



Title	魚群探知機による模擬魚群の分布密度の推定について
Author(s)	李, 吳在; LEE, Dae-Jae; 鈴木, 恒由 他
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 38(3), 239-252
Issue Date	1987-08
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/23957
Type	departmental bulletin paper
File Information	38(3)_P239-252.pdf



魚群探知機による模擬魚群の分布密度の推定について

李 吳在*・鈴木恒由*

Estimation of the Distribution Density of a Model Fish School Using an Echo Sounder

Dae-Jae LEE* and Tsuneyoshi SUZUKI*

Abstract

This paper describes an attempt to verify the echo integration method of determining fish density by the use of steel spheres in a laboratory tank. The spheres were randomly distributed throughout the insonified volume to produce ultrasonic echoes similar to those scattered from real fish schools. The backscattered echoes were measured as a function of target density at two frequencies; i.e., 50 kHz and 200 kHz.

The results obtained are as follows:

1) The mean losses in echo energy caused by a collection of 30 targets/m³ lying in the shadow region behind another collection of 5 targets/m³ were about -0.4 dB at 50 kHz and about -0.2 dB at 200 kHz.

2) The frequency histograms or Probability Density Function (PDFs) of the echo peak values were very close to the generalized Gamma PDF rather than the theoretical PDF, and they gradually shifted over from the Rayleigh PDF to the Gaussian PDF with an increase in the number of targets in the insonified volume.

3) The relationship between mean volume backscattering strength (\overline{SV} : dB) and target density (ρ : no./m³) was expressed by the equations: $\overline{SV} = -46.2 + 13.7 \cdot \text{Log}(\rho)$ at 50 kHz and $\overline{SV} = -43.9 + 13.4 \cdot \text{Log}(\rho)$ at 200 kHz.

4) The difference between the experimentally derived number and the actual number of targets gradually decreased with an increase in the target density and was within 20% when the density was 30 targets/m³.

From these results, we concluded that when the number of targets in the insonified volume is large, the validity of the echo integration method could be expected.

結 言

近年、魚群探知機による水産資源調査が、その迅速性のために注目されている¹⁻²⁾。

魚群探知機を用いた資源量の推定方法は、魚群エコーを対象とする積分方式と、単体エコーを対象とする計数方式に大別される。現在最も広く用いられている方法は、積分方式であり、計量用魚探機はその多くがこの方式を採用している。積分方式では、魚群による超音波の散乱現象を音響系の体積残響理論に近似させることによって、魚群エコーのエネルギーと魚群密度との間に近似的な直線比例関係を得、この関係から魚の分布密度を推定する。

一般的に、積分方式の計量用魚探機は、密集魚群の資源調査に広く利用されているが、いまだ

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

実用上及び精度上の面では問題点が多い。特に、積分方式の基礎となる体積残響理論は、任意のサンプル体積中に非常に多くの等方性の点散乱体が一樣ランダムに分布しており、更に多重散乱の影響を無視できるという仮定に基づいているが、実際の魚群ではこれらの条件が満たされないことが多い。従って、この方式に対する信頼性の把握及び精度の向上を図るために、模擬魚群やケージ魚群による様々な検証実験が行われている³⁻⁴⁾。

本研究では、積分方式の資源量推定法を検証するための試みとして、大型無響水槽で模擬魚群を対象に、模擬魚の分布密度の推定及び群体エコーの統計的性質などについて検討を行った。

理論的解析

1. 単体標的による超音波反射

特定の単体標的からの反射エコーの受波器出力 $y_i(t)$ は次式で表せる⁵⁾。

$$y_i(t) = \text{Re} \{ \sqrt{2} \cdot K_i \cdot S(t - 2r_i/c) \cdot \exp[j(\omega_0 \cdot (t - 2r_i/c) + \psi_i)] \} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 K_i は反射エコー振幅の実効値、 $S(t)$ はピーク振幅を1とする単体エコーの波形関数、 r_i は送受波器から標的までの距離、 c は水中音速、 ω_0 は送信角周波数、 ψ_i は反射エコーの位相、添字 i は i 番目の標的に対する値、 Re は実数部を示す。(1) 式の K_i は、ソナー方程式から次式で表せる。

$$K_i = P_t \cdot M_r \cdot \exp(-2\alpha \cdot r_i) \cdot (1/r_i)^2 \cdot \sqrt{\sigma_i/4\pi} \cdot b(\theta_i, \phi_i) \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 P_t は送波音圧振幅の実効値、 M_r は受波器の受波感度、 α は吸収減衰常数、 σ_i は標的の散乱断面積、 $b(\cdot)$ は送受総合の指向性関数、 θ_i, ϕ_i は各々球座標系においての標的の音軸に対する方向角を示す。

一方、標的が球である場合、この球の超音波反射特性は、反射形状関数 $f_\infty(ka)$ で与えられ、またこの関数は次式のように級数展開で示すことができる。

$$f_\infty(ka) = -(2/ka) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \cdot P_n(\cos \theta) \cdot \sin(\eta_n) \cdot \exp(j \cdot \eta_n) \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 k は波数 ($k=2\pi/\lambda$, λ は波長)、 a は球の半径、 $P_n(\cdot)$ はルジャンドル多項式、 θ は散乱角を示す。また、 η_n は散乱波の n 次の位相角で、Faran⁶⁾ によって厳密解が早くから導かれており、本研究ではそれを利用して η_n の数値計算を行った。(3) 式の $f_\infty(ka)$ と球の標的強度 TS との間には次式が成立する。

$$TS = 20 \cdot \text{Log}[(a/2) \cdot |f_\infty(ka)|] \dots\dots\dots(4)$$

一方、(3) 式を利用して球からの反射エコー波形 $y(\tau_s)$ を計算できる⁷⁾。

$$y(\tau_s) = (a/2r) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} X(q) \cdot F(q) \cdot f_\infty(q) \cdot G(q) \cdot \exp(j \cdot \tau_s \cdot q) dq \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 τ_s は時間パラメータ ($\tau_s=(ct-r)/a$)、 r は受波器から球までの距離、 q は無次元周波数 ($q=ka$)、 $X(q)$ は電気入力信号の周波数特性、 $F(q)$ 及び $G(q)$ は各々送受波器を含んだ送信モード及び受信モードの周波数特性を示す。

