



|                  |   |
|------------------|---|
| Title            | シミュレーションによる魚群の超音波散乱特性に関する基礎的研究  |
| 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(4), 366-374   |
| Issue Date       | 1987-11   |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/23972">https://hdl.handle.net/2115/23972</a> |
| Type             | departmental bulletin paper   |
| File Information | 38(4)_P366-374.pdf  |



## シミュレーションによる魚群の超音波散乱特性に関する基礎的研究

李 昊在\*・鈴木恒由\*

### Basic Studies on Acoustic Scattering Characteristics of Fish Schools by Computer Simulation

Dae-Jae LEE\* and Tsuneyoshi SUZUKI\*

#### Abstract

This paper describes a computer simulation of an experiment recently carried out by the authors as an attempt to test the validity of the echo integration method for determining fish density.

In this simulation, a fish aggregation was modeled as a collection of point scatterers that are uniformly and randomly distributed in space. Also, it was assumed that the fishes have random reflecting strengths and random phases. The simulated fish-school echoes were generated by summing the echoes from each fish and were then processed to estimate the fish density.

In addition, attempts were also made to investigate the effects of multiple scattering in the case of high-density fish schools.

Although the experimental results of model fish schools in a water tank did not show the theoretical linear relationship between echo energy and number density of fish, the results obtained from the simulated fish-school echoes suggest that there is no reason to doubt the validity of the echo integration method on theoretical grounds.

However, it was noted that multiple scattering and shadowing effects were observed during surveys on sardine and mackerel schools in a set-net's bagnet with a 50 kHz echo sounder.

Therefore, we conclude that the assumptions made in the first-order scattering theory will not always be valid in the acoustic estimation of fish abundance.

#### 結 言

近年、魚群探知機を用いた資源量推定技術の進歩は目ざましいが、いまだに精度や実用化の面では問題点が多い。

著者らは、先に模擬魚群とケージ魚群を対象に、魚の分布密度と超音波散乱強度との関係を水槽実験と現場実験を通して分析・考察した<sup>1,2)</sup>。

本研究では、まず、前報<sup>1)</sup>の水槽実験状況を数値モデルとして再現し、モンテカルロ法を用いて魚群エコーの計算機シミュレーションを行った。さらに、シミュレートした魚群エコーから得られた超音波散乱強度と魚群密度の関係を検討することによって、計量魚探で用いられている積分方式による資源量推定法の検証を試みた。次に、高密度魚群からの魚探記録で、魚群の下の海底エコーが消えたり、あるいは魚群エコーが海底エコーより深いところまで延びたりする現象を究

\* 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)

明するために、魚群中における超音波伝搬特性を計算機シミュレーションによって分析・検討した。

方 法

本研究では、前報<sup>1)</sup>で報告した水槽実験の条件及び状況をそのまま再現し、モンテカルロ法により魚群エコーをシミュレートした。その魚群エコーから魚の分布密度を推定するまでの手順を図1に示す。まず、初期条件（周波数、送受波器の直径、平均標的強度（ $\langle TS \rangle$ ）と標準偏差、魚の平均密度、魚探システム常数、送波パルスの波形関数など）を与え、サンプル体積中に分布させる魚の数をポアソン乱数で決める。ここで、魚群は1個とする。次に、各々の魚の空間座標と  $TS$  をそれぞれ一様乱数と正規乱数を用いて変化させ、また初期位相角を  $[0 \sim 2\pi]$  の区間で一様乱数で変化させた後、送受波器から各個体魚までの距離と音軸に対する魚の方位角を計算し、次式を用いて個体魚からのエコーの受波器出力の瞬時値  $y_i(t)$  を求める<sup>3)</sup>。

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

ここで、 $K_i$  は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、 $\omega_0$  は送信角周波数、 $\phi_i$  は反射波の位相角、添字  $i$  は  $i$  番目の標的を表し、 $\text{Re}$  は実数部を示す。(1) 式の  $K_i$  は、ソナー方程式から求めた<sup>1)</sup>。

さらに、このようにして得られたサンプル体積中に分布している全ての個体魚からの反射エコーを、次式を用いて合成することによって魚群エコーの受波器出力電圧  $V(t)$  をシミュレートした。

$$V(t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) \dots \dots \dots (2)$$

