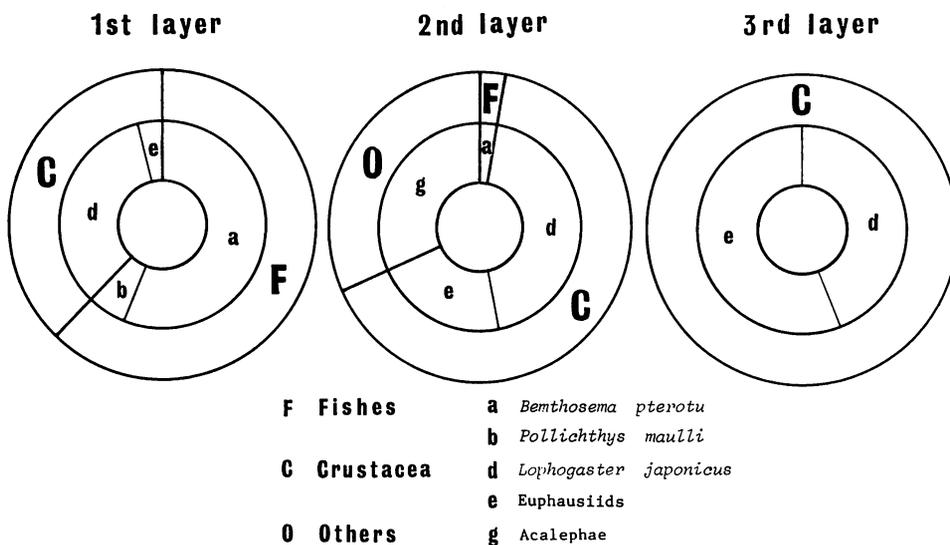


Fig. 6-3-4. Circle graphs showing the ratio of the number of individuals of collected micronekton by the Isaacs-Kidd midwater trawl net in the middle area of the Kagoshima bay in winter.

がそれぞれ87%, 13%を占め, 魚類はイワハダカが100%を占めた。

第三層は曳網を行ったが採集生物は無であった。

iv) 冬

第一層は魚類62%, 甲殻類37%, その他サイウオ1%であった。このうち魚類はイワハダカ, ヨウジエソがそれぞれ90%, 10%を占め, 甲殻類はアミ, オキアミがそれぞれ89%, 11%を占めた。

第二層は甲殻類65%, 魚類3%, クラゲ32%であった。このうち甲殻類はアミ, オキアミがそれぞれ68%, 32%を占め, 魚類はイワハダカが100%を占めた。

第三層は甲殻類98%, 魚類2%であった。このうち甲殻類はオキアミ, アミがそれぞれ56%, 44%を占め, 魚類は100%イワハダカであった。しかしイワハダカの個体数が2と少なく, 第三層は甲殻類のみと推定できるが, 甲殻類も採集された個体数が少なかった。

Isaacs-Kidd トロールネットはオープンネットであるため, 目的とする超音波散乱層の構成生物のみ捕獲するのは不可能である。よって上記の各層の採集生物には他の超音波散乱層およびそれ以外の層の構成生物が当然混獲されているものと推察する。しかし目的とする散乱層の曳網時間は網の揚げ降ろしのため, やむを得ず曳かねばならぬ目的以外の層の曳網時間より数倍長くなるよう配慮した。このことから採集されたより多い生物が目的とする超音波散乱層の構成生物であると推定される。しかし散乱層の上昇速度に合わせて曳網水深をコントロールするのは困難な作業であったこと, および曳網中, 時間の経過とともに他の層と合併してしまう場合も時々みられた事などを充分考慮に入れておかねばならない。又各層を構成する生物の推定には, 各層の記録の特徴, 垂直移動速度, 散乱強度等も合わせて考慮しなければならない。

湾奥海域, 湾中央海域における超音波散乱層の第一層から第三層にいたる一般的な特徴は次のようであった。

第一層の記録は層の厚さも他の層に比べ一般に厚く, 層の上辺, 下辺の輪郭がぼやけている場合が多かった。又ある時は Fig. 2-5の例にみられるように着底し, あたかも海底に密着して吸い込まれてしまうような記録例もあった。垂直移動速度は三層の中で最も速かった。第二層は記録の特徴から魚類であろうと推察される。第二層はいずれの季節においてもその特徴は似ており, その垂直移動速度も速く, 散乱強度は最も大きな値を示し, 特に際立った存在であった。第三層の記録は魚類と推察される場合と, 層の輪郭がぼやけ, 記録の濃さも層の厚さも非常に薄い場合と二種類みられた。前者の散乱強度は第二層とほぼ等しく, 後者のそれは前者より約10 dB 小さい値であった。

ここで前述した諸問題を考慮して超音波散乱層の構成生物について検討する。

I) 湾奥海域における超音波散乱層を構成する生物

i) 春

第一層は魚類のキュウリエソと甲殻類のアミ, 第二層は魚類のイワハダカが主たる構成生物であると推定する。第三層はその記録の特徴および曳網を行ったにもかかわらず採集できなかったことから遊泳速度の速い魚類であると推察する。

ii) 夏

第一層は魚類のヨウジエソと甲殻類のアミ、オキアミ、第二層は魚類のイワハダカ、第三層は春と同様遊泳速度の速い魚類であると推察される。魚類のキュウリエソは捕獲数が少ないもののその数が第三層、第二層、第一層の順に多い。そしてヨウジエソは第三層曳網時全く捕獲されないことから、キュウリエソはヨウジエソより早い時刻に上昇を開始するかあるいは上昇速度が速いものと推察する。

iii) 秋

第一層は魚類のヨウジエソ、キュウリエソ、甲殻類のアミ、オキアミ、第二層は魚類のイワハダカ、甲殻類のオキアミが主たる構成生物であると推察する。オキアミは第一層、第二層両曳網時に捕獲されているが、アミは第一層曳網時にのみ捕獲されていることからオキアミの垂直分布はアミの垂直分布より広い範囲にわたるものと推定する。又クラゲ類はこの時期に多く捕獲された。

iv) 冬

第一層は魚類のキュウリエソ、甲殻類のアミ、第二層は魚類のイワハダカが主たる構成生物であると推定する。

II) 湾中央海域における超音波散乱層を構成する生物

i) 春

第一層は魚類のヨウジエソ、第二層は魚類のイワハダカ、第三層は甲殻類のアミおよび遊泳速度の速い魚類が主たる構成生物であると推定する。特に第三層曳網はその記録から遊泳速度の速い魚類と推定されるものを対象として曳網したにもかかわらず捕獲されたのはほとんどがアミであった。又アミの捕獲数は第三層、第二層、第一層曳網時の順に多い結果となった。これはアミが他の甲殻類および魚類より早い時刻に上昇開始したものと推察する。

ii) 夏

第一層は魚類のヨウジエソ、甲殻類のアミ、第二層は魚類のイワハダカ、甲殻類のアミ、第三層は遊泳速度の速い魚類が主たる構成生物であると推定する。オキアミの捕獲数は少なかったが、アミの群の中にオキアミも混在したものと推定する。

iii) 秋

第一層は魚類のヨウジエソ、キュウリエソ、甲殻類のアミ、オキアミ、二層は魚類のイワハダカ、甲殻類のアミ、オキアミ、第三層は遊泳速度の速い魚類が主たる構成生物であると推定する。

iv) 冬

第一層は魚類のヨウジエソ、甲殻類のアミ、第二層は魚類のイワハダカ、甲殻類のアミ、オキアミ、第三層は甲殻類のアミ、オキアミおよび遊泳速度の速い魚類が主たる構成生物であると推定する。又この季節クラゲ類が大量に捕獲された。

湾奥海域、湾中央海域の各超音波散乱層を構成する生物について検討を加えた。特に甲殻類のアミ、オキアミは各層曳網時捕獲されている。しかし曳網開始時刻が最も早い第三層曳網時は湾中央海域の春を除いて、その捕獲数は少ないかあるいは全く捕獲されていない。又三層全てが上昇を終了した夜間、水深約20mを曳網すればアミ、オキアミは必ず捕獲される。

これらのことからアミ、オキアミは垂直移動を行う際その垂直分布はかなり広い範囲にわたるものと推定される。

以上のことから両海域における超音波散乱層を構成する生物は四季を通じて次のように分類することができた。

- 第一層 …………… 魚類のヨウジエソ、キュウリエソ
- 第二層 …………… 魚類のイワハダカ
- 第三層 …………… 遊泳速度の速い魚類

ここで甲殻類のアミ、オキアミは前述したごとく垂直分布が広いことから、又垂直移動中の層の水深にも関連し第一層、第二層、第三層を構成する魚類と複合的に超音波散乱層を構成するものと推察する。よって散乱強度が小さく層の輪郭が不鮮明な場合例えば Fig. 2-5, Fig. 2-7の(A)に示した第三層はアミ、オキアミで構成された超音波散乱層であると推察される。

第7章 超音波散乱層の水中カメラによる観察

超音波散乱層の構成生物を推定する試みとして、垂直曳き閉鎖ネットによるプランクトンの採集、およびより遊泳速度が速く、より大きな生物を対象とした Isaacs-Kidd 中層トロールネットによる採集を実施した。そしてこれらの結果より各層を構成する生物の推定を行った。この推定の信頼性をより確かなものとするため、別な方法による構成生物の確認手段の開発という意味で水中の写真撮影を実施した。超音波散乱層の写真撮影は Johnson et. al.³²⁾ によって実施されている。それは echo-sounder と50mmのレンズをセットしたカメラを組合わせ、船上より水深約30mにワイヤーで吊り下げ、カメラの全面約3.8mに遊泳する体長約20cmの *Nealotus Tripes* と推定される八匹の群れの撮影に成功している。これは echo-sounder を用いることにより、カメラ前面の魚群の有無およびその距離を知るものであったが、写真の焦点がすこしまらぬものであった。しかしこの魚類が同海域における垂直移動を行う超音波散乱層を構成する生物であるかどうかの確認は行われていない。視覚による確認は筆者自身がスキューバーを使用して潜水するのも一方法であるが、昼間において超音波散乱層の存在する水深が深いことに問題があった。又潜水艇による調査も可能である。しかし「4. 3 超音波散乱層の逃避行動」の項で述べたように人間もしくは潜水艇等が散乱層に近づけば、同じように逃避行動を行う可能性が強い。筆者が超音波散乱層の調査を継続中であった同じ湾奥海域で、1977年9月潜水艇“はくよう”による海底噴気孔の調査が実施された。その報告の中で、超音波散乱層に関連すると推察されるものは、多くの海洋中でみられるマリンスノーおよび海底付近でわずかにエビが確認されただけにとどまった。他の海域においては Cousteau³³⁾ の潜水艇 *Bathyscaphe* による潜水調査の報告もあるが、遊泳速度の速い生物の確認はなかなか困難であると推察される。その他に水中テレビカメラによる撮影も考えられた。大内・鶴ヶ谷⁷³⁾、原・杉崎⁶⁴⁾ によって水中テレビジョンの発展の歴史および技術上の問題点が述べられている。橋本⁶⁵⁾ は被写体までの距離を測定できるように超音波距離計を、又カメラの方位を知る水中コンパスを併用した改良型水中テレビを試作し、海中に人為的に吊るされた網地およびサバの撮影に成功している。西村⁶⁶⁾ はタラバガニ漁場で、カニ、魚礁などの撮影、石田⁶⁷⁾ はサケ・マスの流刺網からの脱落率計測への応用を試

みている。このように水中テレビは海洋中の標的を撮影する有力な方法としてより一層の改良がなされており、橋本ら⁶⁵⁾、西村⁶⁸⁾は超音波散乱層の撮影の可能性についても示唆している。しかしテレビ撮影にはフラッシュ光でなく連続した相当の光力をもった照明が必要である。「第4章 海中の照度と超音波散乱層の垂直移動」で述べたように超音波散乱層を構成する生物は強い光りから逃避する性質があり、この方法も問題があると推察される。このような理由から最も簡便でかつ廉価であるフラッシュ光による一枚撮りカメラでの水中撮影を試みた。

7. 1 撮影方法

超音波散乱層を構成する生物の撮影を目的として Fig. 7-1, Fig. 7-2, Fig. 7-3に示した三種の撮影装置を試作した。

I) 水中カメラニコノスによる撮影

Fig. 7-1に示したようにフラッシュを装備した水中カメラ・ニコノスをカメラケースに装着した。このカメラのシャッターの開閉およびフィルムの巻き取りはレバーを押すことにより可能である。よってこのレバーにワイヤー（直径1mm）を連結し、船上からワイヤーを引っ張ることによりレバーを押し、シャッターの開閉ができるように試作した。その際引く力によりカメラが振れないよう重錘として鉄球3個を取り付けた。総重量は26kgであった。この装置の場合、ある水深で1枚撮影すると1個のフラッシュバルブが使用されるため、連続撮影を行うためには、この装置を一度船上に引き上げ、新しいフラッシュバルブと交換しなければならないという不便さがあった。

この装置に用いた撮影機器は次の通りである。

- i) カメラ……………ニコノスⅢ
日本光学工業株式会社
- ii) レンズ……………ニッコール 80mm 1:4
日本光学工業株式会社
- iii) フラッシュ……………FP 級 6B ガイドナンバー23 (ISO 100)
ナショナル電気産業株式会社
フラッシュガン保持具
日本光学工業株式会社
- iv) 接写装置……………日本光学工業株式会社

II) カメラケース収納——正面よりストロボを同調させた場合

Fig. 7-2に示したようにカメラとストロボを1つの耐圧防水のカメラケースに収納し、カメラと同じ位置から標的にフラッシュ光を照射する撮影方式である。カメラケース本体は鉄板（厚さ4.5mm）を溶接して製作した。前面は厚さ20mmの透明アクリル板を用い、合成ゴム製 O-リングをパッキングとして用い、ケース本体とアクリル板をボルト締めすることにより水密を保持した。カメラシャッターはカメラに取り付けた電動巻上装置と2芯キャプタイヤーコード（径6mm長さ120m）によって接続された押しボタンスイッチにより船上から操作できるようにした。キャプタイヤーコードがカメラケースを貫通することによる漏水対策は充分に対処した。この結果水深110mにおいて2時間の耐圧試験を実施したところ水漏れ

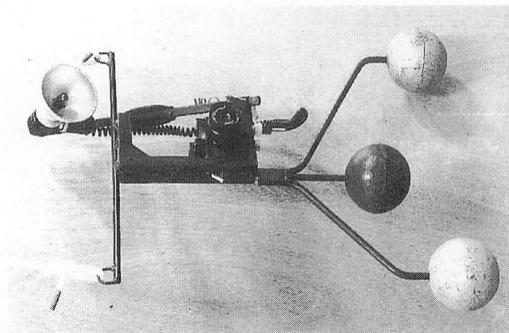
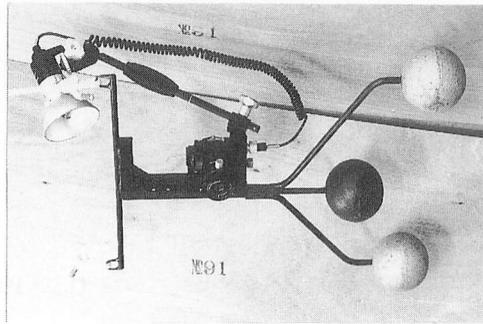
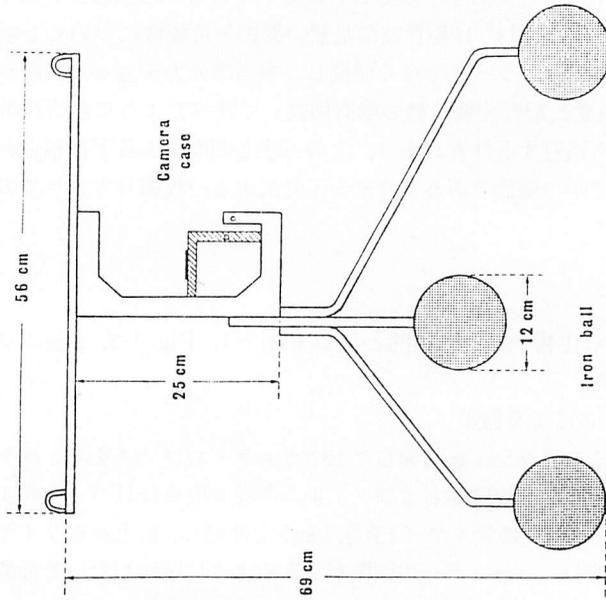


Fig. 7-1. Photographs and schematic diagram showing the camera case for the Nikonos-III which is a kind of underwater camera.

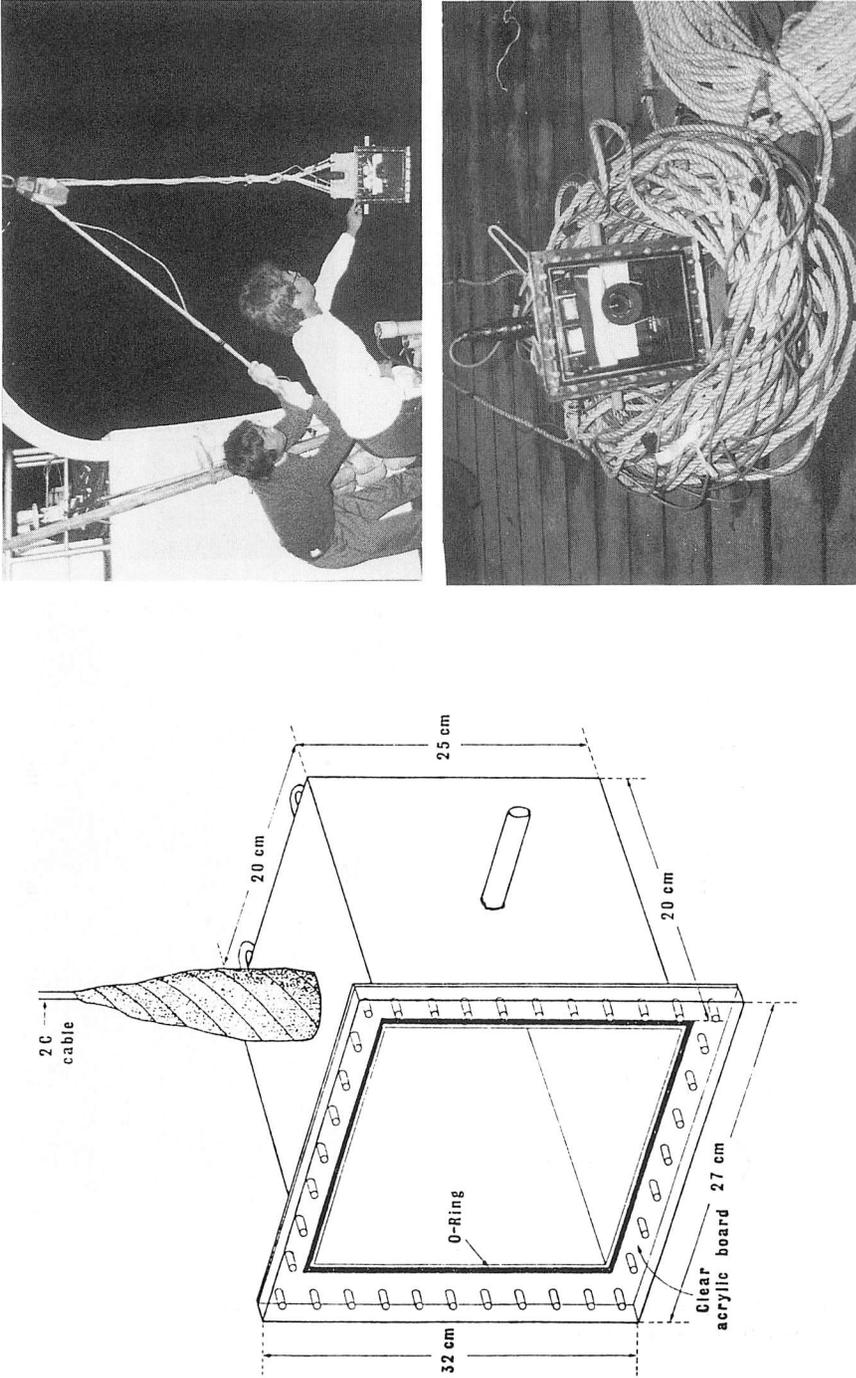


Fig. 7-2. Photographs and schematic diagram showing the watertight camera case. The camera and the strobe are placed in it.

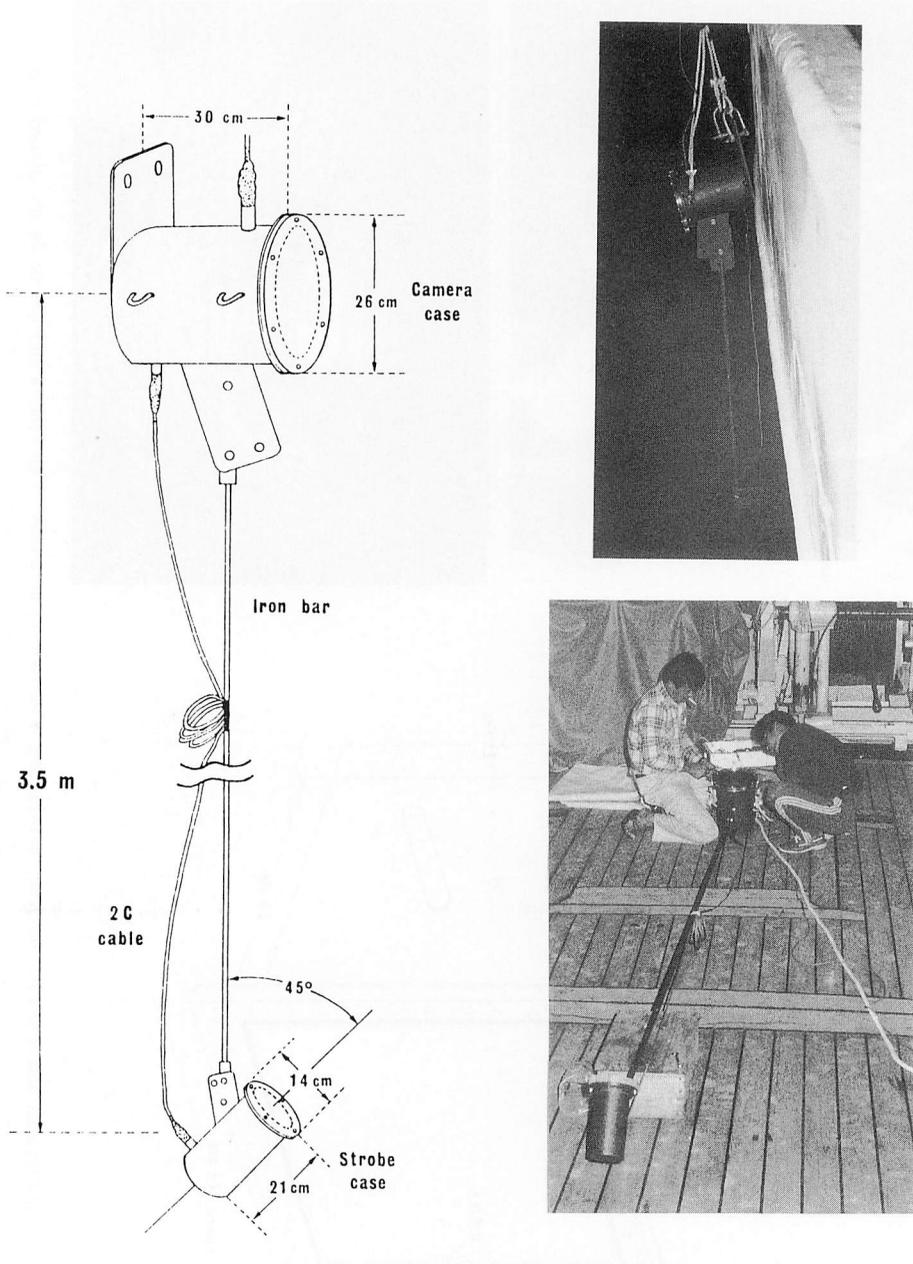


Fig. 7-3. Photographs and schematic diagram showing the watertight camera case and the watertight strobe case.

は全くなかった。

この装置に用いた撮影機器は次の通りである。

- i) カメラ……………ニコン FE
日本光学工業株式会社
- ii) レンズ……………ニッコール20mm F 3.5
ニッコール50mm F 1.4
日本光学工業株式会社
- iii) 電動巻上装置……………ニコン・モータードライブ MD-12
日本光学工業株式会社
- iv) ストロボ……………パナショット PE-203
ガイドナンバー20 (ISO 100)
松下電気産業株式会社

Ⅲ) カメラケース収納——下方45°の角度よりストロボを同調させた場合

Fig. 7-3に示したようにカメラとストロボを別の耐圧防水ケースに収納し、ストロボはカメラ下方約3mの位置から45°の角度で標的にフラッシュ光を照射する撮影方式である。カメラケースの水密の保持およびカメラシャッターの開閉は(Ⅱ)と全く同じ方法を採用した。この結果水深90mにおける2時間の耐圧試験を実施したところ水漏れは全くなかった。この装置に用いた撮影機器は次のとおりである。

- i) カメラ……………(Ⅱ)に同じ
- ii) レンズ……………ニッコール シリーズ E F4
(70~210 mm ズーム)
日本光学工業株式会社
- iii) 電動巻上装置……………(Ⅱ)に同じ
- iv) ストロボ……………ストロボット PE-320S
ガイドナンバー42 (ISO 100)
松下電気産業株式会社

撮影装置(I)の場合は伸長したロープの長さによってその水深を推定した。撮影装置(Ⅱ)(Ⅲ)の場合は Fig. 7-4に示したように魚群探知機の記録から、その水深を推定し、又シャッターチャンスは超音波散乱層ならびに撮影装置の記録水深から定めた。撮影した散乱層および時刻は記録紙にマーク(縦の細い線)を入れることにより混乱することを避けた。

7. 2 結果および考察

I) 水中カメラ・ニコノスによる撮影

1977年10月4日、湾中央海域における撮影結果を Plate 7-1に示した。昼間(14時30分頃)と夜間(20時頃)に分け、水深10m, 20m, 30mでそれぞれ撮影を行った。ここに示した写真は全てクローズアップレンズを使用したもので、焦点距離は235mmにあり、撮影範囲は53mm×79mmであった。フィルムはフジカラー ISO 100を使用し、シャッタースピード1/125、絞り F 22とした。

この撮影結果から、動物プランクトンの橈脚類と推察される体長1.3mm~1.8mmの被写体が

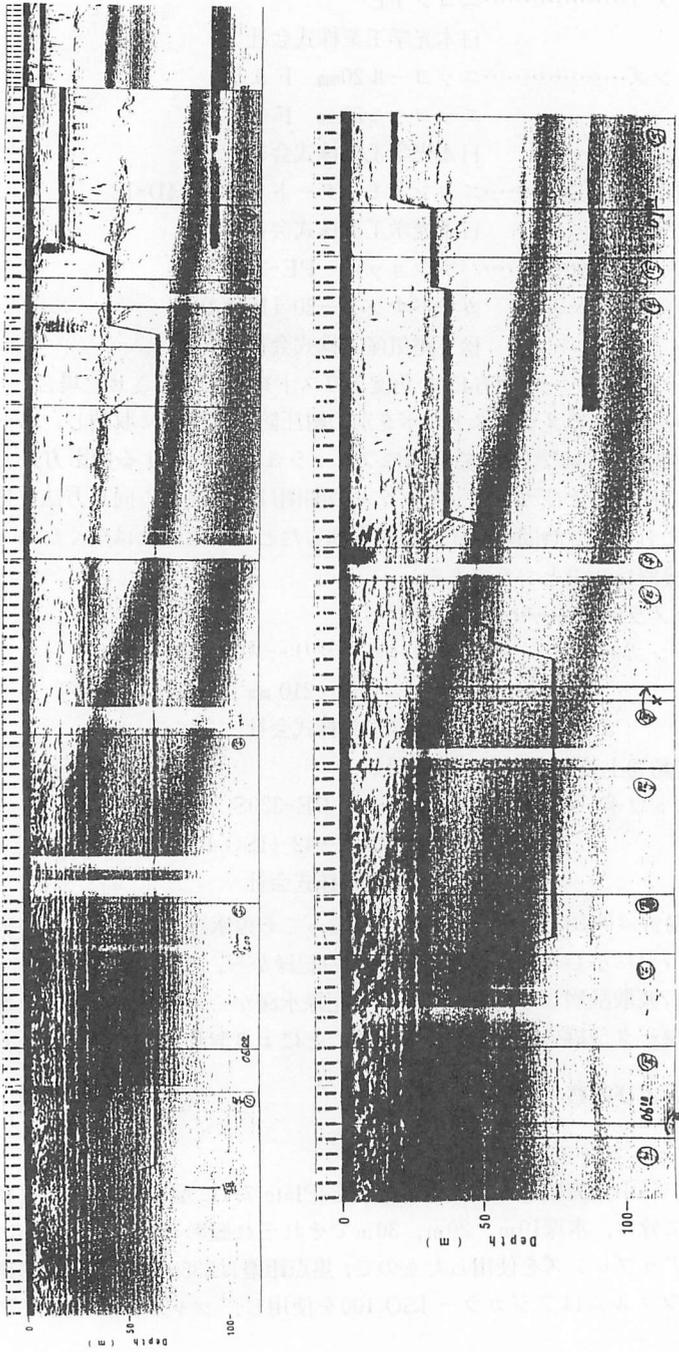


Fig. 7-4. The records of the depth of the camera case (horizontal thick lines) by 50 kHz fish finder and the time when the shutter was opened (longitudinal thin lines).