2. 群体標的による超音波反射

送受波器のビーム内に分布している n 個の標的からの合成エコーの受波器出力 $V(t)$ は、一般的に、(1) 式を利用して次式で表せる。

$$V(t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $V(t)$ の複素包絡線を $V_0(t)$ とし、またこの $V_0(t)$ のフーリエ変換を $V_0(f)$ とすると、
 群体エコーのエネルギー E は、Parseval の定理によって次式で示せる⁹⁾。

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |V(t)|^2 dt = 1/2 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} |V_0(f)|^2 df \dots \dots \dots (7)$$

従って、 $V_0(f)$ を求めて (7) 式に代入し、またこの式の両辺に集合平均を取ると、平均エコーエネルギー $\langle E \rangle$ は次式で表される。

$$\langle E \rangle = \sum_{i=1}^n \langle K_i^2 \cdot \tau_e \rangle + \sum_{i+k}^n \sum_{i+k}^n \langle K_i \cdot K_k \cdot \tau_e \rangle \cdot \langle \cos(\psi_k - \psi_i) \rangle \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 τ_e は等価パルス幅、 $\langle \cdot \rangle$ は集合平均を示す。(8) 式で、標的群がサンプル体積中に
 一様ランダムに分布しておれば、第二項の $\langle \cos(\psi_k - \psi_i) \rangle$ は 0 となり、(8) 式は次式で与えられる。

$$\langle E \rangle = \sum_{i=1}^n \langle K_i^2 \cdot \tau_e \rangle \dots \dots \dots (9)$$

即ち、群体標的からの平均エコーエネルギー $\langle E \rangle$ は、その分布密度 n に比例することが分かる。
 一方、(9) 式から、平均エコーエネルギー $\langle E \rangle$ と単位体積当りの標的の平均分布密度 ρ との関係は、次式で導かれる。

$$\rho \cdot \langle \sigma \rangle / 4\pi = \frac{c \cdot (t_0 + T/2) \cdot (t_0 - T/2) \cdot \langle E \rangle}{2 \cdot C_0 \cdot \Psi \cdot \tau_e \cdot T} \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 $t_0 = 2r_0/c$ (r_0 : 送受波器から標的群の中心までの距離)、 $T = 2 \cdot \Delta r/c$ (Δr : 標的群の厚さ)、 Ψ は等価ビーム幅、また魚探システムのゲインを g とすると、 $C_0 = (g \cdot P_t \cdot M_r)^2$ である。(10) 式は、 α の影響を無視し、更に TVG を考慮しない場合に対する標的の分布密度の推定式である。(10) 式の両辺に常用対数の 10 倍を取ると、右辺のその値は平均体積散乱強度 \overline{SV} となり、次の関係が得られる。

$$\overline{SV} = 10 \cdot \text{Log}(\langle \sigma \rangle / 4\pi) + 10 \cdot \text{Log}(\rho) \dots \dots \dots (11)$$

この式が積分方式の資源量推定法における基本式であり、本研究では (11) 式を利用して標的の分布密度 ρ を推定した。

3. 群体エコーの振幅変動特性

多数の標的からの反射波の合成である群体エコーの振幅は、送信パルス毎に不規則に変動する。この変動は、標的群がサンプル体積中に一様ランダムに分布しておれば、Rayleigh 分布に従い、更に、この分布の性質からそのピーク振幅の確率密度関数 $W(R_p)$ は次式で導かれる⁹⁾。

$$W(R_p) = 0.35 \cdot \frac{R_p^{3/2} \cdot \exp(-3R_p^2/4Z)}{Z^{5/4}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+1) \cdot R_p^n}{\Gamma(n/2+7/4) \cdot 2^n \cdot Z^{n/2}} \dots \dots \dots (12)$$

ここで、 R_p は群体エコーのピーク振幅、 Γ は Gamma 関数、 Z は群体エコーの 2 乗積分の時間平均値、即ち \sqrt{Z} はエコー振幅の実効値である。(12) 式の R_p の平均値 $\langle R_p \rangle$ と Z との間には次式が成立する。

$$\langle R_p \rangle = 1.63 \cdot \sqrt{Z} \dots \dots \dots (13)$$

一方、群体エコーの振幅変動が (12) 式から外れる場合、その差を定量的に検討するために、

Rayleigh 分布を一般化した Gamma 分布を導入した。この分布の確率密度関数 $G(R_p; a, b, c)$ は次式で導かれる¹⁰⁾。

$$G(R_p; a, b, c) = \frac{|c| \cdot R_p^{(b \cdot c - 1)} \cdot \exp[-(R_p/a)^c]}{a^{(b \cdot c)} \cdot \Gamma(b)} \dots \dots \dots (14)$$

ここで、パラメータ a, b, c の値は、Stay ら¹⁰⁾ の方法を利用して推定した。(14) 式で、 $a = \sqrt{2Z}$, $b = 1, c = 2$ の場合が Rayleigh 分布である。

材料及び方法

1. 標的の選定

超音波反射体としての魚は、その音響特性が非常に複雑であるため、実際の魚群を対象に積分方式の資源量推定法を定量的に評価するのに、慎重な注意を必要とする。

そこで、本研究では、この点を考慮して魚より音響特性がある程度明らかにされているスチール球 (35 mmφ) をその模擬標的として選定した。

2. 標的群の分布状況

本実験で計測した単位体積当りの標的の分布密度は、5, 10, 15, 20, 25, 30 個/m³ であり、これらの標的群を大型無響水槽 (12 m × 3 m × 3 m) の中央部の 1 m³ の体積空間中に一様ランダムに分布させた。

個々の標的は試作した位置調整台から釣下げ用のテグスによって水中に吊下げられ、またこの調整台を一定角度の間隔で回転させながら分布状況の異なる標的群に対するエコーを計測した。

