全周ソナーによる表層魚群量計測における 海面・海底残響の影響軽減

湯 勇,^{a*} 古澤昌彦

(2003年12月1日受付, 2004年5月6日受理)

東京海洋大学

Minimization of interference by sea surface and bottom reverberations
in measuring surface fish abundance by scanning sonar

YONG TANG^{a*} AND MASAHICO FURUSAWA

Tokyo University of Marine science and Technology, Minato, Tokyo 108-8477, Japan

An error is introduced by the influence of sea surface and bottom reverberations in quantifying surface fish using fisheries scanning sonar. Minimization of the error is the purpose of this study. The sonar equation is derived to measure the surface backscattering strengths (SS) of the sea surface and bottom reverberations. The characteristics of the equivalent beam angle in the equation is investigated, after clarifying the beam directivity relative to the sea surface and bottom. This equation was applied to an experimental quantitative sonar system, and the SS of the sea surface and bottom reverberations were observed in Tateyama Bay, Japan. The signal to reverberation ratio (SRR) for the average volume scattering measurement of fish is investigated using the characteristics of SS. Combining the SRR and the signal to noise ratio (SNR), an appropriate tilt angle and measurement range are introduced. Then the influence of sea surface and bottom reverberations can be minimized in the abundance measurement by the echo integration method using a sonar.

キーワード：ソナー, 表層魚群, 海面残響, 海底残響, 表面散乱強度, 信号対残響比

現在の音響水産資源調査では、ほとんどの場合計量魚群探知機を利用している。しかし、サンマやイワシのような水深 10 m 程度までに浮上する魚群（以下「表層魚群」と略す）¹⁻³⁾の調査においては、魚群が調査船に対して逃避行動などを示し、計量魚群探知機の調査では過小評価となる。^{4,5)}

この問題を解決する方法の一つとして、水平面を走査するソナーを定量化して利用することが考えられる。筆者らは漁業用全周型スキャニングソナー（以下ソナーと略す）について、信号処理の特性と指向特性を明確にし、標準球を用いて送受信系の較正を行い、出力信号から体積散乱強度（SV と略す）を求められるようにした。また、ソナーによるエコー積分方式においては、エコー表示上で見た場合の三日月状の領域のエコーを使用する方法を提案し、その有効性を確認した。さらに、魚群の

追跡と資源量推定の機能を併有する本格的な計量ソナーの開発の可能性についても示唆した。⁶⁾

しかし、ソナーは水平掃引方式であるために、航跡と海面による散乱の影響、また浅海域においては海底の散乱の影響を受け易い。これらの残響と魚群の弱いエコーとが混在すると、残響と魚群の識別が難しくなったり、これらの残響を考慮しないで積分方式により表層魚群の平均 SV を推定すると、過大な推定結果となる。逆に、残響などの弱いエコーを除去すれば、魚の弱いエコーも除去され、結果として大きい表層魚群のみの調査となり、ソナーによる資源調査が難しくなる。そこで、ソナーにおける海面・海底残響の特性を明確にした上で、それらが表層魚群の計測に妨害を与えないようにする方法が期待される。

海面残響に関する研究は約 60 年前に始まり、実験と

* Tel : 81-3-5463-0489. Fax : 81-3-5463-0518. Email : sonarway@hotmail.com

^a 現所属：北海道大学大学院水産科学研究科（Hokkaido University, Graduate School of Fisheries Sciences, Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan）

その結果を解釈する理論が多数の研究者により行われた。⁷⁻¹²⁾ 海面残響の主な要因としては、海面の凹凸による散乱、海面の直下に存在する微気泡の共振による散乱、海面付近の気泡群による散乱の3種類があげられる。¹¹⁾ 海面残響の強度は、入射音波の周波数、入射余角 (grazing angle)、風速の3つパラメータにより異なることが明らかにされている。しかし、海面残響は海面の凹凸の状況、微気泡の大きさと量、水温などの環境要因の変動により変わりやすく、海面残響の特性の一般的把握は非常に困難である。よって、モデルの利用にも限界がある。¹¹⁾ 一方、海底残響の研究に関しては、海底の堆積物の構成、周波数、入射余角により異なることが明らかにされている。¹²⁻¹⁵⁾ しかし、海底における堆積物の構成と起伏の複雑さにより、海底残響の特性を正確に把握することも難しい。これまでの残響の理論と実験は、目的、条件や方法が様々であり、特に数 kHz 以下の周波数が低い場合が多いので、我々の対象とする魚群を計測するための数十 kHz 以上の高周波を用いたソナーにそのまま適用できるものは少ない。

ソナーの表示上では、Fig. 1 のほぼ 50 m 以内に示されるように海面残響は一般的に円周方向に帯状の反応として表れる。画像を見易くするために、ソナーにはエコーの強さに応じてゲインを変える AGC (Automatic Gain Control) と弱いエコーを除去するスレッシュホールド機能とがある。しかし、これらの機能は、海面残響を除去すると同時に、有用な魚のエコーにも影響を与え、かつ一旦これらの処理を受けると、信号を復元することができないので、表層魚群の定量的調査では使えない。一方、ソナーはアレイの垂直方向での整相によりビームの俯角を変えられる機能を持ち、適切に設定すれば、Fig. 1 からわかるように、残響を減らすことができる。しかし、俯角を大きくするにしたがい、遠距離において水面付近での信号対雑音比 (Signal to Noise ratio, 以後 SN 比と表記) が下がり、表層魚群を探索できる範囲が小さくなる。また、浅海域においては、海底残響が大きくなる。海底残響は、ソナー表示では円形の強い反応として表れ (Fig. 1)、海面残響と反対に俯角が大きいほど強くなる。このように俯角は海面・海底残響の両方に影響を与える。

ソナーを用いてエコー積分方式で広域における魚群を観測する場合は、この特徴を考慮して、ソナー表示上で見て三日月状のエコーサンプリング領域を設定し、⁶⁾ 残響の弱い距離範囲でのエコーを利用すれば、残響の影響を最小限に抑えることが可能となる。そこで、ソナーによる海面・海底残響の散乱強度を明確にし、その俯角と距離特性を把握することが必要である。特に、信号対残響比 (Signal to Reverberation ratio, 以後 SR 比と表記) を求める必要がある。そして、SR 比がある基準よ

Fig. 1 Sonar display showing reverberations by sea bottom for various tilt angles of beam at 20 m depth.

