

計量魚群探知機を用いた調査時に海底起伏により生じる 音響ブラインドゾーン上方境界の決定

田上英明^{1,3†}, 小松輝久², 濱野 明³

Determination of upper boundary of an acoustic blind zone produced by the rugged bottom during a survey using a quantitative echosounder

Hideaki TANOUÉ^{1,3†}, Teruhisa KOMATSU² and Akira HAMANO³

Natural reefs are generally good fishing grounds. To use fish resources in a sustainable manner, it is important to estimate and monitor fish biomass. However, fish biomass survey using trawl is not applicable to natural reefs because the rugged bottom breaks or tangles trawl nets. In such grounds, it is effective to use a quantitative echosounder for estimating fish biomass. Nevertheless, the rugged bottom produces an acoustic blind zone above the bottom, where volume back-scatter from fish under beam is shaded by echo from the rugged bottom within the beam at a depth shallower than the bottom on the beam axis. It must be taken into consideration to estimate fish biomass more accurately. We conducted fish biomass survey in a natural reef, Hachirigase, southwest of the Sea of Japan by using a quantitative echosounder in June 2000. This study aims to develop a statistical method to identify acoustic bottoms, upper boundary of blind zone, with a discriminant analysis by analyzing integral layers of each ping with the minimum thickness from volume back-scatter of echograms obtained by the survey. We examine an effect of blind zone thicknesses determined with different methods by extrapolating volume back-scatter of fish above the acoustic bottom to the blind zones to estimate fish biomass in the reef expressed as volume back-scatter.

Key words: fish biomass, quantitative echosounder, acoustic bottom, acoustic blind zone, natural reef

はじめに

複雑な海底形状を有する天然礁漁場では、魚群が海底付近に集まり、一本釣り等の好漁場となっている。天然礁は、産卵場として利用する魚種もあることから、漁業資源を持続的に利用するためには、このような海域においても魚群量を正確に把握し、過剰漁獲等が生じていないか監視する必要がある。魚群量調査にはトロールが多く用いられるが、天然礁漁場の底層では、海底の岩礁に網がかかって破損するため使用できない。このような場合には、リモート

センシングである計量魚群探知機による計測、または、同機器と立て縄等との併用が有効と考えられる (e.g. Komatsu et al., 2002)。しかし、計量魚群探知機による調査でも、海底の起伏のため、次に述べる問題が生じる。

計量魚群探知機を用いる場合、海底直上には音響的手法で魚群を観測できない音響的ブラインドゾーン (acoustic blind zone) (以下、ブラインドゾーン) が生じる (Simmonds et al., 1992)。平坦な海底におけるブラインドゾーンは、音軸上で海底から半パルス長以内の範囲で生じるが (Mitson, 1983)、パルスが球面状に伝播するため音軸から離れるにしたがい増大する (Fig. 1)。また、傾斜している海底では、音軸から離れた浅い底深方向にある海底に最も近いビームの縁が海底表面から半パルス上に到達したときから (Fig. 2-a)、海底の反射波によってブラインドゾーンが生じる (Mitson, 1983; ミットソン, 1994)。

Bazigos (1981) は魚群量を推定する上でブラインドゾーンにいる魚群が無視できないと考え、ブラインドゾーンにいる魚群がブラインドゾーンの近辺領域にいる魚群と良く似た構造をしていることを仮定し、後処理の段階でブライ

2012年12月5日受付, 2013年1月22日受理

¹ 海洋政策研究財団

² 東京大学大気海洋研究所

³ 現所属: 水産大学校

¹ Ocean Policy Research Foundation, 3–4–10 Toranomon, Minato-ku, Tokyo 105–0001, Japan

² Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 5–1–5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277–8564, Japan

³ Present: National Fisheries University, 2–7–1 Nagata-Honmachi, Shimonoseki, Yamaguchi 759–6595, Japan