実験当時 (1986.12-1987.4) の水槽水 (清水) の水温は、6.5°C-10.0°C であった。

3. 計測システム

魚探信号の処理及び解析システムを図 1 に示す。

超音波エコーの計測は、50 kHz と 200 kHz の二周波魚探機 (日本無線製 JFV-216) を使用して行い、また送受波器としては両周波数共に送受兼用の振動子を用いた。これらの送受波器は、水槽の長さ方向における両端のほぼ中央部において、超音波を水平方向に送受するように、鉄パイプの先端に横向けに固定した。

50 kHz と 200 kHz 用の振動子の音圧指向特性を各々図 2 の (A) と (B) に示す。図 2 から得られた -6 dB 点でのビーム幅は、50 kHz で 11°, 200 kHz で 7.5° であった。

また、送受波器の音軸上で 91 mmφ のスチール球によるエコー振幅の距離減衰特性を測定した結果を、50 kHz と 200 kHz に対して各々図 3 の (A) と (B) に示す。この図から 50 kHz と 200 kHz 用の振動子の遠距離音場限界は、各々約 2.5 m と約 2.3 m であると判断される。

魚探信号の定量化は 2 チャンネルの FFT ア

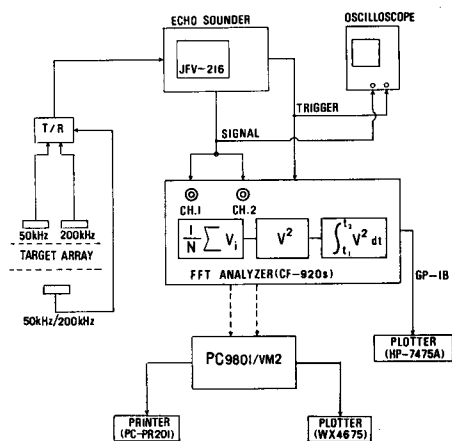


Fig. 1. Block diagram of data acquisition and processing system.

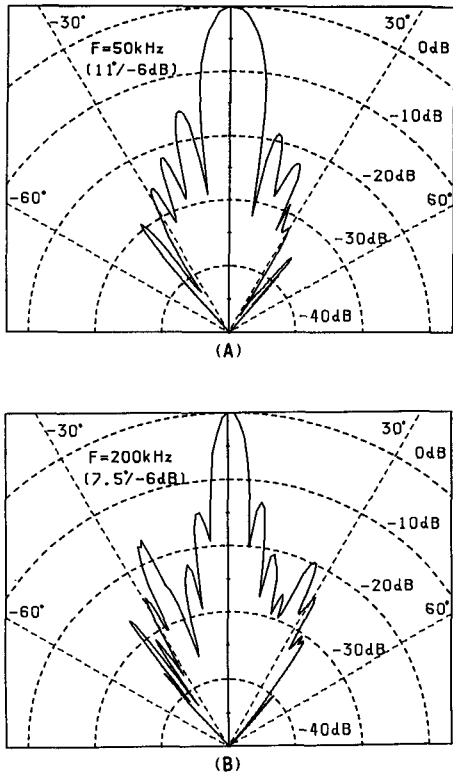


Fig. 2. Directivity patterns of transducers: (A) 50 kHz, (B) 200 kHz.

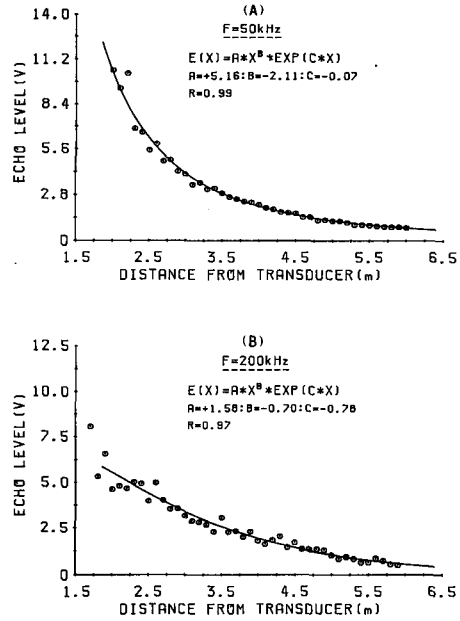


Fig. 3. Echo levels at transmitter/receiver as a function of distance to a 91-mm-diam. steel ball at 50 kHz (A) and 200 kHz (B).

ナライザー（小野測器製 CF-920s）を用いて行った。即ち、魚探の送信トリガパルスと同期して FFT アナライザーへ取り込まれたエコー包絡線信号を内蔵の A/D 変換部で 12 bit の分解能と 51.2 kHz のサンプリング周波数でデジタル化した。ここで、雑音の影響を軽減させるために、16 回の平均処理を行った後、このアナライザーの内蔵機能を利用して、エコーピークの検出やエコーの二乗積分などを行った。

更に、エコーデータをパソコン（日本電気製 PC-9801VM2）で分析し、その結果をプリンター（日本電気製 PC-PR201）或はプロッター（渡辺測器製 WX4675）に出力した。

4. 魚探システムの校正

魚探システムの総合的な校正は、TS 既存のスチール球（50 kHz: 41 mmφ, 200 kHz: 30 mmφ）を用いて行った。これらの標準球と群体標的からのエコーは同時に計測した。

結果及び考察

1. 標的の反射周波数特性

標的の反射周波数特性を図 4 に示す。

縦軸は反射形状関数の絶対値 $|f_0|$ であり、横軸は無次元周波数 ka である。図中の点線と実線

は、各々完全反射球とスチール球に対する $|f_{\infty}|$ の理論値を (3) 式によって求めたものであり、また●印と○印は本研究で魚の模擬標的として導入したスチール球に対する 50 kHz と 200 kHz での $|f_{\infty}|$ の実測値である。更に、■印と□印は 50 kHz と 200 kHz で校正球として用いたスチール球に対するその実測値である。これらの実測値は、各々のスチール球のエネルギー標的強度の実測値を利用して (4) 式から求めた。

スチール球の形状関数 $f_{\infty}(ka)$ の数値計算に利用された各種物理定数は、スチール球に対して、密度 7.7 g/cm³、縦波の音速 5850 m/sec、横波の音速 3230 m/sec であり、清水に対して、密度 1.0 g/cm³、音速 1489 m/sec である。