各送波毎の魚群エコーのエネルギー ( $E$ ) は、(2) 式によって得られた合成エコー波形の包絡線を求め、これをサンプル体積区間に対して二乗積分して算出した。魚の平均分布密度  $\rho$  は、全ての送信パルスに対するエネルギーデータを集合平均して平均エコーエネルギー  $\langle E \rangle$  を求め、これを用いて次式から推定した<sup>1)</sup>。

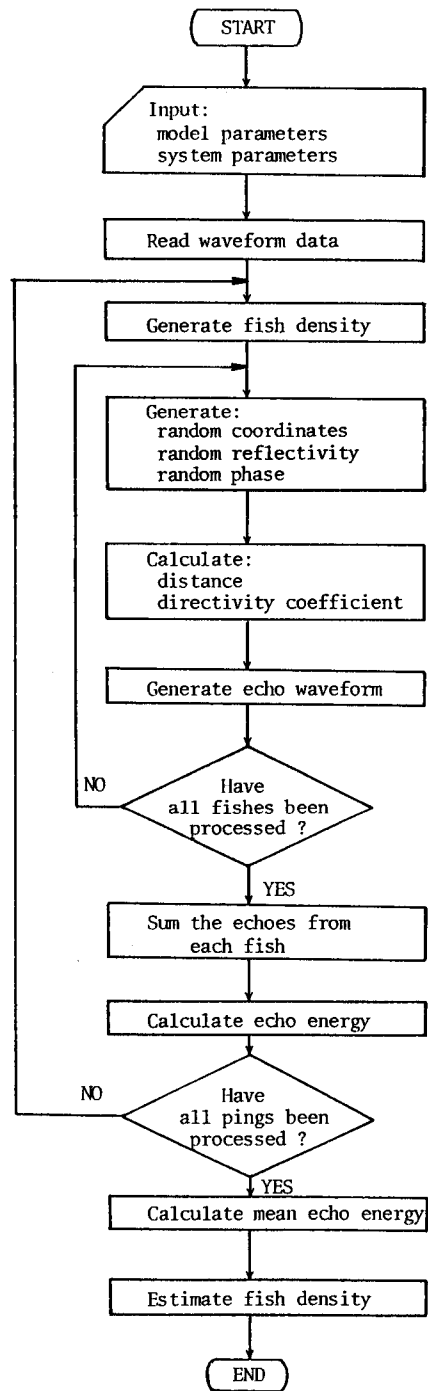


Fig. 1. Flow chart of computer simulation of fish-school echoes.

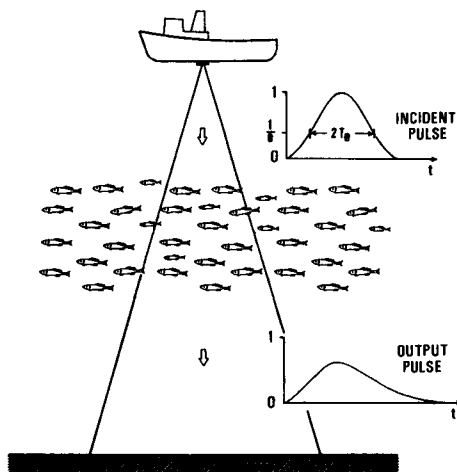


Fig. 2. Distortion of a pulse wave which is propagated through a fish school.

$$\rho = \frac{c \cdot (t_0 + T/2) \cdot (t_0 - T/2) \cdot \langle E \rangle}{\langle \sigma \rangle / 4\pi \cdot 2 \cdot C_0 \cdot \Psi \cdot \tau_e \cdot T} \quad \dots(3)$$

ここで、 $c$  は水中音速、 $t_0 = 2r_0/c$  ( $r_0$ : 送受波器から魚群層の中心までの距離)、 $T = 2L/c$  ( $L$ : 魚群の厚さ)、 $\Psi$  は等価ビーム幅、 $\tau_e$  は等価パルス幅、 $\langle \sigma \rangle$  は魚の平均散乱断面積、また  $C_0$  は魚探システムの常数で、システムのゲインを  $g$ 、送波音圧振幅の実効値を  $P_t$ 、受波器の受信感度を  $M_r$  とすると、 $C_0 = (g \cdot P_t \cdot M_r)^2$  である。