り大きい範囲を選択し、魚のエコーのサンプリング領域を決める。このような処理方法で、海面・海底残響の影響を最小限度に抑えることが、本研究の目的である。

以上の研究目的のために、本論文では、まずソナーにおける表面散乱の理論に基づいて、海面・海底残響のソナー方程式を導く。この方程式には重要な役割をする表面散乱の等価指向角が表れるが、それは海面および海底方向の送受の指向性関数によって決められる。そこで、それぞれの面での指向特性の分布を調べた上で、等価指向角の特性を明らかにする。この方程式により海面・海底残響の表面散乱強度の計測も可能となる。また、ソナーを用いた広域での調査では、あらゆるエコーを生る SV 信号 (すべてのエコーが体積散乱であるとみなして処理した信号) として扱うために、海面・海底残響を等価的に SV 信号として扱い、その特性を調べる。さらに、異なる俯角における SR 比と SN 比を調べ、適切な俯角設定およびエコーのサンプリング距離の選定方法を示し、実際の調査で残響の影響を抑える方法を考察する。

方 法

ソナーにおける海面・海底残響の強度

まず、表面散乱に関するソナー方程式¹²⁾により残響強度を表す。Fig. 2 に示すように、ソナーの送受波器を原点とし、海底に鉛直な方向を Z 軸とした右手座標系 XYZ を設ける。送受波器の深度を h とし、送受波器から海底までの深度を d とすると、この座標系において、海面残響は Z 軸の負方向 ($d = -h$) での表面散乱であるので、理論としては両者を統一的に扱うことができる。そこで、以下海底残響の表面散乱を考える。

送受波器からパルス幅 τ の音波を送信すると、送受波

Fig. 2 Schematic diagram showing sonar transducer, beam, sea surface, and bottom. Depth of sonar transducer from sea surface is h and bottom depth from transducer is d .

器から散乱面の外縁までの斜距離 r における表面散乱は、音速を c として、 $r < d + c\tau/2$ の場合には Z 軸を中心とした海底面上の円の面からの散乱により、 $r \geq d + c\tau/2$ の場合には、ドーナツ形の面からの散乱により生ずる。微小面積 dS による散乱音圧 dP_S は、

$$dP_S^2 = P_0^2 r^{-4} \exp(-4\alpha r) D_s^2 D_r^2 S_S dS \quad (1)$$

と表される。ここで、 P_0 は送波音圧、 α は吸収係数、 S_S (斜体) は表面散乱強度であり、海面と海底残響を区別する場合には、それぞれ S_{SS} と S_{SB} のように添え字 S と B を付して表示する。(以下表面散乱強度の略語を SS (立体) とする。また dB 変数を $SS = 10 \log S_S$ のように大文字の斜体とする。ほかのデシベル変数も同様なルールで表記する。) D_s はソナーの送波の指向性関数であり、長さ $2w$ の線状アレイで近似でき、 D_r は受波の指向性関数であり、長さ $2a$ 幅 $2b$ の矩形アレイで近似できる。⁶⁾ これらは、指向性主軸を基準とした球座標系 (r, θ, ϕ) で、

$$D_s = \frac{\sin(kw \sin \theta \cos \phi)}{kw \sin \theta \cos \phi} \quad (2)$$

$$D_r = \frac{\sin (ka \sin \theta \cos \phi)}{ka \sin \theta \cos \phi} \frac{\sin (kb \sin \theta \sin \phi)}{kb \sin \theta \sin \phi} \quad (3)$$

となる。ここで、 k は波数 ($k=2\pi/\lambda$, λ は波長) であり、 w と a は俯角 γ に対して $\cos \gamma$ の特性を持つ。⁶⁾

座標系 XYZ に対応する球座標 (r, Θ, Φ) において,
 dS は

$$dS = \begin{cases} \pi \left[\left(r + \frac{c\tau}{2} \right)^2 - d^2 \right] \frac{d\Phi}{2\pi}, & d < r < d + c\tau/2 \\ \pi \left[\left\{ \left(r + \frac{c\tau}{2} \right)^2 - d^2 \right\} - \left(r^2 - d^2 \right) \right] \frac{d\Phi}{2\pi}, & r \geq d + c\tau/2 \end{cases} \quad (4)$$

で表される。また, $r \geq d + c\tau/2$ の場合は,

$$dS = \frac{c\tau}{2} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{c\tau}{2} \right) + r \right] d\Phi \quad (5)$$

と変形できる。ここで、 $c\tau/2$ は距離分解能であり、普通は r に対して小さいために無視でき、

$$dS \approx \frac{c\tau}{2} r d\Phi \quad (6)$$

と近似できる。これは Urick の示した式¹²⁾と同じになる。 c を 1500 m/s とし、 τ を 2 ms とした場合、(6)式の誤差は r を 15 m 以上とすると、5 % 以下となる。ソナーを用いて魚群量を計測する場合は、15 m 以内の範囲は船底などの障害により、有効なデータが得られないので、この近似式の利用に問題はない。

したがって、表面散乱による残響は、(6)式を(1)式に代入して積分を行い、

$$P_S^2 = P_0^2 r^{-3} \exp(-4\alpha r) S_S \frac{c\tau}{2} \int_0^{2\pi} D_s^2 D_r^2 d\Phi \quad (7)$$

となる。ここで、処理や計算を簡略にするために、表面散乱強度 S_s は ϕ によらず一定と仮定して、積分の外に出した。これは、SS がソナーの探知範囲では大きく変わらないという仮定を置いたことになる。

表面散乱の等価指向角

(7)式中の積分の項

$$\Gamma = \int_0^{2\pi} D_s^2(\theta, \phi) D_r^2(\theta, \phi) d\Phi \quad (8)$$

は、海面・海底散乱の等価指向角である。海面と海底に対しての等価指向角を区別する場合は、それぞれ Γ_S と Γ_B で表記する。この式は、指向特性を Φ 方向に平均することを示しているので、海面および海底方向の送波と受波の指向性関数の積 $D_s^2 D_r^2$ について調べる必要がある。(2), (3)式の指向性関数 D_s と D_r は、XZ 面での角度 β の座標回転により、座標系 (r, θ, ϕ) において、

$$D_s(\Theta, \Phi) = \frac{\sin(kw(\sin \Theta \cos \Phi \cos \beta - \cos \Theta \sin \beta))}{kw(\sin \Theta \cos \Phi \cos \beta - \cos \Theta \sin \beta)} \quad (9)$$

$$D_r(\Theta, \Phi) = \frac{\sin(ka(\sin\Theta \cos\Phi \cos\beta - \cos\Theta \sin\beta))}{ka(\sin\Theta \cos\Phi \cos\beta - \cos\Theta \sin\beta)} \cdot \frac{\sin(kb \sin\Theta \sin\Phi)}{kb \sin\Theta \sin\Phi} \quad (10)$$