図 4 から分かるように、各々のスチール球に対する $|f_{\infty}|$ の実測値はその理論値 (実線) とほぼ一致しており、またその ka 値の附近での $|f_{\infty}|$ 値の増減の変化も比較的緩やかである。

この事より、本実験で用いた 3 種類のスチール球は、超音波反射体として十分な精度と安定性を持っていると考えられる。

図 4 でスチール球の反射周波数特性 (実線) は、 ka 値が大きくなることに連れて、極めて強い共振特性を示しているばかりではなく、完全反射球に対するその理論値 (点線) に比べて振幅の変動が激しい。このような反射特性は、標的と周囲媒質との音響特性の相違の程度によって大き

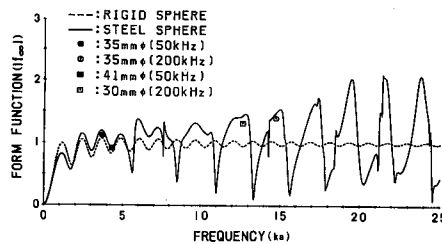


Fig. 4. Theoretical reflection from-function $|f_{\infty}|$ vs ka and experimental points derived from echoes backscattered from steel spheres.

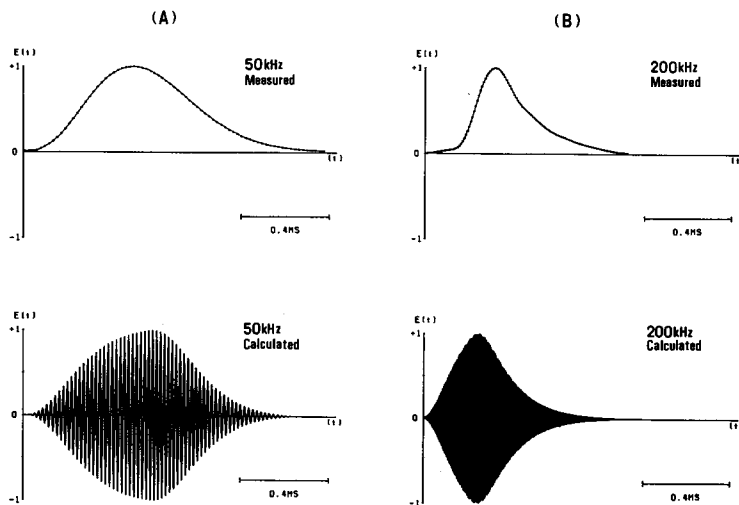


Fig. 5. Comparison of measured and calculated echo waveforms for a 35-mm-diam. steel sphere at 50 kHz (A) and 200 kHz (B).

く変化すると考えられ、また魚のように音響特性が不規則に変化する標的に対してはその定量的な推定が困難であると考えられる。

更に、スチール球を校正球として選定する場合においては、この反射周波数特性を考慮に入れなければならないと考えられる。

一方、標的からの超音波エコーの生成機構を検討するために、模擬標的に対する理論エコー波形を(5)式から推定し、これを実測エコー波形と比較した結果を図5に示す。

実測エコー波形は包絡線波形として示した。理論エコー波形は魚探システムの周波数特性を考慮に入れて推定したもので、実際の計算は4096点のFFTで行った。

50 kHz (図5A) 及び200 kHz (図5B) での実測と理論エコー波形はほぼ一致する傾向を示している。これらのエコー波形の形状は、魚探システムの周波数帯域の範囲内において、標的の反射周波数特性(図4)の変化状態によって左右され、またその帯域内での $|f_{\infty}|$ の成分は標的固有の音響特性としてエコー波形に含まれるということが分かった。

2. 散乱波の相互干渉(多重散乱)の効果

模擬標的として用いた直径35 mmのスチール球からの超音波の散乱パターンを(3)式から求め、その結果を50 kHzと200 kHzの場合に対して、各々図6の(A)と(B)に示す。

散乱パターンは反射形状関数の絶対値 $|f_{\infty}|$ でプロットした。図中の 0° は前方散乱方向を、 180° は後方散乱方向を示す。200 kHzの場合($ka=14.8$)における散乱パターンは、超音波の入射方向である 0° 付近で鋭いピークを持つが、50 kHz($ka=3.7$)ではそれ程のピークを持たず、等方性に近い散乱パターンを示している。また、200 kHzでの前方散乱波の振幅は後方散乱波のそれに比べて非常に大きい。従って、標的の大きさが波長に比べて十分大きい場合、前方散乱の影響は無視できず、むしろこれが重要な役割をすると考えられる。

一般的に、非常に多くの標的による前方散乱波の相互干渉効果を定量的に把握するという事は極めて困難である。

そこで、まず、送受波器の遠距離音場で、二つの模擬標的が音軸を中心に間隔Dで左右対称に位置し(前方標的)、またこれらの標的の後方の音軸上にもう一つの標的(後方標的)が存在している場合に対し、二つの前方標的による散乱波がその後方標的からの超音波散乱に及ぼす影響について検討した。

50 kHzについては、その影響が無視できる程度であったので、200 kHzについての結果のみを図7に示す。

図7で、最上段の図は、二つの前方標的がないときの後方標的からの反射エコーの包絡線波形である。図中の(L1), (U1), (L2), (U2), (L3), (U3), (L4), (U4)は、前方の二つの標的の間隔Dが、各々8 cm, 15 cm, 20 cm, 24 cm, 27 cm, 30 cm, 33 cm, 35 cmであったときの後方標的からの反

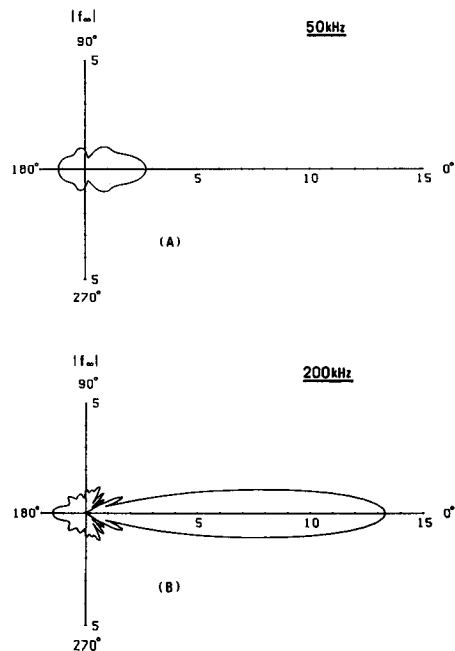


Fig. 6. Polar plots of bistatic-scattering amplitude $|f_{\infty}|$ for a 35-mm-diam. steel sphere at 50 kHz (A) and 200 kHz (B).