(3) 式は一次散乱理論に基づいた近似式で、魚群を構成する各々の魚からの散乱音波が、その周辺に分布する他の魚の超音波散乱に影響を及ぼさない場合、即ち多重散乱による効果を無視できると見なせる場合にのみ有効である。しかし、魚の密度が大きくなると、魚の相互間に多重散乱が誘発されるため、(3) 式が適用できなくなると考えられる。

本研究では、高密度魚群における多重散乱効果を検討するために、魚群中を伝搬する送波パルスの減衰とその波形変化の特性をシミュレーションによって分析・考察する。

一方、Ishimaru ら<sup>4)</sup>は、二周波相関関数を用いて、散乱体がランダムに分布している散乱層において、パルス波の伝搬特性を理論的に解析した。

ここでは、Ishimaru らの理論を基にして、高密度魚群における多重散乱効果を検討する。即ち、図2に示すように、パルス幅  $2T_e$  をもつガウス型の送波パルス  $x(t)$  は次式で表され、

$$x(t) = \text{Re} \{ \exp(-t^2/T_e^2) \cdot \exp(-j\omega_0 t) \} \quad \dots\dots\dots(4)$$

このパルス波が、多数の魚がランダムに分布している魚群層に入射した時、魚群中を伝搬した透過パルス信号  $z(t)$  は、次式で表される。

$$z(t) = (1/2\pi) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \cdot H(\omega) \cdot \exp(j\omega t) d\omega \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 $X(\omega)$  は  $x(t)$  のフーリエ変換、 $H(\omega)$  は魚群による音響散乱の周波数特性である。

本研究では、 $z(t)$  の包絡線波形の解析を目的としているため、(5) 式中の  $X(\omega)$  を、 $x(t)$  の複素包絡線  $e(t)$  のフーリエ変換  $E(\omega)$  に対置すると、 $z(t)$  の複素包絡線  $u(t)$  は、

$$u(t) = (1/2\pi) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} E(\omega) \cdot H(\omega) \cdot \exp(j\omega t) d\omega \quad \dots\dots\dots(6)$$

となる。従って、 $u(t)$  の平均強度  $\langle |u(t)|^2 \rangle$  は、二次元フーリエ変換によって、

$$\langle |u(t)|^2 \rangle = (1/2\pi)^2 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [E(\omega_1) \cdot E^*(\omega_2)] \cdot \Gamma_0 \cdot \exp[-j \cdot (\omega_1 - \omega_2) \cdot t] d\omega_1 d\omega_2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

で表せる<sup>4)</sup>。この式で、 $\Gamma_0$  は、 $E(\omega)$  の帯域幅の範囲内において、ある二つの角周波数を  $\omega_1, \omega_2$  とする時、 $\omega_0 + \omega_1$  と  $\omega_0 + \omega_2$  の二つの角周波数に対する魚群からの散乱振幅の相関を表す、いわゆる二周波相関関数である。即ち、(7) 式から、魚群層を伝播した透過パルス信号の包絡線波形は、魚探機の送信周波数だけではなく、送信パルスの包絡線に含まれた周波数成分によっても、影響

を受けるといことが分かる。

また、 $e(t)$  のフーリエ変換  $E(\omega)$  は、

$$E(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-t^2/T_e^2) \cdot \exp(-j\omega t) dt \\ = \sqrt{\pi} \cdot T_e \cdot \exp[-(T_e^2/4) \cdot \omega^2] \dots\dots\dots(8)$$

となり、(7) 式中の  $[E(\omega_1) \cdot E^*(\omega_2)]$  は、次式で表せる。

$$E(\omega_1) \cdot E^*(\omega_2) = \pi \cdot T_e^2 \cdot \exp[-(T_e^2/2)[\omega_c^2 + (\omega_d^2/4)]] \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 $\omega_c = (\omega_1 + \omega_2)/2$ 、 $\omega_d = \omega_1 - \omega_2$  である。

一方、(7) 式中の二周波相関関数  $\Gamma_0$  は、

$$\Gamma_0 = A(\omega_d) \cdot \exp[j \cdot \omega_d \cdot (L/c) + j \cdot \phi(\omega_d)] \dots\dots\dots(10)$$

