底魚資源量の音響推定における海底基準と海底オフセットの決定

黄 斗 湊, 飯田浩二, 向井 徹

(1994年7月7日受付)

Stable Bottom Detection and Optimum Bottom Offset for Echo Integration of Demersal Fish

DooJin Hwang,* Kohji Iida,* and Tohru Mukai*

This paper discusses methods for the stable bottom detection and the optimum bottom offset which enable to separate the fish echoes from the bottom echoes with echo integration of demersal fish.

In preprocessing of the echo signal, the bottom detection has to be done stably against the fluctuation of echo level and the bottom offset has to be set to a minimum height such that near bottom fish echoes are included.

Two methods of bottom detection, namely echo level threshold method and maximum echo slope method were compared and analyzed. The echo level method works well if the ideal threshold level was given but it sometimes misses the bottom because of the fluctuation of the echo. Another method to detect the bottom which uses maximum echo slope indicates the simple and stable bottom detection.

In addition, the bottom offset has to be set near to the bottom but not to include the bottom echo. Optimum bottom offset should be set a few samples before the detected bottom echo which relates the beginning of pulse shape and acoustic beam pattern to the bottom feature.

キーワード: 計量魚群探知機, 底魚, 海底検出, 海底オフセット

近年の計量魚探技術の発展は目ざましく、従来、困難とされてきた底魚資源の調査にも利用されるようになった。¹⁻³⁾ 底魚にはタイ、タラ、アンコウなどの高級魚が含まれることから、その資源量や生態を把握するために、今後ますます音響資源調査が重要視されるであろう。

エコー積分法を用いて底魚の資源現存量を測定する場合、海底の取り扱いには多くの問題点が残されている。すなわち、送信パルスの物理的長さで決まる距離分解能や、海底付近の魚群のエコーが音響ビーム内の海底エコーにマスクされるといった方位分解能の制約から生ずる Dead Zone³⁻⁶⁾ の存在、さらに海底判別のアルゴリズムや海底上のエコー積分の下限を決める海底オフセット³⁾ の決定が適切でないために生ずる誤差などが挙げられる。この海底オフセットは十分大きくとれば海底エコーを誤って積分することはなくなるが、海底付近の魚群エコーを積分対象から取り除いてしまう危険がある。

本論文はエコー積分法による底魚資源量評価のための海底判別のアルゴリズムの改良と最適な海底オフセットの決定法について検討したものである。

方 法

1993年11月に北海道噴火湾において、北海道大学水産学部研究調査船うしお丸(128トン)を用い、噴火湾に來遊するスケトウダラ群の音響資源調査を実施した。用いた計量魚群探知機は KFC-200 型(カイジョー)で、周波数は 25 kHz と 100 kHz の 2 周波で、船底装備のトランスデューサを用い、パルス幅 1 ms、パルス繰返し周期 0.35 s、測定レンジ 100 m で使用した。トランスデューサの両周波数におけるビーム幅は 25 kHz で 26.4 度、100 kHz で 13 度であった。エコーインテグレータの積分モードは周期 10 s の時間積分とし、10 s ごとに計算される海面下 1 m ごとの体積後方散乱強度 SV の値を船位、潮流、水温などのデータとともに GPIB インターフェイスを経由してパソコンのフロッピーディスクに記録すると同時に、魚探信号を磁気テープに収録した。そして後日、現場で得た魚探信号を Fig. 1 のようにデジタルオーディオプロセッサを通して再生し、エコー解析装置(DR-90、カイジョー)のカラーモニタで表示すると共

* 北海道大学水産学部 (Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 041, Japan).