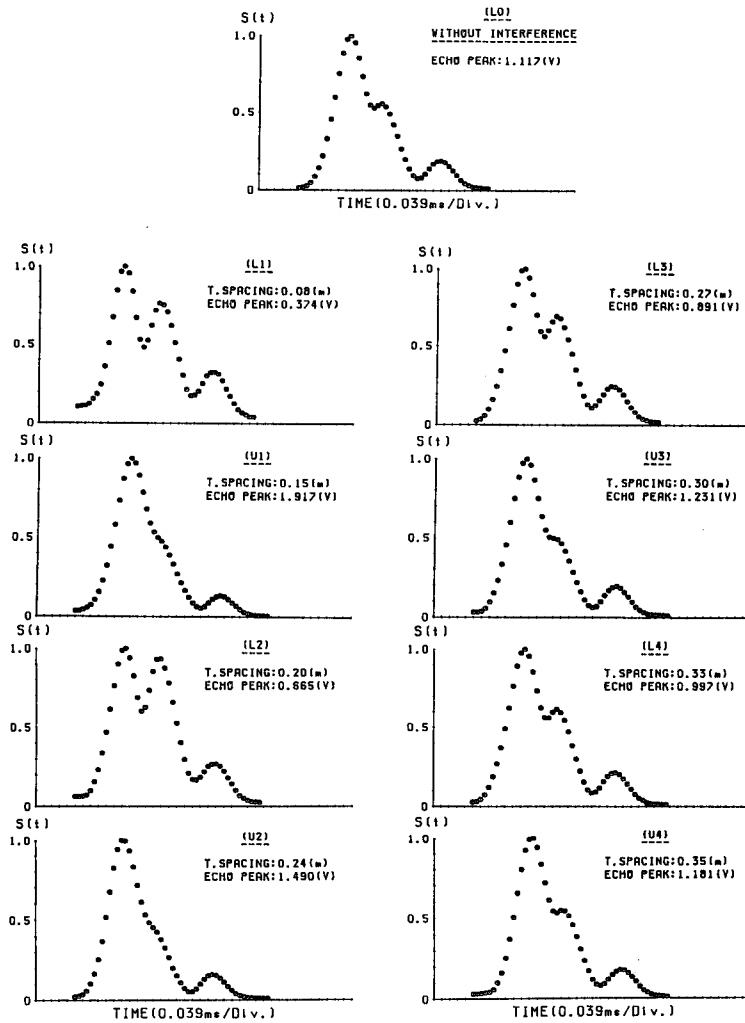


Fig. 7. Measured echo envelopes for the lower target as a function of spacing between the upper targets when a target is positioned in the shadow region behind the two targets which are symmetrically placed in a line perpendicular to the beam axis at 200 kHz: (L0) without upper targets, (L1)-(U4) with upper targets.

射エコーの包絡線波形である。(L1), (L2), (L3), (L4) の反射エコーのピークレベルは、各々0.37 V, 0.67 V, 0.89 V, 0.10 Vで、前方標的がないときのそのピークレベル 1.12 Vより小さくなっているが、(L1) から (L4) へ移行して行くことによって、その値は次第に大きくなる傾向を示している。

これに対し、(U1), (U2), (U3), (U4) でのそのピークレベルは、各々1.92 V, 1.49 V, 1.23 V, 1.18 Vで、前述の場合と正反対の現象を示している。

また、前方の二つの標的の間隔が変化することに連れて、その後方標的からのエコー波形も複雑に変動している。

このように、任意の標的からの散乱波、特に、前方散乱波はその回りの他の標的による超音波散乱に大きな影響を与え、その結果として、他の標的からの反射エコーが激しく変動することが分かる。

更に、送受波器のビーム内で、5個の模擬標的群が音軸上のある点を中心に単位体積空間内に一様ランダムに分布し（前方標的群）、またこの標的群の後方1.9 m (50 kHz) と1.4 m (200 kHz) 距離の音軸上の点を中心に30個の模擬標的群（後方標的群）が同様に分布している場合に対し、前方標的群による散乱波がその後方標的群からの超音波散乱に及ぼす影響について検討した。

その結果を50 kHzと200 kHzの場合について、各々図8の(A)と(B)に示す。

図8は、前方標的群(5個/m³)が存在しないとき、及び存在しているときの後方標的群からの反射エコーのピーク振幅を各々 V_0 及び V_s 、またそのエコーエネルギーを各々 I_0 及び I_s とし、縦軸に $(V_s/V_0)^2$ の値を、横軸に (I_s/I_0) の値を取ったものである。

この図で、 $(V_s/V_0)^2$ と (I_s/I_0) の平均値は、50 kHzで各々0.905と0.913であり、200 kHzでは各々0.905と0.952であった。いずれの場合にもそれらの値は、1よりも小さい。

このことから、5個/m³の前方標的群の存在は、30個/m³の後方標的群による超音波散乱に陰効果(Shadowing Effect)を誘発させる要因となっていることが分かる。

また、 $(V_s/V_0)^2$ と (I_s/I_0) の値の変動は、50 kHzのほうに比べて200 kHzのほうで激しい。即ち、超音波の入射方向に散乱される前方散乱波が強い程(図6)、標的群を構成する個々の標的からの散乱波の相互干渉の影響が大きくなるため、群体エコーが激しく変動するものと考えられる。