となる。¹⁶⁾ 実際の計算では、後方に音波が出ないと仮定して $0 \leq \theta \leq \pi/2$ の範囲を考える。ここで、 $\Theta = \cos^{-1}(d/r)$ であるので、一定の d に対して、 Θ は r の関数となる。また、ビームの俯角（水面からの角度）を γ とすると、 β は $\pi/2 - \gamma$ となる。よって、 $D_s^2 D_r^2$ および Γ は、 d （海面残響の場合は、 $d = -h$ ）、 r 、 γ の関数となる。

ソナーによる海面・海底残響の計測式

(7)式で示される表面散乱の受波音圧 P_S を測定することによって、海面・海底のSSを測定することを考える。受波音圧は、受信系で信号処理されてから、ディジ

タル出力信号

$$D_0 = P_I M_E K_A G_T K_T \quad (11)$$

として出力される。⁶⁾ ここで、 P_I は受信音圧、 M_E は受波感度、 G_T はTVG処理の増幅率、 K_A は受信系全体の固定増幅率、 K_T は俯角補正係数である。次に、(7)式の P_S を P_I として(11)式に代入し、また、 $K_{TR} = P_0 M_E K_A$ を送受信係数とすると、(11)式は

$$S_S = \frac{D_0^2 r^3 \exp(4\alpha r)}{K_{TR}^2 G_T^2 K_T^2 \Gamma c \tau / 2} \quad (12)$$

と変形できる。ここで、 D_0 と r は測定によりわかる。 α と c は水温と塩分を与えて求め、 G_T と K_T は別途水槽実験から得たデータを利用して求めた。また、 τ は設定した値とし、 K_{TR} は較正により決める。⁶⁾

海面のみ、または海底のみの散乱強度の計測は(12)式で行える。海面と海底の残響が両方とも存在する場合は、全体の散乱は、

$$P_S^2 = P_{SS}^2 + P_{SB}^2 \quad (13)$$

となる。ここで、 P_{SS} と P_{SB} は、それぞれ海面と海底残響の散乱の入射音圧である。この場合の(12)式は

$$S_{SS} \Gamma_{SS} + S_{SB} \Gamma_B = \frac{D_0^2 r^3 \exp(4\alpha r)}{K_{TR}^2 G_T^2 K_T^2 \Gamma c \tau / 2} \quad (14)$$

となる。ここで、 S_{SS} と S_{SB} は、それぞれ、海面、海底残響のSSである。よって、両方の残響がある場合の海面または海底のSSの計測では、いずれか一方を既知としなければならない。

本研究での海面・海底の残響の計測方法としては、まず、海底残響を受けない深いところで(12)式により S_{SS} を計測する。次に、その計測地点からはば2 km離れた海面と海底の残響が両方とも存在する浅海域において、表面散乱強度を計測する。この場合は、(14)式を

$$S_{SB} = \frac{1}{\Gamma_B} \left[\frac{D_0^2 r^3 \exp(4\alpha r)}{K_{TR}^2 G_T^2 K_T^2 \Gamma c \tau / 2} - S_{SS} \Gamma_S \right] \quad (15)$$

と変形し、海底の表面散乱強度を算出する。すなわち、2つの計測地点の平均風速はほぼ同じであったので、深いところでの S_{SS} と浅海域の S_{SS} が等しいと仮定した。

計測実験

2002年6月21日に、千葉県館山湾で、東京水産大学の実習艇「ひよどり」を利用して、同艇に装備されているソナー（古野電気製、CHS-5、周波数68 kHz）をベースとして構築した定量化ソナーシステム⁶⁾を用いて、海面残響と浅海における海底残響の計測実験を行った。このシステムは、ソナー、GPS、ジャイロコンパス、風速計、インタフェース、パーソナルコンピュータにより構成される。また、船の動揺データは船用3D姿勢計測システム（トキメック製、TMOS-1500）により測定する。これらによって、ソナーの掃引（ピング）ごとの出力信号 D_0 、船の方位、動揺、風速、水温および塩分の同期したデータを得る。

Fig. 3 Experimental method for observing reverberations by sea surface and bottom for various tilt angles γ at shallow sea.

Fig. 3に実際の計測方法を示す。海面残響の表面散乱強度 S_{SS} の計測においては、障害物のない水深約200 mの海域において船舶を漂流させた状態で、俯角を 0° から 50° まで 2° ごとに变化させ、それぞれの俯角において10 sのエコーを収録した。一方、海底残響の表面散乱強度 S_{SB} の計測においては、水深約20 mの浅海域に移動して、 S_{SS} の計測と同様に、船舶を漂流させた状態で、俯角を 0° から 50° まで 1° ごとに变化させ、それぞれの俯角において10 sのエコーを収録した。

海面・海底残響の等価体積散乱強度

エコー積分方式により魚を計測する場合は、あらゆるエコーを体積散乱として扱う。このために、海面・海底残響のエコーを体積散乱として扱い、その特性を調べる必要がある。処理方法としては、体積散乱に関するソナー方程式

$$P_V^2 = P_0^2 r^{-2} \exp(-4\alpha r) S_{VR} \frac{c\tau}{2} \Psi \quad (16)$$

を利用する。ここで、 P_V は残響の受信音圧($P_V = P_S$)、 S_{VR} は残響の等価的な体積散乱強度であり、デシベル変数は $SVR = 10 \log S_{VR}$ と表す。海面と海底を区別する場合には、それぞれ S_{VRS} と S_{VRB} のように添え字SとBをつける。 Ψ は体積散乱の等価指向角（立体角）であり、

$$\Psi = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} D_s^2(\theta, \phi) D_r^2(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (17)$$

により表される。^{6,17)} (11)式と(16)式により、出力信号 D_0 により S_{VR} を求める式は

$$S_{VR} = \frac{D_0^2 r^2 \exp(4\alpha r)}{K_{TR}^2 G_T^2 K_T^2 \Psi c \tau / 2} \quad (18)$$

となる。

信号対残響比

海面・海底残響の影響は、最終的には魚からのエコーを信号とした場合のSR比の特性により定量的に表すことができる。つまり、残響を雑音として扱い、魚のエコー信号が残響の信号よりある値以上であれば、有効な測定ができると考える。ここで、魚のエコー信号は単体と群体エコーに大別されるが、エコー積分方式により計