で表され、この式中の  $A(\omega_d)$  と  $\phi(\omega_d)$  はそれぞれ二周波相関関数の振幅と位相角で、次式で与えられる。

$$A(\omega_d) = \exp\{-\rho \cdot \sigma_t \cdot L \cdot [1 - (W_0/x) \cdot \tan^{-1}x]\} \dots\dots\dots(11)$$

$$\phi(\omega_d) = (\rho \cdot \sigma_t \cdot L/2) \cdot [(W_0/x) \cdot \ln(1+x^2)] \dots\dots\dots(12)$$

ここで、 $\sigma_t$  は個体魚の全散乱断面積で、魚の吸収及び散乱断面積をそれぞれ  $\sigma_a$ 、 $\sigma_s$  とすると、 $\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$  で表され、 $W_0$  は一次散乱のアルベドと呼ばれるパラメーターで、 $W_0 = \sigma_s/\sigma_t$ 、また波長を  $\lambda$  とすると、 $x = \{(\omega_d \cdot L \cdot \pi \cdot \lambda^2)/(10 \cdot \sigma_t \cdot c)\}$  である。

従って、(7) 式に (9) 式と (10) 式を代入し、実数部を取ると、

$$\langle |u(t)|^2 \rangle = [T_e/\sqrt{2\pi}] \cdot \int_0^\infty \exp[-(T_e^2/8) \cdot \omega_d^2] \cdot A(\omega_d) \cdot \cos[\omega_d t_e - \phi(\omega_d)] d\omega_d \\ \dots\dots\dots(13)$$

となる<sup>5)</sup>。

ここで、 $t_e$  は送波パルスの受信時間で、 $t_e = t - L/c$  である。

本研究では、送信周波数とパルス幅をそれぞれ 50 kHz、0.5 ms とし、石井ら<sup>6)</sup>がタイ 3 年魚を対象にして得た魚群減衰係数 ( $\alpha_f = 0.49$  dB/m) を用いて (11) 式と (12) 式中の  $W_0$  を推定した。その結果、 $W_0$  値は約 0.1 であった。この値を用いて (13) 式を数値積分し、魚群中を伝搬した透過パルスの減衰と波形変化の様子を魚の分布密度と魚群層の厚さについて分析・考察することによって、高密度魚群における多重散乱効果を検討する。

### 結果及び考察

数値計算された魚群エコーの一例を図 3 に示す。

この図で、縦軸は正規化されたエコーレベルであり、横軸は時間である。魚群エコー信号 ( $E(t)$ ) は、各送波毎に魚の分布状況の変化に応じて、不規則的に変動していることが分かる。また 50 kHz に比べて 200 kHz では、その変動が顕著である。

一般に、積分方式による魚群量推定法では、魚群エコーエネルギーの変動を抑えるために、干渉成分が無視できる程度に、多数の魚群エコーを集合平均して平均エコーエネルギー ( $\langle E \rangle$ ) を求めている。

図 4 は魚群エコーの集合平均回数、即ち送信パルスの数と平均エコーエネルギーとの関係を表したものである。それぞれ 50 kHz と 200 kHz における魚の密度が 30 尾/m<sup>3</sup> の場合の計算結果で

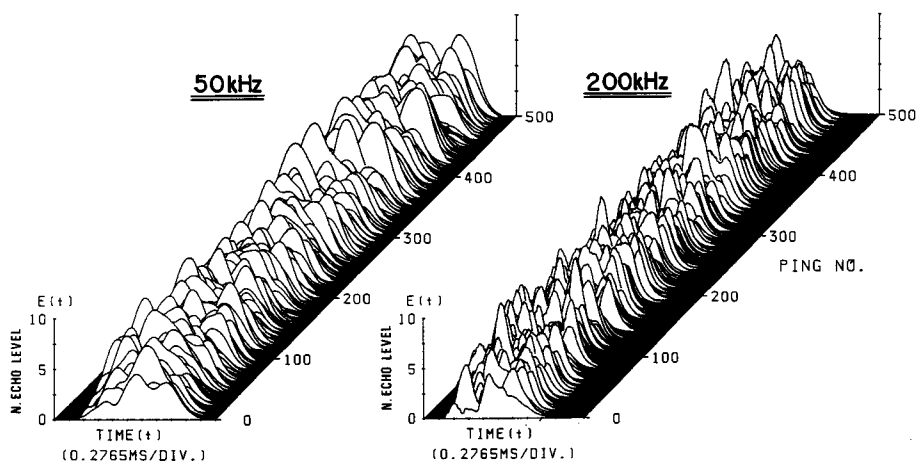


Fig. 3. Three-dimensional plots of the simulated fish-school echoes.

