

6-4. 計量魚群探知機とエコーグラムの基礎

1. 基礎の基礎：計量魚群探知機とエコーグラム

計量魚群探知機（以下、計量魚探）とは、字の如く魚群探知機の種類です。魚群探知機は、高い周波数の強い音（超音波）を水中に発射し、音の反射の強さや、反射音を捉えるまでの時間を測定することで、海中の生物、海底の出現位置や状態を把握します。計量魚探は、水中の物体に音波が当たるまでの音の減衰、物体から帰ってきた音波が送受波器に戻るまでの減衰、出す音の強さや音を受ける際の感度などを正確に補正して定量性を確保し、単位体積あたりの音の反射の強さ等の情報を処理、表示し、データを記録媒体に収録することによって、データ収集後の解析を可能にしたものです。水中に発射した音波が、深度別にどのような物体にあたってどれだけの反射音を捉えたか、色わけして示したものがエコーグラム=Echogramです。エコーグラムは計量魚探の画面上で見るとのっぺりした絵に見えますが、拡大していくとそれは計量魚探が発射した一回一回の音について、深度別の音の反射の強さの値をカラーバーに沿った色で分けて表示したものです（図1）。

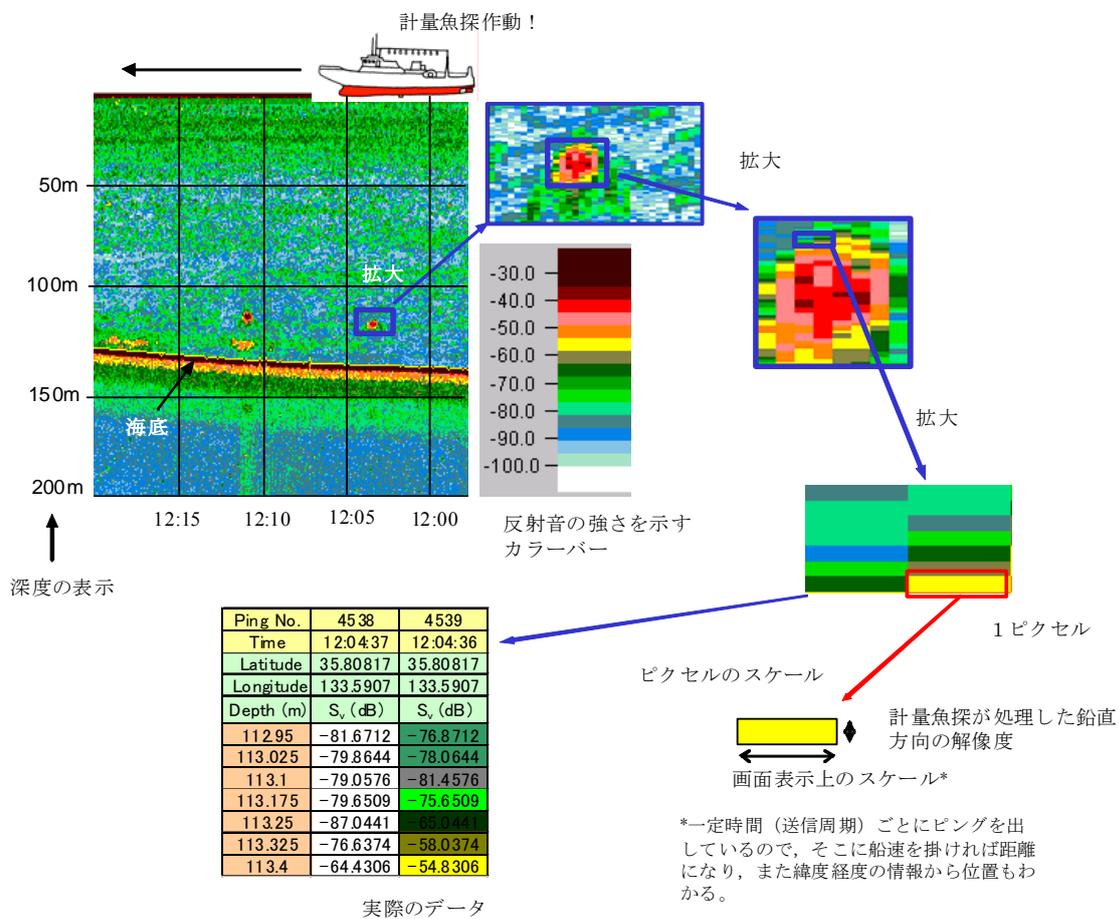


図1 エコーグラムとその詳細

2. 基礎：知っておくべき用語

次に計量魚群探知機を扱い、使い方を理解するために、知っておくべき用語を示します。

- ① 周波数-Frequency：一秒間の間に音の波がいくつあるかということ。我々の話している声は声帯がふるえて高い音・低い音（周波数により決定）、大きな声、小さな声（音圧により決定）を出しています。人間の声は100 Hz~5 kHz程ですが、計量魚探では、18, 20, 38, 50, 70, 120, 200 kHzという人間には聞こえない高い音、超音波を使っています。単位はkHzですから、たとえば38 kHzの場合、1秒間に3