に、両周波数の TVG 処理後の信号を分解能 12 bit の A/D 変換器を用いてパソコンに入力し、XY プロッタで 1 ビングごとの波形を描いた。次に多数の魚群が出現しているところを選び出し、カラーモニタ上のエコーグラムとパソコンで再現したエコー波形を比較し、さまざまな

パターンの魚群について分析した。

結果

調査で得られたエコーグラムを Fig. 2a, b に示す。両図とも海底拡大表示を併記しており、Fig. 2a は 25 kHz、Fig. 2b は 100 kHz で、上半分が海面から海底までの全体像を、下半分は海底上 10 m 層 (85~95 m) の拡大である。レベルスケールは上半分は 3dB ステップ、下半分は 1.5 dB ステップである。画面に表示されている水深 (91 m) は船底からの深さを表し、実際的水深は船舶の吃水 3 m を加算すると 94 m となる。両周波数とも海底拡大表示においてスケトウダラの産卵回遊群と見られる 16 個の魚群 (A~P) が確認された。

Fig. 2a, b と同時刻におけるエコー波形を描いたのが Fig. 3a, b である。上半分は 25 kHz、下半分は 100 kHz の波形を表し、横軸はエコーレベル (Y)、縦軸は深度 (m) として表したものを時間の経過とともに左側から右側へ連続表示したものである。また海面から深度 85 m に実線を引き、そこから海底まで 1 m ごとに破線を引いて、魚群が分布している深度が分かるようにした。両周波数とも、各図の下端に出ているエコーレベルが飽和に達している部分が海底である。そして各々の魚群に対し Fig.

Fig. 1. Block diagram of data processing system.

Fig. 2. Echograms of demersal fish school obtained by 25 kHz (a) and 100 kHz (b) in Funka Bay. Depth ranges are 0-95 m (upper) and 85-95 m (lower).

Fig. 3. Three dimensional plots of echo-envelopes from fish schools near the bottom.

2のエコーグラムに対応する魚群AからPまでのエコー波形を選びだした。

これらの魚群はエコーグラム上において海底から2~3m離れて分布しているように見えるA, C, E, F, H, K, L, M, Oと海底に付着しているように見えるB, D, G, I, J, N, Pの二つに分けられる。このような分布をする魚群に対してエコー積分を行う場合、海底と明確に分離している魚群エコーの抽出や積分は容易であるが、海底に付

着しているように見える魚群の場合は海底と魚群とを識別するための海底判別の精度が問題になり、この方法しだいで推定資源量に大きな誤差を含む可能性がある。

そこで海底のエコーが海底付近の魚群エコーにどのように影響してくるかを見るためにFig. 3の各エコー波形を数値化したデータ（サンプリング間隔は15cm）を用いて、海底付近で積分層の幅を5mに固定したときの面積後方散乱係数 Sa_{5m} を計算した。今、トランスデューサ

から距離 r に, 密度 n , 後方散乱断面積 σ_{bs} の魚群が存在した場合, それから得られるエコー電圧は次式で与えられる。

$$E = P \cdot M \cdot G \sqrt{\frac{c \cdot \tau}{2} \Omega} \frac{10^{-0.1 \alpha r}}{r} \sqrt{n \cdot \sigma_{bs}} \quad (1)$$

ただし,

α : 吸収減衰係数

P : 送波音圧レベル

M : 受波感度

G : 受信部の利得

c : 水中音速

τ : 等価パルス幅

Ω : 送受波器の等価指向角

(1) 式において $n \cdot \sigma_{bs}$ は単位体積当たりの後方散乱断面積を表し, これはまた体積後方散乱係数 S_v に等しい。すなわち

$$S_v = \left(\frac{E}{P \cdot M \cdot G} \right)^2 \cdot r^2 \cdot 10^{0.2 \alpha r} \cdot \frac{2}{c \cdot \tau \cdot \Omega} \quad (2)$$

となる。

S_a は S_v を深度 z で積分したものと定義され,

$$S_a = \int_{z_1}^{z_2} S_v(z) dz \quad (3)$$

で表され, ここでは 1 m ごとに平均した S_v を用いて 5 m 幅の S_a を求めるので任意の深度から 5 個の S_v に関する積分であり

$$S_{a,5m} = \sum_{i=1}^5 S_{v_i} \quad (4)$$

とした。

そして, 積分層の開始深度を 83.05 m から 1 サンプル単位ずつ海底方向にシフトしながら, 各水深による $S_{a,5m}$ の変化について検討した。もし, 5 m 幅の積分層に海底の一部が含まれると, $S_{a,5m}$ は大きく変化する。海底上の魚群分布形態を簡単な五つのパターンに分類して, これに対応する $S_{a,5m}$ の変化を模式化したのが Fig. 4 である。a 図 (1) のように魚群が全くない場合は b 図 (1) のように海底までの S_a が最低で, 海底エコーの成分が含まれるところで急に大きくなる。また a 図 (2) のように海底付近に魚群が集中する場合は, b 図 (2) のように海底の近くでいったん $S_{a,5m}$ が高くなりその後海底エコーの成分が増大する。