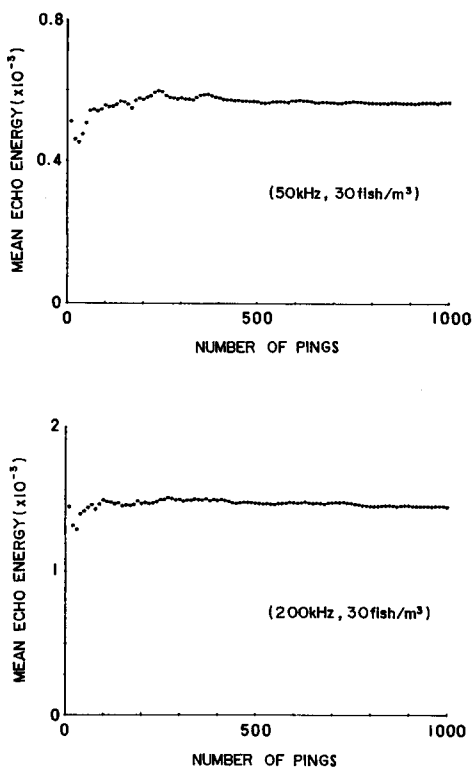


Fig. 4. The relationship between mean echo energy and number of pings.

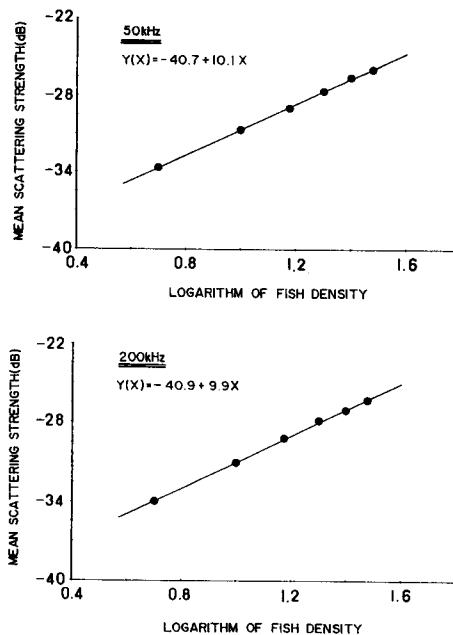


Fig. 5. The relationship between mean volume backscattering strength and fish density

ある。図から両周波数とも魚群エコーの集合平均回数が少ないほど、平均エネルギーは不安定であり、50 kHz では約 400 波、200 kHz では約 250 波以上の魚群エコーを集合平均すると平均エネルギーが安定することが分かる。

シミュレートした魚群エコーから求めた平均体積散乱強度 ( $\langle SV \rangle$ ) と単位体積当りの魚の分布密度 ( $\rho$ ) との関係を図 5 に示す。縦軸は平均体積散乱強度、横軸は魚の分布密度の対数值 ( $\text{Log}(\rho)$ ) である。図中の実線は平均  $SV$  値 (●印) による回帰直線である。図 5 の両周波数での平均  $SV$  値は魚群密度が大きくなるに連れて、直線的に増加しており、また次式の回帰直線式が得られた。

$$50 \text{ kHz} : \langle SV \rangle_{\text{dB}} = -40.7 + 10.1 \cdot \text{Log}(\rho)$$

$$200 \text{ kHz} : \langle SV \rangle_{\text{dB}} = -40.9 + 9.9 \cdot \text{Log}(\rho)$$

一方、魚の平均  $TS$  を  $\langle TS \rangle$  とすると、 $\langle SV \rangle$  と  $\rho$  との間には、(3) 式によって次式の関係が成立する。

$$\langle SV \rangle_{\text{dB}} = \langle TS \rangle + 10 \cdot \text{Log}(\rho) \dots\dots\dots(14)$$