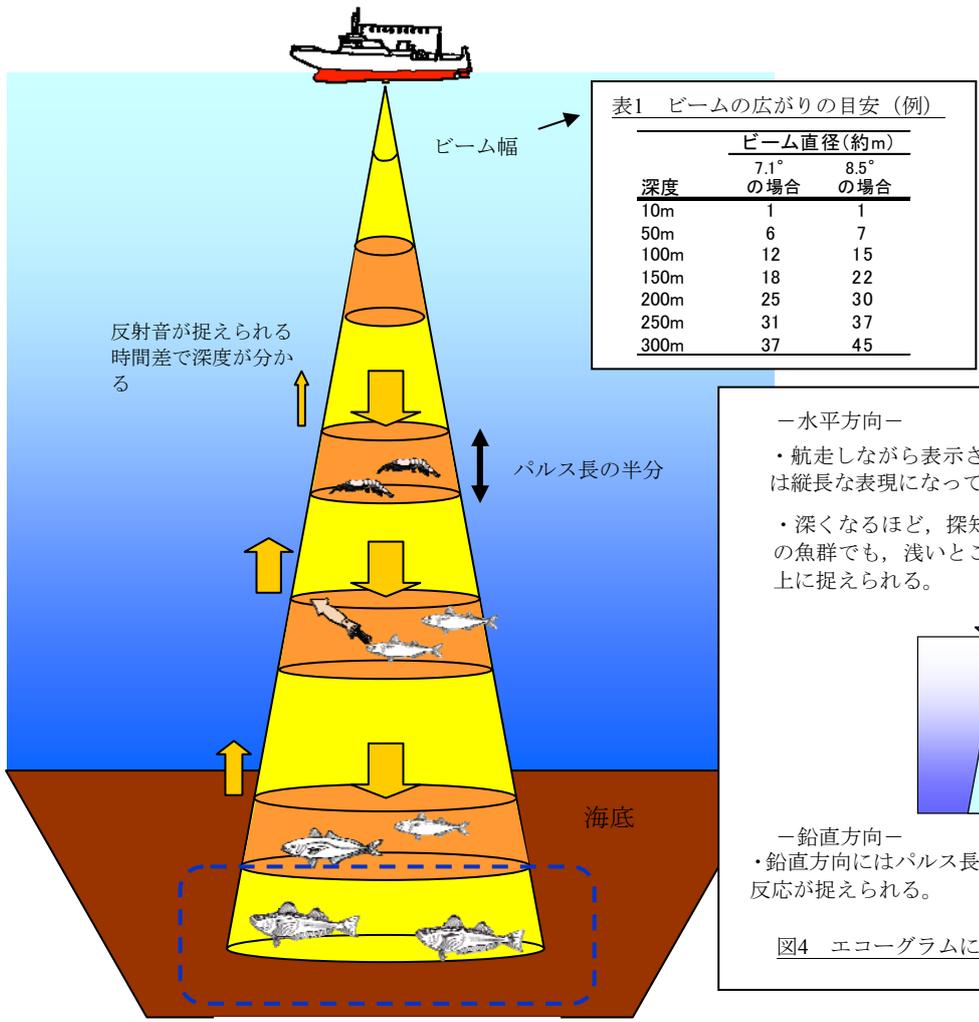
8000回（38×1000）の音の波がある音なのです。

- ② ピング-Ping：計量魚探が発射する一回一回の音波の送波。
- ③ ピングレート（送信周期）-Ping rate（interval）：計量魚探が一つ一つの音波を発射する間隔。見たい水深幅を音が往復してくる距離を考慮して設定します（自動的調整機能あり）。たとえば、1秒間隔であれば、音が一秒に1500 m進むので、750 mの深度帯をカバーできることになります*。
*実際は見たい水深を音波が行って帰ってくるよりも数倍の時間を待って次のピングを発射している。
- ④ パルス-Pulse：計量魚探が発射する一つ一つの短時間の音そのもののこと。
- ⑤ パルス長-Pulse length：パルスは一定の長さがあります。簡単にいうと、「アーという音を10秒だしてください」の10秒がパルス長です。10秒もの音を水中でだと、音が出始めてから音が終わるまで、 $1500\text{ m} \times 10 = 15\text{ km}$ もの長さになります。これでは音が何かに当たって帰ってくるまでに距離がありすぎて何がなんだか分かりません。後述しますが、長い音は解像度が悪いのです。計量魚探の場合、ms（ミリセカンド）という時間単位の音を発射しています。msですから千分の1秒です。ちなみに1 msの場合は水中の音速は1500 m/秒なので、千で割った1.5 mが実際に計量魚探が出している音の長さ（パルス長）ということになります。
- ⑥ トランスデューサ-Transducer：送受波器。通常は船底についている部分です。トランスデューサは圧電セラミックスという素子の集まりでできていて、電気信号を振動（音）に変換し（送波）、同時に振動（音）を電気信号に変換します（受波）。一般に、低周波のトランスデューサほど、径が大きく、高周波のものほど径が小さくてすみます。