3. 群体エコーの振幅変動特性

群体エコーのピーク振幅の頻度分布を、50 kHzと200 kHzに対し、各々図9と10に示す。

両図で、縦軸は頻度(%)であり、横軸は群体エコーのピーク振幅を校正球からの反射エコーの

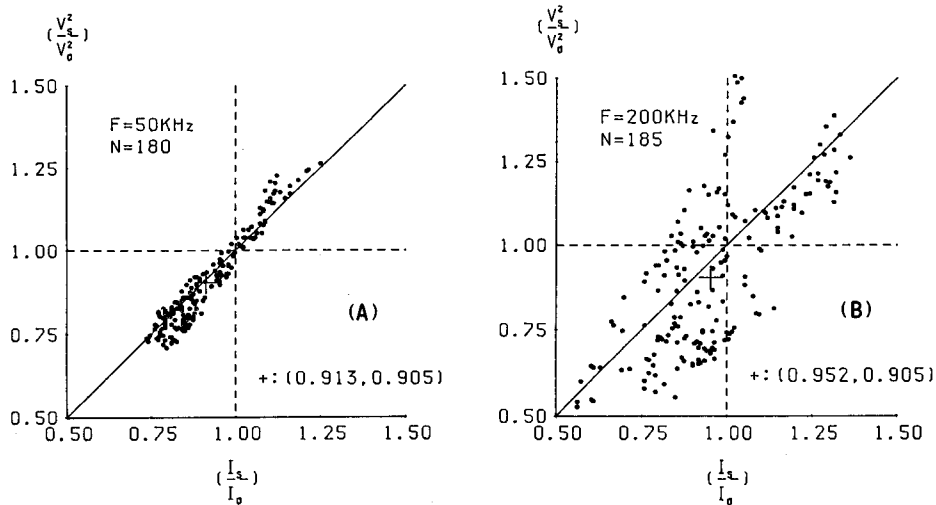


Fig. 8. Fluctuations in backscattered echoes from the lower targets caused by changing the positions of the upper targets when a collection of 30 targets/m³ lie in the shadow region behind another collection of 5 targets/m³: (A) 50 kHz, (B) 200 kHz. The $(V_s/V_0)^2$ indicates the square of the ratio of the echo peak values and the (I_s/I_0) , the ratio of the echo energy values.

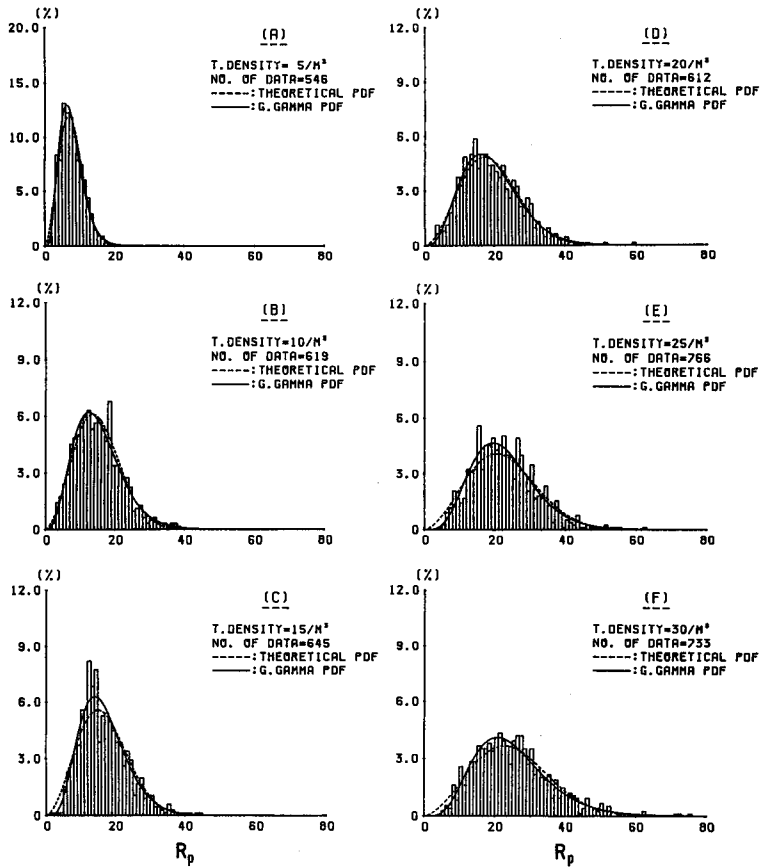


Fig. 9. Measured echo peak PDFs superimposed with the theoretical PDF and the generalized Gamma PDF at 50 kHz.

ピーク振幅として規準化した値 (R_p) である。

図9と10での(A), (B), (C), (D), (E), (F)は、各々模擬標的の分布密度が5, 10, 15, 20, 25, 30個/ m^3 の場合に対する結果を示す。図中の点線は、(12)式による理論分布曲線を、実線は(14)式による一般化Gamma分布曲線を示す。各々の頻度分布に対するエコーデータの数も図中に併記した。

5個/ m^3 から30個/ m^3 までの各々の分布密度に対する実測頻度分布は、50kHzの場合(図9)、その理論分布曲線にほぼ近似しているが、200kHz(図10)の場合では若干の差が見られる。

また、一般化Gamma分布曲線は、両周波数で、理論分布曲線に比べて実測頻度分布によく近似していることが分かる。

更に、これらの図で、もっとも重要な現象は、標的の分布密度が増加することに連れて、群体エコーの振幅変動がRayleigh分布から次第に正規分布へ移行して行くということである。即ち、単位体積空間内に分布する標的の数が大きいく程、群体エコーの振幅は正規分布に近い変動特性を示す。