図 5 の両周波数に対し回帰直線の傾きは、(14) 式の理論予測値とはほぼ一致しており、またその定数項  $-40.7 \text{ dB}$  (50 kHz) と  $-40.9 \text{ dB}$  (200 kHz) も本シミュレーションで初期値として与えた魚の平均  $TS$  ( $-41.16 \text{ dB}$ ) とほぼ一致している。

次に、シミュレートした魚群エコーの平均エネルギーを用いて (3) 式から推定した魚群密度と実際の魚群密度、さらに前報の水槽実験で推定した密度を相互比較した結果を図 6 に示す。縦軸は推定密度であり、横軸は実際の密度である。図中の●印はシミュレーションによる結果、□印は水槽実験による結果で、実線は理論予測値である。この図から、シミュレーションによる魚群密度の推定値は理論予測値とはほぼ一致しているにもかかわらず、水槽実験における分布密度の推定値と理論予測値との間には、50 kHz で平均 29.5%、200 kHz で平均 30.5% の差が見られた。この原因については、今後検討すべき課題であるが、積分方式の基礎となる一次散乱理論で仮定した前提条件、即ち魚を等方性散乱体として取り扱っている点や散乱音波の相互干渉効果を無視し

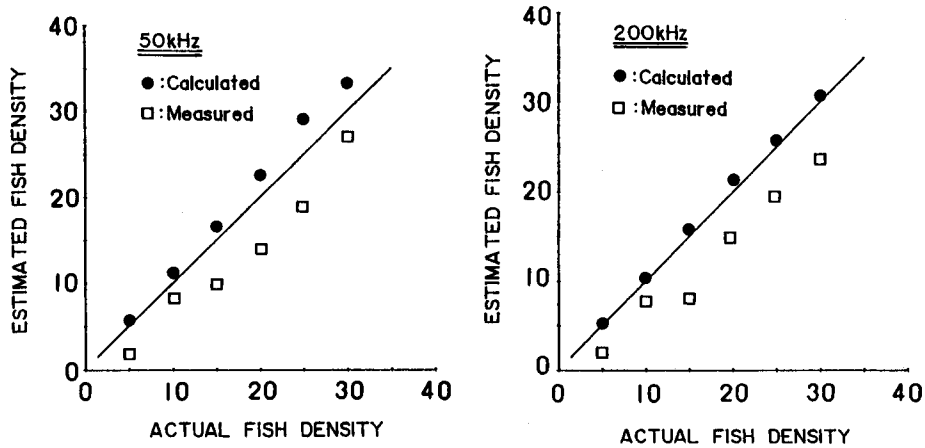


Fig. 6. Comparison of estimated and actual fish densities.  
●: Densities obtained by computer simulation, □: Densities derived experimentally by the use of model fish schools in a water tank.

ている点などは、魚群密度の推定精度を向上させるために、検討しなければならない問題点であろう。

このような観点から、本研究では、いくつかの高密度魚群から得られた魚探記録を分析し、また数値計算を通して、多重散乱効果を検討した。

実際例として、北海道臼尻の沿岸に設置された定置網の箱網に、50 kHz の遠隔式魚群探知機 (古野電気製, TS-12MARK-III) を設備し、入網した魚群から得られた魚探記録を図 7 に示す。図 7 の (A) は 1984 年 9 月 21 日のサバの魚探記録例で、その時の漁獲量はサケ 61 尾とサバ 75 トンであった。また図 7 の (B) は、1984 年 10 月 29 日のイワシの魚探記録例で、その時の漁獲量は 57 トン、(C) の場合は 1986 年 11 月 19 日のもので、その時の漁獲量はイワシ 110 トンであった。これらの記録から分かるように、(A) と (B) では魚群の下の海底記録が部分的に消えており、(C) では魚群エコーが海底エコーより深いところまで延びている。これらの二つの現象は魚群による送波パルスの減衰、いわゆる Shadowing Effect と魚群中における超音波の多重散乱による影響であると考えられる。