† E-mail: h-tanoue@09.alumni.u-tokyo.ac.jp

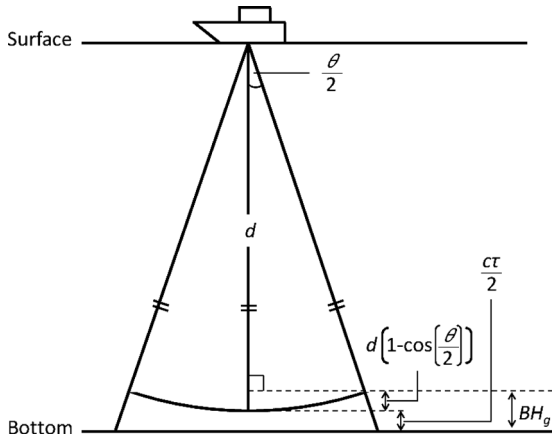


Figure 1. Schematic view showing a height of blind zone (BH_g) on the flat sea bottom and ultrasound beam sent out from a transducer of an echosounder of the ship. Characters, d , θ , c and τ are bottom depth, beam angle of ultrasound, sound speed in the sea and pulse length of ultrasound, respectively.

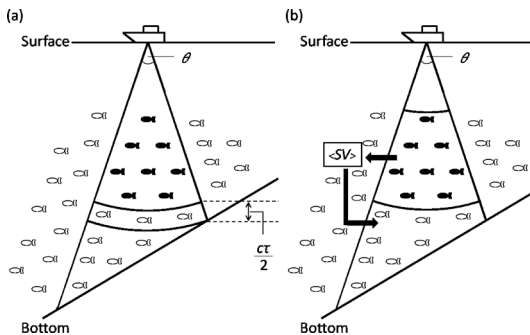


Figure 2. (a): Schematic views showing a blind zone on the slant sea bottom based on Mitson (1994). (b): Extrapolation of mean volume back-scattering strength from the upper layer above the acoustic bottom to the blind zone. Black and white fish marks indicate those distributed in a layer where an echosounder can and cannot detect them, respectively.

ンドゾーンの近辺領域の魚群量をブラインドゾーンに外挿する方法を提案した (Fig. 2-b). また, Kloser (1996) は, エコーグラム中の海底を含む積分層と含まない積分層とを分ける境界を音響海底 (acoustic bottom) とよび, この境界を視覚的に定め, さらに反射強度が最大を示す積分層の深度を真の海底 (true bottom) とした. そして, 音響海底と真の海底との間, つまりブラインドゾーンに, 音響海底から音響海底上 10 m の高さまでの層の平均体積後方散乱強度を外挿する方法を提案した.

Ona and Mitson (1996) は, 体積後方散乱強度を用いた音響海底検出のアルゴリズムを提案した. この海底検出アルゴリズムでは, まず, 前もって任意に定めた体積後方散乱強度を音響海底の深度を決めるための海底判別基準

(bottom discrimination level) として設定する. 次に, 鉛直方向に一定間隔に設定した積分層の中から体積後方散乱強度が最大となる積分層を検出する. これが上述の真の海底であり, その積分層から深度の浅い方向に積分層を逐次調べ, 最初に海底判別基準よりも弱い体積後方散乱強度を示す積分層よりも 1 つ深い層を音響海底とした.

上述の 2 つのエコーを用いた研究例は, 海底近傍の魚群量を推定する非常に有効な方法であるが, いずれの研究でも同じピング中で魚群と海底のエコーが重なり合うブラインドゾーンと海底のエコーと重なっていない魚群を含む水柱のエコーとを区別するための客観的な境界 (音響海底) の深度を決める基準は示されていない. そのため, これらの方法は境界を決める海底判別基準の値があいまいであることや境界を視覚的に決めるオペレータの熟練度の相違によって, 海底のエコーを魚群エコーとして誤検出し, 海底近傍の魚群量を過大評価する危険性を含んでいる.

このように, 天然礁において魚群分布量を計量魚群探知機によって調べる際に, その海底の多様な起伏によってブラインドゾーンに関する問題が起こる. 本研究では, 日本海南海域の沖合天然魚礁漁場である八里ヶ瀬をモデル海域とし, 計量魚群探知機を用いた魚群分布調査を実施した. 取得したピングごとに最小厚さの積分層のデータに分け, これらの層の体積後方散乱強度の違いをもとに, 同じピング中で魚群エコーを含む水柱エコーとブラインドゾーンを区別する境界 (音響海底) を統計的手法によって求める方法を開発し, それを用いた場合と用いない場合の漁場全体の魚群による体積後方散乱強度の違いについて検討することとした.