この現象が雑音理論で中心極限定理として知られているものである。

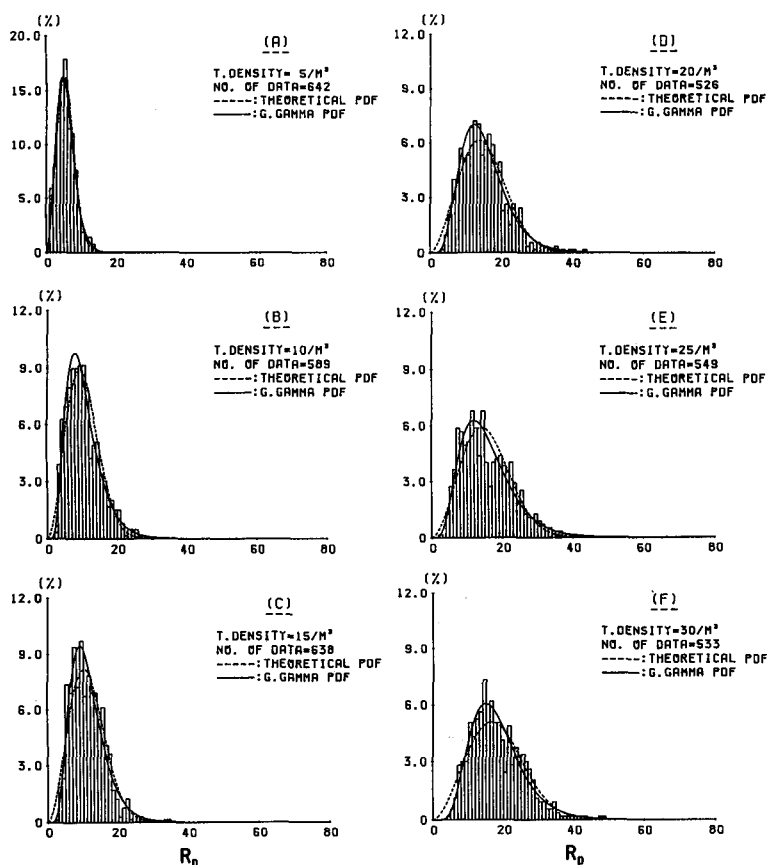


Fig. 10. Measured echo peak PDFs superimposed with the theoretical PDF and the generalized Gamma PDF at 200 kHz.

積分方式の基礎となる体積残響理論では、サンプル体積中に非常に多くの標的が存在することを仮定しているため、この理論を満足させる標的群の場合、その群体エコーの振幅は中心極限定理により正規分布に従って変動するであろうと予想され、また図9と図10の結果はこの理論的な裏付けを示しているものと考えられる。

群体エコーのピーク振幅とその実効振幅との関係を、50 kHzと200 kHzに対し、各々図11の(A)と(B)に示す。

縦軸はエコーのピーク振幅であり、横軸はエコーエネルギーから求めた実効振幅である。図中の点線は(13)式による理論予測値であり、●印は実測値である。更に、実線は実測値による回帰直線を示す。

回帰直線の傾きは、50 kHzで2.06であり、200 kHzでは2.86であった。これらの値は、理論予測値の傾き1.63に比べて若干大きい。このような差は、実際の標的群による超音波散乱現象が理論モデルと完全に対応していないため生じたものであると考えられるが、その原因機構については今後検討すべき課題の一つである。

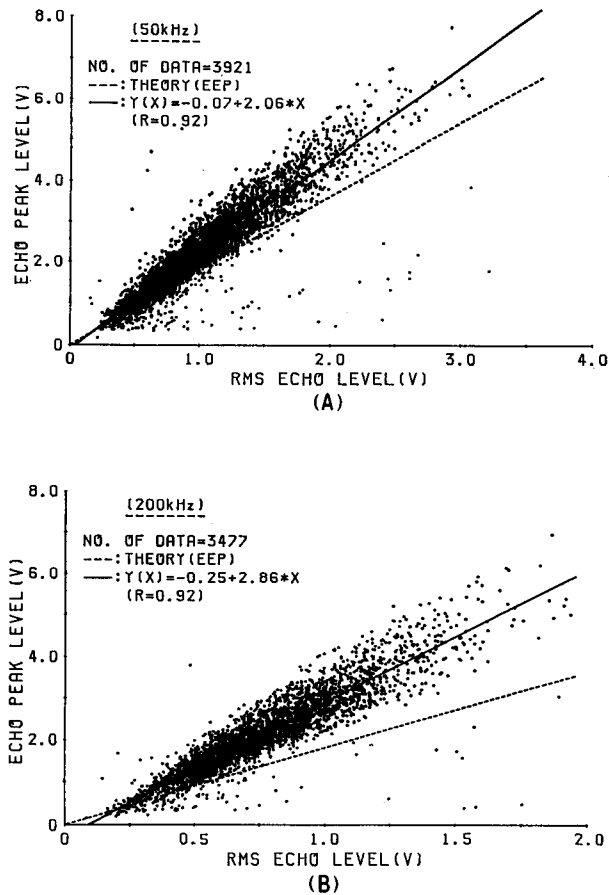


Fig. 11. The relationship between echo peak level and rms echo level of echoes backscattered from arrays of targets at 50 kHz (A) and 200 kHz (B).

4. 標的の分布密度推定

群体エコーのエネルギーから求めた平均体積散乱強度と標的の分布密度との関係を、50 kHz と 200 kHz に対し、各々図 12 の (A) と (B) に示す。

縦軸は後方体積散乱強度の平均値 (\overline{SV}) であり、横軸は単位体積当りの標的の分布密度 (ρ) である。図中の点線は (11) 式による理論予測値であり、○印は実測 \overline{SV} 値である。更に、実線は実測 \overline{SV} 値による回帰直線である。

図 12 の両周波数での実測 \overline{SV} 値は、分布密度が大きくなることに連れて、直線的に増加する傾向を示しており、またその回帰直線は、50 kHz で $\overline{SV} \text{ (dB)} = -46.2 + 13.7 \cdot \text{Log}(\rho)$ 、200 kHz では $\overline{SV} \text{ (dB)} = -43.9 + 13.4 \cdot \text{Log}(\rho)$ であった。

これらの回帰直線の傾きは、理論予測値のそれに比べて若干大きい。また、実測 \overline{SV} 値は、50 kHz と 200 kHz 共に、標的の分布密度が大きくなるに連れて、次第に理論予測値に近づいて行く傾向を示した。

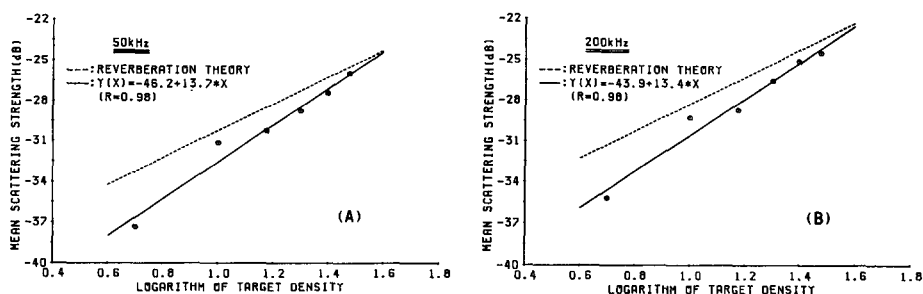


Fig. 12. Comparison of measured and theoretical values of mean volume backscattering strength as a function of the logarithm of target density at 50 kHz (A) and 200 kHz (B).

