

簡易型計量魚探機を用いた全国規模での魚礁設置効果評価法の標準化

実施機関：独立行政法人水産大学校 海洋生産管理学科

〃 水産情報経営学科

担当者：濱野 明・中村武史・青木邦匡

調査実施年度：平成 16 年度－平成 18 年度

1. 緒言

本研究は水産基盤整備調査委託事業のうち「音響・光学機器等を活用した魚礁の蝟集効果把握技術開発調査」の一環として、平成 16 年～18 年度にかけて実施されたものである。

水産基盤整備の対象海域が沿岸から沖合域に進展し、さらに魚礁規模も大規模化するに従い、従来の漁獲調査や潜水調査及び通常魚探機による魚礁設置効果法では適正に魚礁の設置効果の評価することが難しくなってきた。さらに、多額の設置費用がかかる事業に対しては、これまで以上に定量的な評価が求められている。

本研究の目的は、比較的廉価で取り扱いが容易な音響調査機器を用いて、地域に関係なく複数年にわたって比較できる等質データを得るための調査機器の開発と評価手法の開発である。すなわち、一つの魚礁漁場や一つの魚礁に関する魚礁設置効果評価を考えるのではなく、全国規模で魚礁設置効果を一律に評価できるシステムの構築及び標準化を目指したものである。

そこで、本研究では音響資源調査の中心的機器として、広範囲な海域の資源量調査や海洋生物の分布をリアルタイムで収集できる簡易型計量魚探機の開発と評価手法の開発を考えた。この簡易型計量魚探機の特徴は、機器校正を一旦行えば、いつ（調査年度）でも、どこで（地域）でも定量的な情報が収集できることにある。この比較的廉価な簡易型計量魚探機の開発と調査手法の開発は本グループ内の MF21（古野電気）と共同で開発を行った。そのなかで特に水大校は魚礁設置効果を定量的に評価するための手法開発を重点的に行った。この結果、全国規模での展開に先駆けた音響手法による魚類蝟集モニタリング（魚礁の蝟集効果評価手法）の実証化実験調査に向けての基礎的知見を集積することができた。

以下にその調査方法と結果を記述する。

2. 調査方法

2.1 調査海域

対象とした調査海域は山口県阿武町約 2.5 マイル沖の魚礁漁場である（図 1）。図 1 に示す水中構築物は本調査海域の水深約 67m に設置されている高さ 30 m の高層魚礁と、水深約 65m に設置されている高さ 7.5 m の H10 年魚礁である。

2.2 調査内容

本調査は機器開発担当の MF21（古野電気）と共同で 3 ヶ年の調査研究として実施した。なお、年度毎の調査内容は下記の通りである。

平成 16 年度：MF21（古野電気）と共同で簡易型計量魚探機開発のための基礎実験を行った。また音響データ処理の根幹部分である、魚礁と魚群との分離識別法を二値化画像処理法を用いて検討した。

平成 17 年度：魚礁域を調査する上での適切な周波数を検討するため、シミュレーション法を用いてビーム幅に伴う魚礁の画像拡大効果と探知不可能範囲（以下、Dead zone）の推定を行った。

平成 18 年度：シミュレーション法と音響強度分布に基づく二値化処理による判別分析法により、魚礁エコー範囲の推定を行った。また対象生物の音響散乱特性を考慮した魚礁域を調査する上での適切な周波数の検討を行った。