- ⑦ ビーム-Beam：トランスデューサの素子から発射されたそれぞれの音は、重なり合って、トランスデューサの直下の方向でもっとも強く伝わります。逆に直下から離れていくと弱くなっていきます。つまり発射した音の強さ、そして受波の感度には方向性があるのです（指向性）。簡単にイメージすると音が円錐状に魚探の直下に広がっていき、これをビームといいます。
- ⑧ ビーム幅-Beam width：円錐状に広がったビームの幅が文字通り「ビーム幅」となります。ビーム幅は⑦で登場した、直下の感度に対して感度が半分になる幅（半減角）で表現されます。

3. 計量魚探での測定イメージ（範囲・解像度など）

実際に計量魚探から発射される音と反射音のイメージを鉛直方向の解像度の話しを交えながら、図2に示します。まず、計量魚探から発せられた音はビーム状となって広がります。ビームの広がりを目安を実際に計量魚探で用いられているビーム角を用いて表1に示しました。広がっていくビームですが、ごく表層では範囲が狭く送受波器に近いためにデータが安定しません。当然ながら、船の喫水より上の範囲は計測できないので、計量魚探にとって、表層域というのは不得意な部分であるといえます。海中に進んでいくビームはパルス長の幅で海底までを走査していきます。途中、生物がビーム内にあると深度に応じて、海底より早く反射音が帰ってきて、トランスデューサに捉えられます。鉛直方向の解像度は、パルス長の幅で走査していくので、図3に示すようにパルス長の1/2の範囲にあるもの同士は区別できません。同じ理由で、海底とパルス長の1/2の範囲にある生物は海底との区別が困難となり、表層とともに、海底付近は計量魚探にとって不得意な部分となります。