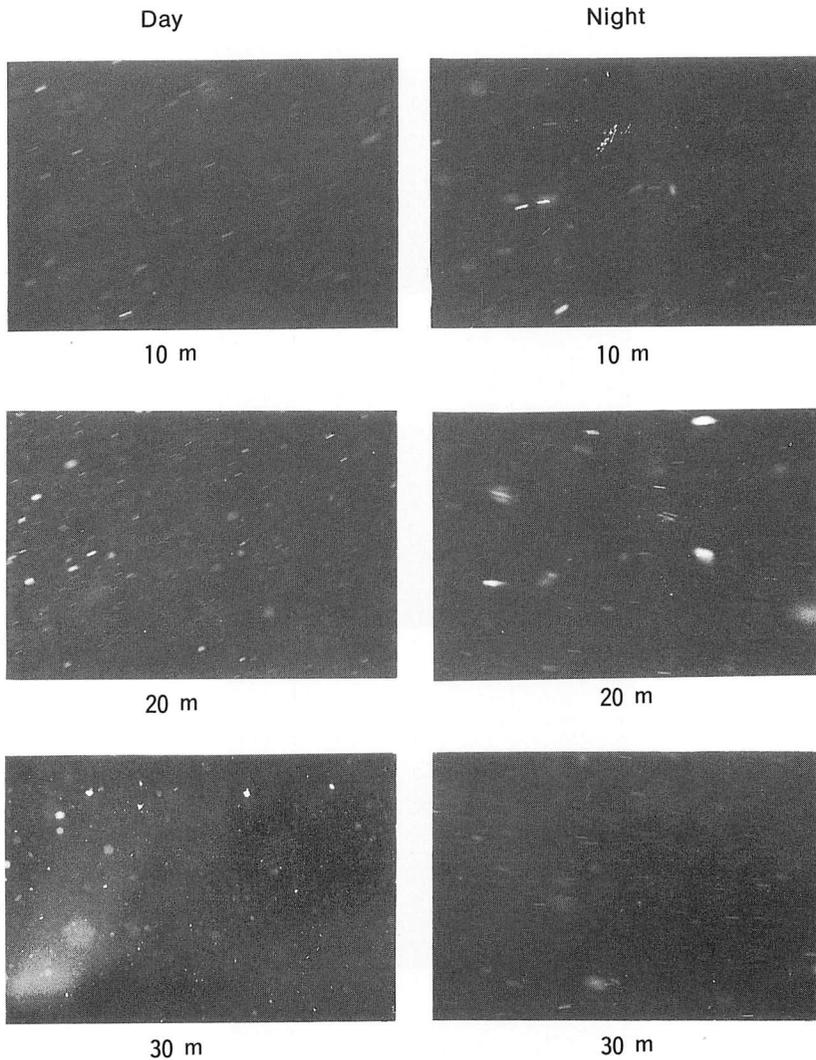


Plate 7-1. Underwater photographs which were taken by the Nikonos-III in the middle area of the Kagoshima bay on 4th in August, 1977. The focal distance was 23.5cm.

数多く撮影された。夜間水深20m層で撮影された右上の大きな被写体の体長は約5mmである。被写体はそれぞれ赤みをおびたものおよび白っぽいものの二種類あったがその種類を確認するまでには至らなかった。なおクローズアップレンズを使用せず、焦点距離100cmとして撮影した結果、各水深とも非常に焦点がぼけた被写体のみが撮影されたにとどまった。

II) カメラケース収納——正面よりストロボを同調させた場合

1982年10月14日～15日湾奥海域における撮影結果を Plate 7-2-1, Plate 7-2-2に示した。Plate 7-2-1はニッコール20mm F 3.5のレンズを使用し焦点距離45cmで、Plate 7-2-2はニッコール50mm F 1.4のレンズを使用し焦点距離100cmで撮影したものである。よって撮影範囲

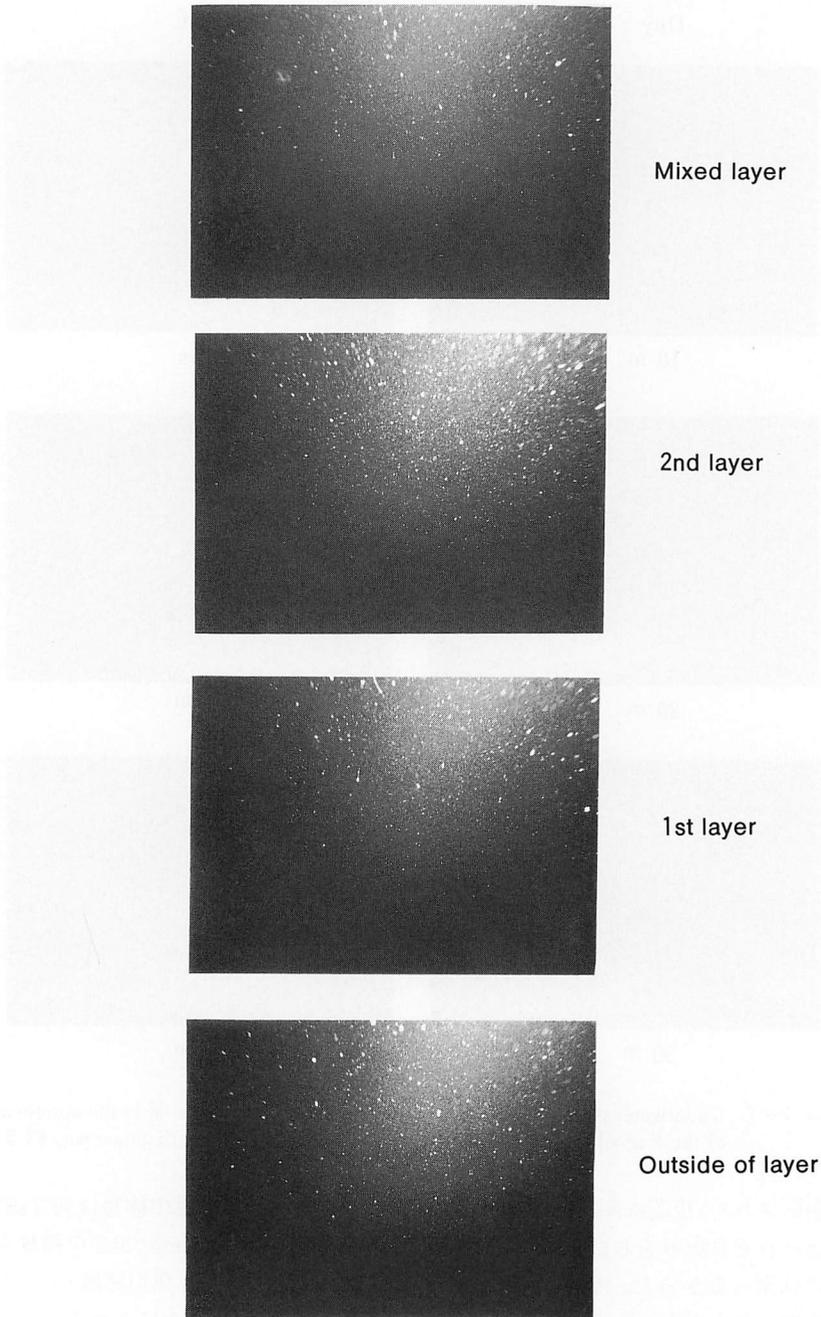
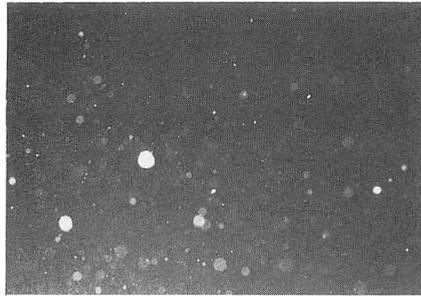


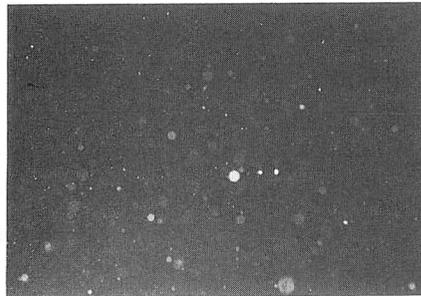
Plate 7-2-1. Underwater photographs which were taken by the method that a camera and a strobe were placed together in the watertight camera case, in the middle area of the Kagoshima bay, in October, 1982. The focal distance was 45cm.



2nd layer



1st layer



Outside of layer

Plate 7-2-2. Underwater photographs which were taken by the method that a camera and a strobe were placed together in the watertight camera case, in the middle area of the Kagoshima bay, in October, 1982. The focal distance was 100cm.

はそれぞれの焦点距離において、17.6cm×26.4cm、35.3cm×53.0cmであった。Plate 7-2-1において、第一層、第二層、各層の合併層および層外全てにおいて、体長2～3mmの橈脚類と推定される被写体が撮影されているが、その数において、それぞれ有意の差はみられなかった。又各層の合併層では体長15～30mmのクラゲが、第一層では体長約18mmの矢虫と推定される被写体が撮影された。又、種類は推定できぬが、体長3.7mm前後の被写体も輝点として撮影されている。しかしこれは焦点距離45cmより近くにあった被写体が、少しぼやけて大きく

撮影された可能性も強い。Plate 7-2-2は焦点距離を100cmとしたため、それより極く近距離にある被写体がぼやけて大きな輝点として撮影された。このように近距離に焦点を合わせて撮影した結果、動物プランクトンと推定される物体が多数撮影されたが、明確に被写体を同定することは(I)同様困難であった。しかもその被写体の数も、超音波散乱層の内と外において有意の差がみられなかった。このことから垂直移動を行う超音波散乱層を構成する生物は、ここには撮影されておらず、別の種類であると推定される。これは撮影範囲、被写体深度と超音波散乱層を構成する生物の量(密度)との関係および超音波散乱層を構成する生物の逃避行動に深く関連するものと推定される。そこで焦点距離を長くし、撮影範囲を広げる試みを実施した。

Ⅲ) カメラケース収納——下方45°の角度よりストロボを同調させた場合

(I)(II)の方法では垂直移動を行う超音波散乱層を構成する生物の撮影は困難であるとの判断により、まず第一に撮影距離、すなわち焦点距離を長くすることを考慮した。しかし Isaacs-Kidd トロールネットによる採集生物は大きくて数cmであったことから望遠レンズを使用した。ここで問題になるのは水中における明るさであり、光の減衰が大きいためカメラと被写体の距離は自ずと制限された。これらの諸条件よりレンズは望遠100mmとし、焦点距離を400cmとした。望遠レンズ100mmの対角線写角は空中で24°、海中では屈折率を考慮して約18°となる。よって400cmの焦点距離における撮影範囲は縦69.3cm、横104cmである。なお撮影は全てフラッシュ光を用い、シャッター速度1/125、絞りは開放であった。Plate 7-3-1は1984年8月3日、湾奥海域における超音波散乱層が全て上昇を終了した夜間における各層の合併層内の写真である。撮影時刻、撮影水深は次のとおりであった。

	撮影時刻	撮影水深
写真 A	21 ^h -10 ^m	30m
写真 B	21 ^h -15 ^m	30m

写真 A および写真 B には魚体がそれぞれ一個体ずつ撮影された。海洋中における魚体の撮影成功は今回が初めてであった。魚種判定のため引き伸ばし写真を付加した。写真機から被写体までの距離が明確でないため、魚体長はネガフィルム又は印画紙に写し出された大きさから直接推定せざるを得ない。写真 A は体長数cm前後のマイワシ、写真 B は体長4cm前後のイワハダカが撮影されているものと推定される。Plate 7-3-2は湾中央海域で1985年1月23日、日没前後、超音波散乱層が上昇中撮影した写真である。撮影時刻、撮影水深は次のとおりである。

	撮影時刻	撮影水深
第三層写真	17 ^h -20 ^m	60m
第二層写真	17 ^h -56 ^m	70m
第一層写真	18 ^h -30 ^m	70m

第三層写真には体長約1cmの被写体がおおよそ120~150個体撮影された。これはオキアミもしくはアミと推定される。第二層写真には体長約4cmのイワハダカと推定される魚体が20個体撮影された。その体軸の上昇角度は23°~27°にあった。又これと同時に第三層写真で撮影されたものと同様の被写体および個体数が撮影された。第一層写真には第三層写真と同様の被写体およびそれより若干多い個体数が撮影された。

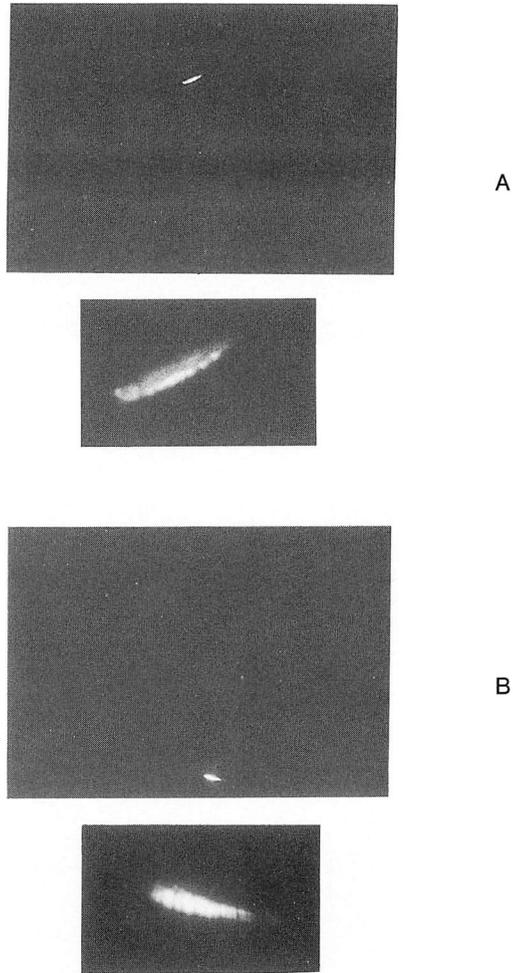


Plate 7-3-1. Underwater photographs which were taken by the method that a camera and a strobe were placed apart in each watertight case, in the innermost area of the Kagoshima bay, in August, 1984, The telephoto lens (100mm) was used and focal distance was 400cm. A is a photograph of a MAIWASHI. B is a photograph of a IWAHADAKA.

Plate 7-3-3は湾中央海域で1985年1月25日、日出前後、超音波散乱層が下降中撮影した写真である。撮影時刻、撮影水深は次のとおりである。

	撮影時刻	撮影水深
写真 A	05 ^h -55 ^m	50m
写真 B	06 ^h -05 ^m	76m
層外写真	07 ^h -00 ^m	40m

1.23 ascending

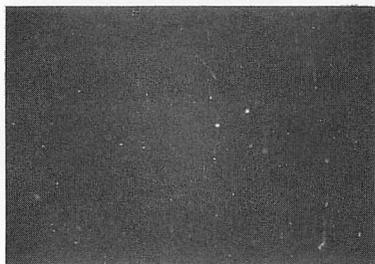
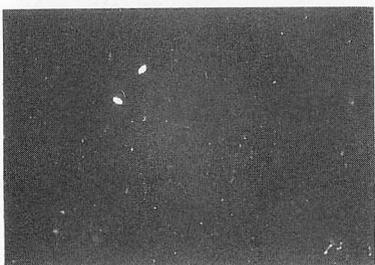
3rd layer
Depth : 70 m2nd layer
Depth : 70 m1st layer
Depth : 70 m

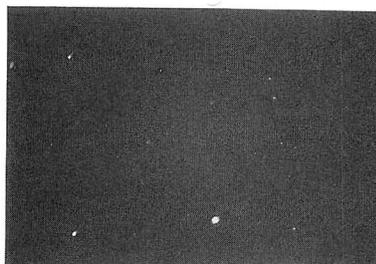
Plate 7-3-2. Underwater photographs which were taken by the same method as the former in the middle area of the Kagoshima bay in January, 1985. The 3rd layer and the 1st layer are photographs of crustacea. The 2nd layer is photographs of IWAHADAKA.

1.25 descending



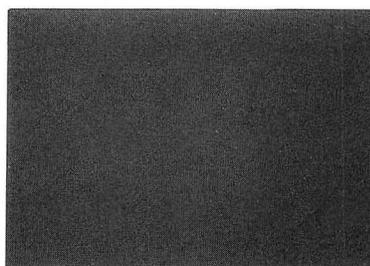
A

Depth : 50 m



B

Depth : 76 m



Outside of layer

Depth : 40 m

Plate 7-3-3. Underwater photographs which were taken by the same method as the former in the middle area of the Kagoshima bay in January, 1985. A is a photograph of MAIWASHI. B is a photograph of IWAHADAKA. The outside of layer photographed nothing.

写真 A には体長10~20cmのマイワシと推定される魚体が6個体撮影された。1月24日~25日にかけての夜間、マイワシの群れが船の周囲を数時間にわたって遊泳したので、数匹捕獲して体長を測定したところ18~20cmであった。ここに撮影されたものは、その一群であると推定される。写真 B には体長約2cmのイワハダカと推定される魚体が3個体撮影された。層外写真は垂直移動を行う超音波散乱層が全て下降してしまった水深40mにおける写真である。被写体は引き伸ばしされた印画紙上で輝点として存在し数十個体認められた。この被

写体の大きさは1～2mm程度と推定される。

上記のように何年間かの試行錯誤の末、望遠レンズを装着したカメラをカメラケースに収納し、ストロボを下方45°の角度より同調させ撮影距離を400cmとしたことで、垂直移動を行う超音波散乱層を構成すると推定される生物の撮影に成功した。しかし何枚となく撮影する間に、偶然被写体が撮影範囲にある時のみ像をとらえることができるという、いわゆる“めくら撮り”のため、撮影距離も明確でなく、焦点の定まらぬ像しか得ることができなかったことは今後の問題として残しておきたい。

第8章 超音波散乱層を構成する生物分布量の測定理論

海洋における生物分布量の測定は、漁獲量の推定および水産資源の長期安定利用を保障するため、国際的尺度で経済的に重要な魚の資源量を迅速に、より精確に推定する必要から実施されてきた。そしてそれは魚群探知機からの情報を詳細に分析することから始まり現在その方法は

- 1) 記録方式
- 2) 自動的方式
 - イ) 計数方式
 - ロ) 積分方式

に分類することができる。

記録方式は魚群探知機が使用された当初から現在に至るまで、特にマグロ漁業^{69), 70), 71)}、北洋のサケ・マス漁業^{72), 73), 74), 75), 76)}、南氷洋の沖アミ量推定⁷⁷⁾、定置網の漁獲量推定⁷⁸⁾など魚群およびプランクトン等超音波散乱層の標的強度、散乱強度を重要な要因とし、物理的な水中の音波伝搬を考慮し、群密度・魚群量を求めるための理論的な検討が、実吉・中村⁷⁹⁾、石田ら⁸⁰⁾、Machlup and Hersey⁸¹⁾、Chapman and Marshall⁸²⁾、Ehrenberg⁸³⁾、Love⁸⁴⁾、Peterson et. al⁸⁵⁾、Johnson⁸⁶⁾、Greeblatt⁸⁷⁾らによってなされ、その手法の高度化が研究、論議されてきた。しかし資料の整理に時間を要し、その割に精度が悪いという欠点を拭い去ることができない。この欠点を補うため現在、上記の研究者らの基礎理論の上に、自動的方法が開発され多くの資料を得るに至っている。計数方式は山中ら⁸⁸⁾によるカツオ・マグロ漁場における実験、佐野ら⁸⁹⁾による遡上するサケの計数実験が行われており、積分方式は見元・青山⁹⁰⁾がイワシ、アジ、サバ等まき網操業において、古沢ら^{91), 92), 93)}によるイケスに飼育されているハマチ、マダイの魚量測定法の開発、佐野ら⁹⁴⁾のサケ・マス自動計測システムの開発などがあり、又計量用魚群探知機の理論、開発、利用等の問題点を述べた McElroy and Wing²⁶⁾、Bodholt⁹⁵⁾、Göetze⁹⁶⁾、Ehrenberg et. al⁹⁷⁾、土井⁹⁸⁾がある。

自動的方法における計数方式は独立した個々の標的の反射波をデジタルカウントするものであり、このために機器の分解能を高くする技術的問題が残されている。又、海洋中における標的の分布が疎である場合しか適用できない欠点がある。もう一つの積分方式は群体標的からの反射波をアナログ量のまま積分して、分布密度を求める方式であり、計数方式より実際的であるため標的の群密度測定の主流を占めようとしている。超音波散乱層を構成する生物の群密度は濃く、かつ1個体の大きさが小さいため計数方式は不適である。よってこの章

における超音波散乱層を構成する生物の分布量を知るための群密度測定理論は積分方式の考え方を導入して理論展開をおこなう。

そこでまず、単体の標的についての理論式を論じ、次に単体標的の集合と考えられる群体の標的について考察する。群体標的の反射については各標的からの一次反射のみならず、各個標的間の相互反射、すなわち二次反射の影響について理論式を展開する^{52),99)}。

8. 1 単体標的の測定理論

Fig. 8-1の(1)に示したように、音波は送波器から垂直方向に発射され、海中を伝搬し、単体標的により反射、再び海洋中を伝搬して受波器に戻る。送波器から発射された音波の強さを I 、送波器の指向性パターン関数の値を $bt(\theta, \Psi)$ とすれば、次のように定義される。

$$bt(\theta, \Psi) = I(\theta, \Psi) / I(0, 0) \quad (8-1)$$

よって任意の方向 (θ, Ψ) における音波の強さ $I(\theta, \Psi)$ は次式で示される。ただし I_0 は $I(0, 0)$ に等しく、発射された音波の音軸線上の強さである。

$$I \sim I_0 \cdot bt(\theta, \Psi) \quad (8-2)$$

送波器より標的に達するまでの距離 r を伝搬する間、拡散減衰 $1/r^2$ 、吸収減衰 $1/e^{ar}$ の影響により、標的への入射波の強さは次式で表わされる。

$$I_i \sim I_0 \cdot bt(\theta, \Psi) \cdot (1/r^2) \cdot e^{-ar} \quad (8-3)$$

$$a = \beta \cdot \log e \quad (8-3)$$

ここで

I_i : 標的への入射波の強さ

β : 音波の減衰係数の対数減少率

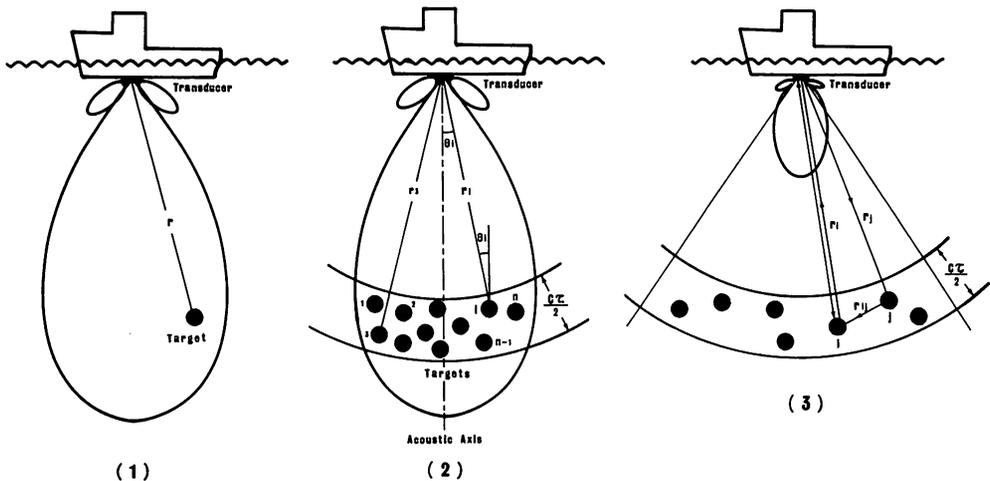


Fig. 8-1. (1) Reflection of sound waves by a single target.
 (2) Reflection of a fish finder pulse by a multiple target.
 (3) First reflection route of sound waves (transducer→*i*th target→transducer) and secondary reflection route of sound waves (transducer→*j*th target→*i*th target→transducer).