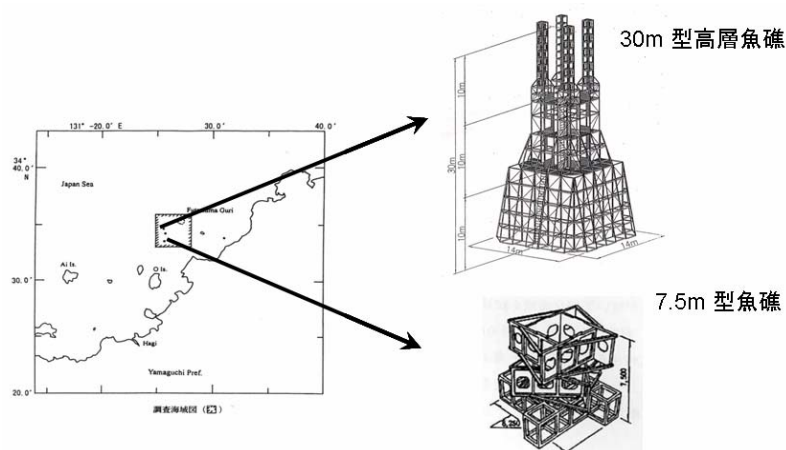


図 1 調査海域図と対象魚礁

2.3 調査方法

調査は平成 16-18 年にかけて図 1 に示す山口県阿武町約 2.5 マイル沖に設置された高さ 30 m の高層魚礁と 7.5 m の H10 年魚礁を対象に、萩市越ヶ浜漁船の“神市丸”（4.9 トン）と萩市大島漁船の“義漁丸”（4 トン）及び、山口県水産研究センター調査船“くろしお”（総トン数 119 トン）と“第二くろしお”（総トン数 16 トン）を使用して実施された。用いた計量魚探機は機器開発担当の古野電気と共同で開発した簡易型計量魚探機（ETR-30N:38kHz, 50kHz, 82kHz, 107kHz, 200kHz）である。ここで、使用した各魚探機システムの設定値を表 1 に示す。音響データの取得に関しては、魚礁直上を船速約 1.7 knots の低速で通過し、計測した音響信号を 1 ピングごとに収集した。ここで得られた音響信号を基に音響解析ソフト“Echoview”（Sonardata 製）を用いてエコーグラムを作成するとともに、深度方向 1m、水平方向 0.63m に設定してセル毎の体積後方散乱強度（以下、SV 値）を求めた。調査結果については、年度毎のテーマに沿って報告する。

表 1. 使用した魚探機の性能

普及型計量魚探機 古野電気製 ETR-30N

周波数(kHz)	ビーム幅 _{-3dB} (20)	ビーム幅 _{-6dB} (20)	ビーム幅 _{サイドローブ} (20)	指向性利得(dB)	等価ビーム幅(dB)
38	20.0×20.8	27.4×28.4	31.6~39.6	21.2	-11.6
50	13.3×18.0	18.2×24.6	20.8~27.2	23.6	-14
82	9.0	12	8.4	26.3	-18.4
107	9.4	12.9	12.8~16.5	26.4	-18.6
200	5.9	8.1	10.1	30	-22.7

3. 調査結果

3.1 二値化画像処理法を応用した魚礁と魚群の分離識別法の開発

図2は計量魚探機により得られた魚礁に密着して分布する魚群と魚礁を示すエコーグラムの一例である。このデジタル化された魚探画像をもとに魚礁と魚群を分離・識別するためには、計量魚探機により得られるSV値を用いて何らかの閾値を設定する必要がある。

ここで、エコーグラムのもとになるSV値の分布を閾値 t で2つのクラスに分割したとき、最もよく2つのクラスに分離できる方法の一つとして判別分析による閾値選択法がある。¹⁾分離性の尺度としては、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)が用いられ、この判別比が最大になるように閾値 t が選択される。そこで、本研究では閾値 t を求める二値化画像処理による判別プログラムをPerl言語により作成し、Linux上で解析を行った。この閾値 t を求める閾値選択アルゴリズムを以下に示す。

まず閾値を t として、 t 以上のSV値をもつセルと、それより小さな値をもつセルの2つに分ける。

クラス i ($i=1,2$)のセル数を ω_i 、平均SV値を M_i 、分散を σ_i^2 とおき、全セルの平均SV値を M_T とおくと、クラス内分散は

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

クラス間分散は

$$\sigma_B^2 = \frac{\omega_1 \omega_2 (M_1 - M_2)^2}{(\omega_1 + \omega_2)} \quad (2)$$

で与えられる。さらに、全セルのSV値の分散を σ_T^2 とすると、次の関係

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

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 を最大にすればよいことが分かる。すなわち t を変化させて σ_B^2 を最大にする t の値を求めればよい。しかし、ある閾値だけで魚礁と魚群の分離・識別を行う場合、船の動揺に伴うエコーレベルの変動やビームの端で魚礁を探知した場合に生じる反射強度の低下の問題を検討しておく必要がある。そこで、この問題を解消するために隣り合うセル間の反射強度の変化に基づいて境界を検出する方法により、上記設定閾値の妥当性を検討した。つまり、本法では隣り合うセルの勾配の大きさを変化量としてとらえ、偏微分を差分して得られた値を2分化するというものである。今回の勾配に基づく境界の検出は各セルの4近傍の差を用いて行った。

ここで、あるセル (x_i, y_j) のSV値を $f(x_i, y_j)$ として表すと、勾配の大きさ $|\nabla f(x_i, y_j)|$ の差分は次式で表すことができる。

$$|\nabla f(x_i, y_j)| = \sqrt{(f(x_{i+1}, y_j) - f(x_{i-1}, y_j))^2 + (f(x_i, y_{j+1}) - f(x_i, y_{j-1}))^2} \quad (5)$$