また a 図 (3) のように均一な魚群と海底上に集中する魚群が混在する場合は, b 図 (3) のように (2) に一定のバイアスを与えた形になる。また a 図 (4) のように均一分布の場合は b 図 (4) のように高い $S_{a,5m}$ に続き, 海底エコーの成分が現れる。最後に a 図 (5) のように海底に近づく程魚群が減少する場合は, b 図 (5) のように深度とともに $S_{a,5m}$ も減少すると考えられる。

Fig. 4. Five models of fish vertical distribution and area backscattering coefficient S_a variation above the bottom.

Fig. 5 は観測されたいくつかの魚群について積分範囲をシフトした時の海底上の $S_{a,5m}$ の変化をプロットしたものである。図の左側は 25 kHz, 右側は 100 kHz のもので, 横軸には 1 サンプル単位 (15 cm) ごとの深度をとり, 縦軸にはその時の $S_{a,5m}$ を対数表示した。各図とも連続する 6 ピング分の $S_{a,5m}$ 曲線を重ね描きた。図中の番号は Fig. 4 で考えた五つの魚群分布パターンに対応する。いずれの図でも海底エコー成分が現れるところ (破線) で $S_{a,5m}$ が急に大きくなるが, 特に (2) 型, (3) 型魚群の場合は, 海底エコーの直前に海底に付着した魚群の成分が現れるという特徴的な変化を示した。したがってこのような分布様式の魚群の場合は海底基準をどこにとるかによって推定誤差を生ずることは明らかである。例えば Fig. 5 の (2) において, 海底基準を破線から離れた 84.65 m 付近に設定した場合, それで深の 87.05 m 付近にある魚群の成分は $S_{a,5m}$ に含まれないし, 逆に海底基準を 87.65 m に設定すれば海底エコーの成分が積分されるといったように, 海底基準をどこにとるかによって底魚資源量の過小または過大評価を生むことになる。

考 察

底魚のエコー積分において積分範囲の下限となる海底基準の決定は魚群が海底に近い程重要になってくる。海

Fig. 5. Area backscattering coefficient Sa variation near the sea bottom.
The thickness of integration layer is fixed to 5 m.

底判別を行う一般的な方法は、海底のエコーレベルが魚群のエコーレベルより大きい事を利用して、適当な閾値を設定し、これを超えた瞬間を海底とするものである。しかしながらこの方法は閾値の設定しただけで海底エコーの誤検出につながる。Fig. 6 は閾値を変化させた時にサンプリングされる海底付近のエコー波形を示したものである。

図の左半分は 25 kHz を、右半分は 100 kHz を表し、横軸は設定した閾値を超える瞬間を海底基準 B として、それ以浅の 15 サンプル点と以深の 5 サンプル点を

表し、縦軸はエコーレベル (V) である。上から順に設定閾値を 9V から 2 V まで 1 V ごとに变化させたときの 30 パルス分のエコー波形を重ね描きしたものである。解析したエコー波形は海底付近に魚群が集中する Fig. 4 の (3) 型魚群である。

図をみると海底検出閾値が 5~6 V の時は海底と魚群が忠実に表現できるが、閾値を大きく (7~9 V) すると海底エコーレベルが低い時に、海底を検出できない機会が増え (Fig. 6 中の Bottom detect failure), 逆に閾値を小さく (2~4 V) しすぎると、魚群エコーを海底エコーと

Fig. 6. Echo signal waveforms from the bottom synchronized with the threshold point. Threshold levels are changed from 20 to 90 (%) of the saturation level.