α : 音波の吸収係数

標的は音波エネルギーの一部を吸収・透過し、残りを反射する。この時標的から単位距離における反射の強さは次式となる。

$$\begin{aligned} I_r &\sim I_i \cdot \sigma_0 \cdot bf(\theta, \Psi) \\ &= I_0 \cdot bt(\theta, \Psi) \cdot (1/r^2) \cdot e^{-\beta r} \cdot \sigma_0 \cdot bf(\theta, \Psi) \end{aligned} \quad (8-5)$$

ここで

I_r : 標的から単位距離における反射波の強さ

σ_0 : 標的の散乱断面積の最大値

$bf(\theta, \Psi)$: 標的の反射指向性パターン関数の値

そして反射波は受波器まで距離 r , 拡散減衰, 吸収減衰の影響を受けて伝搬する。よって受波器における単体標的からの反射波の強さは次式となる。

$$\begin{aligned} I_e &\sim I_r \cdot br(\theta, \Psi) \cdot (1/r^2) \cdot e^{-\beta r} \\ &= I_0 \cdot bt(\theta, \Psi) \cdot (1/r^2) \cdot e^{-\beta r} \cdot \sigma_0 \cdot bf(\theta, \Psi) \cdot br(\theta, \Psi) \cdot (1/r^2) \cdot e^{-\beta r} \\ &= I_0 \cdot bt(\theta, \Psi) \cdot br(\theta, \Psi) \cdot (1/r^4) \cdot e^{-2\beta r} \cdot \sigma_0 \cdot bf(\theta, \Psi) \end{aligned} \quad (8-6)$$

ここで

I_e : 受波器における反射波の強さ

$br(\theta, \Psi)$: 受波器の指向性パターン関数の値

本論文において使用した魚群探知機の振動子は送波・受波兼用の送受波器であったので

$$bt(\theta, \Psi) \simeq br(\theta, \Psi) \equiv b(\theta, \Psi) \quad (8-7)$$

となる。よって (8-6) 式は次のように示すことができる。

$$I_e = I_0 \cdot b^2(\theta, \Psi) \cdot (1/r^4) \cdot e^{-2\beta r} \cdot \sigma_0 \cdot bf(\theta, \Psi) \quad (8-8)$$

(8-8) 式が単体標的の測定理論を示している。

ここで散乱断面積 σ と標的強度 T_s の関係について示す。標的強度は、その定義するところにより次式となる。

$$T_s = I_r / I_i \quad (8-9)$$

散乱断面積は単位面積に入射した音波の強さ I_i と単位距離における散乱パワーの比である。よって散乱断面積 σ と入射音波の強さ I_i との積が、単位断面積によって全方向に放射したパワーと等しい。よって

$$\begin{aligned} I_i \cdot \sigma &= I_r \cdot 4\pi \cdot l^2 \\ \therefore \sigma &= 4\pi \cdot I_r / I_i \end{aligned} \quad (8-10)$$

(8-9) 式と (8-10) 式により

$$\sigma = 4\pi \cdot T_s \quad (8-11)$$

又、これを dB 表示すれば次のようになる。

$$TS(\text{dB}) = 10 \log(I_r / I_i) = 10 \log(\sigma / 4\pi) \quad (8-12)$$

(8-8) 式は散乱断面積を1個のパラメータとしているが、これを標的強度 T_s に置き換えると次式となる。

$$I_e = I_0 \cdot b^2(\theta, \Psi) \cdot (1/r^4) \cdot e^{-2\beta r} \cdot 4\pi \cdot T_s \cdot bf(\theta, \Psi) \quad (8-13)$$

このように (8-11) 式により、散乱断面積を標的強度に簡単に変換することが可能である。よって以降の数式展開は散乱断面積 σ を使用する。

8. 2 群体標的の測定理論

標的が単体の場合、送受波器に到達する反射波の強さは(8-8)式に示したとおりである。しかし先に述べたように超音波散乱層は、単体標的の複数個の集合体である。送受波器の音軸 $(b(0, 0))$ 付近の超音波散乱層を構成する生物からは、最も強い反射波が得られるが、軸線から離れるに従い $b(\theta, \Psi)$ が減少するため、反射波の強さは2乗で小さくなる。又超音波散乱層を構成する生物も、各個体で散乱断面積の値が異なる。いま、水中における音速を C 、発射パルス幅を τ とすれば、 $C \cdot \tau / 2$ の厚みの中に存在する n 個のそれぞれ反射の強さが異なる標的からの反射波の強さを合計することによって、散乱層からの散乱の強さとすることができる¹⁰⁰⁾。すなわち

$$I_r \text{ total} = I_{r_1} + I_{r_2} + \dots + I_{r_n} \tag{8-14}$$

よって(8-8)式は次のようになる。

$$I_e \sim I_0 \sum_{i=1}^n (1/r_i^4) \cdot e^{-2\alpha r_i} \cdot b^2(\theta_i, \Psi_i) \cdot \sigma_{0i} \cdot bf(\theta_i, \Psi_i) \tag{8-15}$$

ここで

- r_i : 送受波器より i 番目の標的までの距離
- $b(\theta_i, \Psi_i)$: i 番目の標的の方向 (θ_i, Ψ_i) に対応する送受波器の指向性パターン関数の値
- $bf(\theta_i, \Psi_i)$: i 番目の標的の反射指向性パターン関数の値
- σ_{0i} : i 番目の標的の散乱断面積の最大値

次に Fig. 8-1の(2)からもわかるように、送受波器と各標的までの距離 r は、 $C \cdot \tau / 2$ の範囲内において、それぞれ異なった値を取る。これは各標的の送受波器に至る伝搬経路の長短による搬送波の位相差に基づく干渉効果の原因となる。この位相差による干渉について古澤ら^{91), 92), 93)}は次のように説明している。ある魚(i 魚)からのエコーの受波器出力の瞬時値 p_{ri} は次式であらわされる。

$$p_{ri} = P_{ri} \cdot \sin(\omega t + \phi_i) \tag{8-16}$$

ここで

- P_{ri} : i 魚のエコーの最大振幅
- ω : 送信角周波数
- t : 送信時からの時間
- ϕ_i : 初期位相

この単体エコーをパルス幅内の全尾数 n について加えれば群体エコーが得られ、その群体エコーの包絡線は次式で与えられる。

$$P_r^2 = \sum_{i=1}^n P_{ri}^2 + \sum_{i \neq j}^n P_{ri} \cdot P_{rj} \cdot \cos(\phi_i - \phi_j) \tag{8-17}$$

$$\equiv B + Y$$

ここで

- n : 距離 r_1 から r_2 の間にいる魚体数

ここで B は基本成分、 Y は干渉成分と定義する。(8-17)式において P_r^2 は n の変動

および干渉成分によってかなり変動がある。干渉成分における $P_{ri} \cdot P_{rj}$ と $\phi_i - \phi_j$ とは独立であることから、多数回の送信に対し、時間軸をそろえて集合平均することにより、 $\cos(\phi_i - \phi_j)$ の平均値は位相差が一様分布すると考えられるので 0 となり、干渉成分は無視できるとしている。

超音波散乱層を構成する生物の平均密度は大きなものと推定されることから、一次反射のみならず、二次反射等の多重反射が、送受波器における反射波の強さ I_e に影響するものと推察する。そこで次に一次反射、二次反射を含めた理論式について展開する。Fig. 8-1の(3)において、標的 i に注目すれば、標的 i の I_e に寄与する強さは (8-16) 式に次の事項を加えることになる。すなわち、他の標的、例えば標的 j から再放射された音波エネルギーを、標的 i が送受波器の方向に再々放射する。この再放射は標的 j のみならず、他の標的 $(n-1)$ 個からの再放射を標的 i は送受波器の方向へ再々放射する。又この再々放射は標的 i のみならず、標的 j を含む全ての標的 n 個が行う。この現象を数式で表わすと次のようになる。ただし、この超音波散乱層を構成する生物は、同一種で、形状、体重など等しいものと仮定する。よって各標的の散乱断面積および反射指向性パターンは全て等しい。

$$p_{ri} = P_{ri_1} \cdot \sin(\omega t + \phi_i) + \sum_{j=1}^n P_{rij_2} \cdot \sin(\omega t + \phi_i + \delta ji) \quad (8-18)$$

ただし (8-15) 式より

$$P_{ri_1} \sim P_0 \cdot b^2(\theta_i, \Psi_i) \cdot (1/ri^4) \cdot e^{-2\beta ri} \cdot \sigma_0 \cdot bf(\theta_i, \Psi_i) \cdot a(t - 2ri/c) \quad (8-19)$$

$$P_{rij_2} \sim P_0 \cdot b(\theta_j, \Psi_j) \cdot (1/rj^2) \cdot e^{-\beta rj} \cdot \sigma_0 \cdot bf(\theta_{ji}, \Psi_{ji}) \cdot (1/rji^2) \cdot e^{-\beta rji} \\ \cdot \sigma_0 \cdot bf(\theta_i, \Psi_i) \cdot (1/ri^2) \cdot e^{-\beta ri} \\ \cdot b(\theta_i, \Psi_i) \cdot a[t - (rj + rji + ri)/c] \quad (8-20)$$

$$\delta ji = (rj + rji + ri)/c \quad (8-21)$$

ここで

- p_{ri} : 標的 i からの反射波の受波器出力の瞬時値
- P_{ri_1} : 標的 i の一次反射の最大振幅
- P_{rij_2} : 標的 i の二次反射の最大振幅
- P_0 : 送受波器から発射された音圧
- $a(t)$: 標的の反射波の平均的波形を表わす波形関数
- ω : 送信角周波数
- t : 送信時からの時間
- ϕ_i : 初期位相
- δji : 二次反射による位相
- $b(\theta_i, \Psi_i)$: 標的 i の方向に対する送受波器の指向性パターン関数の値
- $bf(\theta_i, \Psi_i)$: 標的 i からみた送受波器の方向に対する標的の、反射指向性パターン関数の値
- $bf(\theta_{ji}, \Psi_{ji})$: 標的 j からみた標的 i の方向に対する標的の、反射指向性パターン関数の値
- ri, rj, rji : それぞれ、送受波器から標的 i および標的 j までの距離、標的 j から標的 i までの距離

この標的 i の一次反射および二次反射について、 $C \cdot \tau/2$ の範囲にある全尾数 n について加えれば、二次反射まで考慮した複合標的の反射波を得ることができる。

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^n p r i &= \sum_{i=1}^n P r i_1 \cdot \sin(\omega t + \phi i) \\
 &+ \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n P r i j_2 \cdot \sin(\omega t + \phi i + \delta j i) \\
 &= \sum_{i=1}^n P r i_1 (\sin \omega t \cdot \cos \phi i + \cos \omega t \cdot \sin \phi i) \\
 &+ \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n P r i j_2 \{ \sin \omega t \cdot \cos(\phi i + \delta j i) + \cos \omega t \cdot \sin(\phi i + \delta j i) \} \\
 &= \{ \sum_{i=1}^n P r i_1 \cdot \cos \phi i + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n P r i j_2 \cdot \cos(\phi i + \delta j i) \} \cdot \sin \omega t \\
 &+ \{ \sum_{i=1}^n P r i_1 \cdot \sin \phi i + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n P r i j_2 \cdot \sin(\phi i + \delta j i) \} \cdot \cos \omega t \quad (8-22)
 \end{aligned}$$

ここで

$$A = \sum_{i=1}^n P r i_1 \cdot \cos \phi i + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n P r i j_2 \cdot \cos(\phi i + \delta j i) \quad (8-23)$$

$$B = \sum_{i=1}^n P r i_1 \cdot \sin \phi i + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n P r i j_2 \cdot \sin(\phi i + \delta j i) \quad (8-24)$$

とおけば (8-22) 式は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^n p r i &= A \cdot \sin \omega t + B \cdot \cos \omega t \\
 &= (A^2 + B^2)^{1/2} \cdot \{ |A/(A^2 + B^2)^{1/2}| \cdot \sin \omega t + |B/(A^2 + B^2)^{1/2}| \cdot \cos \omega t \} \quad (8-25)
 \end{aligned}$$

ここで

$$\cos \Phi = A/(A^2 + B^2)^{1/2} \quad (8-26)$$

$$\sin \Phi = B/(A^2 + B^2)^{1/2} \quad (8-27)$$

とおき、(8-26) (8-27) を (8-25) に代入すれば

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^n p r i &= (A^2 + B^2)^{1/2} \cdot (\cos \Phi \cdot \sin \omega t + \sin \Phi \cdot \cos \omega t) \\
 &= (A^2 + B^2)^{1/2} \cdot \sin(\omega t + \Phi) \quad (8-28)
 \end{aligned}$$

ここで (8-26), (8-27) 式より

$$\tan \Phi = B/A$$

$$\therefore \Phi = \tan^{-1}(B/A) \quad (8-29)$$

(8-29) 式を (8-28) 式に代入することにより

$$\sum_{i=1}^n p r i = (A^2 + B^2)^{1/2} \cdot \sin \{ \omega t + \tan^{-1}(B/A) \} \quad (8-30)$$

(8-30) 式において

$$P r = (A^2 + B^2)^{1/2} \quad (8-31)$$

$$\therefore P r^2 = A^2 + B^2 \quad (8-32)$$

よって (8-23), (8-24) 式を (8-32) 式に代入すると

$$\begin{aligned}
Pr^2 &= \left| \sum_{i=1}^n Pr_{i_1} \cdot \cos \phi_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n Pr_{ij_2} \cdot \cos(\phi_i + \delta j_i) \right|^2 \\
&\quad + \left| \sum_{i=1}^n Pr_{i_1} \cdot \sin \phi_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n Pr_{ij_2} \cdot \sin(\phi_i + \delta j_i) \right|^2 \\
&= \sum_{i=1}^n \left\{ \left(Pr_{i_1} \cdot \cos \phi_i + \sum_{j \neq i}^n Pr_{ij_2} \cdot \cos(\phi_i + \delta j_i) \right)^2 \right. \\
&\quad + \sum_{k \neq i}^n \left(Pr_{i_1} \cdot \cos \phi_i + \sum_{j \neq i}^n Pr_{ij_2} \cdot \cos(\phi_i + \delta j_i) \right) \\
&\quad \quad \cdot \left(Pr_{k_1} \cdot \cos \phi_k + \sum_{l \neq k}^n Pr_{kl_2} \cdot \cos(\phi_k + \delta l_k) \right) \\
&\quad + \sum_{i=1}^n \left(Pr_{i_1} \cdot \sin \phi_i + \sum_{j \neq i}^n Pr_{ij_2} \cdot \sin(\phi_i + \delta j_i) \right)^2 \\
&\quad + \sum_{k \neq i}^n \left[Pr_{i_1} \cdot \sin \phi_i + \sum_{j \neq i}^n Pr_{ij_2} \cdot \sin(\phi_i + \delta j_i) \right] \\
&\quad \quad \cdot \left(Pr_{k_1} \cdot \sin \phi_k + \sum_{l \neq k}^n Pr_{kl_2} \cdot \sin(\phi_k + \delta l_k) \right) \Big\} \\
&= \sum_{i=1}^n \left\{ Pr_{i_1}^2 \cdot \cos^2 \phi_i + \sum_{j \neq i}^n Pr_{ij_2}^2 \cdot \cos^2(\phi_i + \delta j_i) \right. \\
&\quad + 2 \cdot Pr_{i_1} \cdot \cos \phi_i \cdot \sum_{j \neq i}^n Pr_{ij_2} \cdot \cos(\phi_i + \delta j_i) \\
&\quad + \sum_{j \neq i}^n \sum_{k \neq j}^n Pr_{ij_2} \cdot \cos(\phi_i + \delta j_i) \cdot Pr_{ik_2} \cdot \cos(\phi_i + \delta k_i) \\
&\quad + \sum_{k \neq i}^n Pr_{i_1} \cdot \cos \phi_i \cdot Pr_{k_1} \cdot \cos \phi_k \\
&\quad + \sum_{k \neq i}^n \sum_{l \neq k}^n Pr_{i_1} \cdot \cos \phi_i \cdot Pr_{kl_2} \cdot \cos(\phi_k + \delta l_k) \\
&\quad + \sum_{k \neq i}^n \sum_{j \neq i}^n Pr_{k_1} \cdot \cos \phi_k \cdot Pr_{ij_2} \cdot \cos(\phi_i + \delta j_i) \\
&\quad + \sum_{k \neq i}^n \sum_{j \neq i}^n \sum_{l \neq k}^n Pr_{ij_2} \cdot \cos(\phi_i + \delta j_i) \cdot Pr_{kl_2} \cdot \cos(\phi_k + \delta l_k) \Big\} \\
&\quad + \sum_{i=1}^n \left\{ Pr_{i_1}^2 \cdot \sin^2 \phi_i + \sum_{j \neq i}^n Pr_{ij_2}^2 \cdot \sin^2(\phi_i + \delta j_i) \right. \\
&\quad + 2 \cdot Pr_{i_1} \cdot \sin \phi_i \cdot \sum_{j \neq i}^n Pr_{ij_2} \cdot \sin(\phi_i + \delta j_i) \\
&\quad + \sum_{j \neq i}^n \sum_{k \neq j}^n Pr_{ij_2} \cdot \sin(\phi_i + \delta j_i) \cdot Pr_{ik_2} \cdot \sin(\phi_i + \delta k_i) \\
&\quad + \sum_{k \neq i}^n Pr_{i_1} \cdot \sin \phi_i \cdot Pr_{k_1} \cdot \sin \phi_k \\
&\quad + \sum_{k \neq i}^n \sum_{l \neq k}^n Pr_{i_1} \cdot \sin \phi_i \cdot Pr_{kl_2} \cdot \sin(\phi_k + \delta l_k) \\
&\quad + \sum_{k \neq i}^n \sum_{j \neq i}^n Pr_{k_1} \cdot \sin \phi_k \cdot Pr_{ij_2} \cdot \sin(\phi_i + \delta j_i) \\
&\quad + \sum_{k \neq i}^n \sum_{j \neq i}^n \sum_{l \neq k}^n Pr_{ij_2} \cdot \sin(\phi_i + \delta j_i) \cdot Pr_{kl_2} \cdot \sin(\phi_k + \delta l_k) \Big\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{i=1}^n P r i_1^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{k \neq i}^n P r i_1 \cdot P r k_1 (\cos \phi_i \cdot \cos \phi_k + \sin \phi_i \cdot \sin \phi_k) \\
 &\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n P r i j_2^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n P r i_1 \cdot P r i j_2 [\cos \phi_i \cdot \cos(\phi_i + \delta j i) + \sin \phi_i \cdot \sin(\phi_i + \delta j i)] \\
 &\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n \sum_{k \neq i}^n P r i j_2 \cdot P r i k_2 [\cos(\phi_i + \phi j i) \cdot \cos(\phi_i + \delta k i) + \sin(\phi_i + \delta j i) \\
 &\quad \quad \quad \cdot \sin(\phi_i + \delta k i)] \\
 &\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{k \neq i}^n \sum_{l \neq k}^n P r i_1 \cdot P r k l_2 [\cos \phi_i \cdot \cos(\phi_k + \delta l k) + \sin \phi_i \cdot \sin(\phi_k + \delta l k)] \\
 &\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{k \neq i}^n \sum_{j \neq i}^n P r k_1 \cdot P r i j_2 [\cos \phi_k \cdot \cos(\phi_i + \delta j i) + \sin \phi_k \cdot \sin(\phi_i + \delta j i)] \\
 &\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{k \neq i}^n \sum_{j \neq i}^n \sum_{l \neq k}^n P r i j_2 \cdot P r k l_2 [\cos \phi_i + \delta j i) \cdot \cos(\phi_k + \delta l k) \\
 &\quad \quad \quad + \sin(\phi_i + \delta j i) \cdot \sin(\phi_k + \delta l k)] \\
 &= \sum_{i=1}^n P r i_1^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n P r i_1 \cdot P r j_1 \cdot \cos(\phi_i - \phi_j) \\
 &\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n P r i j_2^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n P r i_1 \cdot P r i j_2 \cdot \cos \delta j i \\
 &\quad + 2 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n \sum_{k \neq i}^n P r i_1 \cdot P r j k_2 \cdot \cos(\phi_i - \phi_j - \delta k j) \\
 &\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n \sum_{k \neq j}^n P r i j_2 \cdot P r i k_2 \cdot \cos(\delta j i - \delta k i) \\
 &\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{k \neq i}^n \sum_{j \neq i}^n \sum_{l \neq k}^n P r i j_2 \cdot P r k l_2 \cdot \cos(\phi_i + \delta j i - \phi_k - \delta l k) \tag{8-33}
 \end{aligned}$$

(8-33) 式において示した各項の意味は Fig. 8-2の(1)~(7)に相当する。添字の i, j, k, l は標的であり、数字の 1, 2 はそれぞれ標的からの一次反射および二次反射を示す。

- $P r i_1^2$: 標的 i からの一次反射を示す。一次反射の基本成分 B_1 である。Fig. 8-2の(1)。
- $P r i_1 \cdot P r j_1 \cdot \cos(\phi_i - \phi_j)$: 標的 i および j からの一次反射の位相差を示す。一次反射の干渉成分 Y_1 である。Fig. 8-2の(2)。
- $P r i j_2^2$: 標的 i から再放射された音波を標的 j による二次反射を示す。二次反射の基本成分 B_2 である。Fig. 8-2の(3)。
- $P r i_1 \cdot P r i j_2 \cdot \cos \delta j i$: 標的 i からの一次反射と、標的 i から再放射された音波を標的 j により二次反射した時の両者の位相差を示す。二次反射の第一干渉成分 Y_{2-1} である。Fig. 8-2の(4)。
- $P r i_1 \cdot P r j k_2 \cdot \cos(\phi_i - \phi_j - \delta k j)$: 標的 i からの一次反射と、標的 j から再放射された音波を標的 k により二次反射した時の両者の位相差を示す。二次反射の第二干渉成分 Y_{2-2} である。Fig. 8-2の(5)。
- $P r i j_2 \cdot P r i k_2 \cdot \cos(\delta j i - \delta k i)$: 標的 i から再放射された音波を標的 j および k により二次反射した時の両者の位相差を示す。二次反射の第三干渉成分 Y_{2-3} である。Fig. 8-2の(6)。

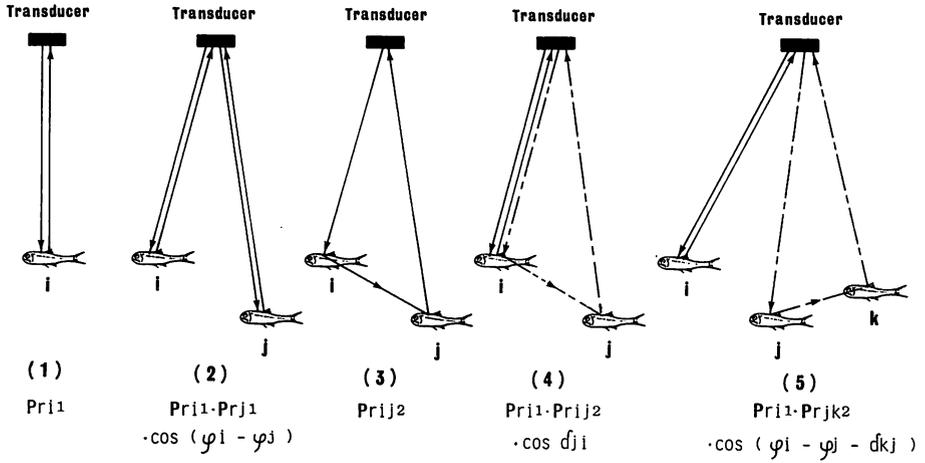


Fig. 8-2-1. Reflection routes of sound waves.

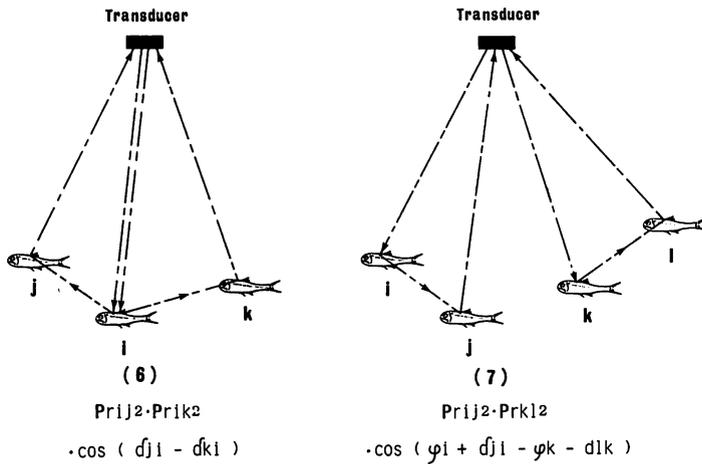


Fig. 8-2-2. Reflection routes of sound waves.

$P_{rij2} \cdot P_{rkl2} \cdot \cos(\delta_{ji} + \delta_{lk} - \varphi_k - \delta_{lk})$: 標的 i から再放射された音波を標的 j により二次反射したものと、標的 k から再放射された音波を標的 l により二次反射した時の両者の位相差を示す。二次反射の第四干渉成分 Y_{2-4} である。Fig. 8-2の(7)。

よって (8-33) 式は次式となる。

$$Pr^2 \equiv B_1 + Y_1 + B_2 + Y_{2-1} + Y_{2-2} + Y_{2-3} + Y_{2-4} \tag{8-34}$$

(8-34) 式の第一項、第二項は、(8-17) 式における第一項、第二項と全く同一のものであり、標的からの一次反射を示し、第一項はその基本成分を、第二項は干渉成分を意味している。第三項以降は標的からの二次反射に関するもので、第三項はその基本成分を、第四項以降は第一干渉成分から第四干渉成分を意味している。よって標的相互の二次反射までを考慮する時、これら7要素の反射波を考えなければならない。しかし一次反射および二次反射の干渉成分とも、それらの平均値は位相差が平均分布すると仮定すれば、干渉成分は全て0となり無視することができる。よって標的による二次反射まで考慮した場合、群体エコー Pr^2 は次式で示すことができる。

$$Pr^2 \approx \sum_{i=1}^n Pr_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n Pr_{ij}^2 \quad (8-35)$$

ここで Pr_i および Pr_{ij} は、それぞれ (8-19)、(8-20) 式より次の近似式を得る。

$$Pr_i \approx P_0 \cdot b^2(\theta_i, \Psi_i) \cdot (1/r_i^4) \cdot e^{-2\beta r_i} \cdot \sigma_0 \cdot bf(\theta_i, \Psi_i) \quad (8-36)$$

$$Pr_{ij} \approx P_0 \cdot b(\theta_j, \Psi_j) \cdot (1/r_j^2) \cdot e^{-\beta r_j} \cdot \sigma_0 \cdot bf(\theta_{ji}, \Psi_{ji}) \cdot (1/r_{ji}^2) \cdot e^{-\beta r_{ji}} \\ \cdot \sigma_0 \cdot bf(\theta_i, \Psi_i) \cdot (1/r_i^2) \cdot e^{-\beta r_i} \cdot b(\theta_i, \Psi_i) \quad (8-37)$$

8.3 標的強度と平均密度

本節では以上の結果を踏まえ、超音波散乱層の平均密度を求めるための計算式を導く。

送受波器の指向性パターンは複雑なので、実用上は一定の指向性パターンに置き換え単純化する。送受波器の指向性パターンは $b(\theta, \Psi)$ である。この時主ローブのみ考え、その指向性は音軸に回転対称であるとする、指向性パターンは $b(\theta)$ となる。そして指向性は鋭いと仮定すれば、 $\sin \theta \approx \theta$ である。

ここで

$$\int_0^{\theta_1} b^2(\theta) \cdot 2\pi \cdot \theta \cdot d\theta = \int_0^{\theta e} 2\pi \cdot \theta \cdot d\theta = \pi \cdot \theta e^2 \quad (8-38)$$

$$\therefore \theta e^2 / 2 = \int_0^{\theta_1} b^2(\theta) \cdot \theta \cdot d\theta \quad (8-39)$$

この指向特性を等価指向角 θe とする。実用上は、送受波器の半減角 $\theta_1/2$ (音圧が音軸の値より 6 dB 減少する角度：パワーレベルが 1/2 になる) との間に次の近似式が成立する。

$$\theta e \approx 0.64 \theta_1/2 \quad (8-40)$$

送受波器からの距離が等しい点においては、 θe は次の特性を満足する。

1) 放射音波の強さは、ビーム角 θe 内のどの点でも等しく一定であり、それ以外では0である。

2) 受信音波の強さは、音源をビーム角 θe 内のどの点においても等しく一定であり、それ以外では強さは0である。

Plate 2-1の(C)に示された NJA-280 ku 魚群探知機、周波数50kHzの超音波発射ビーム・パターンを Fig. 8-3の(3)に示した。この半減半角は12°であり等価指向角 θe は7.68°となった。

送受波器から発射されるパルス波形を Fig. 8-3の(1)に示した。この波形は矩形ではない。よってその波形が理想的な矩形であるとする等価矩形パルスに置き換え単純化する。

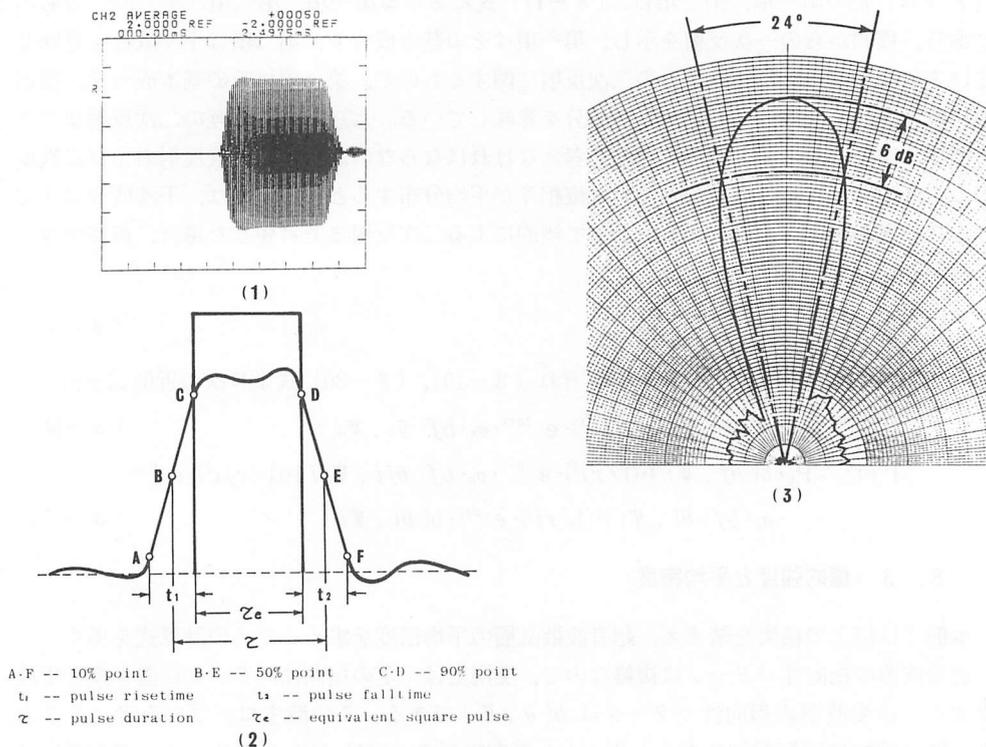


Fig. 8-3. Pulse waveform and beam pattern.