そこで、式 (5) を用いて、魚礁と魚群の境界の検出を行った結果、その境界は2値化処理された結果 (図3) とほぼ同じ結果 (図4) を示し、魚礁反応域だけを上手く抽出することができた。

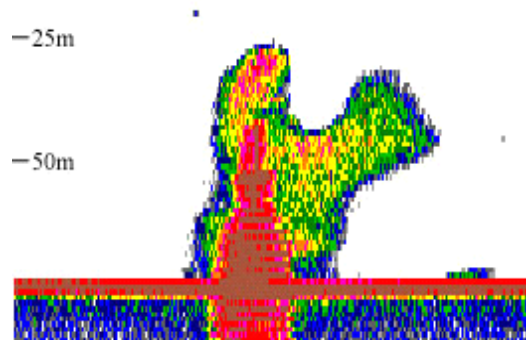


図2 SV 値データに基づく人工魚礁と魚群の魚探映像

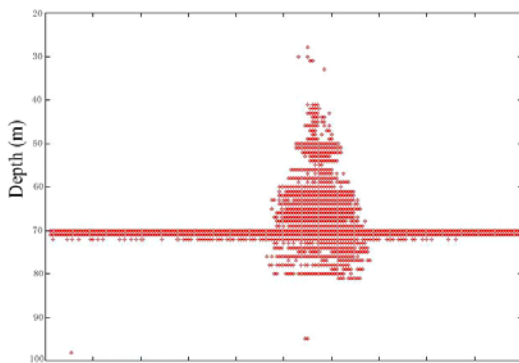


図3 画像2値化処理による魚礁の抽出

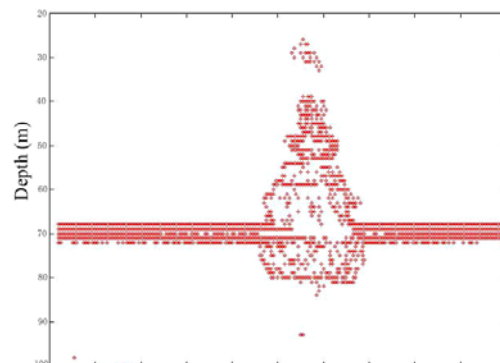


図4 勾配の変化に基づく魚礁と魚群の境界検出

3.2 シミュレーションプログラムを用いたビーム幅に伴う魚礁の画像拡大効果と探知不可能範囲の推定

深度方向に高さがある魚礁を対象に魚探機を用いて調査する場合、ビーム幅の影響により、深度が増加するに従って実際の魚礁より画像が拡大表示される。また、構造物の内部あるいは海底付近では球面波の影響により探知できない探知不能範囲、すなわち、Dead zone が生じる。これらの問題は魚探機を用いて魚礁域を調査する際に最も注目しなければならない重要な問題である。

そこで、対象とする魚礁の形状を3次元座標化し、船速、航走針路、ビーム幅及びパルス発射回数を変動パラメータとして、魚探機で得られる画像をシミュレーションによりコンピュータ上で再現し、ビーム幅に伴う魚礁の画像拡大効果と Dead zone を定量的に推定することを試みた。ここでは、5周波数 (38kHz, 50kHz, 82kHz, 107kHz, 200kHz) の簡易型計量魚探機を用いて、高さが異なる30m型の高層魚礁と7.5m型のH10年魚礁を対象に、その直上を3ノットで通過した場合の音響計測シミュレーションを行った。なお、プログラム言語には Visual Basic を用いた。これらの解析から得られた主な結果は次の通りである。

- (1) 高層魚礁及び H10 年魚礁ともに深度変化に伴う画像拡大効果は、周波数が低くなるにつれ大きくなることがコンピュータの画面上で再現できた (図5, 図6)。

- (2) シミュレーションにより再現された魚探画像と高層魚礁と H10 年魚礁の設計図を基に算出した断面積から、本研究で使用した 5 周波毎の Dead zone を推定した。この結果、Dead zone の領域は高層魚礁及び H10 年魚礁ともに周波数が低くなるに従って大きくなり、特に、高さのある高層魚礁の方で H10 年魚礁に比べ、約 3.4~4.8 倍大きくなることが定量的に把握できた (表 2, 表 3)。
- (3) シミュレーションにより算出される周波数毎の魚探機の探査面積 (Sampling zone: Sz) と Dead zone の面積 (Dead zone : Dz) の差と Dead zone の面積の比を指標値 (以下、探査効率という) として利用し、魚礁周辺を音響調査する際の適切な周波数について検討を行った。この結果、高層魚礁ではビーム幅の差に伴う探査効率に大きな違いは見られなかったものの、高さのない H10 年魚礁ではビーム幅の影響が大きく、高周波数帯が有効であることが示された。(表 2, 表 3, 図 7)