材料と方法

調査海域と調査方法

2000年6月26日に八里ヶ瀬周辺海域において山口県外海水産試験場所属の漁業調査船くろしお (119 t) を用い, 計量魚群探知機による魚群探索調査を行った (Figs. 3 and 4). 八里ヶ瀬に最も近い見島にある山口県漁業協同組合の水揚台帳では, 夏季には, 主に海底に集まる習性がある魚種が多獲されており, とくに初夏には八里ヶ瀬でも一本釣りの操業が行われていることから, この時期に八里ヶ瀬等の天然礁に底棲性浮魚の魚群が分布すると考えられる.

魚群量を推定するための計量魚群探知機では, 魚群探知機の受波信号に影響を及ぼすノイズは高速航走時に生じることから, できるだけノイズが少ない一定の船速で行う必要がある. 一方, 調査開始時と終了時の時間的な差が生じないように, データ間の同時性を確保するためには, 受波信号が得られる範囲でできるだけ高速で調査する必要がある. 調査船くろしおの場合, 船速が9ノット以上では魚群量の推定に及ぼす航走ノイズが大きく, 航走ノイズの少なかった7ノットの船速で計量魚群探知機による調査を行った. ま

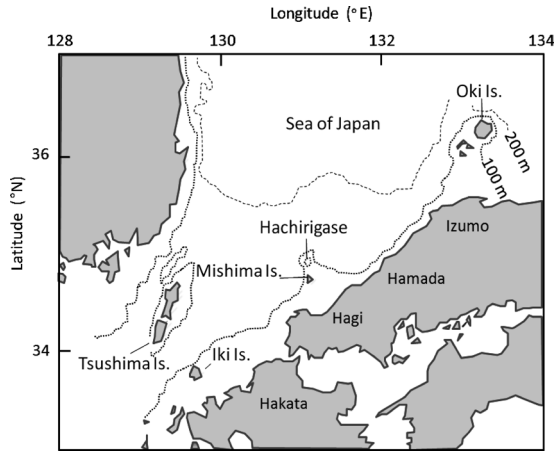


Figure 3. Map showing Hachirigase on the continental shelf in offshore waters southwest of the Sea of Japan.

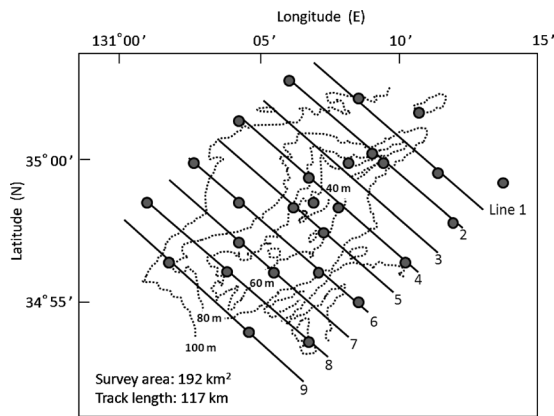


Figure 4. Visualization of the survey area along Hachirigase (June 2000). Isobaths range from 40 to 100 m in 20-m increments. Black lines represent the acoustic transects. Circles indicate locations where surface to bottom measurement by use of conductivity temperature depth profiler (CTD) were done.

た、漁船との衝突を避けるため、昼に調査を行い、漁業協同組合を通じて事前に調査船が通ることを漁業者に知らせ、漁場において調査定線上に漁船がいる場合には無線により漁船の移動を要請し、できるだけ調査定線が直線となるようにした。夜は、観測点において表層から海底付近までの水温と塩分をCTD (SBE-19, SeaBird社製) によって計測した (Fig. 4)。

調査には周波数 50 kHz の計量魚群探知機 (FQ-70, 古野電気社製) を用いた。調査前には、Foote and MacLennan (1984) の計量魚群探知機調査の指針に沿ってタングステンカーバイトの標準球で計量魚群探知機の較正を行った。また、CTD観測により得られた水温、塩分の鉛直分布の結果をもとに超音波が海水によって減衰する吸収減数係数を求め (古澤, 1985), 得られたデータを補正した。調査

で得られた音響データはデータレコーダ (PC208A, ソニー社製) を用いて DAT テープに収録し、後日、研究室にて解析した。

DAT テープに収録した音響データは、インターフェース (PCSCAN, ソニー社製) を介して PC に入力し、コンバータ (Dat2hac, Sonar Data 社製) を用いて HydroAcoustics (HAC) 形式 (Simard et al., 1997; ICES Fisheries Technology Committee, 2003) のデータファイルに変換した。このデータファイルから調査定線に沿って得られた生のエコーと呼ばれるピングごとの体積後方散乱音響強度 (volume back-scattering strength: SV) のエコーグラムを解析ソフト (EchoView, Sonar Data 社製) により作成した。