Fig. 8-3の(2)に示したようにパルス開始時刻は電圧50%の B 点, パルス停止時刻は同じく電圧50%の E 点であり, この BE がパルス幅 τ である。そこで電圧90%の C 点, D 点の間 CD を等価矩形波のパルス幅 τ_e とすると, τ との関係は次式で示される。

$$\tau_e = k \cdot \tau \tag{8-41}$$

ただし k は補正係数とする。よって送受波器から発射された音波は等価指向角 θ_e の扇形ビームであり, そのパルス幅は等価矩形波に置き換えられた τ_e となる。

Fig. 8-3の(1)の発射波形について(2)に示したパルス波形のエンベロープ上の A 点~F 点におけるそれぞれのパルス発射後の時間を $T_A, T_B, T_C, T_D, T_E, T_F$, 又それぞれの電圧を $V_A, V_B, V_C, V_D, V_E, V_F$ とすれば各値は次に示すとおりである。なおこれは水中マイクロホン ST-1005 型受波器 使用周波数範囲 10Hz~100kHz (沖電気工業株式会社) で発射パルスを受信し, シグナルアナライザ SM2100 (岩崎通信機株式会社) により解析したものである。

T_A	1.1288 msec.	V_A	0.13305 V
T_B	1.1738 msec.	V_B	0.66525 V
T_C	1.2328 msec.	V_C	1.19745 V

T_D ……	2.1224 msec.	V_D ……	1.19745 V
T_E ……	2.1871 msec.	V_E ……	0.66525 V
T_F ……	2.2656 msec.	V_F ……	0.13305 V

このことから実際に発射されているパルス幅 τ は

$$\begin{aligned} \tau &= T_E - T_B \\ &= 1.0133 \text{ (msec.)} \end{aligned}$$

又等価矩形波のパルス幅 τ_e は

$$\begin{aligned} \tau_e &= T_D - T_C \\ &= 0.8896 \text{ (msec.)} \end{aligned}$$

であることがわかる。よって (8-41) 式から $K=0.8779$ が求まる。

この結果超音波散乱層は一様ランダムに密に、ビーム幅、パルス幅に比較して広範囲に分布しているので、Fig. 8-4に示したように $C \cdot \tau_e / 2$ の球殻部分 ABCD の体積 V 内に存在する標的の反射について考察すればよい。この体積 V に至る送受波器からの距離を r_e とすると、 V は次式で求められる。

$$V = S \cdot C \cdot \tau_e / 2 \tag{8-42}$$

$$S = r_e^2 \cdot \Omega \tag{8-43}$$

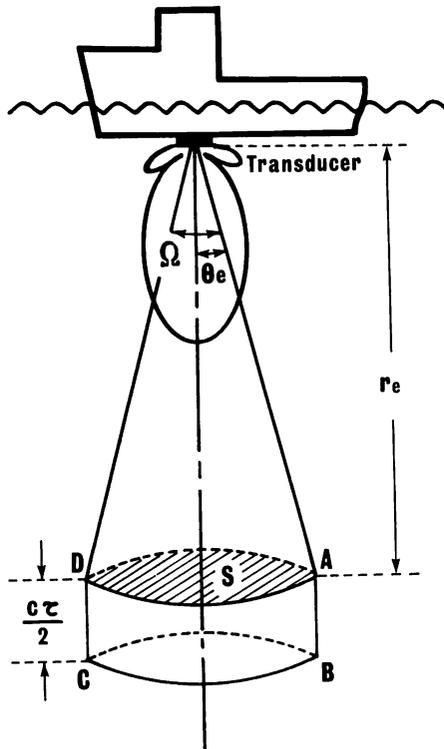


Fig. 8-4. Principle of density measurement.

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta e) \quad (8-44)$$

ただし $\theta e \leq \pi/2$

ここで (8-43), (8-44) 式を (8-42) に代入

$$V = r_e^2 \cdot \pi(1 - \cos\theta e) \cdot C \cdot \tau_e \quad (8-45)$$

ただし

S : 送受波器より距離 r_e における扇形ビームの面積

$C \cdot \tau_e/2$: パルス長の 1/2

Ω : 音源に張る立体角 (sr)

よって超音波散乱層の平均密度を N , 体積 V 内の標的の数を n とすれば, 次の関係式が得られる。

$$n = N \cdot V \quad (8-46)$$

ここで等価指向角の考えをとれば

$$b(\theta_i, \Psi_i) = 1$$

$$\therefore b^2(\theta_i, \Psi_i) = 1 \quad (8-47)$$

となる。又距離 r_e を用い, そして標的は互いに接近しているとすれば, (8-36), (8-37) 式は次のようになる。

$$I r i_1 \sim I_0 \cdot (1/r_e^4) \cdot e^{-2\theta r e} \cdot \sigma_0 \cdot b f(\theta_i, \Psi_i) \quad (8-48)$$

$$I r i_2 \sim I_0 \cdot (1/r_e^4) \cdot e^{-2\theta r e} \cdot \sigma_0^2 \cdot b f(\theta_i, \Psi_i) \cdot b f(\theta_j i, \Psi_j i) \quad (8-49)$$

まず一次反射についてみれば, 垂直魚群探知機における音波の単体標的からの反射は, 後方反射と考えられるので, この monostatic な後方散乱断面積の平均値を σ_e とすれば,

$$\sum_{i=1}^n \sigma_0 \cdot b f(\theta_i, \Psi_i) = n \cdot \sigma_e \quad (8-50)$$

二次反射についてみれば, 送受波器, 標的 i , 標的 j 三者相互の方向が問題となる。しかし単体標的の全周にわたる方向, すなわち立体角 $\Omega = 4\pi(sr)$ にわたって一次反射を行い, そして周囲にある別の単体標的 $n-1$ 個が送受波器の方向に二次反射すると考えられる。よって bistatic な散乱断面積の平均値を σ_m とすれば

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n \sigma_0^2 \cdot b f(\theta_i, \Psi_i) \cdot b f(\theta_j i, \Psi_j i) = n^2 \cdot \sigma_m^2 \quad (8-51)$$

となる。

このことから (8-35) 式は次式で表わすことができる。

$$\begin{aligned} I e &= \sum_{i=1}^n I r i_1 + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n I r i_2 \\ &\sim I_0 \cdot (1/r_e^4) \cdot e^{-2\theta r e} \cdot n \cdot (\sigma_e + n \cdot \sigma_m^2) \end{aligned} \quad (8-52)$$

ここで (8-52) 式に (8-46) 式を代入

$$I e = I_0 \cdot (1/r_e^4) \cdot e^{-2\theta r e} \cdot N \cdot V \cdot (\sigma_e + n \cdot \sigma_m^2) \quad (8-53)$$

さらに (8-53) 式に (8-45) 式を代入すれば

$$I e = I_0 \cdot (1/r_e^2) \cdot e^{-2\theta r e} \cdot N \cdot \pi \cdot (1 - \cos\theta e) \cdot C \cdot \tau_e \cdot (\sigma_e + n \cdot \sigma_m^2) \quad (8-54)$$

となる。

すなわち、送受波器における標的からの一次反射、二次反射を考慮した反射波の強さは、送受波器から発射された音波の強さ I_0 、超音波散乱層の平均密度 N 、平均散乱断面積 ($\sigma_e + \sigma_m^2$)、等価矩形パルス幅 τ_e に正比例し、送受波器から標的までの距離の 2 乗 r_e^2 、およびこの距離の 2 倍にかかる音波の減衰係数の対数減少率 $e^{2\beta r_e}$ に逆比例する。超音波散乱層の平均密度 N は次式で表わされる。

$$N = I r \cdot r_e^2 \cdot e^{2\beta r_e} / \{ I_0 \cdot \pi (1 - \cos \theta_e) \cdot C \cdot \tau_e \cdot (\sigma_e + n \cdot \sigma_m^2) \} \quad (8-55)$$

超音波散乱層を構成すると推定される単体生物は Isaacs-Kidd 中層トロール・ネットの曳網により捕獲することができたので、水槽内においてその単体の標的強度測定が可能である。又洋上における超音波散乱層の標的強度測定結果はすでに Fig. 2-9 および Table 2-2 に示した。

ここで

$$\sigma_e = 4\pi \cdot Tse \quad (8-56)$$

$$\sigma_m = 4\pi \cdot Tsm \quad (8-57)$$

ただし Tse は monostatic な単体標的強度の平均値、 Tsm は bistatic な単体散乱強度の平均値とする。

よって群体標的に関する (8-52) 式から

$$Iev \sim I_0 \cdot (1/r_e^4) \cdot e^{-2\beta r_e} \cdot n \cdot \{ Tse + n \cdot Tsm^2 \} \quad (8-58)$$

ここで Iev は超音波散乱層による散乱波の受波器における強さである。超音波散乱層の散乱強度は $n \cdot \{ Tse + n \cdot Tsm^2 \}$ に等しく、これを Sv と置けば

$$Sv = n \cdot \{ Tse + n \cdot Tsm^2 \} \quad (8-59)$$

となる。ここで両辺対数をとれば

$$\log Sv = \log n \cdot \{ Tse + n \cdot Tsm^2 \} \quad (8-60)$$

両辺 10 倍して

$$\begin{aligned} 10 \log Sv &= 10 \log n \cdot \{ Tse + n \cdot Tsm^2 \} \\ &= 10 \log n + 10 \log \{ Tse + n \cdot Tsm^2 \} \end{aligned} \quad (8-61)$$

ここで

$$SV = 10 \log Sv \quad (8-62)$$

とすれば SV は洋上における超音波散乱層の散乱強度測定結果 (対数表示) の値である。よって単体標的の個体数は次式から求めることができる。

$$10 \log n = SV - 10 \log \{ Tse + n \cdot Tsm^2 \} \quad (8-63)$$

(8-63) 式は二次反射まで考慮した近似式である。

第9章 超音波散乱層を構成する生物の密度

海洋における魚群，プランクトンあるいは甲殻類その他超音波散乱層を構成する生物分布の絶対量を推定するためには，散乱強度および単体標的強度のより精確な測定が必要となる。橋本ら⁵³⁾，橋本・間庭^{101),102),103)}，間庭¹⁰⁵⁾は各魚種単体魚の主として背側の標的強度を測定し，体長，周波数，鰭との関係，又魚の群の大小による散乱強度の変化などについて論じている。佐野¹⁰⁵⁾は活魚についての測定を行い，松野・山中¹⁰⁶⁾は魚体の内部構造を違えた模型魚による測定を行っている。又 Haslett¹⁰⁷⁾，Love^{108),109),110)}は単体魚の標的強度測定，Haslett et. al¹¹¹⁾は周波数との関係，Foote¹¹²⁾は平均標的強度と体長との関係，そして Ehrenberg¹¹³⁾，Drew¹¹⁴⁾，Marchal¹¹⁵⁾，Dalen¹¹⁶⁾，Foote¹¹⁷⁾，Olsen¹¹⁸⁾，Midttun¹¹⁹⁾は魚群量を直接推定するため単体魚又は魚群の標的強度測定の方法論および理論について述べている。又橋本・間庭¹²⁰⁾，石田・佐野^{121),122)}はプランクトンあるいは気泡など微小物体の散乱強度について水槽内での基礎実験を行い，Beamish^{123),124)}，Ehrenberg⁸³⁾，Greenlaw¹²⁵⁾，Penrose and Kaye¹²⁶⁾，Guzman et. al¹²⁷⁾は主として理論的な面を考察し，橋本・間庭¹²⁸⁾，鈴木¹²⁹⁾，松野ら²⁰⁾は洋上において超音波散乱層の反射損失の測定を行っている。このように多くの研究者によって海洋における生物分布量の推定を行うための基礎資料の蓄積がなされてきた。

各季節における各超音波散乱層の散乱強度の測定結果は「1. 6 散乱強度」に，そして各層の構成生物の採集結果を「6. 2 結果および考察」に示した。しかし超音波散乱層の散乱強度と，それを構成する生物の分布量との関係については未検討であった。そこで，洋上における超音波散乱層の散乱強度測定結果，水槽における単体の標的強度測定結果および Isaacs-Kidd 中層トロールネットでの曳網結果との関係について，「第8章 超音波散乱層を構成する生物分布量の測定理論」で論議した理論的考察を踏まえ，超音波散乱層を構成する生物の分布量について検討した。

9. 1 超音波散乱層を構成する生物の単体標的強度測定

超音波散乱層を構成する生物の分布量を知るためには前章で述べたように構成生物単体の標的強度を知る必要がある。そこで構成生物であると推定されたイワハダカ，ヨウジエソ，キュウリエソ，ロホガスターの単体標的強度の測定を水槽において実施した。

9. 1. 1 測定方法

I) 実験水槽

超音波散乱層を構成する生物の単体標的強度の測定は，鹿児島県垂水市にある鹿児島県栽培漁業センターの屋内水槽を使用した。Fig. 9-1に示したように水槽はコンクリート製で縦6.5m，横3.3m，深さ2.7mで50m³の容積である。水槽の大きさは周波数，パルス幅，指向角，送受波器の振動面の径，標的の大きさ等により制限を受けるので，これらの諸条件を充分満足することを計算の上確認した。水槽には海からポンプで汲み上げた海水を濾過し注入，そして海水に含まれた気泡を除去するため二昼夜放置した後測定を開始した。

II) 測定システムおよび機器

測定システムおよび使用機器を Fig. 9-2に示した。

i) 魚群探知機

魚群探知機は Plate 2-1 に記した(C)である。周波数50 kHz, パルス幅0.5 msec. を使用した。この測定においては魚群探知機内増幅ユニット, 外部増幅器等は用いず, 送受波器に生じた信号電圧を次に示す波形解析処理装置に直接入力した。よって本機には以下のユニットを追加した。

a) 送信信号カット用リミッタ・ユニット

送信時, 送受波器にかかる大電圧 (ピーク値約1500 V) から測定装置を保護するため約5 V 以上の電圧を接地する。

b) トリガ制御ユニット

パルス繰り返し周期の設定と, 波形解析処理装置の A/D コンバーターのトリガ信号発生を行う。

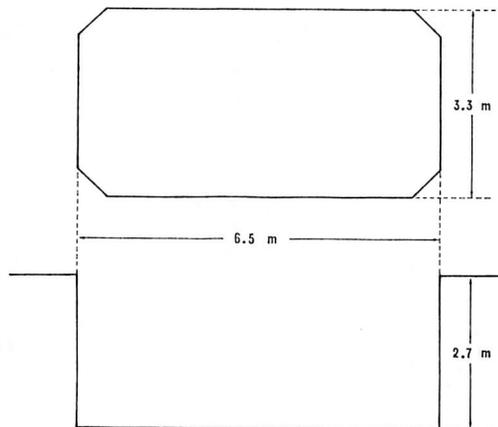
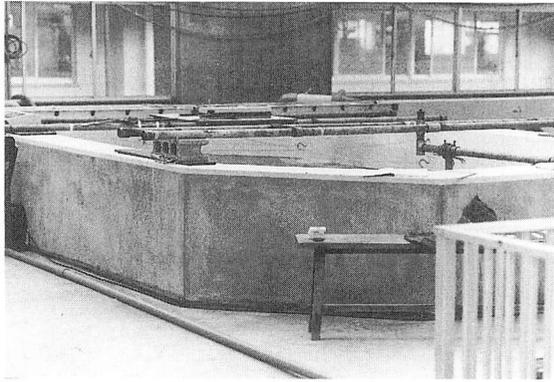
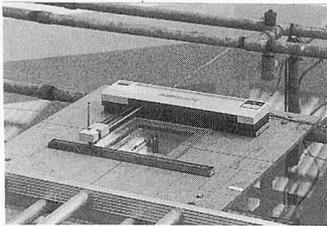
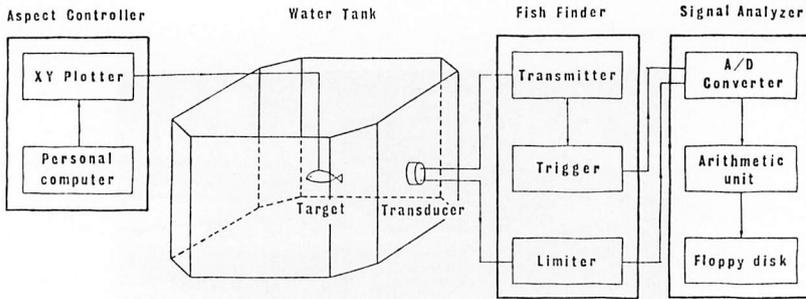


Fig. 9-1. Photograph and schematic diagram showing the water tank and its dimension.

ii) 波形解析処理装置

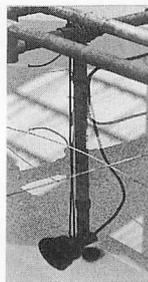
信号の取り込み、記憶、演算処理には「シグナルアナライザ SM2100A」(岩崎通信機株式会社)を用いた。この装置は A/D コンバータで変換されたデジタルデータをメモリーに記憶し、演算処理、ミニフロッピーディスクへの記憶、外部装置へのデータ転送等を行う汎用波形解析処理装置である。標的からの反射信号を送受波器より直接この装置に取り込みピーク電圧値を測定した。測定ピーク電圧値 (V) は置換法によって標的強度 (dB) で表示した。A/D コンバータの分解能は12 bit であり、本測定では±0.1 V フルスケールで測定したので、電圧分解能は約50 μV であった。



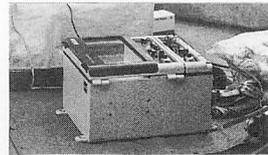
XY Plotter



Personal computer



Transducer



Fish finder



Signal analyzer

Fig. 9-2. Schematic diagram and photographs showing the system and the instruments of the observation in the water tank.

iii) 標的施回支持装置

標的の支持装置は Fig. 9-3 に示した。送受波器面に対する標的の姿勢角度はパーソナル・コンピュータ「PC-8001」（日本電気株式会社）と XY プロッター「WX-4675」（渡辺測器株式会社）を組み合わせ制御した。単体標的は二本のナイロン製テグス 0.2 号を胴体貫通させ下部に重錘を取りつけて保持した。本測定においては、三軸方向のうち Pitch Plane と Roll Plane の二軸について行い Yaw Plane については実施しなかった。これは本論文全てを通して垂直方向に超音波を発射する魚群探知機を取り扱っている理由によった。なお施回は各保持姿勢について 5° 間隔で 0° から 180° まで行った。

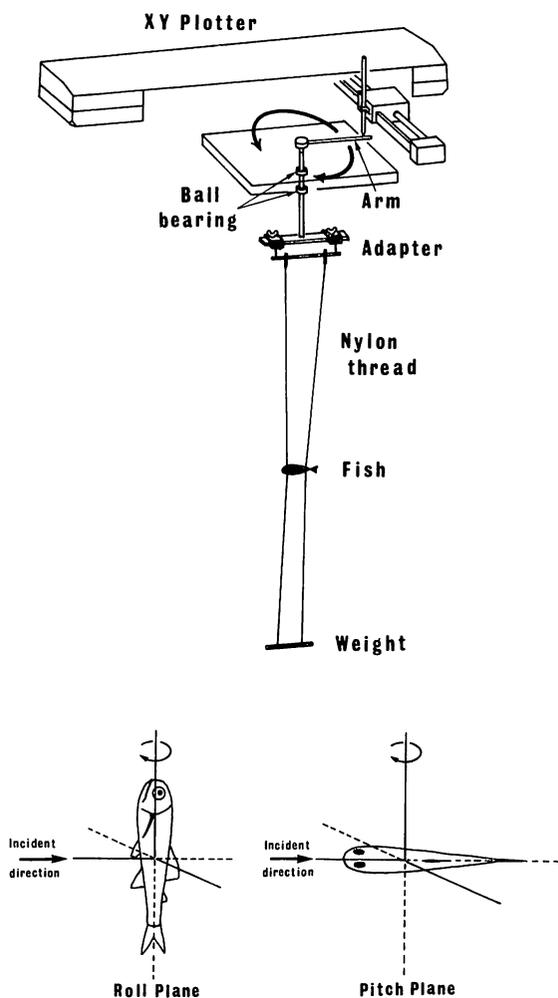


Fig. 9-3. Schematic diagrams showing the support method for the target fish.

9. 1. 2 標的からの反射信号の処理

I) 偶然誤差の処理

反射信号の取り込みは、偶然誤差処理のため50回のパルスからの反射信号を平均化処理して、その結果を一点のデータとした。平均化回数を n 回とした時、S/N 比は $n^{1/2}$ 倍に改善される。これを dB で表すと $20\log n^{1/2}$ (dB) となり、今回の実験では平均化回数を50としたため S/N 比は17 dB 向上する。

II) 定誤差の処理

水槽はコンクリート製で槽内に吸音材が装備されていないため、水槽の形状、サイドローブその他の原因により、標的が存在しない場合においても水槽特有の反射信号が現れる。これを偽像とした。この偽像は非常に安定した信号であるため、本測定においては定誤差として取り扱った。

標的からの反射信号を平均化処理し、偶然誤差の影響を取り除いたとしても、この反射信号には必ずこの偽像が合成されている。よって標的反射信号から偽像を減算処理することにより、標的の反射信号のみを取り出すことができた。これを Fig. 9-4 に示した。しかしこの処理方法は偽像測定時と標的からの反射信号測定時の時間経過が長くなると、水温変化等のため、両者にわずかながら位相ずれが生じ、偽像を完全に除去することが困難なので両測定の間をできる限り短くするようにした。

9. 1. 3 イワハダカ単体の標的強度パターン

Fig. 9-5-1 にイワハダカ単体魚の標的強度測定結果を示した。Pitch Plane においては尾部方向からの反射を 0° 、背部を 90° 、頭部を 180° とし、Roll Plane においては左側部からの反射を 0° 、背部を 90° 、右側部を 180° と定めた。 5° 間隔での標的強度 (dB) の数値も合わせて表示した。これはヨウジエン、キュウリエン、ロホガスター各単体の標的強度測定の場合も同様である。

i) Pitch Plane

背部 (95°) の標的強度が最も大きく -48.1 dB であった。頭部方向が尾部方向より標的強度がわずかに大きな傾向にあるが、背部を中心としてほぼ対称となっている。 90° を中心として頭部、尾部の方向へそれぞれ 30° に極小値、 $55^\circ \sim 60^\circ$ に極大値がみられ、又頭部で -53.2 dB、尾部で -55.0 dB を示した。

ii) Roll Plane

左側部 (0°) の標的強度が最も大きく、 -45.2 dB であった。背部 (90°) が最小値 -48.4 dB を示し、左右ほぼ対称となった。又その変化は Pitch Plane のように急でないで、背部と側部の境界は定かではない。

Pitch Plane, Roll Plane 両測定結果によれば、特に Pitch Plane において、標的強度の値の変化が急であった。よってその原因を考察する一つの資料として、イワハダカの形状およびその内部構造を知るため、Plate 9-1 に測定に使用したイワハダカの写真ならびにソフテックス写真を示した。体長35mm、体高7mm、体幅5mmで目が大きいのが特徴といえる。ソフテックス写真より、骨格はよく発達しており、左右一対の耳骨が体の大きさに比して大きい。又頭部より背鰭、腹鰭にかけて体高の $1/2 \sim 3/4$ の巾で中心部に黒い陰が存在する。又浮袋は明確に写っていない。ここに標的として使用したイワハダカとその体形が酷似した

他のイワハダカ単体魚により、シリコンラバーによる模型魚を作成し、同様の方法による測定を行ったところ、標的強度に差はみられたものの、そのパターンは Pitch Plane, Roll Plane とも両者ほとんど同じ傾向であった。

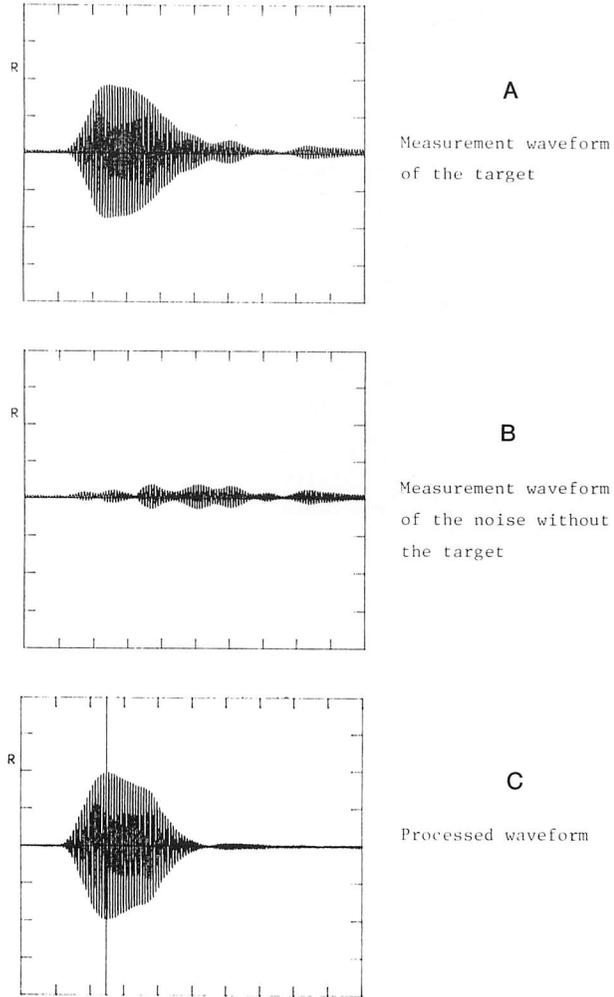


Fig. 9-4. Schematic diagrams showing the process of the measurement waveform.
 $C=A-B$

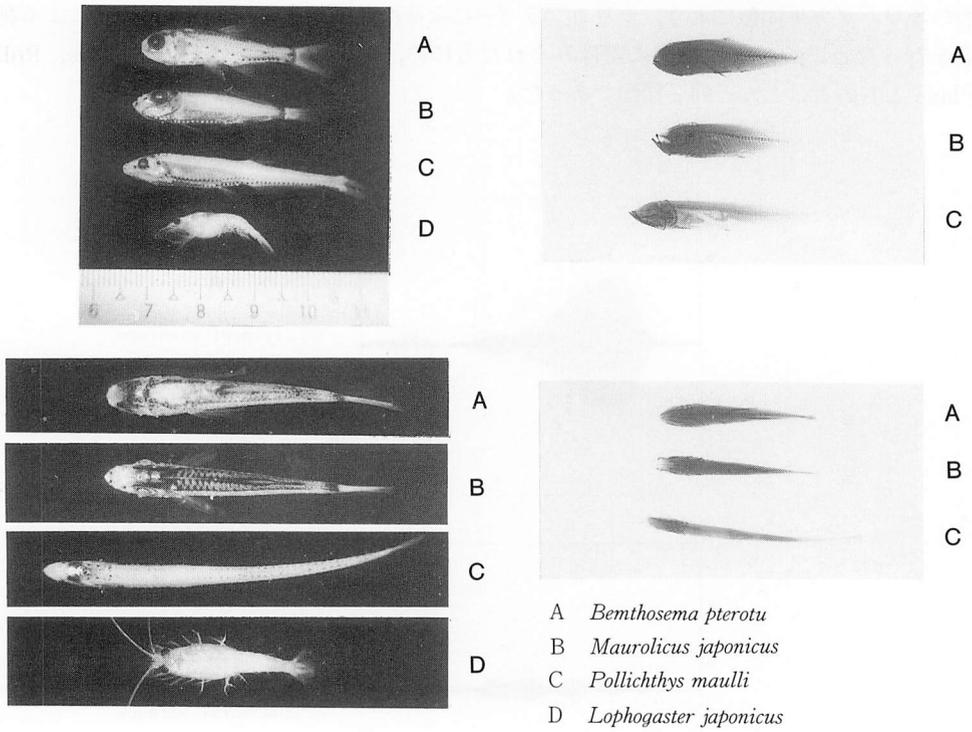


Plate 9-1. Photographs and Softex photographs of the composition organism of the ultrasonic scattering layer.