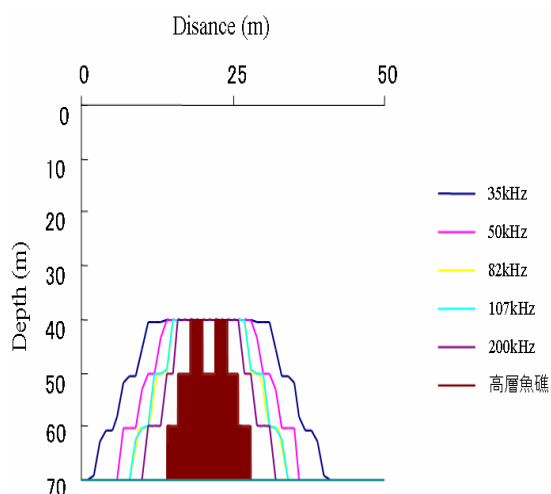


図 5 シミュレーションにより再現された周波数毎の魚礁画像 (高層魚礁)

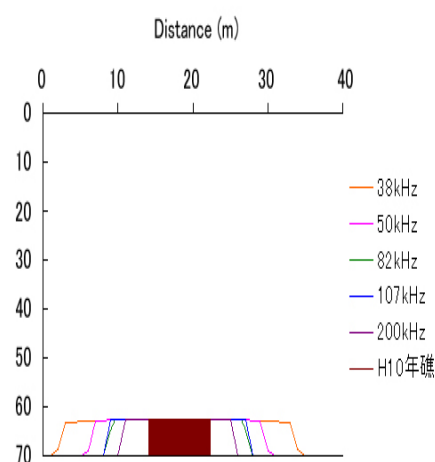


図 6 シミュレーションにより再現された周波数毎の魚礁画像 (H10 年魚礁)

表 2. シミュレーション結果(高層魚礁)

周波数 (kHz)	ビーム幅 (deg)	魚探画像面積 (㎡)	設計図上の面積 Da (㎡)	Dead zone 面積 Dz (㎡)	魚探機の探査面積 Sz (㎡)	探査効率 (Sz-Dz) / Dz
38	25.8	1016.7	280	850.3	4342.2	4.1
50	17.6	787.2	280	552.5	3253.4	4.9
82	11.7	620.7	280	360.1	2479.6	5.9
107	9.5	560.6	280	294.1	2202.3	6.5
200	10.3	582.5	280	318.0	2303.5	6.2

表 3. シミュレーション結果(H10年魚礁)

周波数 (kHz)	ビーム幅 (deg)	魚探画像面積 (㎡)	設計図上の面積 Da (㎡)	Dead zone 面積 Dz (㎡)	魚探機の探査面積 Sz (㎡)	探査効率 (Sz-Dz) / Dz
38	16.5	197.3	62	174.8	2710.5	14.5
50	14.6	180.9	62	149.2	2459.8	15.5
82	12.9	166.9	62	128.7	2244.8	16.4
107	10.8	148.9	62	104.0	1972.8	18.0
200	8.3	127.4	62	76.4	1647.3	20.6