ブラインドゾーンを含む海底エコーと水柱エコーの判別方法

Ona and Mitson (1996) では任意に海底判別基準を設定するが、本研究では、この海底判別基準値を 2 値化処理の過程で使用する代表的な閾値選定法の一つである判別分析法により求めた。この方法は、Otsu (1979) によって開発され、コンピュータを用いた画像処理法の一つとして画像の境界検出のために広く利用されている。水産音響分野では、ソナーの画像から魚群を抽出するために Hamano et al. (2005) により、この方法は用いられた。

判別分析法による閾値選定では、鉛直方向の積分層を最大の分解能である音速 c とパルス幅 τ を乗じた長さの半分 ($c\tau/2$) を用い、水平方向の最大の分解能であるピングごとに体積後方散乱強度を算出し、体積後方散乱強度のヒストグラムを作成した。このヒストグラムにおける体積後方散乱強度の分布を、判別分析による閾値選定法を用いて得た閾値で客観的に 2 つのクラスに分離した。閾値の分離の尺度としては、2 つのクラスの平均値の分散 (クラス間分散) と各クラスの分散 (クラス内分散) の比 (判別比) を用い、この判別比が最大になるように閾値 TH を選択する (Otsu, 1979)。

上述の海底を判別する体積後方散乱強度の閾値を TH として、 TH 以上の体積後方散乱強度のセルと、それ以下のセルの 2 つに分けた。クラス i ($i=1, 2$) のセル数を ω_i 、体積後方散乱強度の平均を M_i 、分散を σ_i^2 とおくと、クラス内分散 σ_w^2 は

$$\sigma_w^2 = \frac{\omega_1\sigma_1^2 + \omega_2\sigma_2^2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (1)$$

と表せられる。全セルの平均体積後方散乱強度の値を M_T とおくと、クラス間分散 σ_B^2 は

$$\begin{aligned} \sigma_B^2 &= \frac{\omega_1(M_1 - M_T)^2 + \omega_2(M_2 - M_T)^2}{\omega_1 + \omega_2} \\ &= \frac{\omega_1\omega_2(M_1 - M_2)^2}{(\omega_1 + \omega_2)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

で与えられる。クラス内分散は2つのクラスの分散の重み付き和であり、2つのクラスの密集度を、クラス間分散は全体の平均から2つのクラスの平均がどれだけ離れているかを表す。さらに、全セルの体積後方散乱強度の分散を σ_T^2 とすると、

$$\sigma_T^2 = \sigma_w^2 + \sigma_B^2 \quad (3)$$

が成り立つので、判別比は

$$\frac{\sigma_B^2}{\sigma_w^2} = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_T^2 - \sigma_B^2} \quad (4)$$

となる。

ここで、全分散 σ_T^2 は閾値とは無関係な定数であるため、判別比を最大にするためには、 σ_B^2 を最大にするTHを求めればよい。このTHを海底判別基準とすることにより、いままで経験的に設定していたブラインドゾーンを含む海底エコーと水柱エコーの境界を客観的に求めることができる。判別分析法は、ヒストグラムに明瞭な谷がない場合にも閾値が選択できる。ただし、ヒストグラムに谷があったとしても分離したい2つの領域のピクセル数が大きく異なる場合に、選定された閾値がヒストグラムの谷からずれることがある(田村, 2002)。そこで、本研究ではセル数の差による影響や中層に分布する魚群の影響をなくするため、判別分析法で解析する深度方向のデータは、海底表層に近いと推定される1ピングにおける体積後方散乱強度が最も大きい深度を基準に幾何学的に求め、航程線方向のデータは、前後5 m、計10 m範囲と設定することで海底に近いピクセルデータのみを使用した。

指向性を持つ音波は、音軸から離れるほど感度が減衰する。したがって、同じ底質の海底を探索した場合、1ピング中の最大の音響強度のある深度は、海中に構造物等の海底よりも強い散乱体がないならば、一般に音軸上で海底の表面を捉えた深度、つまり、真の海底の深度と考えることができる。そこで、本研究では、1ピングにおける最大音響強度を示す深度を真の海底深度とよび、この深度から判別分析法によって求めた音響海底を示す深度までをブラインドゾーンの高さ(以下、 BH_S)とした。