測する場合は、両者の信号を扱う。通常単体エコーレベルは群体エコーレベルより小さいので、単体エコーについて検討すれば十分である。

単体エコーの音圧 P_F は、ソナー方程式により、

$$P_F^2 = P_0^2 r^{-4} \exp(-4\alpha r) T_S D_s^2 D_r^2, \quad (19)$$

で表される。ここで、 T_S (斜体) は単体の散乱体のターゲットストレングス (以後 TS (立体) と表記) の線形量である。よって、信号対残響比は、(19) 式と表面散乱による残響を表す (7) 式の比であり、

$$R_{FR} \equiv \frac{P_F^2}{P_S^2} = \frac{T_S D_s^2 D_r^2}{r S_S \Gamma c \tau / 2} \quad (20)$$

となる。ここで、海面残響と海底残響を区別して扱う場合は、それぞれ R_{FRS} と R_{FRB} と表示する。 R_{FR} は距離 r に反比例する。従って、魚の測定に対しては一般的には近距離の方が有利である。また、海面・海底残響両者とも存在する場合は、(13) 式を利用し、 $S_S \Gamma$ を

$$S_S \Gamma = S_{SS} \Gamma_S + S_{SB} \Gamma_B \quad (21)$$

とすればよい。

上式から R_{FR} は、測定対象の T_S 、海面、海底の S_S などにより変わるが、 R_{FR} について検討する際のこれらの値の与え方を示しておく。(20) 式の T_S は魚のサイズと TS の指向性などにより異なるが、後の計算では $TS = 10 \log T_S$ を -40 dB と仮定する。Love の全方向 TS モデル¹⁸⁾によると、この -40 dB の値は、体長約 30 cm の魚の TS である。 T_S の変動は R_{FR} の特性を線形的に変化させるだけであるので、他の T_S について調べる場合は R_{FR} のスケールのシフトで対応できる。同様の理由で指向性関数 $D_s D_r$ を 1 と仮定する。 $c \tau / 2$ の項について、 c はほぼ 1500 m/s、 τ は 300 m 以内のレンジで普通 1.5 ms ~ 2 ms であるので、これらによる R_{FR} の変化はほぼ 1 dB 程度と少ない。 S_S は、周波数、入射余角、海面残響に対しては風速により異なり、海底残響に対しては底質と起伏により異なる。Lilly and McConnell¹⁹⁾ は、入射余角 $5^\circ \sim 30^\circ$ 、周波数 15 ~ 60 kHz に対して S_{SS} はほぼ変わらないことを報告している。Wong and Chesterman¹⁵⁾ は、浅海域において 20° 以下の入射余角で S_{SB} を測定し、従来の実験データと比較し、0.5 ~ 100 kHz の周波数範囲で、 S_{SB} の周波数による違いはほとんどないことを報告している。よって、今回の 68 kHz のソナーを用いた計測では、 S_S は主に海底や海面のみの条件によって決まると考えられる。そこで、SR 比を検討する場合の S_{SS} と S_{SB} の値としては今回の計測結果を利用し、異なる条件に対するこれらの違いも (20) 式と (21) 式により R_{FR} のスケールの調整で対応できる。さらに、 Γ は俯角 γ 、距離 r と送受波器の深度 h 、水深 d の関数であるので、 r は変数とし、 γ は $0^\circ \sim 12^\circ$ のパラメータとし、 h と d もパラメータとして扱う。

信号対雑音比

ソナーを用いた魚の計測では、以上述べた海面・海底以外の雑音がある環境で魚のエコーの処理を行う。よって、魚のエコーがある程度雑音より大きくないと、エコーの処理結果に誤差をもたらす。つまり、(19) 式の単体エコーの音圧は、TS 自身が小さく、また伝搬減衰により小さくなるので、特に大きい距離で誤差が生じる。そこで、SN 比を検討する。雑音源は多種あるが、ソナーを用いた走航中の観測においては、環境雑音と電気雑音は自船の走航雑音に較べ低いために、²⁰⁾ 走航雑音に対して SN 比を調べる。西村の研究により、走航雑音の音圧は

$$P_N^2 = N_{P0}^2 f^{-1.8} \Delta f / D_I \quad (22)$$

で表される。²⁰⁾ ここで、 N_{P0} は 1 Hz に換算した雑音のスペクトル密度であり、船により異なるが、ここでは 220 トンのスチール船について測定された値 145 dB (0 dB = 1 μ Pa/Hz^{1/2}) とする。²⁰⁾ また、 f は周波数、 Δf は受信系の帯域幅、 D_I は指向性利得である。(19) 式と (22) 式により、SN 比は

$$R_{SN} \equiv \frac{P_F^2}{P_N^2} = \frac{P_0^2 r^{-4} \exp(-4\alpha r) T_S D_s^2 D_r^2}{N_{P0}^2 f^{-1.8} \Delta f / D_I} \quad (23)$$

となる。²¹⁾ ここで、 D_I は

$$D_I = \frac{4\pi}{\int D_s^2 D_r^2 d\Omega} \quad (24)$$

で表され、分母は体積散乱に関する等価指向角 Ψ でもあり、(17) 式の数値積分により計算する。⁶⁾

今回の研究で利用したソナーは、 P_0 は 207.5 dB (俯角を 0° から 10° まで変えるとほぼ 1 dB 減少する⁶⁾ が、距離 r の変化による R_{SN} の減少より極めて小さいので、今回は俯角 0° の値とする)、 f は 68 kHz、 Δf は普通周波数の 5 % ($Q=20$)²²⁾ 程度であるので、3.4 kHz と仮定した。 TS の値としては、 R_{FR} の場合に揃え、 -40 dB とする。

結 果

海面・海底の方向の指向特性および表面散乱の等価指向角

海面・海底の方向の指向特性を、 γ をパラメータとし、 h を 1 m、3 m、5 m、 d を 20 m、40 m、60 m とし (9)、(10) 式を用いて計算した。Fig. 4 と Fig. 5 に、 r と Φ に対して $20 \log D_s D_r$ の特性を、 -40 dB ~ 0 dB の範囲を 5 dB ステップで 8 段階の濃淡スケールで示す。ビームは実際には旋回するが、計算では一方向に固定し、また後方向には音波は出ないとし、 Φ が $-\pi/2 \sim \pi/2$ の範囲において調べた。

海面の場合 (Fig. 4) の大きな俯角、および海底の場合 (Fig. 5) の小さな俯角を除くと、最も黒い部分がメ

Fig. 4 Directivity combined for transmission and receiving in the direction of sea surface as a function of range for various transducer depths h and tilt angles.

Fig. 5 Directivity combined for transmission and receiving in the direction of sea bottom as a function of range for various sea depths d and tilt angles.