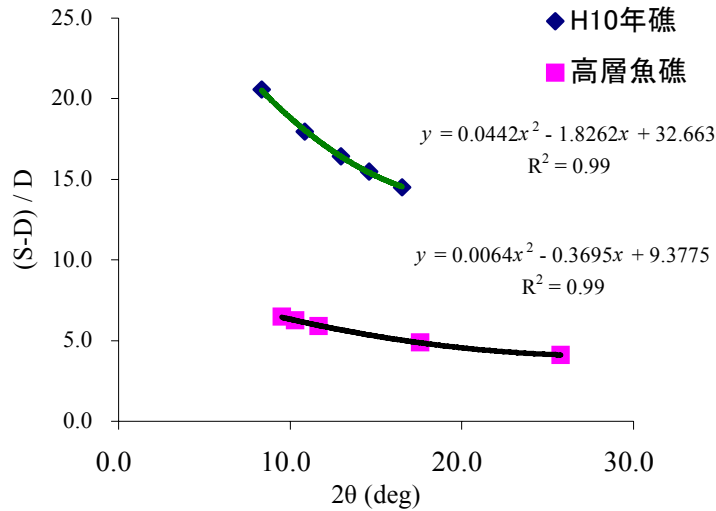


図7 ビーム幅 (2θ) と探査効率 (S-D) / D との関係

3.3 ビーム幅に基づいたシミュレーション法と音響強度分布に基づく二値化処理法による魚礁エコー範囲の推定

本研究では魚探機が持つビーム幅に伴う画像拡大効果や音響強度の分布から、魚群分布を計測できない範囲（以下、魚礁エコー範囲と定義する）を推定するための手法開発を行った。

まず、表1に示す簡易型計量魚探機の5周波数（38kHz, 50kHz, 82kHz, 107 kHz, 200kHz）の-3 dBのビーム幅 (2θ) と-6 dBのビーム幅 (2θ) 及びサイドローブのビーム幅 (2θ) を用いて、シミュレーション法（平成17年度開発）により、ビーム幅による影響を考慮した魚礁エコー範囲を推定した。次に、魚探機により得られたSV値の分布に基づいて、二値化処理技術を応用した判別分析法（平成16年度開発）により、音響強度の分布を考慮した魚礁エコー範囲の推定を行った。これら一連の処理の後、図8に示す2つの魚礁エコーの集合範囲に対し、ローリングやピッチング等の影響によるビームの揺れを考慮した係数、すなわち安全率を掛けることにより、最終的な魚礁エコー範囲を推定した。得られた主な結果は以下の通りである。

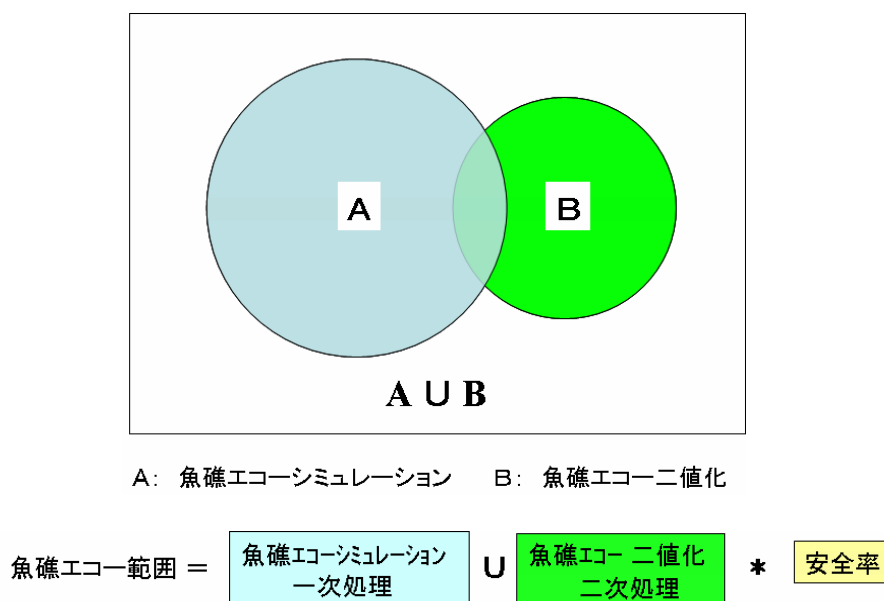


図8 魚礁エコー範囲の概念図及び解析フロー

- (1) 今回作成したシミュレーションプログラムは使用する魚探機の周波数やビーム幅及びパルス幅、さらには調査時に得られた GPS からの情報（船速、コース、緯度・経度）など多様なパラメータを用いて、紙上では行えない複雑な計算が可能となった。
- (2) ビーム幅による影響のみを考慮してシミュレーションで得られた水深情報を位置情報や時間情報とともに ASCII 形式で記録することにより、魚探機のエコーグラム上に魚礁エコー範囲を反映させることができた。（図 9）。
- (3) 5 周波数の魚探機により得られた SV 値の分布に基づき、二値化画像処理による判別分析法を用いて、音響強度の分布を考慮した魚礁エコーの影響範囲を抽出するための閾値を周波数毎に算出した。さらに、(2) で示したビーム幅による影響を考慮して行ったシミュレーションの結果を和集合として考えることによって、最終的な魚礁エコー範囲を求めることができた（図 10）。これにより、魚礁エコー範囲以外は、魚群分布を計測できる範囲として容易に解析を行うことが可能となった。