これらの散乱機構を理論的に考察するため、(13) 式を用いて、魚探機の送受波器から送波されたパルス波が魚群中を伝搬する際に生ずる送波パルスの減衰 (魚群減衰) 特性 (図 8) と波形変化の特性 (図 9) を数値計算した。

図 8 に魚群減衰を、魚の密度と魚群の厚さを変数として示す。この図の縦軸は魚群減衰 (dB)、横軸は魚の密度 (尾/m<sup>3</sup>) である。図 8 には、石井らによる実験結果も参考的に付記した<sup>9)</sup>。

図 9 には魚群層を伝搬した透過パルスの包絡線波形の変化を、魚の密度と魚群の厚さを変数として示す。この図の縦軸は正規化した送波パルスの強度、横軸は正規化した送波パルスの受信時

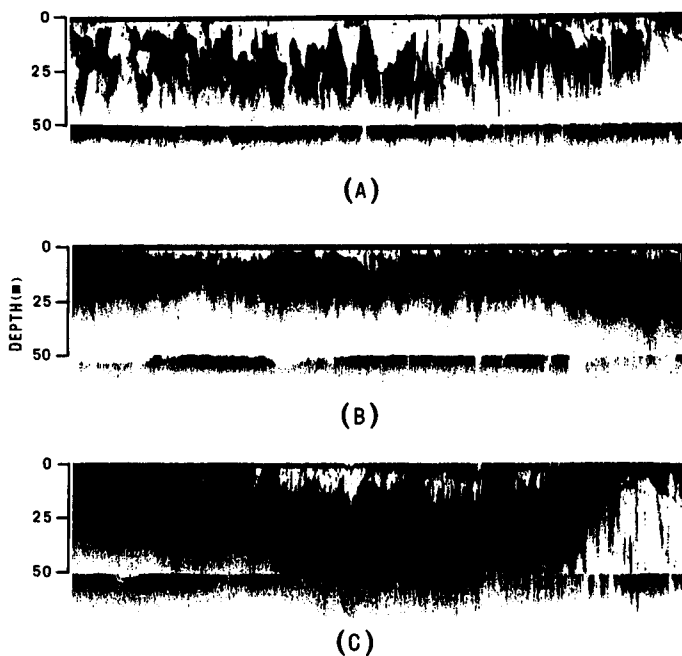


Fig. 7. Echograms of mackerel (A) and sardine (B, C) schools obtained by a 50 kHz echo sounder in a set-net's bagnet.

間である。

両図で、魚の分布密度が高いほど、また魚群層の厚さが増加するほど、魚群中を伝搬する送波パルスの強度は指数関数的に減少し、さらに透過パルスの波形が著しく変形していることが分かる。即ち、魚群層が薄い場合、魚群密度が高くなっても、透過パルスの波形にほとんど変化はないが、魚群層が厚くなると、パルスの立ち下りの部分が延びると同時に、立ち上がりの開始時間が次第に遅れる。

図7の魚探記録に見られる多重散乱現象は、図8と図9のシミュレーション結果から、送信ビーム内に分布している魚の相互間に数多くの散乱が誘起されて、魚による吸収・散乱過程が繰り返された結果、魚群中を伝搬する送波パルスの強度が次第に減衰すると同時に、送波パルス幅の増加とパルスの受信時間の遅れ等が生じたため、海底エコーが消えたり、また魚群エコーが海底の下まで延びたものと考えられる。

積分方式による魚群量推定の精度を向上させるためには、さらにこれらの点に関する定量的な検討が必要であろう。

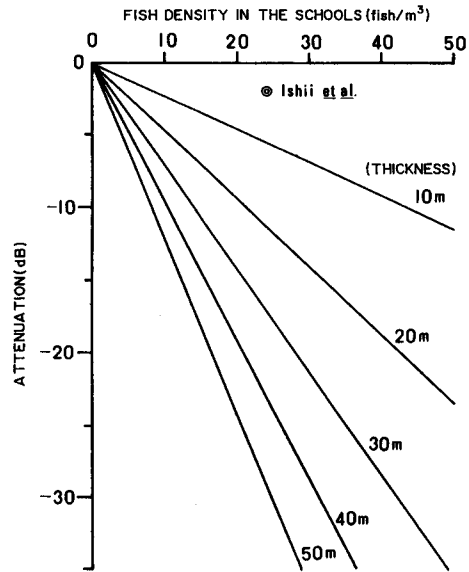


Fig. 8. Simulated values of attenuation coefficient as a function of fish density and fish school thickness.