インローブによる寄与を表し、両者ともそれ以外のサイドローブの複雑な寄与がうかがわれる。(8)式の等価指向角は、 r を一定とし、この特性を Φ に対して積分したものである。海面に対する送受の指向特性の大きさは、俯角を増加するほど、また h を大きくするほど減少する。一方、海底に対する送受の指向特性は、水深 d の

Fig. 6 Equivalent beam angle Γ_s for sea surface reverberation as a function of range for tilt angles of 0° to 12° by 2° step downward and transducer depths h . Reliable range for measuring surface scattering strength is the right of bold broken line with circles.

Fig. 7 Equivalent beam angle Γ_B for sea bottom reverberation as a function of range for various tilt angles and sea depths d . Effective range for measuring bottom scattering strength is the right of bold broken line with circles.

増加とともに弱くなり、俯角を増加するほど強くなる。 $D_s^2 D_r^2$ の計算と同じなパラメータに対し、(9), (10)式を用い、(8)式を数値積分することによって、 Γ_s と Γ_B を求め、得られた結果をそれぞれFig. 6とFig. 7に示

す。 Γ_S , Γ_B とも、似た特性を示した。すなわち、主にメインローブによる最大値は約 -4 dBであり、近距離においては、主にサイドローブのために、山や谷を持つ。しかし、俯角に対しては逆特性を示し、海面残響の場合は俯角が増加するほど等価指向角は減少し、海底残響の場合には増加する。サイドローブの寄与の大きい部分では、等価指向角は非常に小さく、表面散乱に関する有効散乱面積 $\Gamma_{rcr}/2$ が小さいので、この部分の残響を無視することができる。また、メインローブによるカーブの急上昇の部分は、表面散乱強度を実測する場合は、船の動揺により大きな誤差が生じ易く、また指向特性の近似度が低いので、信頼性が低い。そこで、計測の精度を確保するために、従来のビーム幅、フィルターのカットオフ周波数などを決める際の方法に習い、 Γ_S と Γ_B の最大値から 3 dB 下がるところの勾配を一応の基準として、それぞれの俯角に対する Γ の同じ勾配をもつところを探し、それ以上のレベルに対応する距離範囲を表面散乱強度の実測における等価指向角の有効範囲とする。この境界を Fig. 6 と Fig. 7 に○印を付けた太い破線で示した。

海面・海底残響の表面散乱強度の計測

実験当日の平均風速は 4.6 m/s、表層水温は 19.9°C 、塩分濃度は 35.0 psu であった。ピッチングの平均値は 5.4° 、ローリングの平均値は 1.6° であった。また、浅海域の実験場所の底質は、ほぼ均一な砂泥底質（粒径が直径 $1/16$ mm 以上の砂の含有率が $25\% \sim 50\%$ ）である。^{23,24)}

船は漂流状態のため、船尾方向のプロペラの回転で生じる気泡による航跡の残響はない。よって、水平面内での散乱はほぼ均等と見なすことができ、海面残響のエコーの出力信号を平均処理する。具体的には、まず、それぞれの俯角に対する 10 ピング（ 1 ピング/s）の残響信号の距離軸を揃えてピングに対して平均処理を行い、次に、この平均した信号を円周方向（受波の円周方向のデータの読み取り角度ステップは $360^\circ/128 = 2.8^\circ$ ）にも平均を行い、(12)式の残響の平均出力信号 D_0 を距離 r のみに対する信号とする。収録した残響信号中に、他船からの音響機器の干渉音波が混入したことがあるが、干渉エコーの距離を確認した上で、データ処理の段階で除く。

(12)式の変数のうち、 $KTR = 10 \log K_{TR}$ は 2000 年 9 月の較正結果 33.5 dB を利用し、⁶⁾ α は水温と塩分により 10.3 dB/km となり、 τ は設定値 2 ms とした。これらの条件を用い、(12)式による距離に対する海面残響の表面散乱強度 $SS_S = 10 \log S_{SS}$ の平均値を、俯角をパラメータとして Fig. 8 に示す。 20 m 以内のデータは、船底のエコーがあり、また Γ の有効範囲 (Fig. 6) 外なので、使えない。また、 70 m 以内では受信処理系で飽

Fig. 8 Measured sea surface backscattering strength as a function of range for various tilt angles at sea depth of 200 m.

Fig. 9 Measured sea bottom surface backscattering strength as a function of range for various tilt angles at shallow sea depth of 20 m, right hand sides of symbol * are reliable range of Γ_B .

和することがあったので有効でない。 $6^\circ \sim 10^\circ$ の俯角に対する値は、Fig. 6 に示すように Γ_S が小さいために、船の動揺の影響を受け、過大な SS_S が生じやすく、誤差が大きい。さらに、 12° の俯角の場合は、 Γ_S が指向特性のサイドローブで支配されるために (Fig. 5 参照) 信頼性が乏しい。そこで、Fig. 8 では $0^\circ \sim 4^\circ$ の俯角の 70 m（スケールを合わせるために 60 m から示す）以上の SS_S を示した。干渉信号による大きいピークの値を除くと、平均値は -44.8 dB となり、俯角や距離による違いは少ない。

浅海域における海底残響の観測では、 $r > d$ の場合は、海面残響と海底残響の両者が存在し、それらのエコーが同時に観測された。データの平均処理とパラメータの決定方法は上述の SS_S の計測の場合と同様である。 SS_S としては上記の実測平均値 -44.8 dB を用い、(15)

Fig. 10 Measured equivalent volume backscattering strength by sea surface reverberations as a function of range for tilt angles of 0° to 12° by 2° step downward at sea depth of 200 m.

Fig. 11 Measured equivalent volume backscattering strength by sea surface and bottom reverberations as a function of range for various tilt angles at shallow sea depth of 20 m.

式により SS_B を求め、結果を Fig. 9 に示した。Fig. 7 の Γ_B の有効距離範囲 (Fig. 9 の*印の右側) を見ると、俯角と距離の変化に関係なく SS_B はほぼ一定の -40 dB (平均 -39.8 dB) であった。なお、この範囲外の大きいピークは SS_B の特性ではなく、正確な推定が難しい Γ_B の零点や小さい範囲での特性によるものである。 SS_B の測定では、海底の底質の均一性を確保するために、ソナーのレンジを 100 m と小さく設定したので、 100 m 以上の値はない。また、俯角を 0° から 4° とした SS_B の値は、 Γ_B の有効範囲が 100 m より大きい (Fig. 7 の $d = 20$ m 参照) ために、俯角 4° のカーブは参考として示したが、 0° と 2° のカーブは表示していない。

海面・海底残響の等価的な体積散乱強度

海面残響の等価体積散乱強度 S_{VRS} の (18) 式による計算は、海面残響の出力信号 D_0 を上述の方法により平均

Fig. 12 Signal to reverberation ratio of fish echo ($TS = -40$ dB) and sea surface reverberation as a function of range for tilt angles of 0° to 12° by 2° step upward and transducer depths h . Line labeled “S/N” shows signal to noise ratio.