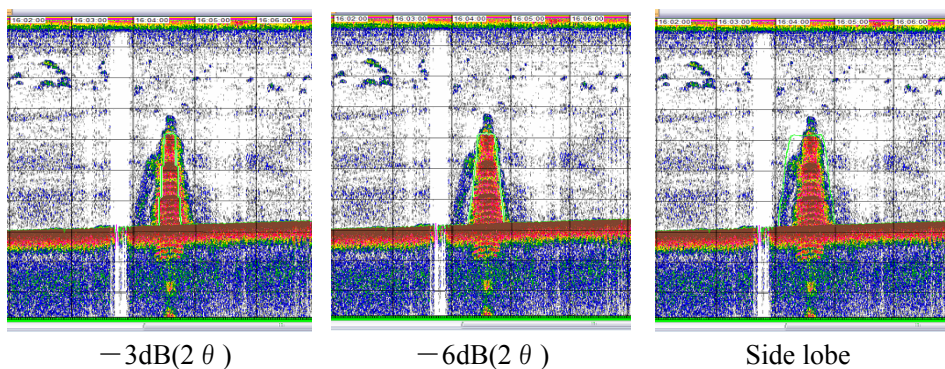


図9 シミュレーション法により各ビーム幅に基づいて再現された 38kHz における魚礁エコー範囲 (緑色で示した範囲)

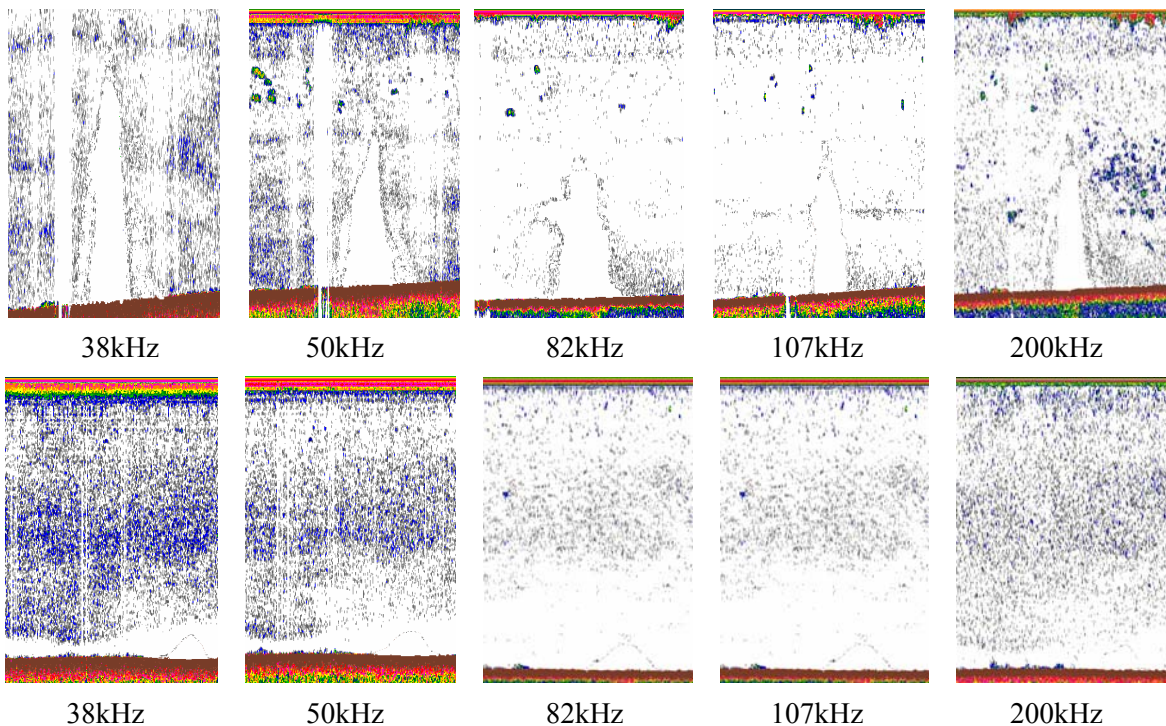


図10 二値化処理法により周波数毎に求められた魚礁エコー範囲 (上図：高層魚礁 下図：H10年魚礁) (白抜きで示した範囲)