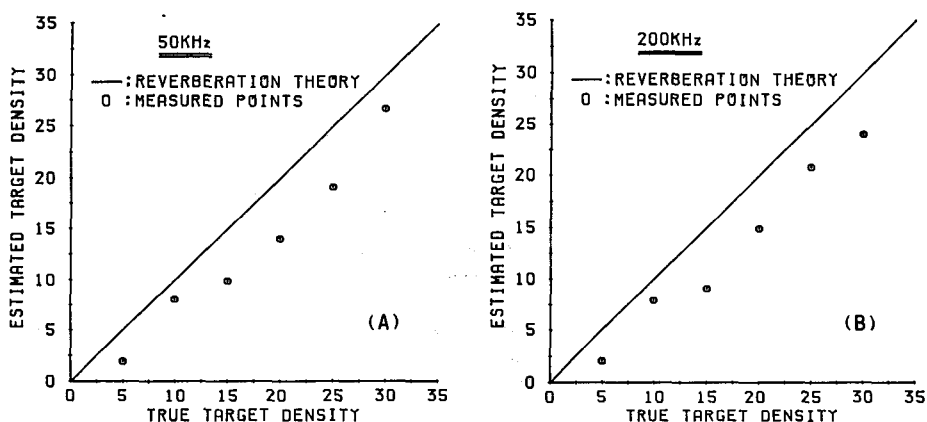


Fig. 13. Comparison of estimated and actual target densities at 50 kHz (A) and 200 kHz (B).

一方、実際の標的の分布密度と積分方式によって推定された分布密度との関係を 50 kHz と 200 kHz に対し、各々図 13 の (A) と (B) に示す。

縦軸は推定された分布密度 (個/m³) であり、横軸は実際の分布密度 (個/m³) である。図中の実線は理論予測値であり、○印は推定値である。

実際の分布密度 5, 10, 15, 20, 25, 30 個/m³ に対する推定値は、50 kHz で各々 1.9, 8.1, 9.9, 14.1, 19.2, 26.7 個/m³ であり、200 kHz では各々 2.0, 8.0, 9.1, 15.0, 20.1, 24.1 個/m³ であった。

要 約

積分方式の資源量推定法を検討するための試みとして、大型無響水槽で模擬魚群を対象に、50 kHz と 200 kHz で、基礎実験を行った。その結果は次のように要約される。

1. 模擬標的として用いたスチール球に対する $|f_0|$ の実測値は理論値とはほぼ一致し、またその実測エコー波形は計算エコー波形によく近似した。
2. 他の標的群の陰の中に存在する標的群からの反射エコーは、50 kHz に比べて 200 kHz でその変動が大きかったが、平均的には両周波数共に約 -0.43 dB の Shadowing Effect が観測された。
3. 群体エコーの実測頻度分布は、理論分布に比べて一般化 Gamma 分布によく近似し、また標

的の分布密度が増加することに連れて、Rayleigh 分布から次第に正規分布へ移行して行く傾向を示した。

4. 実測された平均 SV 値と標的の平均分布密度 (ρ) との間には、次の関係が得られた。

$$50 \text{ kHz} : \overline{SV} \text{ (dB)} = -46.2 + 13.7 \cdot \text{Log}(\rho), \quad r=0.98$$

$$200 \text{ kHz} : \overline{SV} \text{ (dB)} = -43.9 + 13.4 \cdot \text{Log}(\rho), \quad r=0.98$$

5. 実際の標的の分布密度と積分方式によって推定された分布密度との差は、単位体積当りの標的の数が大きいほど、小さかった。

これらの結果から、魚の分布密度がある程度高い場合において、積分方式による資源量推定法の信頼度は期待できると推察される。

本研究を進めるに当たって、種々有益な御助言を頂いた漁業測器学講座佐野典達助教授、並びに飯田浩二助手に深甚の謝意を表します。

文 献

1. 佐野典達・谷野保夫 (1985). 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 34, 220-230.
2. 水産庁研究部 (1986). 昭和 59 年度漁業資源評価システム高度化調査結果報告書. 393 P.
3. Lozow, J.B. and Suomala, J.B. (1971). The application of hydroacoustical methods for aquatic biomass measurements. *Charles Stark Draper Laboratory Rep.* R-712, 92 P.
4. Foote, K.G. (1983). Linearity of fisheries acoustics, with addition theorems. *J. Acoust. Soc. Am.* 73, 1932-1940.
5. Ehrenberg, J.E. (1974). Recursive algorithm for estimating the spatial density of acoustic point scatterers. *J. Acoust. Soc. Am.* 56, 542-547.
6. Faran, J.J., Jr. (1951). Sound scattering by solid cylinders and spheres. *J. Acoust. Soc. Am.* 23, 405-418.
7. MacLennan, D.M. (1981). The theory of solid spheres as sonar targets. *Scottish Fisheries Research Report* 22, 1-17.
8. Ziomek, L.J. (1985). Underwater acoustics. A linear system theory approach. 290 p. Academic Press, Inc., New York.
9. Rice, S.O. (1954). Mathematical analysis of random noise. Selected papers on "Noise and stochastic processes". 133-294, Dover Publication, Inc., New York.
10. Stay, E.W. and Mihram, G.A. (1965). Parameter estimation for a generalized Gamma distribution. *Technometrics* 7, 349-358.