Fig. 13 Signal to reverberation ratio of fish echo ($TS = -40$ dB) and sea bottom reverberation as a function of range for tilt angles of 0° to 12° by 2° step leftward and bottom depths d .

処理し、また俯角を $0^\circ \sim 12^\circ$ とし、(17) 式により数値積分で求めた Ψ の値 -12.5 dB $\sim$ -12.4 dB⁶⁾ を用いて行なった。結果を Fig. 10 に示す。干渉によるピーク状のデータを除けば、距離が 70 m 以上の場合には、すべて

の俯角に対する $SVR_S = 10 \log S_{VRS}$ は、距離が増加するにつれて小さくなる特性を示した。また、俯角の増加とともに SVR_S は小さくなる。

水深約 20 m の浅海における海面・海底残響の SVR の距離および俯角の特性を Fig. 11 に示す。Fig. 10 の 200 m 水深の海域で見られた距離が増加につれて小さくなる特性は顕著ではないが、これは海底残響が距離の増加とともに徐々に大きくなるためである。また、メインローブが海底に当たる 50 m 付近 (Fig. 5 参照) からは、海底残響に大きく依存し、 SVR が急上昇し、俯角特性が逆転している。

SR 比および SN 比

海面残響の SR 比 (RFR_S) を (20) 式により計算し、結果を Fig. 12 に示す。 RFR_S は、 $1/(\Gamma_S r)$ の特性によって、 r の減少と俯角の増加に伴い大きくなる。また、 h を増加するほど、 RFR_S が大きくなる。ただし、俯角を 10° 以上にしても RFR_S の改善は少ない。

海底に関する SR 比 (RFR_B) の特性は、Fig. 13 に示すように、ほぼ Γ_B と逆特性を示す。俯角が大きくなるとともに、メインローブによる散乱が大きくなる距離が近くなり、同じ距離に対する RFR_B が小さくなる。また、 d の増加とともに、海底残響の影響する距離が遠くなる。メインローブの縁辺の急カーブの部分は、船の

動揺の影響を非常に受け易いので、SR 比が大きくても利用できない。よって、 RFR_B のメインローブの範囲にいる魚の測定は難しく、測定可能な領域は基本的に RFR_B のサイドローブの部分のみである。なお、 r^{-1} の特性は、 Γ_B の急カーブの特性により、顕著ではない。

ソナーを用いる場合、海面と海底の残響の両方の影響を受けることが多い。つまり、上で述べ場合は、海面・海底残響の一方が無視できる特別の場合である。そこで、汎用として使えるように、(20) と (21) 式により海面・海底の両者の残響を考慮して計算した SR 比 (RFR) の結果を、 d を 50, 100, 200 m, h を 1 m, 3 m, 5 m とし、Fig. 14 に示す。 RFR の距離と俯角特性は、 RFR_S と RFR_B の両者の距離と俯角特性を総合的に反映している。つまり、海底残響のメインローブにより急減する特性が出るより近い距離では、主に海面残響による距離と俯角特性が現れている。近距離においては、水深 d の増加よりも送受波器の深度 h が増加する方が、 RFR が格段に大きいことが分かる。しかし、 h の増加によらず、測定可能な最大距離は RFR_B におけるメインローブの影響が表れる距離で制限され、 d が増加しない限り測定範囲は大きくならない。また、俯角の増加により、海面残響の影響は減少するが、逆に海底残響が増し、測定可能な最大距離が近くなる。

Fig. 14 Signal to reverberation ratio of fish echo ($TS = -40$ dB) and sea surface and bottom reverberations as a function of range for tilt angles of 0° to 12° by 2° step upward and of transducer depths h and bottom depths d . Lines labeled “S/N” show signal to noise ratio.

(23)式により計算したSN比の特性をFig. 12とFig. 14に描き入れた。SN比が少なくとも10 dB以上必要であるとする、-40 dBのTSの場合は、最大距離はほぼ130 mであり、残響による制限よりも大きい。よって、ソナーによる表層魚群の計測の場合、制限要因は残響であるといえる。なお、これらの図でTSなどの影響は前述のように、全体の曲線を上下に移動するだけである。

考 察

海面・海底残響の表面散乱のソナー方程式

海面・海底の表面散乱による残響強度の定式化においては、海面・海底に当たるビームの指向特性を知ることが重要であり、異なる h と d に対するそれらの特性が、表面散乱の等価指向角の特性を決める。今回の研究では、等価的な線状アレイの送波器と矩形アレイの受波器の指向特性を座標変換することにより、海面と海底に対しての送受指向特性と表面散乱の等価指向角を明確にし、ソナーによる海面・海底残響の定式化と測定を可能にした。一般の残響の計測ではビームを測定面に向けるが、ソナーの海面散乱の場合は、主軸を海面下に向ける点は大きな違いである。

海面・海底残響の表面散乱強度の計測結果

海面残響の計測では、60 m以上での入射余角は、 $\sin^{-1}(h/r)$ によりほぼ 1° であり、計測結果としての SS_S の平均値は-44.8 dBであった。ほぼ同様な風速条件において単一の送受波器を用いて行ったWildt (25 kHz, 入射余角 3° , 風速5 m/s)の実験結果は-48~-44 dBであり、Garrisonら (60 kHz, 入射余角 0° , 風速6.2 m/s)の実験の近似曲線の結果は-50 dB¹¹⁾である。これらと今回の結果を較べると、最大5.2 dBの差がある。従来の海面残響の計測結果¹¹⁾を参照すると、異なる実験場所と条件による SS_S のこの程度の差は、有り得る値と考えられるので、今回の海面残響の測定結果は妥当だと考えられる。

浅海域において測定した海底残響の SS_B の平均値-39.8 dBを、過去の報告と比較する。 SS_B は底質、周波数、入射余角の関数であり、実験を行った場所の底質はほぼ均一な砂泥底質であった。McKinney and Andersonの測定結果では、中砂底質 (0.295 mm < 粒子直径 < 0.589 mm), 入射余角 10° , 68 kHzの場合-40 dBである。^{13,24)} Urlickはシルト底質 (0.074 mm < 粒子直径 < 0.295 mm), 入射余角 10° , 55 kHzおよび60 kHzにおいて、-35 dBの結果を報告している。^{12,24)} 異なる実験条件や、底質の違いも考慮し、また従来からの研究結果を参考とすれば、今回の結果は妥当だと考えられる。