3.4 対象生物の音響散乱特性を考慮した魚礁域を調査する際の適切な周波数の検討

魚礁域を調査するための適切な周波数を選定するためには、前項で検討したビーム幅以外にも対象生物の音響散乱特性を考慮に入れた検討が必要である。図 11 は魚礁周辺海域において得られた 38kHz と 200kHz のエコーグラムの一部を表したものである。この図から緑色の線で示した深度 20 m～40m 層にかけて、連続的に分布する音響散乱層が 200kHz と 38kHz の 2 周波数において観測された。このような音響散乱層は一般に動物プランクトンや魚類稚仔魚などにより構成される。²⁻⁴⁾ また、動物プランクトンと鰾を持つ魚類では超音波反射特性が大きく異なるため、魚探機を用いて音響散乱層を対象に調査した場合、使用する魚探機の周波数によって測定される SV 値に差が生じる。Miyashita *et al.* (2004) は 38kHz と 120kHz の 2 周波数の計量魚探機を用いて、2 周波間の SV 値の差 (以下、 ΔSV) から、エコー反応を構成する稚仔魚と動物プランクトンの分離・識別を行っている。ここで、2 周波で測定された体積散乱係数 Sv はそれぞれ、

$$Sv_{(120kHz)} = n \cdot \sigma_{bs(120kHz)} \quad (1)$$

$$Sv_{(38kHz)} = n \cdot \sigma_{bs(38kHz)} \quad (2)$$

として表される。ここで、 n は密度、 σ_{bs} は対象種 1 個体当たりの後方散乱断面積である。そのため、2 周波で測定された Sv の比は、(1) 式と (2) 式の共通項である密度 n を除去することで (3) 式に示すような σ_{bs} の比として表すことができ、

$$Sv_{(120kHz)} / Sv_{(38kHz)} = \sigma_{bs(120kHz)} / \sigma_{bs(38kHz)} \quad (3)$$

さらに、(3) 式を対数に直すことにより、

$$\Delta SV_{(120kHz-38kHz)} = Sv_{(120kHz)} - Sv_{(38kHz)} = TS_{(120kHz)} - TS_{(38kHz)} \quad (4)$$

2 周波間の SV 値の差は TS 値の差として表すことができる。

そこで、本研究においても Miyashita *et al.* (2004) の方法を用いて、200kHz と 38kHz により得られた深度 20m～40m 層における 2 周波間の平均 SV 値の差 ($\Delta SV_{200kHz-38kHz}$) を調べてみた。この結果、2 周波間の ΔSV 値は平均約 -5.4dB と 200kHz に比べ 38kHz の方で高い値を示した (図 12)。これら 2 周波間の SV 値に差が生じた理由について考察するため、有鰾稚魚のように鰾が音波の波長に対して小さい場合に有効な気泡共振モデル⁵⁻¹⁰⁾ を用いて、200kHz と 38kHz の 2 周波数間の TS 差を調べた結果、体長約 3mm～40mm の範囲では 200kHz に比べ 38kHz の方で高い値を示した。これらの結果から深度 20m～40m 層において 200kHz に比べ 38kHz の方で高い値を示した結果は、音響散乱層内に分布したと考えられる体長約 4cm 以下の稚仔魚等の超音波散乱特性が反映された結果であると示唆された。

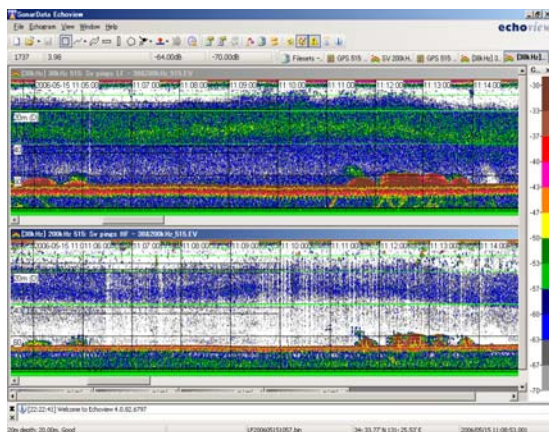


図 11 38kHz と 200kHz により魚礁周辺域において得られたエコーグラム (上図：38kHz, 下図：200kHz)