間違える割合が増えることがわかる。

そこで、次に海底エコーレベルの変化率に着目し、海底判別への適用について検討した。すなわち、海底エコーの形成は音響ビームの指向特性や海底の反射特性あるいは音響パルス波形などの時間的相互作用によって決

まるため、一般に海底エコー波形の立ち上がりは緩やかでその後急峻となりやがて極大を示す。その変化を次式のようなサンプリング電圧の差分として表した。

$$\Delta V = V(t+1) - V(t) \quad (5)$$

(5) 式で計算した差分電圧の変化の例を Fig. 7 に示

Fig. 7. Relationship between echo signal waveform and its differential waveform from the sea bottom.

Fig. 8. Echo signal waveforms synchronized with the maximum differential of echo level.

す。上図がエコー電圧波形で下図が差分電圧波形である。横軸はサンプリング単位、縦軸は電圧 (V) を表す。図から電圧変化量が最大になる点は唯一明確であることがわかる。そこでこれを新たな海底基準として Fig. 6 と同様に 30 パルス分のエコー波形を表したのが Fig. 8 である。

図を見ると海底検出閾値を 5 V にした時と同様に海底付近の魚群が忠実に表現された。またこの時の積分下限は、海底エコーの立ち上がりが揃っており、かつ安定しているので、海底基準 B からわずかに 1~2 サンプル単位 (0.2~0.4 ms) で十分であり、海底オフセットを最小にすることができると考えられた。海底エコーの立ち上がりを見ると 25 kHz の方が 100 kHz に比べて緩やかであるが、これに対しては二つの理由が考えられる。一つはパルス波形の立ち上がりに関係し、100 kHz の方が 25 kHz よりパルス波形が矩形波に近いからと考えられる。もう一つは音響ビームに関係があり、ビーム幅が広い 25

kHz の方が音響パルスが海底中央に最初に到達してからビーム周囲のエコーが帰ってくるまでの時間が長いと考えられる。これに関しては今後さらに理論的検討が必要であろう。

要 約

計量魚群探知機を用いて底魚を対象としたエコー積分を行う場合、積分範囲の下限を決めるための海底基準やオフセットの曖昧さは、底魚資源量推定の誤差要因の一つになっている。海底付近の魚群エコーの解析から海底基準の決定方法と最適なオフセットに関して考察した結果、次の知見を得た。

1) 積分層の幅を 5 m にとり、積分範囲を 1 サンプル単位ごとに海底方向にシフトしながら、海底付近の Sa_{5m} の変化を見たところ、海底付近の魚群エコーを積分するためには、積分範囲の下限を可能な限り海底まで近づけなければならない。

2) エコーレベルの閾値で海底検出を行う場合、閾値が大き過ぎると海底検出不能回数が増え、小さ過ぎると海底誤検出回数が増える。

3) エコーレベルの最大変化点を海底基準としたところ、高精度で、かつレベル変動に対し安定な海底基準となる。

4) この方法によると最適な海底オフセットは海底基準から 0.4 ms 以内でよく、これはパルス波形と海底地形に対する音響ビームに依存する。

文 献

- 1) 朱 徳山, S. A. Iverson: 黄海・東海のカタクチイワシおよびその他重要魚類資源の音響学的評価研究 (大滝英夫), 資料 No.32, 海洋水産資源開発センター, 東京, 1991, pp. 56-57.
- 2) 黄 斗濤, 佐野典達, 飯田浩二, 向井 徹, 増田紀義, 佐々木成二: エコー積分とトロールデータから算出した東シナ海における底棲魚族のターゲットストレングスについて, 北大水産彙報, **44**, 197-208 (1993).
- 3) Egil ONA: Hydroacoustic method for estimation of demersal fish resources, in "Proceedings of International Symposium on the Investigation of Demersal Fish Resources", Hokkaido University, Hakodate, 1993, pp. 22-34.
- 4) R. B. Mitson: Acoustic detection and estimation of fish near the sea bed and surface. *FAO Fish. Rep.*, **300**, 27-34 (1983).
- 5) R. B. Mitson: FISHERIES SONAR (incorporating Underwater Observation using Sonar by D. G. Tucker), Fishing News Books, Ltd., England, 1983, pp. 156-169.
- 6) K. A. Johannesson and R. B. Mitson: Fisheries acoustics; A practical manual for aquatic biomass estimation, *FAO Fisheries Technical Paper*, **240**, FAO, Rome, 1983, pp. 155-180.