さて、航走中のエコーグラムは横のスケールが縮んだ形で表示されています。したがってエコーグラム上に縦長に映っている細長い魚群も実際は球に近かったり、横長であったりします（P.23, 29, 43, 57, 61, 63 参照）。またビーム幅があることによって、エコーグラム上に現れる魚群は同じサイズであっても深くなるほど水平方向に長く捉えられます。この他、鉛直方向にも解像度の問題によりパルス長の1/2だけ長く映ります（図4）。こうしたことを考慮に入れてエコーグラム上にうつる魚群のスケールを考えるべきなのです。



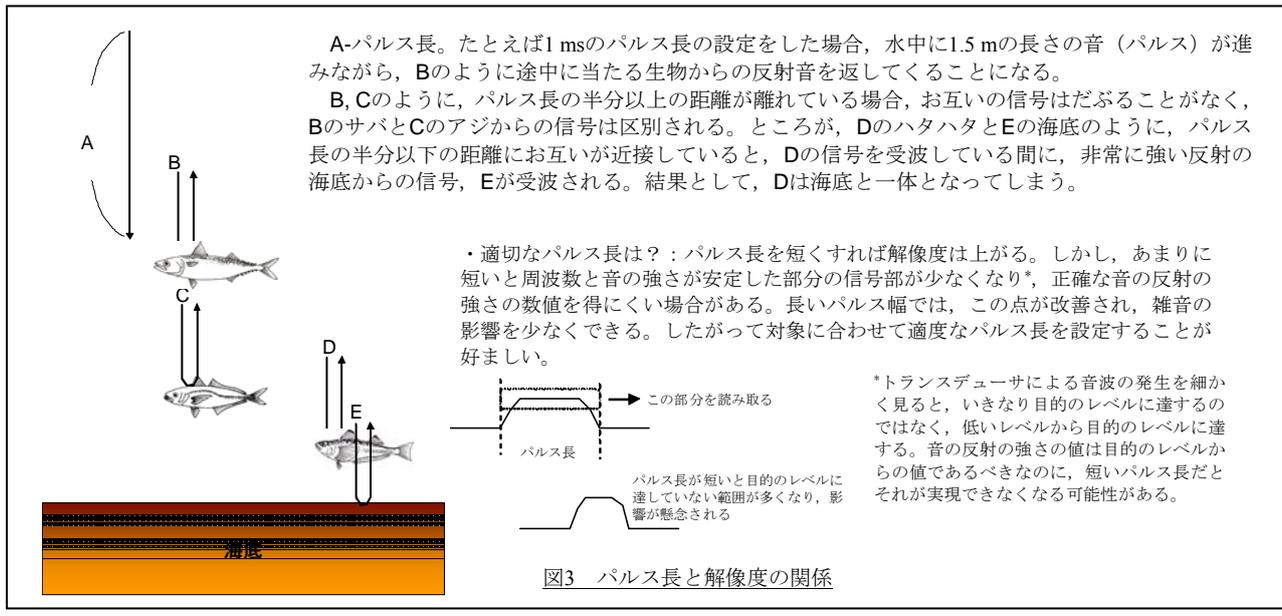
—水平方向—

- ・航走しながら表示されるエコーグラムは基本的には縦長な表現になっている。
- ・深くなるほど、探知範囲が広くなり、同じサイズの魚群でも、浅いところに比べ、長くエコーグラム上に捉えられる。

—鉛直方向—

- ・鉛直方向にはパルス長の半分の長さにも実際よりも長く反応が捉えられる。

図4 エコーグラムに映る魚群の実際のスケール



4. トランスデューサに反射音が捉えられるまで

トランスデューサから発射された音は対象に届くまでに、拡散による減衰（拡散減衰）と海水の成分によってエネルギーを吸収されて減衰します（吸収減衰）。対象に当たった音は反射し、再び、拡散減衰と吸収減衰を受けてトランスデューサに戻ってきます。拡散による減衰は単純に距離＝時間によって補正され、吸収減衰については、海水中の塩分や温度によって係数^{*1}がきまり補正されます。したがって、計量魚探を用いる際は、測定海域の水温や塩分を把握しておくべきです。特に、高周波数を用いる場合は、この吸収減衰の係数が大きくなるので、水温塩分の把握をした上で、それに合った係数を設定する必要があります。