幾何学的に求めるブラインドゾーンの高さ

ブラインドゾーンの高さは底深や傾斜によって変化するので判別分析法に利用するピクセルデータの範囲は、次に示すミットソン(1994)をもとに幾何学的方法によってブラインドゾーンの高さ(以下、 BH_G)を基準に設定した。本研究で設定した判別分析法に利用するピクセルデータの深度方法の範囲は、統計解析に利用するデータ数を確保するため BH_G のおよそ15倍の高さとした。また、連続したピングで得られる最大音響強度の深度変化、すなわち底深の変化から水平面と海底がなす海底傾斜角を求めた。 BH_S とは別に、海底傾斜角 α 、ビーム幅 θ 、そして底深 D とし、

ブラインドゾーンの幾何学的関係をもとに(Fig. 5)、 BH_G は式(5)のようになる。

$$BH_G = q + \frac{c\tau}{2} \quad (5)$$

ここで、 α が0でないときには、 q は式(6)–(8)を用いて表される。

$$q = \frac{Q}{P+Q} D \quad (6)$$

$$P = \frac{D}{\tan(\alpha)} \quad (7)$$

$$Q = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) D \quad (8)$$

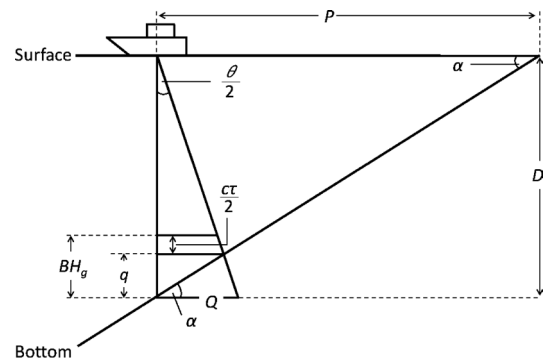
また、 α が0のとき、 BH_G は式(9)により求まる(Mitson, 1983)。

$$BH_G = \frac{c\tau}{2} + d \left\{ 1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right\} \quad (9)$$

ここで、 d は次の式で表される。

$$d = D - \frac{c\tau}{2} \quad (10)$$

式(5)および式(9)から求めた BH_G は、音軸から離れ感度が減衰したビームの縁付近で捉えた海底やpartial integration zone(Ona and Mitson, 1996)とよばれる魚群を厳密



- D : bottom depth along the main lobe of ultrasound beam
- P : distance between the transducer to the intersection of extended line of slant bottom with the sea surface
- Q : bottom edge of right triangle consisting of P and the hypotenuse between intersection of outer edge of beam with the line at the depth D parallel to the sea surface
- α : slant angle of the sea bottom just below the transducer from the horizontal plane
- q : D minus bottom depth at the intersection point of outer edge of beam with the slant bottom

Figure 5. Schematic view showing geometric relation of beam and blind zone on a slant sea bottom.

に分離できない積分層を含んでいない。そのため、海底の起伏がある場所において、ピング間隔が短い魚群探査調査を実施した場合、この高さ BH_G よりも実際のブラインドゾーンの高さが低くなることはない。したがって、 BH_S が BH_G よりも低い場合は、 BH_S が過小評価されていることを意味する。

結果

2000年6月26日の計量魚群探査調査定線について BH_S と BH_G を比較した結果 (Fig. 6), 前者の平均は 0.72 ± 0.16 m (mean \pm SD) で、後者の平均 0.55 ± 0.13 m と比べ有意に大きかった (t -test, $p < 0.01$)。定線別では、両者の差が全体の平均 0.17 m よりも 0.10 m 以上小さかった定線は、Line 3 (0.05 m), Line 4 (0.02 m), Line 5 (0.05 m) で、全体の平均とほぼ同じだった定線はLine 9 (0.16 m) で、平均より大きかった定線はLine 1 (0.19 m) であった。