9. 1. 4 ヨウジエソ単体の標的強度パターン

Fig. 9-5-2にヨウジエソ単体魚の標的強度測定結果を示した。

i) Pitch Plane

背部 (90°) の標的強度が最も大きく -48.9 dB であった。この90°を中心として90°~180°, 90°~0°はほぼ対称となった。又90°より頭部, 尾部方向へそれぞれ15°~20°, 45°~50°に極小値, 25°~30°, 60°に極大値がみられ, 頭部 (180°) で -57.7 dB, 尾部 (0°) で -59.5 dB を示した。イワハダカは3つの極大値をもったが, ヨウジエソは5つの極大値を示した。

ii) Roll Plane

右側部 (180°) の標的強度が最も大きく -46 dB であった。最小値は80°の -49.2 dB であり90°より10°ずれているが, 大略のパターンはイワハダカと酷似している。

Plate 9-1に測定に使用したヨウジエソの写真ならびにソフトテックス写真を示した。体長49mm, 体高6mm, 体幅3.5mmであり, その形状はイワハダカ, キュウリエソと大いに異なる。ソフトテックス写真より骨格および内臓は他より発達していることがわかる。今回測定を行った標的強度のパターンはヨウジエソの形状および内部構造に負うところが大きであると推定される。

9. 1. 5 キュウリエソ単体の標的強度パターン

Fig. 9-5-3にキュウリエソ単体魚の標的強度測定結果を示した。

i) Pitch Plane

背部(90°)の標的強度が最も大きく-49.9 dBであった。この90°を中心として90°~180°, 90°~0°はほぼ対称になっており、頭部、尾部の方向へそれぞれ30°に極小値、60°~65°に極大値がみられ、又頭部(180°)で-54.7 dB、尾部(0°)で-56.2 dBを示した。イワハダカのパターンに酷似している。

ii) Roll Plane

側部(0°, 180°)の標的強度が最も大きく、左右とも-46.6 dBであった。背部(90°)が最小値-50 dBを示し左右ほぼ対称となった。イワハダカ、ヨウジエソのパターンと酷似している。

Plate 9-1に測定に使用したキュウリエソの写真ならびにソフテックス写真を示した。体長35mm、体高6mm、体幅3.5mmでありイワハダカに比較すれば瘦せた形状である。ソフテックス写真より骨格はよく発達しており、又浮袋は明確に写っていなかった。イワハダカ同様、その内部構造に著しい特徴もなかったことから、今回測定を行った標的強度のパターンはキュウリエソの形状に負うところが大きであると考えられる。

9. 1. 6 ロホガスター単体の標的強度パターン

Fig. 9-5-4にロホガスター単体の標的強度測定結果を示した。

i) Pitch Plane

背部(90°)の標的強度が最も大きく-53 dBであった。この標的強度のパターンは背部から頭部にかけて略一定値を示し、背部から尾部にかけて急激に減少している。75°~180°の平均値は-53.6 dB、0°~70°の平均値は-60 dBであり、その差は6.4 dBに及んでいる。

ii) Roll Plane

前三種の魚体については大略90°で最小値を示すパターンが特徴であった。しかしロホガスターに関しては側部から背部(0°~180°)にかけてほとんど変化がみられなかった。

9. 1. 7 各単体の標的強度の推定

各単体の標的強度はそれぞれの標的強度パターンに示したように、送受波器面と標的の体軸とのなす角の変化が大きく標的強度に影響を及ぼすことがわかった。全般的な傾向としてPitch Planeは体軸に直角な方向の背部方向で最大値を示し、体軸方向すなわち頭部尾部方向で最小値を示す。Roll Planeは体側部方向で最大値を示し、背部方向で最小値を示す。両Plane含めての最大値は体側部方向であり、最小値は頭部又は尾部方向に見られる。又Pitch Planeにおいてはその間、極大・極小値がみられ標的強度の変化は複雑であるが、Roll Planeにおいては標的強度の変化は緩やかである。しかし甲殻類であるロホガスターはPitch Planeにおいて魚類と異なった傾向を示した。又標的強度最大値と最小値の差はイワハダカ7.8 dB、キュウリエソ9.8 dB、ヨウジエソ10.7 dB、ロホガスター9 dBであった。

以上のことから各単体の標的強度の代表値をつぎの項目を考慮して推定した。

①背部(90°)の標的強度の値

②背部(90°)を中心として前後、左右それぞれビーム巾(半減半角)に相当する範囲に

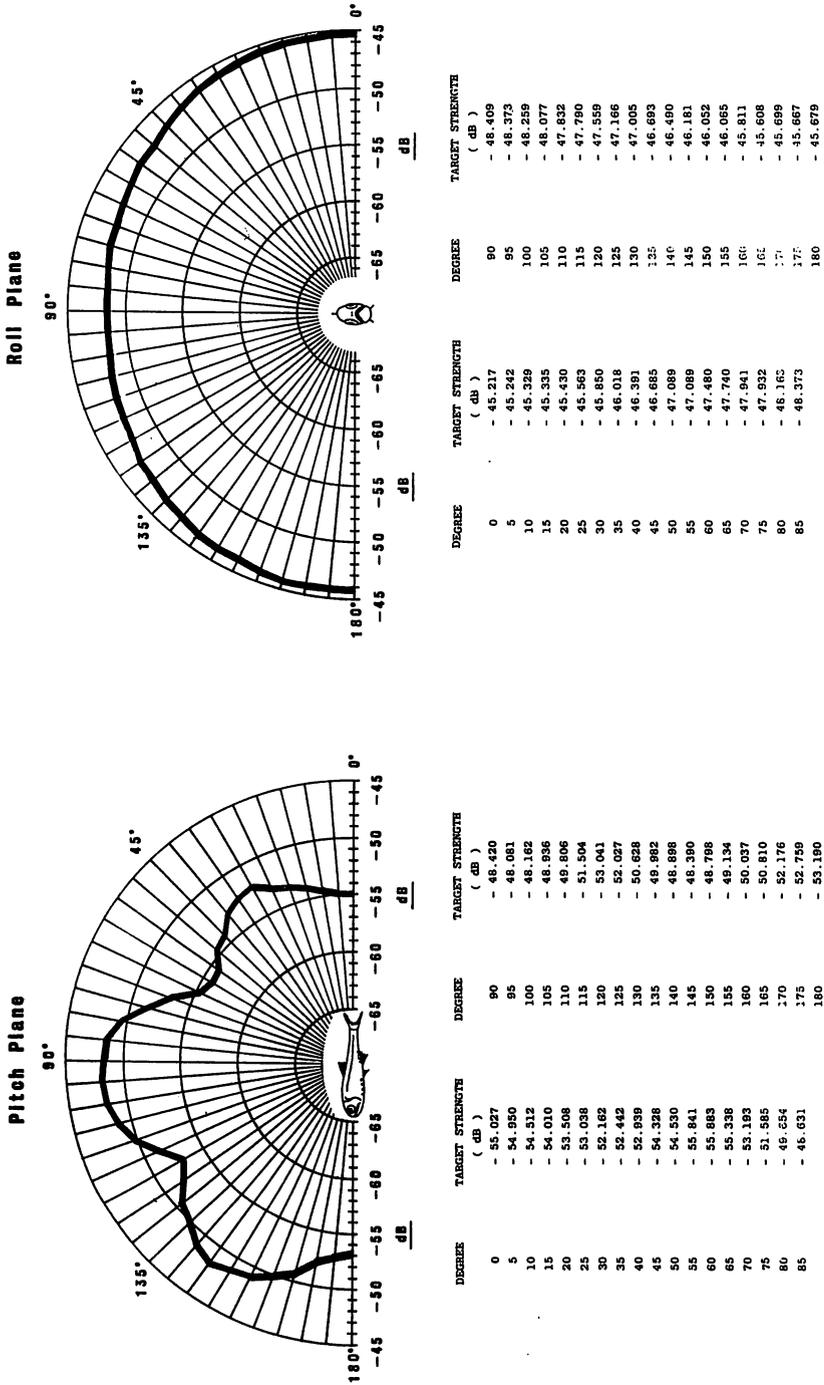


Fig. 9-5-1. Acoustic back-scattering polar diagrams of the fish (IWAHADAKA) in the pitch plane and roll plane.

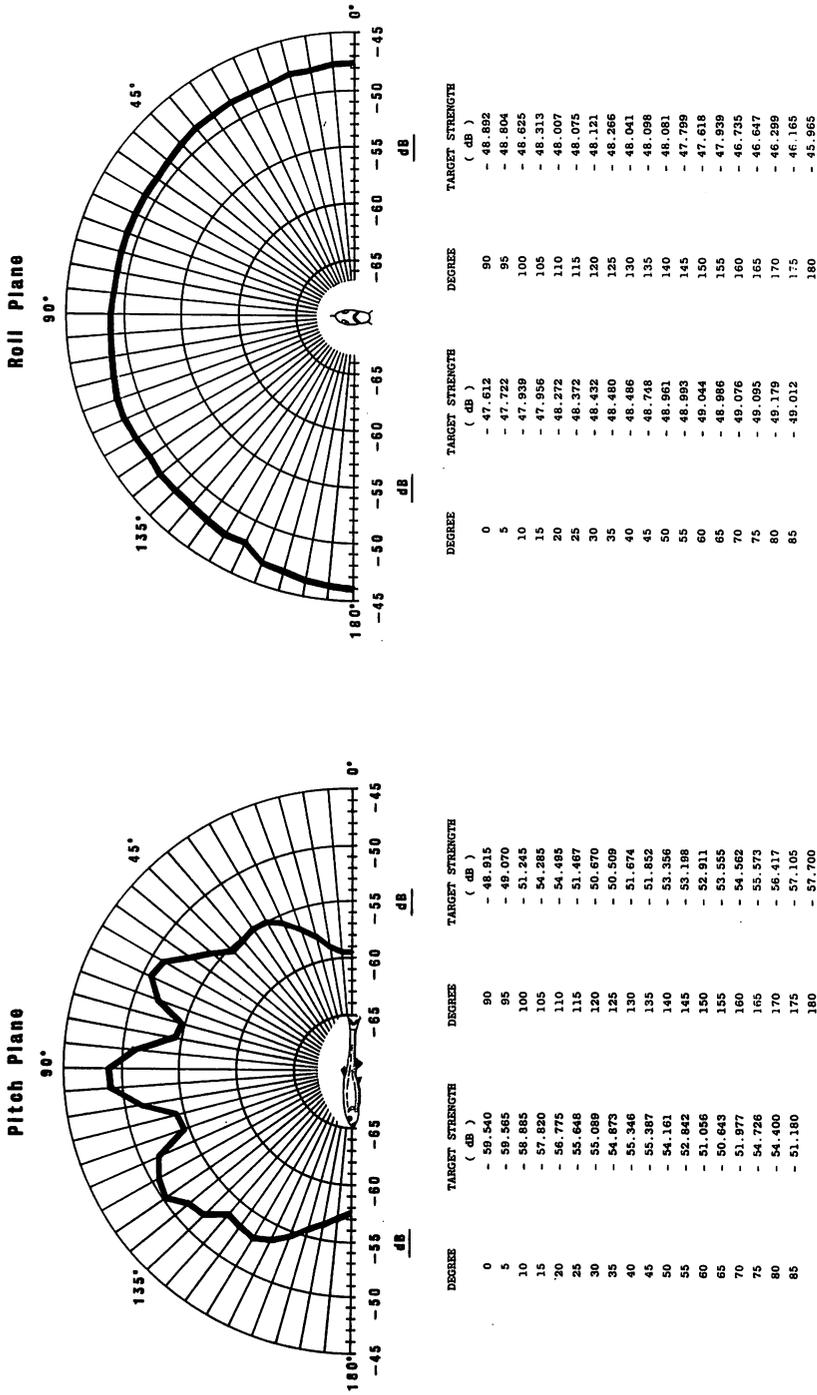


Fig. 9-5-2. Acoustic back-scattering polar diagrams of the fish (YOUZIESO) in the pitch plane and roll plane.

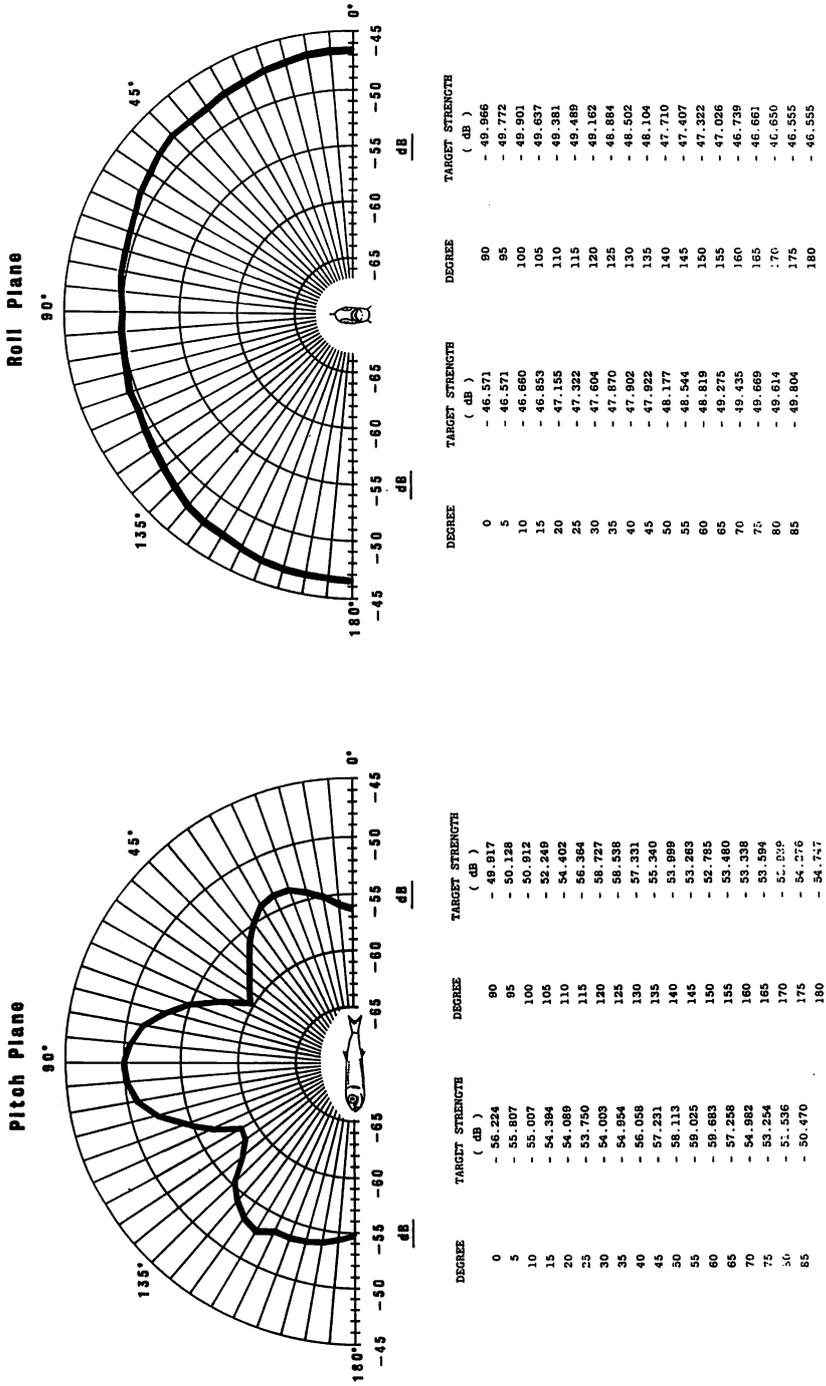


Fig. 9-5-3. Acoustic back-scattering polar diagrams of the fish (KYURIESO) in the pitch plane and roll plane.

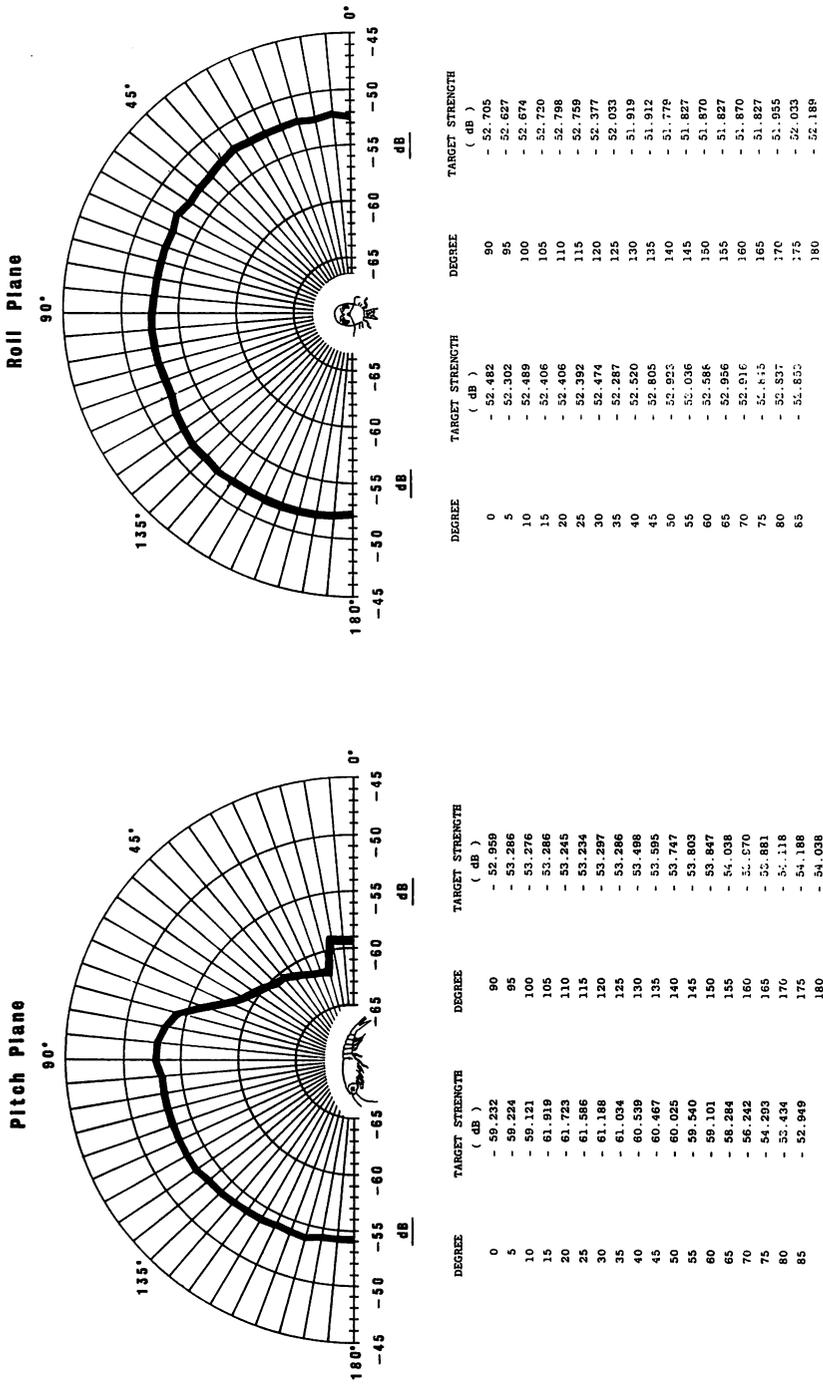


Fig. 9-5-4. Acoustic back-scattering polar diagrams of a *Lophogaster japonicus* in the pitch plane and roll plane.

ある標的強度の平均値

- ③背部 (90°) を中心として等価指向角に相当する範囲にある標的強度の平均値
- ④背部 (90°) を中心として前後左右それぞれ体軸の傾斜角度に相当する範囲にある標的強度の平均値
- ⑤尾部—背部—頭部方向 (0°~180°) および左側部—背部—右側部 (0°~180°) の標的強度の平均値

鹿児島湾における超音波散乱層の散乱強度測定に使用した魚群探知機は半減半角12°, 等価指向角7.7°であった。又 Plate 7-3-2に示したように夕方時イワハダカの群が上昇する時、その体軸が二十数度上を向いていることが推定された。このことから朝方下降時体軸は二十数度下を向いていることが推察でき、上昇時、下降時 Pitch Plane の角度に変化がみられると推定する。遊泳中 Roll Plane の角度変化についての推察は困難であった。これらのことから、各単体標的の①~⑤の値を水槽実験の結果より次に示す。なお今回実施した測定は5°間隔であったため、②は背部 (90°) を中心として前後左右10°, ③は背部 (90°) を中心として前後左右5°, ④は背部 (90°) を中心として Pitch Plane は前後25°, Roll Plane は左右10°の範囲に相当する標的強度平均値をもって単体標的強度の近似値とした。単位は dB である。

	①	②	③	④	⑤
イワハダカ	-48.4	-48.4	-48.4	-49.5	-48.7
ヨウジエソ	-48.9	-49.8	-49.3	-50.8	-50.4
キュウリエソ	-50.0	-50.2	-50.0	-51.6	-50.6
ロホガスター	-53.0	-53.0	-52.9	-53.5	-53.9

ヨウジエソを除いた三種の標的の①, ②, ③の値はほとんど等しく、その差は0.2 dB 以下であったがヨウジエソの場合は約1 dB に達した。しかしいずれも③の値は①, ②の平均値に極めて近い。④, ⑤は全般的に①, ②, ③の値と異なった傾向を示した。

上昇、下降時における遊泳中の姿勢は前述のようにイワハダカ以外推定することができなかった。しかしイワハダカの場合においても船上におけるマージン・テスト実施時に各個体の体軸がどの方向を向いていたかを知ることは困難である。よって遊泳中4種の各個体は平均的に各体軸が水平であったと仮定せざるを得ない。又①, ②, ③の値がほとんど等しかったことから、どの値を使用しても差し支えないと考えられるが、前章において等価指向角の考えを導入していることから各単体標的の標的強度は③の値を採用する。ただしイワハダカについては④の値も参考とし、以後括弧の中に表示する。各単体の標的強度 TSe をそれぞれ次のように推定する。

イワハダカ	-48.4 dB (-49.5 dB)
ヨウジエソ	-49.3 dB
キュウリエソ	-50.0 dB
ロホガスター	-52.9 dB

9. 2 超音波散乱層を構成する生物分布量の推定

洋上における各超音波散乱層の散乱強度 SV (dB) は Table 2-2 に、又超音波散乱層を構成する生物と推定される各単体の標的強度 TSe (dB) は前節において推定した。よって (7-63) 式は一次反射のみ考慮すれば次のように近似される。

$$\begin{aligned} 10 \log n &\approx SV - 10 \log TSe \\ &= SV - TSe \end{aligned} \quad (9-1)$$

$$\begin{aligned} \therefore \log n &\approx (SV - TSe) / 10 \\ n &\approx 10^{(SV - TSe) / 10} \end{aligned} \quad (9-2)$$

ここに示された単体標的の個体数 n は散乱強度の定義から、単位体積 1 m^3 中の個体数を意味するので、超音波散乱層の平均密度 N に等しい。よって湾奥海域、湾中央海域の各季節における各散乱層の散乱強度よりそれぞれの平均密度 N を求めた。

9. 2. 1 湾奥海域における超音波散乱層構成生物の平均密度の推定

I) 第一層

第一層はヨウジエソ、キュウリエソ、ロホガスター等が混棲している混合層であると「第 5 章 Isaacs-Kidd 中層トロールネットによる超音波散乱層の構成生物の採集」において推定した。よって標的強度の平均値 TSe は -50.5 dB 、又ヨウジエソ、ロホガスター二者の平均値は -50.7 dB となる。各季節における平均密度を次に示す。

	N (個体/ m^3)
春	17.378
夏	12.303
秋	22.909
冬	8.511

ここで Isaacs-Kidd 中層トロールネット曳網結果より採集個体数 (Table 6-1) の比によりそれぞれの平均密度を概算した。

i) 春	N (個体/ m^3)
ヨウジエソ	0.087
キュウリエソ	3.238
ロホガスター	14.053
ii) 夏	
ヨウジエソ	0.265
キュウリエソ	—
ロホガスター	12.038
iii) 秋	
ヨウジエソ	9.667
キュウリエソ	1.854
ロホガスター	11.388
iv) 冬	
ヨウジエソ	0.147

キュウリエソ	4.549
ロホガスター	3.815

II) 第二層

第二層はイワハダカが主たる構成生物であると第5章において推定した。よって TSe は -48.4 dB (-49.7 dB) である。各季節における平均密度を次に示す。

	N (個体/m ³)
春	22.387 (30.200)
夏	26.915 (36.308)
秋	22.909 (30.903)
冬	11.454 (19.500)

III) 第三層

第三層は Isaacs-Kidd 中層トロールネット曳網においては構成生物と推定できる生物を採集することはできなかった。しかし水中写真撮影においてマイワシと推定される魚が撮影された。船上から数匹捕獲したマイワシの全長は18~20cmであった。よって参考のため全長20cmのマイワシの標的強度を測定したところ背部(90°)を中心とし頭部、尾部、左右方向それぞれ10°までの TS の平均値 TSe は -41.5 dB であった。よって春の第三層がマイワシであるとすれば N の値は3.162 (個体/m³) となる。

9. 2. 2 湾中央海域における超音波散乱層を構成する生物の平均密度の推定

I) 第一層

第一層はヨウジエソ、キュウリエソ、ロホガスター等が混棲している混合層であると第5章において推定した。よって平均値 TSe は -50.5 dB, ヨウジエソ, ロホガスター二者の平均値は -50.7 dB であった。各季節における平均密度を次に示す。

	N (個体/m ³)
春	1.549
夏	14.791
秋	8.913
冬	26.915

ここで Isaacs-Kidd 中層トロールネット曳網結果より採集個体数 (Table 6-2) の比例によりそれぞれの平均密度を概算した。

i) 春	N (個体/m ³)
ヨウジエソ	0.680
キュウリエソ	—
ロホガスター	0.869
ii) 夏	
ヨウジエソ	1.105
キュウリエソ	—
ロホガスター	13.686
iii) 秋	
ヨウジエソ	0.203

キュウリエソ	0.339
ロホガスター	8.371
iv) 冬	
ヨウジエソ	4.215
キュウリエソ	—
ロホガスター	22.700

II) 第二層

第二層はイワハダカが主たる構成生物であると第5章において推定した。よって TSe は -48.4 dB (-49.7 dB) である。各季節における平均密度を次に示す。

	N (個体/m ³)
春	14.791 (19.953)
夏	36.308 (48.978)
秋	27.542 (37.154)
冬	21.877 (29.512)

III) 第三層

第三層構成生物は湾奥海域と同様マイワシであると推定すればその平均密度は次に示すとおりである。

	N (個体/m ³)
夏	4.365
冬	3.162

9. 2. 3 鹿児島湾海域における超音波散乱層を構成する生物の分布量

前項で各季節における各超音波散乱層構成生物の平均密度を試算した。そこでそれぞれの構成生物の鹿児島湾海域全域（湾口海域は除く）における分布量を概算する。「2. 2 湾全域における記録」で述べたように湾全域において超音波散乱層が確認され、水深100m以深の海域で多く見られた。又湾奥海域と湾中央海域における観測においても両海域の垂直移動を行う超音波散乱層には際立った相違は見られなかった。そこで海図 No. 221（鹿児島湾：縮尺1/100,000）よりプランメータ TAMAYA PLANIX7（タマヤテクニクス株式会社）により水深100 m 以深の水域の面積を求めた。

湾奥海域	169.7 km ²
湾中央海域	307.3 km ²

又構成生物と推定される単体の平均体重は次に示すとおりであった。

イワハダカ	0.46 g
ヨウジエソ	0.29 g
キュウリエソ	0.33 g
ロホガスター	0.09 g

各季節における各超音波散乱層の層の厚さは Table 2-1-1, Table 2-1-2に示したが、ここにそれらの大略の平均値を示す。

湾奥海域	第一層	第二層	第三層
春	45 m	15 m	15 m

夏	30 m	15 m	10 m
秋	25 m	15 m	10 m
冬	25 m	10 m	15 m
湾中央海域	第一層	第二層	第三層
春	35 m	25 m	20 m
夏	20 m	15 m	15 m
秋	35 m	20 m	15 m
冬	22.5 m	25 m	20 m

これらのことから海域 1 km² に一様に分布すると仮定した生物量は次式によって推定することができる。

$$N_k = N \cdot L \cdot 10^6 \tag{9-3}$$

ここで

N_k : 1 km² の海域に生物が一様に分布すると仮定した時の個体数

N : 平均密度

L : 超音波散乱層の層の厚さ

また 1 km² に存在する生物の重量 W は次式による

$$W = w \cdot N_k \tag{9-4}$$

ただし

w : 単体の重量

以上のことから湾奥海域と湾中央海域に分け各季節、各構成生物の個体数および重量を試算した。Table 9-1, Table 9-2にそれぞれ水域 1 km² に現存すると推定される個体数および重量を示した。表中イワハダカの欄の括弧内の数値は前述した単体標的強度を -49.5 dB としたときのものである。これらの値は洋上における超音波散乱層のマージン・テストの結果より導いた散乱強度、水槽において測定された単体魚の標的強度および Isaacs-Kidd 中層トロールネットによる曳網結果の三者がパラメータとなっているため、それぞれの精度が直接誤差として現れてくる。この中で最も大きな誤差の要因は Isaacs-Kidd 中層トロールネットの採集効率に問題があると推察する。それはすでに「第5章 Isaacs-Kidd 中層トロールネットによる超音波散乱層の構成生物の採集」で述べたところである。ここに一年を通じての各構成生物の海域 1 km² 当たりの分布量の平均値を示す。単位はトン / 1 km² である。

	湾奥海域	湾中央海域
イワハダカ……………	2.5628 × 10 ² (3.9229 × 10 ²)	2.3140 × 10 ² (3.1216 × 10 ²)
ヨウジエソ……………	1.8648 × 10	1.0409 × 10
キュウリエソ…………	2.5228 × 10	0.9789
ロホガスター…………	3.0906 × 10	2.4411 × 10

次にこれらの値を基に両海域の100m以深の水域面積を乗じて各魚種の総分布量を推定する。単位はトンである。

Table 9-1. Individual numbers of the composition organism of the ultrasonic scattering layer in unit area (1 km²).

	<i>Bemthosema pierotzu</i>	<i>Pollichthys maulli</i>	<i>Maurolicus japonicus</i>	<i>Lophogaster japonicus</i>
Innermost area	Spring	3.3581×10 ⁸ (4.5300×10 ⁸)	3.9150×10 ⁶	1.4571×10 ⁸
	Summer	4.0373×10 ⁸ (5.4462×10 ⁸)	7.9500×10 ⁶	—
	Autumn	3.4364×10 ⁸ (4.6355×10 ⁸)	2.4168×10 ⁸	4.6350×10 ⁷
	Winter	1.1454×10 ⁸ (1.9500×10 ⁸)	3.6750×10 ⁶	1.1373×10 ⁸
Middle area	Spring	3.6978×10 ⁸ (4.9883×10 ⁸)	2.3800×10 ⁷	—
	Summer	5.4462×10 ⁸ (7.3467×10 ⁸)	2.2100×10 ⁷	—
	Autumn	5.5084×10 ⁸ (7.4308×10 ⁸)	7.1050×10 ⁶	1.1865×10 ⁷
	Winter	5.4693×10 ⁸ (7.3780×10 ⁸)	9.0563×10 ⁷	—

Unit : inds

Table 9-2. Weight of the composition organism of the ultrasonic scattering layer in unit area (1 km²).