しかし、緒言で述べたように、海面・海底残響の特性は、風速、海底の凹凸度合などの環境要因のために複雑

であり、また高周波での計測例も少ないことから、今後ソナーを用いて異なる環境条件における綿密な計測と理論上での研究が必要であると考えられる。

海面・海底残響の等価体積散乱強度

海面残響の等価体積散乱強度 SVR_S は、海面残響の散乱音圧 $P_S = P_V$ とすると、(7)式と(16)式により、

$$S_{VR_S} = \frac{S_{SS} \Gamma_S}{\Psi r} \quad (25)$$

となり、 r に反比例するために、距離に対して小さくなる特性を示す (Fig. 10)。さらに、 Ψ はほぼ一定であるので、 Γ_S の俯角特性により、 SVR_S も俯角と共に下がる。 SVR_S のこの特性は、表層魚群の計測や探索に対して重要である。つまり、体積散乱の特性を持つ魚群のエコーに対しては、遠距離で計測すれば海面残響の影響が小さい。この理由は、(16)式と(7)式から得られる体積散乱対残響の表面散乱の比

$$R_{MS} = \frac{P_M^2}{P_S^2} = \frac{S_V \Psi}{S_{SS} \Gamma_S} r \quad (26)$$

が r に比例するためである。体積散乱の特性を持つ条件は、魚群の大きさがビームの拡がりより大きいことである。ビームの拡がりを近似的に $2r\theta_w$ (θ_w はビーム幅)とすると、これは距離 r に比例するので、遠ければ遠いほど魚群の規模が大きい必要がある。今回使用したソナーの送受総合のビーム幅はほぼ 4.7° であるので、100 mで16.4 m, 200 mで32.8 mより大きい魚群がこの条件に当てはまる。しかし、エコー積分方式を適用する場合は、単体魚も対象とするので、単体エコーに対するSR比を中心にすべきである。したがって、遠距離の方が有利ということで述べた特性は、大きな魚群の探索、行動追跡、場合によっては群内密度の推定などの、個群推定に関するものである。

浅海域における海面・海底残響のSVRの特性 (Fig. 11) では、(7), (13)式と(16)式により

$$S_{VR} = \frac{S_{SS} \Gamma_S + S_{SB} \Gamma_B}{\Psi r} \quad (27)$$

となる。海面・海底残響は r^{-1} の距離特性をもつが、 Γ_B の距離特性により、 SVR は一定の距離から増加の特性を示し、さらに、 Γ_B のメインローブによる寄与は俯角の増加とともに出現距離が近づく (Fig. 7) ので、 SVR の増加特性の出現距離も近づいてくる。

SR比、SN比および残響の軽減方法

海面残響に対するSR比 RFR_S の特性 (Fig. 12) には、俯角の増加によるSR比の改善は実際の海面残響のエコー強度の俯角特性 (Fig. 1) と一致している。海底残響のSR比 RFR_B の特性 (Fig. 13) によって、魚の計測可能な境界距離とその俯角特性を解明できた。また、170 m以内の距離では、SN比は今回の海面残響のSSにおけるSR比より大きい。よって、SR比 RFR の

特性によって残響影響の軽減策が立てられる。

ソナーを用いた表層魚のエコー積分方式による調査では、海底散乱の影響を受けない深い海域において、送受波器の深度 h を大きくし、俯角を大きくすることにより SR 比を改善することができる (Fig. 14, 特に右下の図)。そのため、ソナーの送受波器の装備で h を大きくすることが、残響を軽減する第一の対策である。 h は一旦装備すれば決まり、また水深 d は自由に選べないので、後は俯角の調整とエコーをサンプルする距離の選択を行なうことになる。

SR 比の汎用図による俯角と計測距離の選定方法

ソナーを用いた実際の計測に際しては、Fig. 14 に示した異なる送受波器の設置深度 h 、ビームの俯角、計測海域の水深 d の条件に対して SR 比と SN 比を総合的に示した図が便利である。海面残響と海底残響の影響の仕方が異なるために、以下、海底残響を無視することができる深い海域と、両者とも存在する浅い海域に分けて、適切な俯角およびサンプリング距離を検討する。

200 m 程度以上の深い海域においては、Fig. 14 の RFR の特性により、俯角を大きくするのが有利であるが、 10° 以上では RFR の改善が少ないために、大きな俯角では表層魚を捕捉出来ないという意味も含め、約 10° が適当な俯角である。 h が大きい場合は、 10° 以下の俯角でも海面残響の影響が少なくなる (Fig. 12 の $h=5$ m の図を参照)。また、遠距離での大きい俯角での測定に対しては、SN 比による制限が出てくる。

浅い海域の場合は、 RFR_B の特性によって最大観測可能な距離が制限されるために、SN 比の影響を考慮しなくてもよい (Fig. 14 の $d=50$ m の図を参考)。また、Fig. 14 からわかるように、俯角を 10° 程度に選ぶとよい。最大のサンプリング距離は水深で決まり、最小 SR 比を 10 dB とすると、 $h=1$ m, 3 m, 5 m の場合、それらはそれぞれ、ほぼ 40 m, 70 m, 90 m である。この距離内にサンプリング距離を決める。

風浪や海底性状などの環境は複雑であり、よって海面・海底残響の特性も複雑である。今回の研究では、館山湾の特定な環境条件における海面・海底残響の特性をもとに、一般的な計測方法を考察した。異なる天候条件と海底構造に対しては、SS の値を補正する必要がある。また、与えた散乱対象は TS が -40 dB の単体魚である。対象により TS の値も補正する必要がある。これらの補正は (20) 式からわかるように、Fig. 14 の縦軸のスケールの変更のみで可能である。その意味で Fig. 14 は適切な俯角およびサンプリング距離を決める汎用図である。例えば、Fig. 14 の $h=3$ m, $d=100$ m の計測条件では、SR 比の最小限を 10 dB, TS を -40 dB, 俯角を 10° とした最大の計測可能距離は 70 m であるが、TS が -35 dB および -30 dB の場合の最大の計測可能距離

Fig. 15 An image showing different set of echo sampling ranges for fishes with different TS. Ship moves from P_1 to P_3 searching maximum range up to r . The range r_A is for fish with a small TS and r_B is for fish with a large TS.