BH_S と BH_G の差について、底深および海底傾斜角との関係を定線別に調べた。その結果、底深の平均が全定線の平均よりも浅い定線のうち、定線間の底深の平均に有意な差がなかったLine 3とLine 7では (Steel-Dwass, $p > 0.05$)、海底傾斜角が全定線の平均よりも大きかったLine 7の BH_S と BH_G の差の平均は 0.11 m で、海底傾斜角が全体の平均よりも小さかったLine 3よりも高さの差の平均は 0.06 m 大きかった。また、底深の平均が全定線の平均よりも大きかった定線のうち、底深の平均に有意な差がなかったLine 8とLine 9では (Steel-Dwass, $p > 0.05$)、海底傾斜角の平均が全定線の平均よりも大きかったLine 9の方が、小さかったLine 8よりも BH_S と BH_G の差の平均は 0.02 m 大きかった。海底傾斜角の平均に有意な差がなかったLine 3とLine 9の

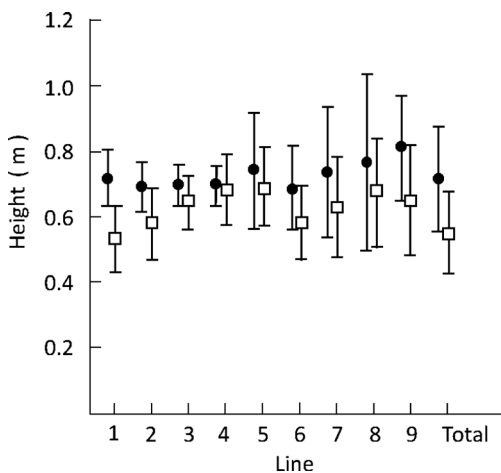


Figure 6. Heights of blind zones along the transects obtained from the discriminant analysis (BH_S ; closed circles) and those from geometric relation of slant sea bottom based on Mitson (1994) (BH_G ; rectangular). Standard deviations are shown as vertical bars.

うち、底深の平均が有意に大きかったLine 9がLine 3に比べ BH_S と BH_G の差の平均は 0.11 m大きかった。

考察

BH_S と BH_G の差に関して以下に論議する。 BH_G を求めるために使用した海底傾斜角は、連続するピングごとの最大体積後方散乱強度を結んだ線の傾きを用いている。一方、 BH_S では、1ピングにおけるすべての積分層中の最大体積後方散乱強度を含む反射強度のクラス (海底を含むブラインドゾーンのエコー) とそれ以外のクラスに判別するため、ビームの縁付近で探査した海底の突起による反射等も前者に含んでいると考えられる。

BH_S と BH_G を定線別に比較した結果では、底深の差がない定線間において、海底傾斜角が大きい定線で両者の差は増加する傾向があった。このことは、判別分析法を用いた場合、海底傾斜角が大きい定線では少ない定線と比べ、音軸から離れ感が減衰したビームの縁付近で捉えた海底の突起の反射等を含んだ積分層の範囲をブラインドゾーンとして多く検出していることから生じたものだと考えられる。海底傾斜角に差がない定線間では、底深の平均が大きい定線が両者の差は増加する傾向があった。このことは、底深が深くなると超音波の探査範囲が広がるのが影響していると考えられる。

BH_S の高さは 0.72 ± 0.16 m (mean \pm SD) で底深 82.8 ± 16.6 mに占める割合は1%未満であった。そこで、このブラインドゾーンに含まれる魚群による体積後方散乱強度を外挿することが、八里ヶ瀬全体の魚群量の推定にどの程度効果をもたらすか検討する。まず、音響海底の上層 10 mの平均体積後方散乱強度をブラインドゾーンに外挿するというKloser (1996)の方法にしたがって、八里ヶ瀬全体の(1)音響海底の深度から直上 10 mまでの層の平均体積後方散乱強度を求め、(2)今回開発した方法で得たブラインドゾーンに(1)の値を外挿し、(3)真の海底の深度から表層までの体積後方散乱強度を求めた。この値と、ブラインドゾーンを含まない音響海底の深度から表層までの値とを比較した。その結果、前者の体積後方散乱強度が後者のよりも $7.8 \pm 11.7\%$ (mean \pm SD)大きくなった。また、Kloser (1996)が調査した海丘は、底深 600 – 1000 mであったが、八里ヶ瀬の平均体積後方散乱強度を算出した範囲の底深は 30 – 100 mなので、Kloser (1996)の研究した海丘の底深に対して底深がおよそ 10 分の1である。そこで、Kloserが設定した音響海底の上層 10 mまでの層の代わりに、その 10 分の1である 1 mの層厚をオフセットを考慮して音響海底から直上 1 mから 2 mまでの層とし、その層の平均体積後方散乱強度をブラインドゾーンに外挿すると、ブラインドゾーンを含む体積後方散乱強度は含まない強度よりも $18.4 \pm 43.6\%$ も大きくなった。したがって、ブラインドゾーンに外挿する体積後方散乱強度としては、 10 m等、機械