	<i>Bemthosema pterotu</i>	<i>Pollichthys maulli</i>	<i>Maurolicus japonicus</i>	<i>Lophogaster japonicus</i>
Innermost area	Spring 1.5447×10 ² (2.0838×10 ²)	1.1354	4.8084×10	5.6915×10
	Summer 1.8572×10 ² (2.5053×10 ²)	2.3055	—	3.2503×10
	Autumn 1.5807×10 ² (2.1323×10 ²)	7.0087×10	1.5296×10	2.5623×10
	Winter 5.2688×10 (8.9700×10)	1.0658	3.7531×10	8.5838
Middle area	Spring 1.7010×10 ² (2.2946×10 ²)	6.9020	—	2.7374
	Summer 2.5053×10 ² (3.3795×10 ²)	6.4090	—	2.4636×10
	Autumn 2.5339×10 ² (3.4182×10 ²)	2.0605	3.9155	2.6369×10
	Winter 2.5159×10 ² (3.3939×10 ²)	2.6263×10	—	4.3900×10

Unit : tons

	湾奥海域	湾中央海域
イワハダカ……………	4.3491×10 ⁴ (6.6572×10 ⁴)	7.1109×10 ⁴ (9.5927×10 ⁴)
ヨウジエソ……………	3.1646×10 ³	3.1987×10 ³
キュウリエソ……………	4.2812×10 ³	3.0082×10 ³
ロホガスター……………	5.2447×10 ³	7.5015×10 ³

このことから鹿児島湾全域（ただし湾口海域を除く）における分布量を次のように推定する。単位はトンである。

	鹿児島湾全域
イワハダカ……………	1.1460×10 ⁵ (1.6250×10 ⁵)
ヨウジエソ……………	6.3633×10 ³
キュウリエソ……………	4.5820×10 ³
ロホガスター……………	1.2746×10 ⁴

よって鹿児島湾全域における超音波散乱層を構成する生物の分布量はおよそイワハダカの11.5万トン（16.3万トン）、ヨウジエソ0.6万トン、キュウリエソ0.5万トン、ロホガスター1.3万トンと推定される。

9. 3 超音波散乱層を構成する生物分布量推定値の検討

前節で超音波散乱層を構成する生物の分布量の推定を行った。それは洋上で魚群探知機を使用して実施したマージン・テスト結果より得たそれぞれの超音波散乱層の散乱強度、水槽で実施した構成生物単体魚の標的強度および Isaacs-Kidd 中層トロールネットにより各超音波散乱層の存在する水深を曳網し、採集した各生物の個体数の比をパラメータとして推定した。この節では前節で推定した生物分布量と Isaacs-Kidd 中層トロールネット曳網により採集された個体数との比較、次に理論的考察は二次反射まで考慮したが生物分布量推定にあたっては二次反射の影響を無視した。よってこの影響による誤差を推定するため、水槽において散乱強度に与える二次反射の影響に関する実験を行った結果について考察した。

9. 3. 1 Isaacs-Kidd トロールネット曳網結果の検討

1982年4月22日夕方、垂直移動を行う超音波散乱層第二層の構成生物を採集する目的で Isaacs-Kidd 中層トロールネットの曳網を実施した。上昇中の超音波散乱層の記録は魚群探知機により監視し、その水深を曳網するために、ネットの網口、スプレッダー・バーに取り付けられたネット・レコーダーの発振器により網水深を知る方法はすでに「6. 1 採集方法」で述べた。その時の魚群探知機による超音波散乱層の記録と、ネット・レコーダーによる網水深の記録を Fig. 9-6 に示した。この時の海況は Very smooth sea であった。又マージン・テスト終了後航走を開始し、針路270°、船速2.5ノットで曳網した。投網は18時42分であったが、ワイヤーロープの伸縮を適宜行い第二層を確実に曳網し始めたのは18時54分からであった。その後19時11分に揚網を開始した。この間第二層を曳網したと推定される時間は17分であった。曳網中の網口の高さはネット・レコーダーの記録から1.6mであったので網口面積は3.8m²であった。このことから17分間の汙水量は4,984.8m³であった。この曳網に

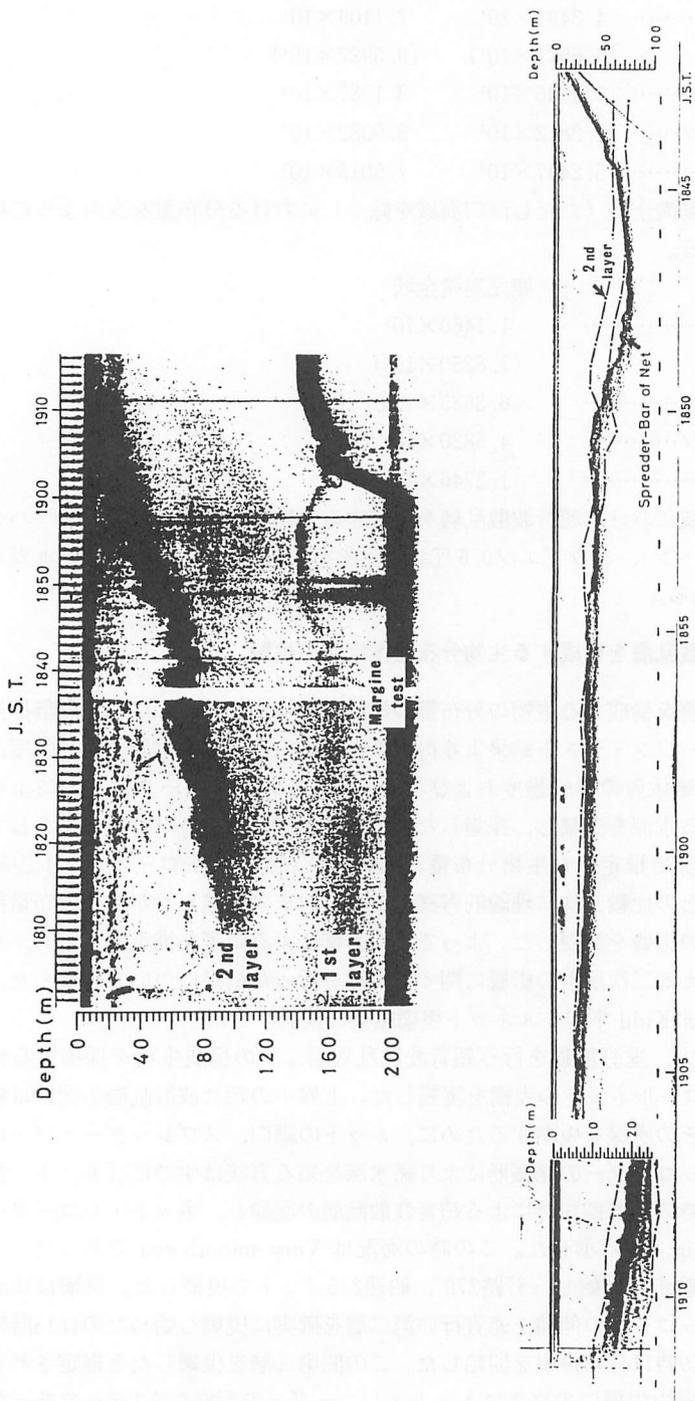


Fig. 9-6. The records of ultrasonic layers by 28 kHz fish finder and the net recorder when the Isaacs-Kidd midwater trawl net was towing.

よる採集生物は次のようであった。

	種 類	個体数	平均体長
魚類	イワハダカ	1,170	35mm
甲殻類	エ ビ	68	42mm
	オキアミ	42	14mm
その他	ク ラ ゲ	2	

上記個体数を汙水量で除せば、1 m³あたりの個体数すなわち平均密度が算出される。その結果を次に示す。

イワハダカ	0.2347個体/m ³
エ ビ	0.0136個体/m ³
オキアミ	0.0094個体/m ³

この時曳網開始直前マージン・テストを実施し、この超音波散乱層の散乱強度を-33.9 dB に測定した。また前述のようにイワハダカ単体魚の標的強度を-48.4 dB (-49.5 dB) と推定した。よって平均密度は28.184 (36.038) 個体/m³となる。この数値は Isaacs-Kidd 中層トロールネットの結果と2桁異なる。もし計算平均密度がより正しい値とすれば Isaacs-Kidd 中層トロールネットによる生物個体の採集率は1%以下となる。これはイワハダカが遊泳能力の高い魚類であり、2.5ノット(約1.3m/秒)の曳網速力では網口直前に位置するリング、シャックル、撚り戻しおよび4本のワイヤーなどの影響も加わって、網口からの逃避が多いものと推察される。しかし現実問題としてこれ以上の曳網速力では網全体の浮き上がりが激しく適切な水深を曳網するのが困難であった。又網口から5mは網地の目が75mmと大きいため網目から逃避した可能性も推察される。

9. 3. 2 散乱強度に与える二次反射の影響

一個体の標的強度が判明しても、それが複数個存在し互いにその間隔が変化すれば、送受波器より各標的までの距離も変化し、それに伴い位相差に変化が生じる。又、二次、三次等多重反射の強さにも変化が生じる。これは群を形成する超音波散乱層の散乱強度に影響するものと推察する。すなわちイワハダカ単体の標的強度が測定できても、海洋中において、それらがある群を形成し、各単体それぞれが遊泳することにより相互間隔に変化が生じ、散乱強度に変化が生じることになる。よってその基礎的な資料を得るため標的として二個の球体を使用しその間隔を変化させ、標的強度がどう変化するか、また二次、三次等多重反射がどの位の距離まで影響があるのか水槽において測定し検討した。

9. 3. 2. 1 測定方法

実験水槽、測定システム、器機および標的からの反射信号の処理は単体魚の標的強度測定時と同様であった。

I) 球体

球体はシリコンラバー球、直径20mmおよびナイロン製ボールベアリング(椿本精工社)、直径25.5mm(精度 ±0.05mm以下)を各二個使用した。球体の保持はナイロン製テグス1号1本を接着剤により1点で接着し吊り下げた。

II) 球体の移動

パソコンとXYプロッターを連動させ、あらかじめプログラミングされた各測定点まで、

XYプロッターにより移動させた。

i) 後方への移動

標的は直径20mmのシリコンラバー球を使用し、送受波器の音軸線上に球体1個を固定（固定球と称する）、他の1個を音軸線後方に移動（移動球と称する）させた。2球体が接触している状態を二球体間距離0mmとし、1mm間隔で54点測定した。

ii) 側方への移動

標的は直径25.5mmのナイロン製ボールベアリングを使用した。各測点の決定に際しては、Fig. 9-7に示したように、まず送受波器を中心とした円弧(Y)を作図した。よって(Y)上を移動球が移動する時、その反射波の位相は変わらない。次に固定球を中心とし、測定すべき球体間距離を半径とした円弧(X)を作図した。(X)上を移動球が移動する時、二球体間に多

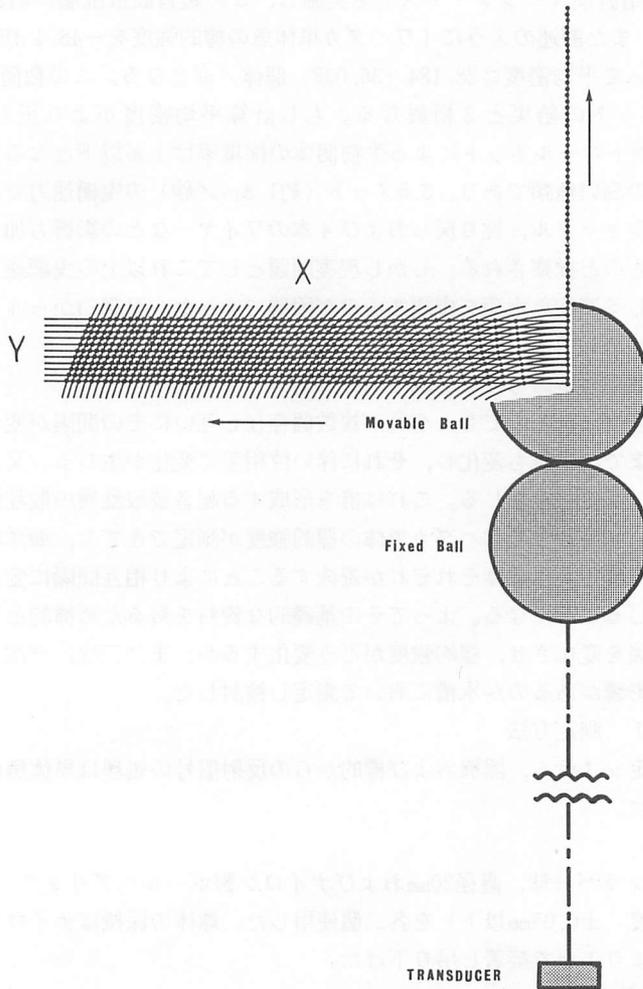


Fig. 9-7. The illustration of relative positions of two balls.

重反射の影響があるとすればその位相は変わらない。そこで(X)(Y)の交点を測点とした。(Y)の数は二球体接触の状態から後方へ1mm間隔で11本、(X)の数は二球体が1mm離れた状態から1mm間隔で60本の軌跡とした。よって測点は $60 \times 11 + 1$ となり661点であった。

9. 3. 2. 2 結果および考察

Fig. 9-8は移動球を音軸線上後方へ移動した時、Fig. 9-9は移動球を側方へ移動した時の反射信号ピーク電圧の変化曲線を示している。両図とも横軸は球体間距離を示しているが、二球体が接触している状態を球体間距離0としている。よって球体の中心間距離はFig. 9-8の場合は20mmを、Fig. 9-9の場合は25.5mmをそれぞれの値に加えれば求めることができる。

i) 後方への移動

極大値は二球体間距離が約6.5mm, 22mm, 37.5mm, 52mmにあった。これら極大値から求めたこの曲線の1波長は15.2mmとなった。又それぞれの反射ピーク電圧値は52.5 mV, 47.3 mV, 43.5 mV, 40.0 mVであった。極小値は二球体間距離が14.5mm, 30mm, 45mmにあり、極小値から求めたこの曲線の1波長は15.3mmとなった。又それぞれの反射ピーク電圧は8.5 mV, 7.7 mV, 8.3 mVであった。

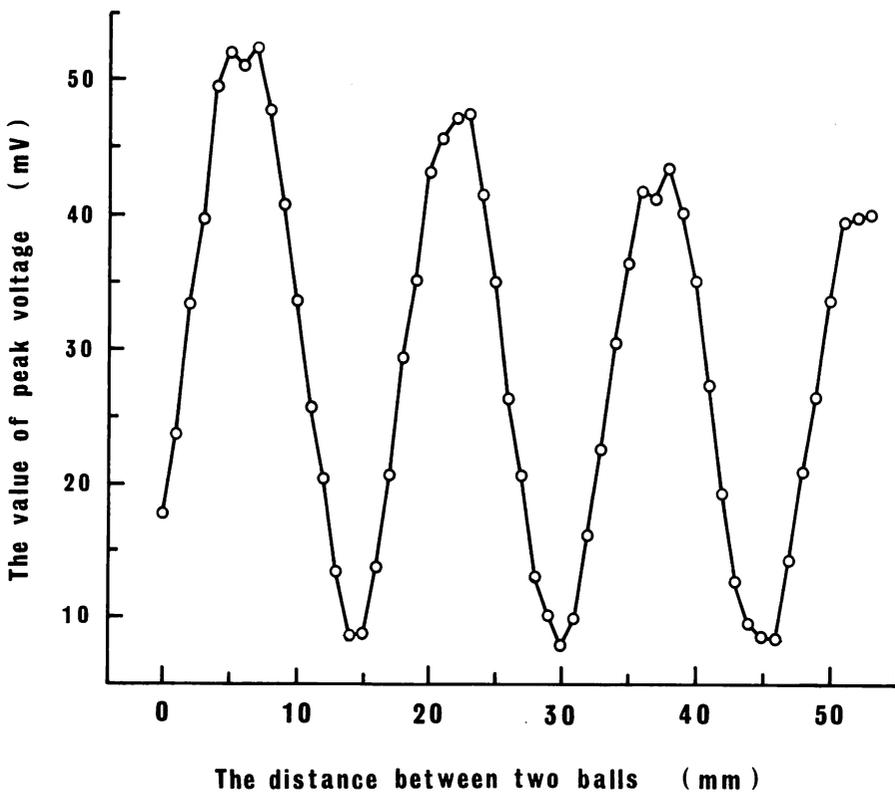


Fig. 9-8. Acoustic back-scattering diagram of two balls when the other ball moved back along the sound ray.

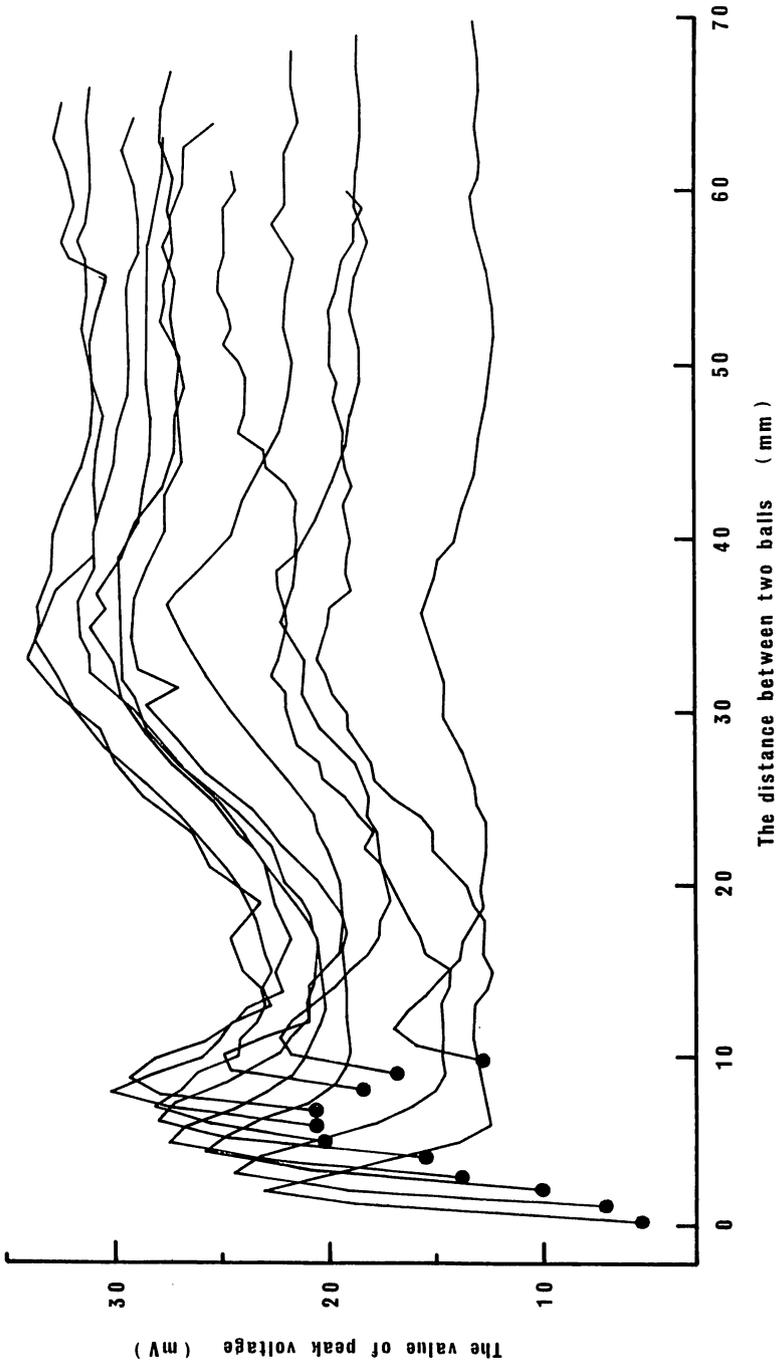


Fig. 9-9. Acoustic back-scattering diagram of two balls when the other ball moved in the right angled direction of the sound ray.

ii) 側方への移動

Fig. 9-9における●印は移動球が音軸線上固定球の後方にあることを示し、一連の側方への移動の原点となる。この状態のとき送受波器の位置からは、二球体は完全に重なって見えることになる。そしてこの位置から移動球を側方へ移動させることにより反射電圧は急激に高くなった。その極大値は全ての測定において側方へ移動した第二番の測点で発生した。それは送受波器の位置からみて、側方へ(Y)上次に示す数値だけずれている。

		距離	角度 (θ)
球体間距離	1 mmの場合	10.36mm	17.5'
球体間距離	11mmの場合	12.19mm	20.5'

ただし固定球と移動球が送受波器においてなす角を θ とする。次に球体間距離16~17mmで極小値、約35mmで再び極大値をとり、その後ゆるやかに変化する。

周波数50 kHzの超音波の海水中での波長は約30mmである。移動球を後方へ移動させた時のピーク電圧の変化曲線の周期は球体間距離で約15mmであったことから、ピーク電圧値の変化は二球体の一次反射波の伝搬距離の違いによる位相差が大きく影響したと推定される。移動球の側方への移動については、一次反射波の伝搬距離の違いによる位相差の影響を取り除くため送受波器を中心とした円弧上を移動させた。しかし球体間距離約0~35mmの間でピーク電圧値は大きく変化した。(X)上、原点から第二番目の測点に至るまでの急激な増加は、移動球が固定球の影から出ることによる標的の受波面積の増加によるものと推定される。それ以後における16~17mm付近の極小から約35mmの極大をとるまでの間は、二球体間の多重反射が複雑に影響しているものと推定される。

以上のことから、海洋中に遊泳する魚群など、群を形成する複数の標的の相対位置が魚群探知機の音軸線上で変化する場合は、使用周波数の波長に応じた標的間距離で標的強度が大きく変化する。又音軸線上に垂直方向での相対位置に変化がある場合は、主として、複数の標的がそれぞれごく近くに存在する時、多重反射の影響により標的強度が変化する。その他の角度においては両者が共に標的強度に影響を与えるが、より大きく影響を与えるのは、一次反射の伝搬距離の違いによる位相差であると推定される。しかし群が非常に密な場合は多重反射の影響も大きくなるものと推察される。

ここで実際の超音波散乱層について考察する。超音波散乱層を構成する生物の中で平均密度が大きいのはイワハダカである。この単体標的強度に対する平均密度の平均値は23.023 (31.564) 個体/m³であり、一辺35.2 (31.6) cm立方に1個体存在することになる。又最大値は48.978個体/m³であった。この時一辺27.3cm立方に1個体存在する。よって最大の平均密度をとる場合であっても他のイワハダカとの間隔は27.3cm以上離れていることになる。

一方水槽実験において使用したナイロン製ボールベアリングの標的強度は-49.2 dBでありイワハダカ、キュウリエソ、ヨウジエソの標的強度と極めて近い値である。そして二次反射の影響があったのは二球体の中心間距離およそ6 cmまでであった。それ以上の距離離れると多重反射の影響はみられなかった。イワハダカが最も密に存在する場合においても個体間隔は27cm以上離れているものと推定され、マージン・テスト測定結果より得られた散乱強度には多重反射の影響は無視できる。よって(9-1)式、(9-2)式は鹿児島湾内における垂直移動を行う超音波散乱層の平均密度を求める式として充分実用に供するものと推定する。

第10章 総 合 考 察

海洋中の超音波散乱層は水産業特に漁業に関する生物学的な関わり、そして漁業用計器、生物・海洋・海底の調査用計器、音響航法計器など水中音響機器全般にわたる開発・設計・使用に重要な影響を与え、その実態を究明することには大きな意義をもつものである。超音波散乱層に関する研究は音響測深機、魚群探知機を使用して第二次世界大戦後、世界各国において実施され、その生物学的起因、物理的起因について多くの知見を得てきた。しかし超音波散乱層の実態すなわち漁場・漁獲との関連、散乱層構成生物そして超音波散乱特性など重要な問題はまだ充分解明されていない。外洋域における超音波散乱層に関する報告は数多く見られるが、閉鎖海域に近い内湾における報告は数少ない。特に鹿児島湾においては超音波散乱層の存在すら確認されておらず、その実態に関する調査・研究は白紙の状態であった。そこで筆者は鹿児島湾内における超音波散乱層の実態を明らかにする目的で本研究を行った。

鹿児島湾は九州本土最南端に位置し、地質構造上は西南日本外帯、地形区上は南九州火山地域に属している。この中央域には霧島火山帯がほぼ南北に走り、さまざまな火山地形が発達しており活火山桜島、休火山開聞岳に代表される。又鹿児島湾そのものは中央部の始良カルデラ、南部の指宿(阿多)カルデラの陥没により形成された¹³⁰⁾。そして最近の海底地質調査によれば多くの海底火山が発見されている。又鹿児島湾は黒潮(暖流)地域に位置し、この流れの一部が湾内に流入することにより水温、塩分、溶存酸素、透明度など水質を基本的に性格づけ生物相に大きな影響を与えている。湾の形は南北方向の長さが東西方向の幅に比べて4倍以上の細長い地形であり、しかも桜島を境として南北二つの海域に分離され、それぞれ海盆を有し、水深は最深部で200mを越える。海水面は湾奥海域237.9km²、湾中央海域563.7km²の面積である。このため湾全海域の海水交換のための更新日数は110日~140日を要する¹³¹⁾。第十管区海上保安本部¹³²⁾によれば、湾内表層(5m)の潮流は次のようになっている。湾口上げ潮北流最強時(1.0ノット)、桜島水道の東側が最も強く1.5~1.7ノット、湾中央海域で0.1~1.0ノット、湾奥海域は最も弱く0.1~0.5ノット、又湾口下げ潮南流最強時(1.1ノット)、桜島水道が最も強く1.5~1.6ノット、湾中央海域大隅半島側0.1~0.3ノットの南流、西側の薩摩半島喜入沖で約1ノットの北流、湾奥海域は0.2~0.3ノットとなっている。

このように鹿児島湾は火山地域に属し複雑な海底地形と地質構造を持ち、かつ黒潮流域に位置することから、これらに伴う複雑な地形および海況が超音波散乱層を構成する生物に大きく影響しているものと考えられる。又湾口海域において超音波散乱層が明確に記録されなかったのは外洋水の流れが強く、湾中央海域、湾奥海域とはその環境が異なることに大きな原因があるものと推察される。近年日本沿岸の海洋汚染問題が取り上げられているが、鹿児島湾もその例にもれず生活廃水の湾内への流入とくに湾奥海域7本、湾中央海域12本の大小河川が湾内に流れ込んでおり水質変化の大きな要因になっているものと推定される。さらに福山沖のタギリ現象のようにガス噴出および溶岩、火山灰等も含めて火山帯特有の水質、海底地形、底質が生物相に与える影響は大きく、今後の問題として検討されねばならない。

鹿児島湾の主な漁業の種類は、あぐり網(旋網)、敷網(八田網)、刺し網、小型定置網、はえ縄、小型底引網(トントコ網)、その他釣り漁業であり、その対象魚種は約60種に及ぶ。1977年から1981年の5年間の主な漁獲種と漁獲量(5年間平均)は次のとおりである^{133), 134), 135)}。

漁獲種	漁獲量
カタクチイワシ	1,638トン
イカ類	215トン
マアジ	124トン
サバ類	113トン
マダイ	106トン
ボラ類	80トン
ブリ類	77トン
タコ類	55トン
その他魚類	1,043トン
合計	3,451トン

これによると特に敷網、あぐり網で漁獲されるカタクチイワシ（魚体長10～15cm）の漁獲量が多く、年によって異なるがおよそ全漁獲量の45%にあたる。又湾奥海域の方が湾中央海域より多獲されるものにはカタクチイワシ、イカ類、タチウオ、ボラ類がある。反対に湾中央海域の方が多獲される魚種はマアジ、マイワシ、サバ類、ブリ、チダイがある。

このような地形、海況、漁業を背景とした鹿児島湾において50 kHz 魚群探知機により垂直移動を行う超音波散乱層が鹿児島湾全域にわたって記録された。湾奥海域、湾中央海域それぞれの観測記録によれば日周期垂直移動を行う超音波散乱層は湾奥海域の秋（10月）が二層、春（4月）、夏（7月）、冬（1月）が三層、湾中央海域は一年を通じて三層記録された。しかし湾奥海域の1981年11月の記録は三層記録された。又1983年は二層しか記録されなかった。このことから湾奥海域の秋においては年により二層あるいは三層記録される不安定さがみられた。湾奥海域における10月から11月の1ヶ月の時間経過で水温の垂直分布あるいは海水中の照度に急激な変化は起こっていない。特に水中照度は昼夜1日サイクルの変化の方が大きい。湾奥海域において盛んであるカタクチイワシ漁の最盛期は3月、4月、5月、9月、10月である。このカタクチイワシ漁の集魚灯などの灯火類が、海中の照度と非常に関わり深い超音波散乱層の形成に大きな影響を与えているものと推察される。このような例外を除いて鹿児島湾には四季を通じて三層の超音波散乱層が存在することを確認した。しかし「第2章 超音波散乱層の記録」で述べたように昼夜第一層が、ある一定水深に存在するとき、一つの層が二つの層に分離する記録がみられた。これは第一層構成生物が単独の種類ではなく複数の種類によって構成されていることを裏付けているものと推察される。このように記録された超音波散乱層も夕方上昇運動に入ると二つの層は一つの層に合併された記録となった。