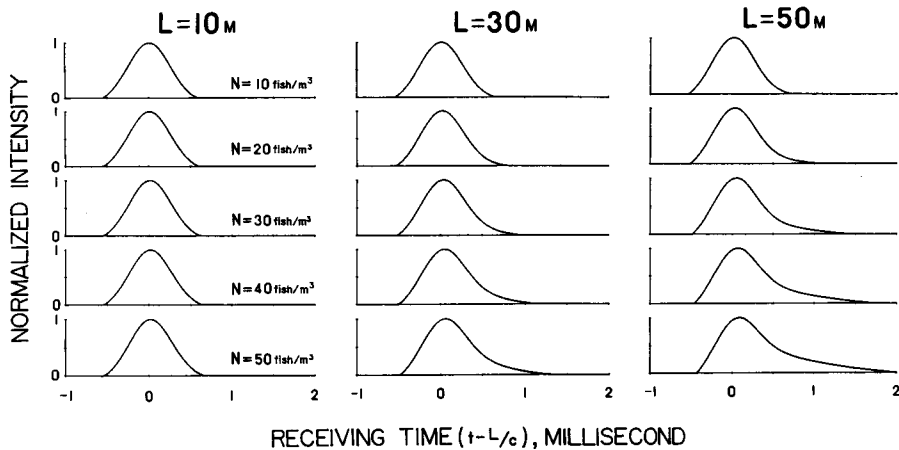


Fig. 9. Simulated envelopes of Gaussian pulse propagated through the schools as a function of fish density ( $N$ ) and fish school thickness ( $L$ ).

## 要 約

魚群エコーについて計算機シミュレーションを行い、シミュレートした魚群エコーから得られた超音波散乱強度と魚群密度の関係の検討を試みた。

その結果、次のように要約される。

1) シミュレートした魚群エコーから求めた平均体積散乱強度 ( $\langle SV \rangle$ ) と魚の分布密度 ( $\rho$ ) との間には、次の関係が得られた。

$$50 \text{ kHz} : \langle SV \rangle_{dB} = -40.7 + 10.1 \cdot \text{Log}(\rho)$$

$$200 \text{ kHz} : \langle SV \rangle_{dB} = -40.9 + 9.9 \cdot \text{Log}(\rho)$$

2) シミュレーションによって求めた魚の分布密度の推定値と理論予測値はほぼ一致したが、水槽実験による推定値と理論予測値との間には、50 kHz で平均 29.5%、200 kHz で平均 30.5% の差が見られた。

3) 定置網の箱網に入網したイワシとサバの魚群から Shadowing Effect と多重散乱効果が観測された。数値計算の結果から、これらの現象は、魚群中を伝搬する送波パルスの減衰 (魚群減衰) とパルス幅の広がり、さらにパルスの受信時間の遅れ等に起因していると考えられる。

本稿をまとめるに当たり、種々有益な御助言を頂いた漁業測器学講座佐野典達教授、並びに飯田浩二助手に深謝の意を表する。

## 文 献

- 1) 李 吳在・鈴木恒由 (1987). 魚群探知機による模擬魚群の分布密度の推定について, 北大水産彙報 38, 239-252.
- 2) 李 吳在・鈴木恒由・飯田浩二 (1987). ケージ内魚群密度と超音波散乱強度との関係について, 北大水産彙報 38, 253-258.
- 3) Ehrenberg, J.E. (1974). Recursive algorithm for estimating the spatial density of acoustic point scatterers. *J. Acoust. Soc. Am.* 56, 542-547.
- 4) Ishimaru, A. (1978). *Wave propagation and scattering in random media*, Vols. 1 and 2, Academic Press, New York.
- 5) Ishimaru, A. and Hong, S.T. (1975). Multiple scattering effects on coherent bandwidth and pulse distortion of a wave propagating in a random distribution of particles. *Radio Science*, 10, 637-644.
- 6) 石井 憲・古沢昌彦・宮野鼻洋一 (1983). 魚群減衰係数の測定, 水工研技報 4, 73-94.