的に層厚を決めるのではなく、実際のエコーグラムを調べ、魚群の分布している音響海底直上の層の値を用いるのがよいと考えられる。

以上のように、ブラインドゾーンを区別する境界である音響海底を体積後方散乱強度の値をもとに判別分析法を用いて客観的に決め、ブラインドゾーンに魚群による体積後方散乱強度を外挿することで計量魚群探知機による魚群量推定の精度向上につながると考えられる。この方法は、八里ヶ瀬のような天然礁漁場だけでなく、海底の傾斜が大きい大陸棚斜面や海山等の漁場でも魚類資源の分布量推定の向上に貢献すると考えられる。

謝 辞

元山口県水産技術センター主任研究員小林知吉氏には、調査船くろしおでの調査の機会を、同センター天野千絵氏、水産大学校助教中村武史氏、同校非常勤職員濱名正泰氏、同校海洋生産管理学科漁業計測学分野の学生には、調査・解析の協力を、同校准教授青木邦匡氏には、判別分析法に関する指導をいただいた。また、萩市理事貞光一成氏、山口県日本海区調整委員小畑嘉道氏、見島大竜丸船長長田孝一氏、萩市役所および山口県漁業協同組合には調査に関する協力および便宜をはかっていただいた。これらの方々には厚く御礼申し上げます。本研究は、2009年2月に東京大学大学院農学生命科学研究科に提出した第1著者の博士論文の内容の一部である。

引用文献

Bazigos, G. P. (1981) A Manual on Acoustic Surveys: Sampling Methods for Acoustic Surveys. Food and Agriculture Organization, Rome, 203

- pp.
- Foot, K. G. and D. N. MacLennan (1984) Comparison of copper and tungsten carbide calibration spheres. *J. Acoust. Soc. Am.*, **75**, 612–616.
- 古澤昌彦 (1985) 魚群探知機のTVGについての検討. 水工研技報 (漁船工学), **6**, 33–49.
- Hamano, A., H. Tanoue and R. Kieser (2005) The three-dimensional GIS using sonar information for coastal fisheries. *ICES CM U*: **19**, 1–12.
- ICES Fisheries Technology Committee (2003) Report of the Planning Group on the HAC Data Exchange Format. ICES, Copenhagen, 18 pp.
- Kloser, R. J. (1996) Improved precision of acoustic surveys of benthopelagic fish by means of a deep-towed transducer. *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 407–413.
- Komatsu, T., Y. Mitani, K. Ishida, T. Inagaki and A. Hamano (2002) Assessment of *Beryx splendens* biomass around the Nakanba Seamount in the Izu Archipelago, Japan, by echosounder. *Fish. Sci.*, **68**, suppl.1, 429–431.
- Mitson, R. B. (1983) Fisheries Sonar. Fishing News, Farnham, 287 pp.
- ミットソン, R. B. (1994) ソナー. 濱野 明・前田 弘訳, 恒星社厚生閣, 東京, 231 pp.
- Ona, E. and R. B. Mitson (1996) Acoustic sampling and signal processing near the seabed: The deadzone revisited. *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 677–690.
- Otsu, N. (1979) Threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Tran. Syst. Man. Cyber.*, **9**, 62–66.
- Simard, Y., I. H. McQuinn, M. Montminy, C. Lang, D. Miller, C. Stevens, D. Wiggins and C. Marchalot (1997) Description of the HAC standard format for raw and edited hydroacoustic data, version 1.0. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.*, 2174, 65 pp.
- Simmonds, E. J., N. J. Williamson, F. Gerlotto and A. Aglen (1992) Acoustic survey design and analysis procedure: a comprehensive review of current practice. ICES Cooperative Research Report 187, ICES, Copenhagen, 127 pp.
- 田村秀行 (2002) コンピュータ画像処理. オーム社, 東京, 336 pp.