超音波散乱層が垂直移動を行う主な原因は、水温躍層を突き抜けて移動することからも、水温垂直分布の変化ではなく海中の照度の変化と深い関係があるものと推定される。朝方の薄明時から夕方の薄明時にかけては太陽光に、夜間にあつては月光に大きく影響される。夜間水面近くまで浮上していた各超音波散乱層は天文薄明時下降を開始、昼間はそれぞれ一定水深に位置する。この時の各層の水中照度は多くの場合次に示したとおりであった。

第一層	10^{-7} lux～ 10^{-9} lux
第二層	10^{-4} lux～ 10^{-7} lux
第三層	10^0 lux～ 10^{-2} lux

この第三層の構成生物は魚群探知機の記録の特徴および水中撮影の結果からマイワシと推定する。Nomura (1959)¹³⁶⁾によれば山口県近海におけるマイワシ群は日出前には水深約40mに位置し日出直前水面まで浮上する。その時の水中照度は $10^{-1} \sim 10^{-2}$ lux である。その後水深30mより深く潜り水中照度 $10 \sim 10^3$ lux の範囲に位置するとある。鹿児島湾内におけるマイワシと推定される魚群の、昼間に存在する水中照度は季節によって変動があるものの多くの場合 $10^0 \sim 10^{-2}$ lux の範囲内にあった。外海と内湾とでは透明度が異なり水中照度にも大きな差があると推定されるものの、両者の間に差がみられた。

天文薄明時最も早い時期に下降を始めるのは第一層であり、次に第二層、第三層と続く。よって照度に最も敏感なのは第一層を構成するヨウジエソ、キュウリエソであろう。その時の垂直最大移動速度は第一層(平均2.5m/分)が最も早く、次に第二層(平均2.0m/分)、第三層(平均0.8m/分)であった。この急激な垂直移動を行っている時、各層にとって最も適切な水中照度であろうと推定される照度の帯域を越えて加速度的に移動を行う傾向にあった。又垂直移動速度はその日の天候に関係あるものと推察される。すなわち天候が快晴における日出時あるいは日没時頃、水中照度の変化が極めて大きく、垂直移動速度も大きな値を示し、曇もしくは雨の場合は水中照度の変化も少なく垂直移動速度も小さな値を示す傾向がみられた。その差は湾奥海域、湾中央海域とも第一層、第二層約0.5m/分であった。各季節による太陽の赤緯の変化は当然水中照度の変化にも影響を与え、垂直移動速度の季節変化があるものと推察されるが、魚群探知機の記録からは判然としなかった。しかしこの垂直移動速度の大小がその超音波散乱層を構成する生物の水平的な遊泳速度とは直接結びつかないようである。第三層構成生物と推定されるマイワシはヨウジエソ、キュウリエソ、イワハダカに比べて当然、水平の遊泳速度¹³⁷⁾が大であると推定されるにもかかわらず、垂直移動速度が最も小さい値を示した。Isaacs-Kidd 中層トロールネットで第三層の存在する水深を曳網したにもかかわらず採集生物はほとんど無く、マイワシも捕獲されなかった。Isaacs-Kidd 中層トロールネットの曳網結果に着目すればヨウジエソ、キュウリエソの採集個体数がイワハダカに比べ少なかったのは、その分布量が少ないこと、ならびにイワハダカより遊泳速度が速かったことによるトロール網口からの逃避行動も大きな一因であると推定される。ここで述べた垂直移動速度は船舶に装備される船速計の一種であるドップラー・ソナーの速力指示精度に直接影響する。垂直移動の平均値を知り得ても、下降速度と上昇速度に大きな差異があるならば、その値は無意味なものとなる。本論文における測定資料のみでは時間・季節・海域別の速力指示補正値を求めるには不十分であり、今後更に資料の蓄積を行わなければならない。

超音波散乱層各層の構成生物推定は「第5章 閉鎖ネットによる超音波散乱層の構成生物の採集」、 「第6章 Isaacs-Kidd 中層トロールネットによる超音波散乱層の構成生物の採集」、 「第7章 超音波散乱層の水中カメラによる観察」において述べた。少なくとも鹿児島湾内の垂直移動を行う超音波散乱層を構成する生物の採集には一般に使用されている垂直曳閉鎖ネット(改良丸特ネット、口径45cm)のプランクトン採集網では困難であった。これは前述したように各構成生物の遊泳速度が速く網口から逃避する効果に他ならない。ただしここで特記することは、この丸特ネットによって採集された枝角類の個体数が水深0~50m付近において夜間に多かったことである。「第3章 水温の垂直分布と超音波散乱層の垂直移動」

において水温の垂直分布と超音波散乱層の関係について考察したが、水温躍層の水深に垂直移動を行わない超音波散乱層がみられた。しかもこの超音波散乱層は夜間約100m以浅に見られ、日出とともに記録が消える場合が多かった。又その散乱強度は夜間約-43 dB、昼間-60 dBであったことから、特に夜間において水温躍層に主として枝角類、橈脚類および他のプランクトン類が密に凝集しているものと推定される。鹿児島湾に出現する動物プランクトンについては藤井・税所¹³⁸⁾、税所^{139),140)}、野沢・税所¹⁴¹⁾、に詳細に記載されている。しかしそれらは主として各種プランクトンの水平分布密度および分布密度の季節変化・年変化について述べられており、プランクトンの日周期垂直移動すなわち時間経過に伴う枝角類、橈脚類等の水深変動に関する報告はみられなかった。垂直移動を行う超音波散乱層を構成する生物の採集には、この垂直閉鎖ネットに変わり Isaacs-Kidd 中層トロールネットの曳網によって始めて構成生物と推定される生物を採集することができた。この結果第一層は魚類のヨウジエソ、キュウリエソ、第二層は魚類のイワハダカ、第三層は遊泳速度の速い魚類であろうと推定する。魚群探知機による第三層の記録は表層にある魚類の記録パターンであった。又各層の記録の中で最も顕著なものは第二層であった。Isaacs-Kidd 中層トロールネット曳網結果および水中写真撮影の結果も合わせて考察し、第二層はイワハダカ単一種の層であるとの結論を得た。各層の構成生物推定にあたり最も識別困難であったのは甲殻類のアミ、オキアミであった。ロホガスター（アミ）の全採集個体数は8,624個体、オキアミは912個体であり散乱強度に及ぼす影響はロホガスターの方が大きいと推定される。ロホガスター採集個体数は、湾奥海域においては第一層曳網時が最も多く、湾中央海域においては第一層、第二層、又春においては第三層で最も多く採集された。Isaacs-Kidd 中層トロールネットがオープンネットである問題点も考慮して湾中央海域においても第一層を構成するものと推定する。しかし第一層、第二層を構成する魚類が上昇する以前にロホガスター、オキアミなど甲殻類が上昇する場合もあるものと推察する。

鹿児島湾の魚類相¹³⁴⁾は約400種に達する。今井¹⁴²⁾が1973年夏～秋の古江魚協のエビ網漁場における漁獲物のうち、魚類を選別してその同定を行った結果を見ると、底魚の魚類としてキュウリエソ、イワハダカは掲載されているがヨウジエソはない。又ロホガスターに関しては税所¹⁴³⁾によれば、1972年から1973年にかけて鹿児島湾深海部（水深100～230m）の底生動物について、主としてトントコ網（小型底引網）漁獲物の調査を実施し、湾奥海域において深海性のアミの一種 *Lophogaster japonicus* が採集されたが、これは国内では例が少なく相模湾、駿河湾とならんで鹿児島湾の深海動物相の一端を示すものとして興味深いと報告している。又村野¹⁴⁴⁾は *Lophogaster japonicus* は日本周辺、少なくとも黒潮および対馬暖流域に比較的広く分布し、棲息量は北九州における打ち上げの例から見ても決して少ないものとは考えられずかなり海底に接近して生活していることが想像されると述べている。しかしロホガスターが夜間水面付近まで垂直移動を行う旨の記述は見られなかった。筆者が採集したアミ類は同定の結果 *Lophogaster japonicus* であり鹿児島湾が黒潮流域にあることから肯定できた。鹿児島湾において採集個体数が多いのは分布量も多いと推定され、一つの特徴であるかも知れぬ。又1985年1月24日湾中央海域における曳網により、白色をした育児のうに体長1mm弱の多数の幼体をかかえたロホガスターを1,000個体をこえて捕獲した。この報告は過去に見られず、ロホガスターの生活史など生物学的見地から今後調査されることを希望する。

鹿児島湾における各構成生物分布量推定のための測定理論を「第8章 超音波散乱層を構成する生物の測定理論」で述べた。群体標的すなわち超音波散乱層からの散乱波の強さの基本的な考え方は、水中における音速を C 、発射パルス幅を τ とすれば $C \cdot \tau / 2$ の厚みの中に存在する n 個のそれぞれ反射の強さが異なる標的からの反射強度の合計であるとするものである。しかしこれには送受波器と各標的までの距離 r がそれぞれ異なった値を取るため、各標的の送受波器に至る伝搬経路に長短が生じ、搬送波の位相差に基づく干渉効果を考慮しなければならない。又 n 個の標的が密に存在する時は、送受波器からの音波エネルギーをまず標的 i によって反射し、それが別の標的 j に達し、そこから送受波器に向けて音波エネルギーが再放射されるという二次反射まで考慮する必要がでてくる。しかし結果的に一次反射の干渉成分については、多数回の送信に対し、時間軸をそろえて集合平均することにより、位相差の平均値は0となり干渉成分は無視できるとした。又二次反射の影響については、鹿児島湾の垂直移動を行う超音波散乱層に関して、その分布密度から二次反射の影響も無視できるとした。

各超音波散乱層の散乱強度はマージン・テスト実施により測定され、その結果は「2. 5 散乱強度」で述べたところである。それによれば散乱強度の平均値は第二層、第三層、第一層の順に大きく、第二層と第一層の差は湾奥海域で3.7 dB、湾中央海域で5.1 dB に達した。第一層の散乱強度の季節変化は湾奥海域では秋、春、夏、冬、湾中央海域では冬、夏、秋、春の順に大きく、両海域における散乱強度の関係を見出すことはできなかった。特に湾中央海域において春と冬の差が12.4 dB にも及び相当大きな変動がみられた。第二層の散乱強度季節変化は湾奥海域では夏、秋、春、冬、湾中央海域では夏、秋、冬、春の順に大きく、冬春の順が逆になっているが両海域における散乱強度は互いに関係があると推定される。第三層については「2. 3 湾奥・湾中央海域における記録」で述べたように二つの種類、すなわち明らかに魚類であると推定される記録パターンと、魚類であるかどうか推定困難な記録パターンに分類することができた。湾奥、湾中央海域とも前者の記録パターンがほとんどであり、活発な動きがみられたため第三層の散乱強度測定値は他の二層に比較して変動が大きかった。

超音波散乱層を構成する生物の単体標的強度は周波数50 kHz でイワハダカ、ヨウジエソ、キュウリエソ、ロホガスターの4種について水槽内で測定し、その結果を「9. 1 超音波散乱層を構成する生物の単体標的強度測定」で述べた。Pitch Plane のパターンはイワハダカとキュウリエソが3つの極大値、2つの極小値を持つことで似通ったものとなったが、ヨウジエソは5つの極大値、4つの極小値を持ち前二者とは異なったパターンを示した。これはヨウジエソの体長、形状が他の二種とは異なること、および内臓の占める割合が他の二種よりも大きく、内部構造の違いによるものと推定する。甲殻類のロホガスターは魚類とは全く異なったパターンを示した。これは明らかに甲殻類と魚類の体形の違いによるものと推定される。Roll Plane のパターンは魚類、甲殻類とも似通ったものとなった。標的強度の値は Pitch Plane では背部が最大、頭部あるいは尾部が最小、Roll Plane では側部が最大、背部が最小となった。これは超音波の標的への幾何学的入射面積の大小と大いに関係があるものと推定される。このように単体標的の長さ、形状および内部構造の違い、ならびに送受波器の音軸に対する標的の体軸の変化によって標的強度が大きく変化することが確認された。

その最大値と最小値の差はイワハダカ7.8 dB, キュウリエソ9.8 dB, ヨウジエソ10.7 dB, ロホガスター 9 dB であった。本研究では背部を中心として前後左右, 等価指向角に相当する範囲にある標的強度の平均値をもってその単体標的を代表する標的強度の値と定めた。超音波散乱層を構成する生物が朝方あるいは夕方時に垂直移動を行っている時, 昼間一定水深に位置する時の遊泳姿勢を知ることができなかつたため, 指向角のみ考慮した。ただイワハダカについては水中撮影により夕方上昇時の遊泳姿勢を知ることができたので参考としてその値を括弧内に付加した。そして各単体の標的強度はイワハダカ-48.4 dB (-49.5 dB), ヨウジエソ-49.3 dB, キュウリエソ-50.0 dB, ロホガスター-52.9 dB と定めた。単体標的の標的強度を知るための実験式は橋本・間庭¹²⁾, Love¹⁰⁹⁾ によって求められている。前者の実験式によれば, それぞれの標的強度はイワハダカ-67.36 dB, ヨウジエソ-66.72 dB, キュウリエソ-68.91 dB となった。又後者の実験式によればイワハダカ-53.06 dB, ヨウジエソ-50.97 dB, キュウリエソ-53.06 dB となった。橋本・間庭の実験式より求めた標的強度の値は測定値と17~19 dB もの差がみられた。一方 Love の実験式より求めた標的強度の値は橋本・間庭によるものより近似したが, まだ両者の値には1.7 dB~4.7 dB の開きがあった。しかし橋本・間庭の実験式は魚種による補正值 K の値により標的強度の値は大きく変化する。前記した標的強度は K=1 として求めた値である。補正值 K の値は測定値と一致するよう測定結果から逆算されるものであるから, 便宜的に K=1 として実験式から求めた値には大きな誤差が含まれる可能性があるものと推定される。又 Love の実験式は $0.7 \leq L/\lambda \leq 90$ (L……魚体長, λ ……波長) の制約条件がある。超音波散乱層を構成する生物の体長は小さいので, L/λ の値は1に近く, この条件の境界に近い。このような理由により, 両実験式から求めた標的強度の値は測定値と一致しなかつたものと推定する。よって本研究で求めた超音波散乱層を構成する生物の単体標的強度の値の誤差は小さいものと推定する。このようにして各超音波散乱層の散乱強度とその構成生物の単体標的強度を知って「9.2 超音波散乱層を構成する生物分布量の推定」において各構成生物イワハダカ, ヨウジエソ, キュウリエソ, ロホガスターの分布量を試算した。まず第一段階として超音波散乱層各層の平均密度を求めた。この平均密度の推定値は散乱強度および単体標的強度の測定値が大きく影響する。第二段階として超音波散乱層を Isaacs-Kidd 中層トロールネットにより曳網し, 採集された各個体数の比で各層の平均密度を按分し各構成生物ごとの平均密度を求めた。この値には Isaacs-Kidd 中層トロールネットの性能, および曳網時目的とする超音波散乱層を確実に曳網したかが大いに影響する。第一段階における精度については「1-5 散乱強度」, 「9.1 超音波散乱層を構成する生物の単体標的強度測定」で考察し, 第二段階における問題点は「5-1 採集方法」で指摘した。以上のことを考慮して, 分布量試算結果は全ての数値において1桁以内の誤差であると推定する。

超音波散乱層を構成する生物であるイワハダカの平均密度に関して散乱強度および単体標的強度の関係から求めた推定値と, Isaacs-Kidd 中層トロールネット第二層曳網による採集結果から求めた推定値の比較検討を行った。第二層はイワハダカのみで構成されているため両者の比較検討には最適であると考えた。その結果, 前者による平均密度は28.184個体/m³で一辺約33cm立方に1匹存在することになり, 後者による平均密度は0.2347個体/m³で一辺約162cm立方に1匹存在することになる。これは本研究で使用した魚群探知機の $C \cdot \tau / 2$ の

厚みの体積中に存在する個体数に換算すると次のようになる。すなわち Fig. 8-4の球殻部分 ABCD の体積 V は水深50mでは(8-45)式より 94m^3 となり、この体積中に存在するイワハダカの個体数は、散乱強度と単体標的強度から求めた推定値を用いると2,650匹、Isaacs-Kidd 中層トロールネット採集結果から求めた推定値を用いると22匹となる。後者はその数値が極めて小さく、魚群を形成しているとは考えにくく、現実の分布とは異なるものと推定される。Isaacs-Kidd 中層トロールネット曳網中は絶えずネット・レコーダにより網水深を監視し、適宜ワイヤーロープの伸縮を行いながら超音波散乱層の中心水深にトロールネットがくるように注意を払った。又曳網時間算定についてはネット・レコーダと魚群探知機の記録を照合し、網水深が散乱層から外れた時間は曳網時間から除外した。にもかかわらず平均密度に二桁もの誤差が出た主たる原因は「9. 3 超音波散乱層を構成する生物分布量推定値の検討」で考察したようにイワハダカの網口からの逃避と推定せざるを得ない。よってここでイワハダカの遊泳速度を推定する。第二層の垂直最大移動速度の平均値が $2.0\text{m}/\text{分}$ であった。又夕方上昇時における水中写真撮影の結果から、体軸の上昇角度は $23^\circ\sim 27^\circ$ であった。垂直移動を行っている間は遊泳速度および体軸の上昇角度が略一定であると仮定すれば、1分間に2mの距離上昇するためには、上昇角度が 23° の場合遊泳速度は $9.4\text{cm}/\text{秒}$ となり、 27° の場合遊泳速度は $8.1\text{cm}/\text{秒}$ となる。これは長時間泳ぎ続けることができる遊泳速度であり、井上¹³⁷⁾によれば最大遊泳速度(突進速度)はこの値の3~4倍程度となる。イワハダカの遊泳速度を $9.4\text{cm}/\text{秒}$ と $8.1\text{cm}/\text{秒}$ の平均値、 $8.8\text{cm}/\text{秒}$ とすれば最大遊泳速度はおおよそ $35.2\text{cm}/\text{秒}$ となる。魚の最大遊泳速度の概算式 $10\times B.L.\text{cm}/\text{秒}$ によればおおよそ体長の10倍が最大遊泳速度であり、捕獲されたイワハダカの平均体長は 35mm であったことから最大遊泳速度はおおよそ $35\text{cm}/\text{秒}$ となる。このように魚群探知機の記録および水中写真撮影を基本として求めた値と、概算式から求めた値が略一致した。よってイワハダカの最大遊泳速度(突進速度)はおおよそ $35\text{cm}/\text{秒}$ であると推定される。一方曳網速度は 2.5ノット であったため約 $129\text{cm}/\text{秒}$ となる。よって遊泳方向と曳網方向とが一致すれば捕獲可能である。しかしイワハダカは「5. 3 超音波散乱層の逃避行動」で述べたように障害物等からの逃避行動は水平方向あるいは下方への移動であった。今イワハダカが網口の中心点上にいるとするなら、網口に入らないためには水平方向に 150cm あるいは垂直方向に 80cm 避行しなければならない。そのために要する時間は 4.3秒 および 2.3秒 である。この時間にネットはそれぞれ 555cm 、 297cm 前進するのでイワハダカはその距離より離れた位置で逃避行動を起こせば網口に入ることはない。もし網口から 4.5m 前方に取りつけたシャックル、リング、撚り戻しあるいはワイヤー等が逃避行動の引き金になり、あるいは網口に一端入ったイワハダカが網目(目合 75mm)から抜け出たとするならば、又 Fig. 6-1に示した1mリングに取りつけた濾水計の示数が不安定であったことからオーバーフローの問題も考えられ、Isaacs-Kidd 中層トロールネットそのものの改良をしなくてはならない。

鹿児島湾内における漁獲対象魚、非漁獲対象魚を含めて魚種別の分布量試算の報告はない。ただ鹿児島県水産試験場事業報告書^{145), 146), 147)}の中に 50kHz 垂直魚群探知機による航走中の記録により、魚群量=魚群の幅(湮) \times 魚群の高さ(m)として便宜的に全魚種総括しての魚群量を試算している。これは他の海域との相対的な魚群量の比較検討を行う一つの方法ではあるが、現存量(tons/m^3)を求めることができないという欠点は否めない。よって筆者が推

定した超音波散乱層を構成する生物分布量推定値と、他の魚種の分布量との比較検討の方法がないので「8-2 超音波散乱層を構成する生物分布量の推定」に示された分布量は一桁以内の誤差に収まっているものと推定せざるを得ない。

鹿児島湾全域における総漁獲量は前記したように約3,450トンであり、又超音波散乱層を構成する主たる生物であるイワハダカ、ヨウジエソ、キュウリエソ、ロホガスターの総量を約14万トンと推定した。このように総漁獲量に比し超音波散乱層を構成する生物の量は多く、鹿児島湾の生産性にとって重要な役割を演じているものと推察する。これは Fig. 2-5, Fig. 2-7の(A)に示したように魚群が超音波散乱層を追跡しながら垂直移動を行っていること、又、Fig. 5-3に示したように遊泳速度の速い大型魚類で形成されていると推定される魚群から超音波散乱層が逃避行動をとった記録もみられることから、超音波散乱層はそれらの餌料生物の集群層となっていることが推察される。よって超音波散乱層を構成する生物は食物連鎖の一環として今後の鹿児島湾の生産性に大きく寄与するものと推定する。

資源量の推定は今後ますます重要な課題となっていくであろうから、さらに多くの調査・研究を積み重ねなければならない。そのためには、今後の研究課題として、超音波散乱層を構成する多くの種類の生物の精密な標的強度の測定および同生物の個体数が既知である時の自然遊泳中の散乱強度の測定に取り組む必要がある。又超音波散乱層による透過損失を定量的に把握する必要がある。これは超音波散乱層の下にある魚群からのエコーは、その魚群密度と比例しない可能性があるからである。これらを解明することによって資源量の推定もより精度の高いものが期待できる。又この透過損失の定量的把握は吸収損失と密接に関連し、音響測深機の測深能力に、又ドップラー・ソナー、トランス・ポンダーおよび船位保持装置における音響信号のS/N比に直接影響するところである。今後さらに測定海域を広め、水中音響の基礎資料を蓄積し、漁業および生物調査、そして水中音響航法分野に役立てることができれば幸いである。

第11章 結 論

超音波散乱層は漁業、漁場調査、生物調査、水中音響航法などに使用される水中音響機器の開発・設計・使用に重要な影響を与える。筆者はこれら各分野の物理的、生物的な水中音響に関する研究の一端として鹿児島湾における超音波散乱層の実態を明らかにすることを目的としてこの研究を実施した。鹿児島大学水産学部実習船南星丸に50 kHz 魚群探知機を装備し記録を得るとともに水温測定、照度測定を実施した。又超音波散乱層を構成する生物を確認するためプランクトン・ネット、Isaacs-Kidd 中層トロールネットの曳網および水中写真撮影を実施し多角的に超音波散乱層実態の把握を試みた。そして次のような結果を得た。

1) 鹿児島湾における日周期垂直移動を行う超音波散乱層の存在を確認することができた。それは鹿児島湾全域（ただし湾口海域は除く）に一年を通じて三層記録された。しかし秋季には二層のみの記録がみられた。特に湾奥海域においては秋季から冬季にかけて二層記録される場合が多かった。

その他海洋中に起こる短周期内部波そのものの記録と推定される超音波散乱層の内部波型波動記録が、湾中央海域と湾口海域の境界付近で記録された。又湾奥海域だけにみられるタ

ギリ現象の記録も得ることができた。

2) 日周期垂直移動を行う超音波散乱層は、日出時、表層から早い時期に下降を開始する順に第一層、第二層、第三層とした。各超音波散乱層の垂直移動は物理的要因、生物的要因により非常に複雑な様相を呈した。又湾奥海域、湾中央海域、各季節において異なる点が多々見られたがその大略パターンは似通っており次に示すとおりであった。

	第一層	第二層	第三層
夜間下辺水深	50~60m	20~30m	20~30m
下降開始時	日出前 30~40分	日出前 10~20分	日出時~ 日出後15分
層の厚さ	30~50m	10~30m	10~20m
昼間の水深	最も深い (海底付近)	第一層と 第三層の間	最も浅い
上昇開始時	日没前 変化大	日没前 変化大	日没前 変化大
上昇終了時	日没後 30~40分	日没後 15~40分	日没後 10~20分

3) 各超音波散乱層の昼間における水深は第一層が最も深く位置し、海底に密着するような記録もしばしばみられた。第二層は第一層と第三層の間に、第三層は最も浅い水深に位置した。夜間における水深は各層の底辺のみ判読できた。それによれば第一層は50~60m、第二層、第三層は20~30mであった。各層の位置する水深は昼間にあっては太陽光、夜間にあっては月光に大きく影響された。

4) 各超音波散乱層の垂直移動の原因および各層の位置する水深は、水中照度と密接な関係がみられた。すなわち水中照度が各層の最適水中照度より大きくなれば下降し、小さくなれば上昇する。各層の最適水中照度は次に示すとおりであった。

第一層	10^{-7} lux~ 10^{-9} lux
第二層	10^{-4} lux~ 10^{-7} lux
第三層	10^0 lux~ 10^{-2} lux

5) 水温垂直分布に関しては、超音波散乱層の垂直移動の原因と直接結びつかなかったが、水温躍層の存在する水深と垂直移動を行わない超音波散乱層の水深とが略一致した。又その記録の濃さは昼間より夜間に濃いことより、枝角類、橈脚類等動物プランクトンが夜間、水温躍層付近に凝集するものと推定される。

6) 各超音波散乱層の一年を通じての垂直最大移動速度は次に示すとおりであった。

第一層	4.0 m/分
第二層	3.0 m/分
第三層	2.0 m/分

又各層の垂直最大移動速度の平均値は次に示すとおりであった。

第一層	2.5 m/分
第二層	2.0 m/分
第三層	0.8 m/分

垂直最大移動速度は同季節においても年により大きく変化した。又垂直移動速度と水中照度の変化との関係がみられた。すなわち快晴の場合、日出没時頃の水中照度の変化量は大きく垂直移動速度も大きな値を示し、曇もしくは雨の場合、水中照度の変化も小さく垂直移動速度も小さな値を示す傾向にあった。その差は第一層、第二層とも約0.5m/分であった。

7) 各超音波散乱層の一年を通じての鹿児島湾における散乱強度の平均値は次に示すとおりであった。

第一層	-39.1 dB
第二層	-34.7 dB
第三層	-36.0 dB (-43.7 dB)

第三層についてはその構成生物が魚類であると推定される記録パターンの場合には-36.0 dB、魚類であるかどうか推定困難な記録パターンの場合には-43.7 dB と、その差は7.7 dB に達した。

8) 垂直移動を行う各超音波散乱層を構成する生物採集は、プランクトン採集網である垂直曳閉鎖ネット（改良丸特ネット、口径45cm）では、散乱層構成生物の遊泳速度が速いため、その逃避行動により困難であることが判明した。

9) Isaacs-Kidd 中層トロールネットによる超音波散乱層を構成する生物の採集および各超音波散乱層の水中写真撮影などの結果より各層を構成する生物は次のように推定される。

第一層	ヨウジエソ、キュウリエソ、ロホガスター
第二層	イワハダカ
第三層	マイワシ

しかし第一層に関しては、主としてロホガスターなど甲殻類のみの層を構成し垂直移動を行い、その層の厚さも数10mに及び第二層とも合併する場合も起こり得、又昼間一定水深にある時、ヨウジエソ群とキュウリエソ群の二つの層に分離することも超音波散乱層の記録より推察される。

10) 各超音波散乱層を構成する生物の単体標的強度の測定を実施し、各平均値を次のように得た。

イワハダカ	-48.4 dB
ヨウジエソ	-49.3 dB
キュウリエソ	-50.0 dB
ロホガスター	-52.9 dB

これら単体標的強度の決定には、水槽等における測定値および実験式による値等を参考としても、標的の遊泳姿勢など送受波器に対する体軸の方向が不明のため種々問題点が残る。又各単体の標的強度パターンは魚類と甲殻類では Roll Plane においては酷似したが Pitch Plane において極めて異なった結果を得た。又魚類のイワハダカ、キュウリエソは Pitch Plane において、3つの極大値をもつ似通ったパターンを示した。しかしヨウジエソは5つの極大値をもち前二者とは異なったパターンを示した。これは形状および内部構造の違いによるものと推定される。