は、縦軸のスケールをそれぞれ 5 dB および 10 dB 増加させることによって、それぞれ 130 m および 200 m と読める。

複数のエコーサンプリング距離の提案

RFR は調査対象の TS によって異なるので、すべての TS に対して適切なサンプリング距離を決めるのは難しい。つまり、小さい TS の水中生物を調査対象とした場合、近距離の方が有利となり、ソナーの広い探索範囲という特長を発揮できない。大きいサンプリング距離とすれば、小さい TS の魚の計測ができなくなる。この問題に対しては、Fig. 15 に示すように、複数のエコーサンプリング距離を設け、異なる距離のエコーを同時サンプリングする。これにより、小さいサンプリング距離での測定結果は、弱い散乱体の計測を中心とし、大きい距離の方は強い散乱体を対象として計測することができる。複数のサンプリング距離による結果を相互比較することにより信頼性の検討もできるであろう。今後、この方法の実用化についての研究が必要である。

結 論

- 1) 全周スキャニングソナーにおける海面・海底残響のソナー方程式を導いた。
- 2) 海面・海底残響で重要な海面・海底方向の送受の指向特性は、俯角 γ 、送受波器深度 h と水深 d により決まり複雑ではあるが、図化により容易に知ることが出来るようにした。
- 3) 海面・海底残響の表面散乱に関する等価指向角 Γ

を求め, その特性を明らかにした。その値の大きい部分が表面散乱強度 SS を計測する場合重要である。また, 信号対残響比 SR 比の大きいところは, Γ の小さい領域である。

4) ソナーにより海面・海底残響の表面散乱強度 SS を計測する方法を開発し, この方法をフィールドで適用し, 有効性を確認した。

5) 海面残響の等価的な体積散乱強度 S_{VS} の距離特性を明らかにした。深い海域におけるビームの拡がりより大きい魚群の観測に対しては, 遠距離が有利である。

6) SR 比および SN 比の距離特性を, d と h のパラメータとして示し, 適切な俯角とサンプリング距離を容易に決められるようにした。

7) エコー積分による表層魚の計測においては, 単体エコーの SR 比が距離に反比例するので, 近距離での観測が有利である。エコーのサンプリングの最大距離は, RFR の汎用図 (SN 比を含む) により, 総合的に決める必要がある。

8) h の増加により SR 比を改善することが最も有効である。

9) 複数のエコーサンプリング距離を同時に利用する方法を提案した。これによれば, ソナーの広い探索範囲という特長を失わずに, 弱い散乱体に対しての計測もでき, 結果の信頼性の検討もできる。

謝 辞

本研究に協力いただいた東京海洋大学武田誠一教授, 実験艇「ひよどり」の酒井英一艇長, 古野電気㈱の鉛進部長, 青山繁工場長, 西森靖室長に謝意を表する。

文 献

- 1) 佐野典達, 谷野保天. 科学魚探によるサンマ資源現存量の推定について. 北大水産彙報 1983; **34**: 220-230.
- 2) Cardinale M, Casini M, Arrhenius F, Hakansson A. Diel spatial distribution and feeding activity of herring (*Clupea harengus*) and sprat (*Sprattus sprattus*) in the Baltic Sea. *Aquat. Living Resources*. 2003; **16**: 283-282.
- 3) Lawson GL, Barange M, Freon P. Species identification of pelagic fish schools on the South African continental shelf using acoustic descriptors and ancillary information. *ICES J. Mar. Sci.* 2001; **58**: 275-287.
- 4) 李 遺元, 向井 徹, 飯田浩二. スキャニングソナーを用いた船舶の接近に対する魚群行動の評価法. 日水誌 2000; **66**: 825-832.
- 5) Olsen K, Angell J, Løvik A. Quantitative estimations of the influence of fish behaviour on acoustically determined fish abundance. *FAO Fish. Rep.* 1983; **300**: 139-149.
- 6) 湯 勇, 古澤昌彦, 青山 繁, 樊 春明, 西森 靖. 全周型スキャニングソナーによる表層魚群の体積散乱強度の計測方法. 日水誌 2003; **69**: 153-161.
- 7) Marsh HW. Sound reflection and scattering from the sea surface. *J. Acoust. Soc. Am.* 1963; **35**: 240-244.
- 8) Clay CS, Medwin H. High-frequency acoustical reverberation from a rough-sea surface. *J. Acoust. Soc. Am.* 1964; **36**: 2131-2134.
- 9) Chapman RP, Harris JH. Surface backscattering strengths measured with explosive charges. *J. Acoust. Soc. Am.* 1962; **34**: 1592-1597.
- 10) McDonald BE. Echoes from vertically striated subresonant bubble clouds: a model for ocean surface reverberation. *J. Acoust. Soc. Am.* 1991; **89**: 617-622.
- 11) McDaniel ST. Sea surface reverberation: a review. *J. Acoust. Soc. Am.* 1993; **94**: 1905-1922.
- 12) Urick RJ. *Principles of underwater sound*, 3rd edition. McGraw-Hill Book Company. USA, 1983; 244-277.
- 13) McKinney CM, Anderson CD. Measurements of Backscattering of Sound from the Ocean Bottom. *J. Acoust. Soc. Am.* 1964; **36**: 158-163.
- 14) Urick RJ, Saling DS. Backscattering of explosive sound from the deep-sea bed. *J. Acoust. Soc. Am.* 1962; **34**: 1721-1724.
- 15) Wong HK, Chesterman WD. Bottom Backscattering near Grazing Incidence in Shallow Water. *J. Acoust. Soc. Am.* 1968; **44**: 1713-1718.
- 16) Furusawa M, Sawada K. Effect of Transducer Motion on Quantifying Single Fish Echoes. *Nippon Suisan Gakkaishi*. 1991; **57**: 857-864.
- 17) Clay CS, Medwin H. *Acoustical Oceanography*. JOHN Wiley & Sons, Inc., USA, 1977; 232-234.
- 18) Love RH. Target strength of an individual fish at any aspect. *J. Acoust. Soc. Am.* 1977; **62**: 1397-1403.
- 19) Lilly JC, McConnell SO. Surface reverberation measured in Dabob Bay and the open ocean. *J. Acoust. Soc. Am.* Suppl. 1, 1978; **63**: S24.
- 20) 西村 實. 魚群探知機の最適周波数に関する研究. 学位論文 (東北大学), 仙台. 1969; 32-45.
- 21) 古澤昌彦. 水産資源推定のための超音波による魚群探知に関する研究. 水産工学研究所研究報告 1990; **11**: 217-218.
- 22) Furusawa M, Asami T, Hamada E. Detection range of echo sounders. *The 3rd JSPS International Seminar, Sustainable Fishing Technology in Asia towards the 21st Century*. 2000; 207-213.
- 23) 青山千春, 濱田悦之, 古澤昌彦. 海底反射を利用した計量魚群探知機の総合的検証. 日水誌 1999; **65**: 78-85.
- 24) 佐藤一彦, 内野孝雄. 海洋計測ハンドブック. 東海大学出版会, 東京. 1973; 518-531.