^{*1}吸収減衰係数- α （アルファ）と表される。計量魚探や解析ソフトで係数が求められる。計量魚探での計測にあたって、標準球較正值と並んで必須の値。

5. 対象による音の反射の強さ

対象にあたった音は、対象の質や形、大きさに応じた音を反射します。質に関していえば、音の反射は媒質と物体との密度と音速の違いによって決定するので、魚の場合は鰾を持っているかどうかの一つのポイントになります（鰾という水中の気体は、水とは密度も音速も大きく異なるため大きな反射をもたらす）。また動物プランクトン類では、季節によって脂質が異なることが音の反射の強さに大きく寄与します。

素材とならんで重要なのは対象と波長^{*1}の関係です。図5に波長（ λ ）とサイズ（ L ）の関係（ L/λ ）によって、反射の強さ（ TS_{cm} 、ターゲットストレングスと呼ばれる反射の強さを体長の2乗で規準化したもの）が鰾のある生物（有鰾）と、鰾のない生物（無鰾）でどのように変化するかを示しました。波長よりある程度大きいサイズの物体であれば、音の反射の強さが対象のサイズの2乗（対象の断面積）にほぼ比例しますが^{*}、波長より小さいとそうなりません。サイズの小さいプランクトンの音の反射の強さが低周波より高周波で強く映るのもこの関係のためです。

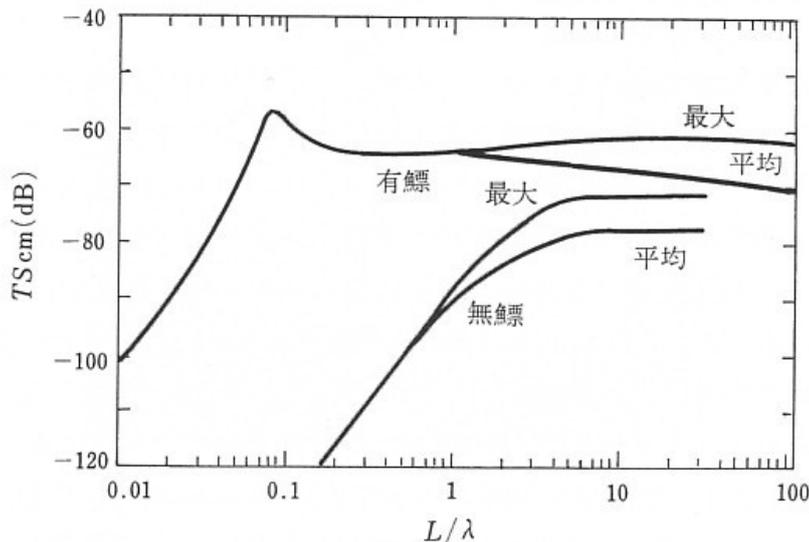


図5 波長（ λ ）と対象のサイズ（ L ）の関係（ L/λ ）によって、異なる音の反射の強さ。（古澤 2001より引用）

最後に大きさと音の反射の強さの関係ですが、当然大きなサイズほど、同じ生物では反射が大きくなります。ただ、魚探の場合、真上から音波を当てて、真上に帰ってきた音波を測ります。したがって、同じサイズの魚でも姿勢によって、反射の仕方が異なり、音の反射の強さを左右します。一匹の魚の音の反射の強さを求める際は、魚が水平に泳ぐことを仮定する場合がありますが、実際に自然状態の魚の遊泳姿勢を観察して、平均的な姿勢角を把握し、平均的な音の反射の強さを求めるのが理想です。