11) 水中写真撮影結果より第二層を構成するイワハダカの垂直移動上昇時の体軸の上昇角度は23°~27°にあるものと推定される。これは単体標的強度の推定に際して一つの要因と

なる。

12) 垂直移動を行う超音波散乱層の生物分布量推定のための散乱強度測定値には各標的からの一次反射のみ影響し、二次反射、三次反射など標的間の多重反射の影響は無視できるものと推定される。

13) 超音波散乱層第二層の Isaacs-Kidd 中層トロールネット曳網結果と散乱強度測定結果より求めた平均密度はそれぞれ、 0.2347 個体/ m^3 、 28.184 個体/ m^3 と二桁異なった結果を得た。これはイワハダカの遊泳速度と Isaacs-Kidd 中層トロールネットの構成および曳網速度等の影響によるものと推察される。

14) イワハダカの遊泳速度は、第二層の垂直最大移動速度と水中写真撮影から得た体軸の上昇角度から 8.8 cm/秒と計算され、このことから最大遊泳速度(突進速度)はおおよそ 35 cm/秒と推定される。

15) 群体標的の測定理論式 $10\log n = SV - 10\log(Tse + n \cdot Tsm)$ および Isaacs-Kidd 中層トロールネット曳網による捕獲結果から各構成生物の平均密度を求めた。そしてこの値から鹿児島湾における超音波散乱層を構成する生物の分布量を次ように試算した。単位はトンである。

	湾奥海域	湾中央海域
イワハダカ	4.3491×10^4	7.1109×10^4
ヨウジエソ	3.1646×10^3	3.1987×10^3
キュウリエソ	4.2812×10^3	3.0082×10^3
ロホガスター	5.2447×10^3	7.5015×10^3

よって鹿児島湾全域(ただし湾口部海域は除く)における超音波散乱層(第一層, 第二層)を構成する生物分布量は大略イワハダカ 11.5 万トン, ヨウジエソ 0.6 万トン, キュウリエソ 0.5 万トン, ロホガスター 1.3 万トンと推定される。

16) 鹿児島湾全域における総漁獲量は約 $3,450$ トンであり, 又超音波散乱層(第一層, 第二層)を構成する主たる生物の総量を約 14 万トンと推定した。総漁獲量に比し超音波散乱層を構成する生物の量も多く, 鹿児島湾における生物の食物連鎖の一環として今後とも重要な役割を演じるものと推定される。

謝 辞

本論文をとりまとめるにあたり, 懇篤な御指導と御助言を賜った北海道大学水産学部教授 鈴木恒由博士, 同学教授 箕田高博士, 同学教授 佐野典達博士に深甚なる敬意と感謝の意を表す。そして終始激励と御便宜を賜った鹿児島大学名誉教授 源河朝之博士に謹んで感謝の意を表す。

さらに海上観測ならびに水槽実験の遂行に多大の協力と援助をいただいた鹿児島大学水産学部実習船南星丸船長 柿本亮氏 外乗組員御一同, 西桜島漁業協同組合組合長理事 有馬精雄氏, 鹿児島県栽培漁業センター場長 山口昭宣氏, そして資料整理に際し有益な御助言をいただいた鹿児島大学水産学部教授 税所俊郎博士, 同学助教授 菊川浩行博士, 鹿児島県水産試験場 前場長 福元覺氏, DBT を提供下された鹿児島大学工学部海洋土木開発工

学科海洋工学基礎講座、観測・実験・資料整理に大いに協力いただいた鹿児島大学水産学部助手 山中有一氏、および漁船航海学講座で卒業論文を作成された田中康博氏、坂口晃氏を始めとする多くの卒業生諸氏、また観測用機器の改良・製作に尽力いただいた同学機械工場技官 高岡勝義氏の皆様に厚く御礼申し上げます。

なおこの研究の一部は鹿児島大学援助会教育研究助成金によってなされたもので、記して謝意を表する。

文 献

- 1) 渡辺加藤一 (1979)：“海難史話”，pp.115-124 (海文堂，東京)
- 2) 間庭愛信 (1981)：特集：水産音響技術とその展望① 魚群探知機の変遷. OCEAN AGE, **13** (1), 13-17
- 3) 伊藤豊 (1970)：最近のソーナー. 日本音響学会誌, **26** (6), 272-278
- 4) 宇田道隆 (1952)：海中超音波による水産生物研究の進歩. 科学, **22** (2), 22-27
- 5) OSCAR SUND (1935)：Echo Sounding in Fishery Reserch. Nature, **35**, 953
- 6) 久山多美男 (1967)：水中音響の研究とその応用. 日本音響学会誌, **23** (6), 401-406
- 7) CARL F. EYRING, RALPH J. CHRISTENSEN and RUSSELL W. RAITT (1948)：Reverberation in the Sea. Journal of the Acoustical Society of America, **20**(4), 462-475
- 8) MARTIN W. JOHNSON (1948)：Sound as a tool in marine ecology from data on biological noises and the deep scattering layer. Journal of Marine Reserch, **7**(3), 443-458
- 9) ROBERT S. DIETZ (1948)：Deep scattering layer in the pacific and antarctic oceans. Journal of Marine Research, **7**(3), 430-442
- 10) 坂本市太郎・天野良平・岡田弥一郎・富永義昭 (1966)：日本南海の DSL 生物資源に関する研究—I. 1965年7月淡青丸による駿河湾調査, 東海大学海洋学部紀要, **2**, 179-196
- 11) 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, 日本水産学会誌, **33** (4), 325-337
- 12) R. P. CHAPMAN, O. Z. BLUY and R. H. ADLINGTON (1970)：Geographic variations in the acoustic characteristics of deep scattering layers. Proceedings of an international symposium on biological sound scattering in the ocean March 31-April 2, 316-327
- 13) R. P. CHAPMAN, O. Z. BLUY, R. H. ADLINGTON and A. E. ROBISON (1974)：Deep scattering layer spectra in the Atlantic and Pacific Oceans and adjacent seas. Journal of the Acoustical Society of America, **56**(6), 1722-1734
- 14) WILLIAM G. PEARCY and RODERICK S. MESECAR (1970)：Scattering layers and vertical distribution of oceanic animals off oregon. Proceedings of an international symposium on biological sound scattering in the ocean March 31-April 2, 381-394
- 15) RICHARD K. JOHNSON (1976)：Deep scattering layer spectra in the eastern North Pacific. Journal of the Acoustical Society of America, **59**(2), 465-466
- 16) 松野保久 (1980)：ハワイ諸島南方海域における DSL について. 鹿児島大学水産学部紀要, **29**, 123-128
- 17) 西村実 (1958)：東支那海に於ける底魚用魚群探知機の実験. 漁船研究技報, **12**, 115-135
- 18) 橋本富寿・西村実 (1958)：東支那海に於ける魚群及 D. S. L. の探知について. 日本航海学会誌 **19**, 31-37
- 19) 俵悟・藤石昭生・広瀬誠 (1969)：魚群探知機による東支那海の超音波散乱層の記録について, 水産大学校研究業績 **18** (1), 12-17
- 20) 松野保久・西徹・有馬純宏・益満侃 (1975)：魚群探知機による東シナ海における超音波散乱層の

- 反射損失について—I. 鹿児島大学水産学部紀要, **24**, 73-77
- 21) 松野保久 (1975) : 魚群探知機による東シナ海における超音波散乱層の内部波型波動記録について—I. 鹿児島大学水産学部紀要, **24**, 79-85
 - 22) 松野保久・湯脇泰隆・菊川浩行 (1978) : 魚群探知機による東シナ海における超音波散乱層の内部波型波動記録について—II. 鹿児島大学水産学部紀要, **27** (1), 167-171
 - 23) 前田辰昭・上野元一・斎藤市郎 (1957) : D. S. L. の研究, カムチャッカ西海岸沖合に於ける D. S. L. に就て. 北海道大学水産学部研究彙報, **7** (4), 284-290
 - 24) 前田辰昭・上野元一・今野昇 (1966) : D. S. L. の研究—II オコツク海の D. S. L. について. 北海道大学水産学部研究彙報, **16** (4), 241-250
 - 25) 箕田嵩・大沢圭介 (1967) : 夏季オホーツク海に生ずる音波散乱層のプランクトン. 北海道大学水産学部研究彙報, **18** (1), 9-19
 - 26) PAUL T. McELROY and ASA WING (1970) : Scattering returns in the Mediterranean and eastern atlantic-data and instrumentation. Proceedings of an international symposium on biological sound scattering in the ocean March 31 - April 2, 223-235
 - 27) H. P. COLE, G. M. BRYAN and A. L. GORDON (1970) : The deep scattering layer : Patterns across the gulf stream and the sargassosea. Proceedings of an international symposium on biological sound scattering in the ocean March 31-April 2, 291-303
 - 28) BRIAN P. BODEN (1970) : Bioluminescence in sonic-scattering layers. Proceedings of an international symposium on biological sound scattering in the ocean March 31-April 2, 61-69
 - 29) BERNARD J. ZAHURANEC and W. LAWRENCE PUGH (1970) : Biological results from scattering layer investigations in the norwegian sea. Proceedings of an international symposium on biological sound scattering in the ocean March 31 - April 2, 360-378
 - 30) P. M. HARGREAVES (1976) : Echo-traces from the North-eastern Atlantic. J. Cons. int. Explor. - Mer, **37**(1), 46-59
 - 31) H. F. P. HERDMAN (1953) : The deep scattering layer in the sea : Association with density layering. NATURE, **172**, 275-276
 - 32) HENRY R. JOHNSON, RICHARD H. BACKUS, J. B. HERSEY and DAVID M. OWEN (1956) : Suspended echo-sounder and camera studies of midwater sound scatterers. Deep-Sea Reserch, **3**, 266-272
 - 33) JACQUES-YVES COUSTEAU (1954) : To the Depths of the Sea by Bathyscaphe. The National Geographic Magazine, **106**, 67-79
 - 34) J. B. HERSEY, H. R. JOHNSON and L. C. DAVIS (1952) : Recent findings about the deep scattering layer. Journal of Marine Research, **11**(1), 1-11
 - 35) 橋本富寿 (1973) : 海洋に於ける超音波利用の沿革. 日本音響学会誌, **29** (12), 730-733
 - 36) 柴田恵司 (1964) : 魚群探知機に現れた記録解析の試み—IV. D. S. L. とマグロ類の食物環境について(1). 長崎大学水産学部報告, **15**, 59-84
 - 37) 水産庁 (1965) : マグロ延縄漁業合理化のための魚群探知機の活用法 (漁場の生態と記録の見方). 水産庁, かつお・まぐろ漁船労働の省力化研究会編
 - 38) 橋本富寿・間庭愛信 (1956) : 北洋鮭鱒漁場における魚群探知実験漁船研究技報. **8**, 131-150
 - 39) 鈴木恒由 (1967) : DSL と漁場生物, 北洋における DSL 生物とサケ・マスとの関係について. 水産海洋研究会報, **11**, 65-72
 - 40) 花村慎一・熊野正雄・穴戸正昭 (1980) : 水中音響機器の最近の動向. 日本音響学会誌, **36** (11), 581-585
 - 41) R. J. URICK (1978) : “水中音響の原理”, (土屋明訳西村実監修), pp 112-114, (共立出版, 東京)
 - 42) GILBERT J. WESTERVELT (1976) : Pulse Doppler Sonar Navigation System Concepts and Implementation. IEEE PLANS, 53-57

- 43) ROBERT C. SPINDEL, ROBERT P. PORTER, WILLIAM M. MARQUET and JAMES L. DURHAM (1976) : A High-Resolution Pulse-Doppler Underwater Acoustic Navigation System. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, OE-1 (1), 6-13
- 44) J. A. CESTONE, R. J. CYR, G. ROESLER and E. ST. GEORGE, JR. (1977) : Latest Highlights in Acoustic Underwater Navigation. *Journal of the Institute of Navigation*, 24(1), 7-39
- 45) D. BLACKWELL (1977) : Approach to an electro-acoustic system. *Electronic Circuits and Systems*, 1(2), 73-76
- 46) M. H. DAMON (1971) : Ships acoustic navigation system (SANS). *IEEE Eng. in the Ocean environment conf.*, 155-158
- 47) 西村実 (1969) : 海洋研究に於ける超音波の応用について. 水産海洋研究会報, 特別号, 315-317
- 48) 谷義隆 (1970) : わが国超音波業界の現状と将来. *日本音響学会誌*, 26 (11), 547-552
- 49) 実吉純一 (1970) : 海洋開発における音響技術. *日本音響学会誌*, 26 (9), 418-428
- 50) 間庭愛信 (1981) : 漁業における超音波の応用. *日本音響学会誌*, 37 (10), 518-521
- 51) 鹿児島県水産試験場 (1985) : 赤潮調査資料
- 52) 実吉純一・菊池喜充・能本乙彦 (1971) : “超音波技術便覧”, p 48, (日刊工業新聞社, 東京)
- 53) 橋本富寿・間庭愛信・能本和男 (1953) : 魚群探知機に関する研究 (V. 魚体の反射損失). *漁船研究技報*, 4, 143-153
- 54) 実吉純一・菊池喜充・能本乙彦 (1971) : “超音波技術便覧”, pp 624-629, (日刊工業新聞社, 東京)
- 55) 実吉純一・菊池喜充・能本乙彦 (1971) : “超音波技術便覧”, pp 616-618, (日刊工業新聞社, 東京)
- 56) HILARY B. MOORE (1950) : The relation between the scattering layer and the euphausiacea. *Biol. Bull.* 99(2), 181-212
- 57) ELIZABETH M. KAMPA and BRIAN P. BODEN (1954) : Submarine illumination and the twilight movements of a sonic scattering layer. *NATURE*, 174, 869-871
- 58) GEORGE L. CLARKE and Woods Hole Oceanographic Institution (1970) : Light conditions in the sea in relation to the diurnal vertical migrations of animals. *Proceeding of an international symposium on biological sound scattering in the ocean March 31 - April 2*, 41-50
- 59) 気象庁 (1970) : “海洋観測指針”, pp. 85-89, (日本気象協会, 東京)
- 60) GORDON H. TUCKER (1951) : Relation of fishes and other organisms to the scattering of underwater sound. *Journal of Marine Research*, 10(2), 215-238
- 61) ROBERT S. DIETZ (1962) : The sea's deep scattering layers. *Scientific American*, August
- 62) ABRAHAM FLEMINGER and ROBERT I. CLUTTER (1965) : Avoidance of towed nets by zooplankton. *Limnol. and Oceanogr.* 10(1), 96-104
- 63) 大内淳義・鶴ヶ谷武雄 (1964) : 光学系測器の開発とその問題点, 水中 TV カメラ及びその応用について. 水産海洋研究会報, 4, 67-74
- 64) 原雅光・杉崎正 (1967) : 水中テレビジョン. 水産海洋研究会報, 11, 131-134
- 65) 橋本富寿・西村実・間庭愛信 (1964) : 超音波距離計を併用せる水中テレビジョンの実験 (漁研型水中テレビジョン). *漁船研究技報*, 18 (9), 1-14
- 66) 西村実 (1966) : 水中テレビの実用化に関する研究 (第2報) (ヒトデ発生地, 定置漁場ならびにタラバガニ漁場におけ実験). *漁船研究技報*, 20 (4), 1-18
- 67) 石田正巳・佐野典達・三島清吉・斎藤昭二 (1969) : 水中テレビ技術を利用したサケ・マス流刺網漁法の脱落率の計測. *日本水産学会誌*, 35 (12), 1157-1166
- 68) 西村実 (1967) : 超音波および水中テレビによる海底と漁場生物調査. 水産海洋研究会報, 11, 85-88
- 69) 柴田恵司 (1965) : 魚群探知機に現れた記録の解析—VI, 生物調査への応用について. 長崎大学水産学部研究報告, 19, 37-46

- 70) 柴田恵司 (1967) : 長崎丸の魚群探知機による漁場調査. 水産海洋研究会報, **11**, 79-84
- 71) 柴田恵司 (1969) : 魚探による資源量推定. 水産海洋研究会報, 特別号, 319-322
- 72) 佐野典達 (1968) : サケ・マス魚探技術の若干の問題点についてⅡ, サケ・マス用横方向魚探の試用. 日本水産学会誌, **34** (8), 670-680
- 73) 佐野典達 (1971) : サケ・マス魚探技術の若干の問題点についてⅢ, サケ・マス用横方向魚探の実用化試験. 日本水産学会誌, **37** (1), 1-7
- 74) 佐野典達・安間元 (1976) : 魚探機によるサケ・マス資源現存量の推定についてⅡ. 資源現存量の推定におけるシステム・モデル. 北海道大学水産学部研究彙報, **27** (2), 78-90
- 75) 安間元・佐野典達 (1977) : 魚探機によるサケ・マス資源現存量の推定についてⅢ. 中層曳航式魚探機の試作・試用. 北海道大学水産学部研究彙報, **28** (2), 74-82
- 76) 飯田浩二・鈴木恒由 (1981) : 魚群探知機を用いた北海道倶多楽湖におけるヒメマスの資源および生態に関する研究. 北海道大学水産学部研究彙報, **32** (3), 272-280
- 77) Nobuo HIRAYAMA Sakutarō YAMADA, Hidemitsu SAKURAI and Kazumi SAKURAMOTO (1979) : Stock assesment of antarctic krill by records of a fish finder. Transactions of the Tokyo University of Fisheries, **3**, 71-81
- 78) 小山武夫 (1962) : 陸上で定置網の漁獲量を推定する装置について. 東海区水産研究業績, **A163**, 141-147
- 79) 実吉純一・中村薫 (1952) : 群体からの超音波反射理論と実験. 日本音響学会誌, **8** (3), 123-127
- 80) 石田正巳・鈴木恒由・佐野典達 (1955) : 音響測深機による魚群量の近似的評価について, 北海道大学水産学部研究彙報, **5** (4), 362-367
- 81) STEFAN MACHLUP and J. B. HERSEY (1955) : Analysis of sound-scattering observations from non-uniform distributions of scatterers in the ocean. Deep-Sea Research, **3**, 1-22
- 82) R. P. CHAPMAN and J. R. MARSHALL (1966) : Reverberation from Deep Scattering Layers in the Western North Atlantic. The Journal of the Acoustical Society of America, **40**(2), 405-411
- 83) JOHN E. EHRENBERG (1974) : Recursive algorithm for estimating the spatial density of acoustic point scatterers. Journal of the Acoustical Society of America, **56**(2), 542-547
- 84) RICHARD H. LOVE (1975) : Predictions of volume scattering strengths from biological trawl data. Journal of the Acoustical Society of America, **57**(2), 300-305
- 85) MILES L. PETERSON, CLARENCE S. CLAY and STEPHEN B. BRANDT (1976) : Acoustic estimates of fish density and scattering function. Journal of the Acoustical Society of America, **60**(3), 618-622
- 86) RICHARD K. JOHNSON (1977) : Acoustic estimation of scattering-layer composition. Journal of the Acoustical Society of America, **61**(6), 1636-1639
- 87) PAUL GREEBLATT (1982) : Distributions of volume scattering observed with an 87.5 kHz sonar. Journal of the Acoustical Society of America, **71**(4), 879-885
- 88) 山中一・行縄茂理・森田二郎 (1974) : 超音波魚量計数機の実験結果について. 電気測定研究会資料, 電気学会
- 89) 佐野典達・見上隆克・秋葉芳雄・安間元 (1981) : 茂辺地川に遡上するサケの計数装置の試作・試用に関する研究. 北海道大学水産学部研究彙報, **32** (4), 388-399
- 90) 見元考一・青山恒雄 (1978) : 超音波魚群計量装置による計測値の実数化に関するまき網操業実験について. 西海区水産研究所報告, **51**, 159-166
- 91) 古澤昌彦 (1979) : 超音波による魚量把握に関する研究について. 漁船, **222**, 276-281
- 92) 古澤昌彦・石井憲 (1980) : 超音波魚量計による魚群密度の測定理論. 水産工学研究報告, **1**, 143-156
- 93) 古澤昌彦・石井憲・間庭愛信 (1980) : 超音波魚量計の開発. 電子通信学会技術研究報告, **80** (114),

1 - 8

- 94) 佐野典達・見上隆克・浅野一彦・秋葉芳雄・安間元 (1985) : サケ・マスの遠隔自動計測システムの開発に関する研究. 昭和59年度科学研究費補助金 (試験研究(2)), 研究成果報告書
- 95) H. BODHOLT (1977) : Variance error in echo integrator output. *Rapp. P. -v. Reun. Cons. int. Explor. Mer*, **170**, 196-204
- 96) EBERHARD GÖTZE (1977) : Hydroakustische bestandsbestimmung an dichten fischkonzentrationen. *Seewirtschaft*, **9**(5), 290-292
- 97) JOHN E. EHRENBERG, JIMMIE J. TRAYNOR and NEAL J. WILLIAMSON (1980) : An evaluation of methods for indirectly measuring the mean acoustic scattering cross section of fish. *IEEE*, 371-375
- 98) 土井長之 (1980) : 「科学魚探」に関する研究座談会, 科学魚探の開発と利用. 水産海洋研究会報, **36**, 90-93
- 99) 鈴木秀爾・川上武彦 (1981) : 「科学魚探」に関する研究座談会第二回, 「科学魚探」のこれから. 水産海洋研究会報, **40**
- 100) J. BURCZYNSKI (1982) : Introduction to the use of SONAR systems for estimating fish biomass. Food and agriculture organization of the united nations
- 101) 橋本富寿・間庭愛信 (1955) : 魚群体の超音波反射損失と反射波の性質. 漁船研究技報, **6**, 113-139
- 102) 橋本富寿・間庭愛信 (1956) : 波長がmmの程度となった場合の魚体に於ける反射損失に関する研究(2). 漁船研究技報, **9**, 165-173
- 103) 橋本富寿・間庭愛信 (1958) : 魚体の超音波反射損失の研究 (鰯の影響について). 漁船研究技報, **11**, 143-155
- 104) 間庭愛信 (1959) : 魚体の超音波反射損失の研究 (魚体の寸度と波長の検討). 漁船研究技報, **13**, 81-88
- 105) 佐野典達 (1974) : 活魚 (試料ヤマメ) の超音波反射について. 日本水産学会誌, **40** (12), 1203-1211
- 106) 松野保久・山中有一 (1982) : 内部構造の異なる単体魚模型の三軸方向に於ける標的強度について. 鹿児島大学水産学部紀要, **31**, 9-21
- 107) R. W. G. HASLETT (1962) : Determination of acoustic back-scattering patterns and cross sections of fish. *BRIT. J. APPL. PHYS*, **13**, 349-357
- 108) RICHARD H. LOVE (1969) : Maximum Side-Aspect Target Strength of an Individual Fish. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **46**(3) Part 2, 746-752
- 109) RICHARD H. LOVE (1971) : Dorsal-Aspect Target Strength of an Individual Fish. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **49**(3) Part 2, 816-823
- 110) RICHARD H. LOVE (1977) : Target strength of an individual fish at any aspect. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **62**(6), 1397-1403
- 111) R. W. G. HASLETT, W. H. BURGESS and K. FROST (1973) : Equipment for plotting the polar diagrams of target strength of fish at five frequencies. *Ultrasonic International 1973 Conference Proceedings*, 135-141
- 112) KENNETH G. FOOTE (1980) : Averaging of fish target strength functions. *Journal of the Acoustical Society of America*, **67**(2), 504-515
- 113) JOHN E. EHRENBERG (1979) : A Comparative Analysis of In Situ Methods for Directly Measuring the Acoustic Target Strength of Individual Fish. *IEEE*, 141-152
- 114) ALBERT W. DREW (1980) : Initial results from a portable dual beam sounder for in situ measurements of target strength of fish. *IEEE*, 376-380
- 115) E. MARCHAL (1981) : Target-strength measurements in situ Subject group E. *Rapp. P. -v.*

- Reun. Cons. int. Explor. Mer, **184**, 73-80
- 116) J. DALEN (1984) : Target-strength experimental studies Subject group D. Rapp. P. -v. Reun. Cons. int. Explor. Mer, **184**, 68-72
- 117) K. G. FOOTE (1984) : School and multiple echoes Subject Group G. Rapp. P. -v. Reun. Cons. int. Explor. Mer, **184**, 84-94
- 118) K. OLSEN (1984) : Special aspects of target strength (TS) Subject group F. Rapp. P. -v. Reun. Cons. int. Explor. Mer, **184**, 81-83
- 119) LARS MIDTTUN (1984) : Fish and other organisms as acoustic targets. Rapp. P. -v. Reun. Cons. int. Explor. mer, **184**, 25-33
- 120) 橋本富寿・間庭愛信 (1954) : DSL の超音波伝播特性に及ぼす影響に関する研究. 漁船研究技報, **5**, 167-185
- 121) 石田正巳・佐野典達 (1961) : 海中不連続からの超音波反射について 第1報 海中小反射物群からの超音波反射の近似的取扱いについて. 北海道大学水産学部研究彙報, **12** (4), 279-292
- 122) 石田正巳・佐野典達 (1962) : 海中小反射物群からの超音波反射の近似的取扱いと若干の実験. 日本音響学会誌, **18** (2), 65-75
- 123) PETER C. BEAMISH (1970) : Acoustic scattering from zooplanktonic organisms. Proceedings of an international symposium on biological sound scattering in the ocean March 31-April 2, 474-475
- 124) PETER BEAMISH (1971) : Quantitative measurements of acoustic scattering from zooplanktonic organisms. Deep-Sea Research, **18**, 811-822
- 125) CHARLES F. GREENLAW (1977) : Backscattering spectra of preserved zooplankton. Journal of the Acoustical Society of America, **62**(1), 44-52
- 126) JOHN D. PENROSE and G. THOMAS KAYE (1979) : Acoustic target strengths of marine organisms. Journal of the Acoustical Society of America, **65**(2), 374-380
- 127) OSCAR GUZMAN F., SERGIO LILLO V. and BERNARDO MARIN I. (1982) : Calibration of the echointegration constant of Krill (*Euphausia superba*). INACH, Scientific Series, **28**, 47-71
- 128) 橋本富寿・間庭愛信 (1956) : 超音波に依る DSL の研究(2). 漁船研究技報, **9**, 209-216
- 129) 鈴木恒由 (1969) : 北西部太平洋水域の DSL—II, DSL 中の動物プランクトン群の反射損失について. 水産海洋研究会報, 特別号, 309-314
- 130) 鹿児島島の地理 (1985) : 鹿児島県高等学校地理部会編
- 131) 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編 (1985) : “日本全国沿岸海洋誌”, pp. 780-793, (東海大学出版会, 東京)
- 132) 第十管区海上保安本部 (1974) : 鹿児島湾の潮流
- 133) 鹿児島県水産試験場 (1974) : 鹿児島湾内の漁業実態の概要
- 134) 鹿児島湾奥漁業影響調査委員会資料 (1983)
- 135) 鹿児島水産業改良普及所, 鹿児島湾水産業改良協議会 (1981) : 鹿児島湾の漁業 (農林統計から)
- 136) Masatsume NOMURA (1959) : On the behaviour of fish schools in relation to gillnets, “Modern fishing gear of the world”, No. 1, pp. 550-552
- 137) 井上実 (1978) : “魚の行動と漁法”, pp. 152-160, (恒星社厚生閣, 東京)
- 138) 藤井清文・税所俊郎 (1973) : 鹿児島湾における動物性プランクトンとくに枝角類および橈脚類について. 鹿児島大学水産学部紀要, **22** (1), 113-125
- 139) 税所俊郎 (1976) : 鹿児島湾におけるプランクトンの性状. 昭和50年度 鹿児島湾環境容量調査報告書, 239-289, 鹿児島県衛生部環境局
- 140) 税所俊郎 (1983) : 鹿児島湾における沿岸および外洋プランクトンの分布. 沿岸海洋研究ノート, **21** (1), 29-35
- 141) 野沢治治・税所俊郎 (1980) : 鹿児島湾のプランクトン. 海洋科学, **12** (9), 654-672

-
- 142) 今井貞彦 (1974) : 最近の錦江湾魚類相について. 鹿児島湾水域環境調査報告書, 136-139, 鹿児島県
 - 143) 税所俊郎 (1974) : 鹿児島湾の底生動物 (甲殻類) および浮遊生物について. 鹿児島湾水域環境調査報告書, 140-153, 鹿児島県
 - 144) 村野正昭 (1970) : 日本近海の *Lophogaster* 属 (甲殻綱, アミ目) 3種について. 動物分類学会誌, **6**, 1-5
 - 145) 鹿児島県水産試験場 (1978) : 昭和51年度鹿児島県水産試験場事業報告書漁業部編
 - 146) 鹿児島県水産試験場 (1980) : 昭和53年度鹿児島県水産試験場事業報告書漁業部編
 - 147) 鹿児島県水産試験場 (1981) : 昭和54年度鹿児島県水産試験場事業報告書漁業部編