周波数 (kHz)	波長 (cm)
38	3.9
50	3.0
70	2.1
120	1.3
200	0.8

*1波長-Wave Length : 音波は空気中では、大体340 m/秒の速さ、水中では大体1500 m/秒の速さで進みます (音速)。周波数の解説で (2. ①, P.210) 1秒間にどれだけの音の波があるかが周波数と話をしました。ということは、音速を周波数で割り算すると一つの波の長さが求まることとなります。これが波長です (表2)。たとえば、水中で38 kHzの周波数の波長は、 $1500 \text{ m/s} \div 38000 \text{ /s}$ ですから、0.03947 m (3.947 cm) となります。

*2正確には音の反射の強さは、三次元的な魚体や鰐の形状、および魚体の材質の影響を受けます。

6. 量が求まる原理、音の単位と表現

計量魚探では魚群からの単位体積あたりの音の反射の強さを測定します。したがって単位体積あたりの音の反射の強さを平均的な一匹の魚からの音の反射の強さで割れば、単位体積あたりの尾数すなわち密度が得られます。これを魚群の高さ分積算すれば、 1 m^2 あたりの魚の密度が得る訳です。さらに、調査海域の面積を乗じれば、調査海域の魚の量が求まります。

魚からの音の反射は当たった音の強さに比べて非常に小さい微小な音です。音の反射の強さは物体に当たった音の強さに対して跳ね返った音の強さの比で表すのですが、たとえば、対象に当たった音の強さを1としたら、帰ってくる音の強さは0.001、といったようにその比率は小数点何位といったオーダーである場合がほとんどです。これでは扱いにくいので、対数を取り、10を掛けたdB (デシベル) という値で音の反射の強さを表すことが一般的です (例. 0.001で-30 dB)。もちろん、実際に魚群の密度を算出する場合、dBの値同士を単純に割り算しても密度は求められませんから、もとの線形量 (dBにする前の普通の値) に変換して計算を行います。

以下に水産音響に登場する代表的な指標を記します。

TS・・・Target strength。魚一匹あたりの反射の強さ。

S_v ・・・ 1 m^3 あたりの音の反射の強さ (平均的な S_v という意味ではMVBS-Mean Volume Backscattering Strengthを用いる場合もあり)。

S_a ・・・ 1 m^2 あたりの音の反射の強さ (断面 1 m^2 の柱体からの音の反射の強さ。海面 1 m^2 に対して、目的とする魚群の存在する深度範囲の S_v の線計量 s_v に積分幅を掛け合計し*1, dB表記したもの)。

dB表記	線形量表記
TS	σ_{bs}
S_v	s_v
S_a	s_a , ABC*2

上記の指標はdB表記ですが、これを線計量で表示する場合は、表3のように表記が異なってきます。この他、NASC (Nautical Area Scattering Coefficient) といって、線形量表記の s_a に $4\pi 1852^2$ を掛けたものも線形量表記としてしばしば用いられることがあります (NASCから密度を算出する場合は、 $4\pi \sigma_{bs}$ で割る必要あり)。

なお、水産音響の世界ではこれらの表記が統一されていないのが現状で (アルファベットの小文字・大文字・下付き文字の使い方が研究者によって異なることがある)、注意が必要です。ここでは、MacLennan *et al.* (2002)*3に従った表記としました。

*1 r_1 -積分開始深度, r_2 -積分終了深度とすると、 S_a の線形量 s_a は、 S_v の線形量 s_v を用いて、 $s_a = \int_{r_1}^{r_2} s_v(r) dr$ と表される。

*2 ABC (Area Back Scattering Coefficient) : s_a と同義で変数ではなく呼称 (ABCの値が s_a)。ちなみにNASCも呼称。

*3 MacLennan. D. N., Fernandes. P. G., Dalen. J. 2002 A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics. ICES J. Mar. Sci., 59: 365-369.

7. 水産音響調査実施の注意点

実際に調査を行う場合、前述したように音の反射の強さを問題とするので、計量魚探が正しい反射音の値を読み取っているかを把握するために、計量魚探の較正を行うことが重要となります。そしてその際、調査で使うパルス幅・周波数毎に較正を行う必要があります。水温が大きく異なる環境ではトランスデューサの感度も変わる可能性があるため、やはり較正を行うことが推奨されます。現在、一般的には水温と塩分により反射音の値が分かる標準較正球という金属球をつるして、理論値と実測値を比較することによって較正を行います。船を止め、船底のトランスデューサの直下に標準球を吊るす作業は簡便ではありませんが、多くの誤差要因を含む音響調査において、確実な誤差軽減の第一歩が計量魚探本体の較正であり、その意味で基本的かつ重要なものとなります。

調査の実施にあたって、もう一つ重要なことは雑音の影響をなるべく排除することです。計量魚探は出した周波数の音を拾う調査機器ですから、似たような周波数の音が調査船の他の音響機器（通常魚探、潮流計、ADCPなど）より発射されていれば、その音が計測値に混じることになります（音波の干渉：P.111, 129, 145, 202に事例）。対象生物の音の反射の強さが、これらの雑音に比べて十分に大きいのであれば、影響は少ないといえますが、実際の調査では、データを収集している間に数回画面をチェックし、予期しない雑音の混入を避けるように注意する必要があります。なお、雑音に関連して、荒天時には船底が波をたたくことで発生した気泡等により、音波の送受波がままたまならない場合があります（泡切れ：P.129に事例）。このような場合は調査の時間を考慮しながら船速を調整するか、もしくは、走る方向を調整（向かい波を受けないように）することで影響を軽減します。

8. 最後に

計量魚探は、開発当初に比べれば大幅に進歩したとはいえ、スイッチを入れれば自動的に魚の量が求められるという測器ではありません。計量魚探を活用するためには、まず、調査海域の経験的な知見を収集し、生物採集とエコグラムのデータセットを揃えて魚種判別を行うステップが必要不可欠であり、音響データのみから結果を導くことはできません。また、仮に魚種判別をクリアしたとしても、魚の量を正確に求める場合は、対象魚群の魚種組成の把握、その魚群内の魚の平均的なサイズの把握、遊泳姿勢を考慮したTS-体長関係の当てはめ等が必要になります。広い海域を対象にして、これらを完璧にクリアするのは生物サンプリングの回数、手法の制限もあり、不可能です。しかし、計量魚探は、見えない海を可視化して効率的にデータを取り続けることのできる唯一の計測機器であることに変わりはありません。航海中にスイッチを入れて自動的にデータを収集しておけば、ある程度精度は粗くても、比較的少ない労力で海中の生物分布を定量的に把握するモニタリングが可能になります。たとえば、海洋観測等で一定の定線を定期的に航走する際は、その間データを取り続けておけば、データが積み重なり、TSの情報がなくとも、NASCなどの値を指標として、生物量の長期的なモニターをすることも可能なのです。このような観点から、まず第一歩は計量魚探でデータを取り、エコグラムの理解の元、他の調査の結果と突き合せながら、最終的に必要となる情報の精度にあわせて、計量魚探で得られたデータを活用することが大切です。

参考文献

- 奥村都誉司, 大下誠二, 本田 聡, 宮野鼻洋一, 高尾芳三 1992 音響調査の設計とデータ解析: 現代の調査方法の総合的解説 (ICES COOPERATIVE RESEARCH REPORT No.187 の和訳), (独) 水産総合研究センター 水産工学研究所, 1-161
- 古澤昌彦 2001 音で海を見る, ベルソープックス007 成山堂書店. 東京
- 古澤昌彦 2005 音響水産資源調査の原理, 実際, 将来, 西海ブロック漁海況研報 第12号
- 古澤昌彦 2007 水産音響の発展. 海洋音響学会誌 Vol.34 No.4 234-346