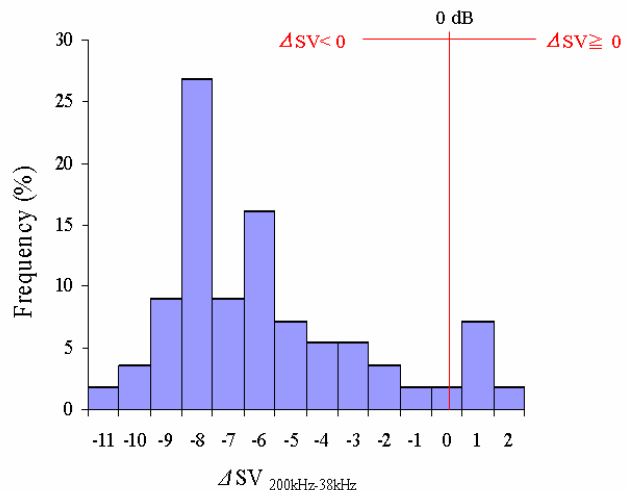


図 12 深度 20m～40m 層における $\Delta SV_{200kHz-38kHz}$ の分布

4. 考察

水産基盤整備事業の大きな柱の一つである魚礁設置効果評価を、限られた国家予算の中で効率的に行うためには、特定の海域、あるいは特定の魚礁だけの効果評価を考えるのではなく、全国規模で一律に魚礁設置効果を定量的に評価して、重点的に整備すべき海域を決定することが重要である。そのためには、地域や調査時期に関係なくデータを同等のものとして扱うことができる計測機器を導入して、全国規模で魚礁設置効果を評価できるシステムを構築する必要がある。特に、潜水や釣りなどによる評価手法が応用できない大水深海域における魚礁設置効果評価法の確立は、沿岸・沖合漁業の振興にとって重要な意味を持つ。

計量魚探機による調査手法の利点は、調査ごとに較正を行えば、いつでも、どこでも等質なデータが得られ、数年にわたって数多くのデータを収集・蓄積できる点にある。しかし、計量魚探機は従来高額であったため、一部の調査船でしか利用できない状況にあった。また、計量魚探機を用いて魚礁域を調査する上での最適な調査方法や適切な周波数の選定については、これまで詳しく調べられた報告例は少ない。

そこで、本研究では機器開発担当の MF21（古野電気）と共同で、従来高額であった計量魚探機の最低必要限度の機能だけを残した比較的廉価な簡易型計量魚探機を開発した。ここで開発した簡易型計量魚探機の性能を評価するため、簡易型計量魚探機により得られた平均 SV 値と水産大学校が所有する曳航式計量魚探機より得られたそれとを比較した結果、両者はほぼ同程度の値を示した。このことから、簡易型計量魚探機は高額な計量魚探機と技術的にも遜色がないことが示された。さらに、計量魚探機を用いて魚礁域を調査する上での最適な調査手法を確立する前段階として、初年度（平成 16 年度）は計量魚探機により得られたデータの中から魚礁と魚群を分離・識別するための判別アルゴリズムを二値化画像処理技術を応用して開発した。これにより、これまで経験的判断によって設定されていた魚礁と魚群の閾値判別を数理的に求めることが可能となった。次年度（平成 17 年度）は Visual Basic 言語を用いて開発したシミュレーションプログラムにより、ビーム幅に伴う画像拡大効果と Dead zone を定量的に推定した。そして、最終年度（平成 18 年度）はビーム幅に基づく探査率からの検討に加え、対象生物の音響散乱特性を考慮して、魚礁域を調査する上での適切な周波数選定に係わる検討を行った。このように、これまで 3 ヶ年かけて実施してきた簡易型計量魚探機を用いたモニタリング手法が今後標準化されれば、魚礁蝟集効果を全国規模で比較することができ、且つ天気予報の気温情報のように、魚礁設置効果を可視化された情報として定量的に評価することができるものとする。また、地理情報システム（GIS）技術などを用いることによって、全国各地に設置された魚礁へ蝟集する魚群情報を海洋環境情報と関連付けることにより、両者の関係を多次的に評価することも可能となろう。¹¹⁾ 従って、本システムは今後水産基盤整備事業における沿岸・沖合漁業の振興を効率的に行うための意思決定支援システムとしても、地域的な魚礁設置特性に関する貴重な情報を提供できる有効なシステムになるものとする。

5. 摘要

1. 機器開発担当の MF21（古野電気）と共同で、従来高額であった計量魚探機の最低必要限度の機能だけを残した比較的廉価な計量魚探機を開発し、魚礁設置効果を定量的に評価するための現場での基礎的実験を行った。
2. Linux 上で動作する Perl 言語により作成した二値化画像処理技術を用いて、計量魚探機により得られる膨大なデジタル情報をもとに魚礁と魚群を分離・識別するための判別プログラムを開発した。これにより、これまで経験的判断によって設定されていた魚礁と魚群の閾値判別を数理的に求めることが可能となった。

3. 魚礁域を調査する上で重要な適切な周波数を選定する前段階として、ビーム幅や船速、パルス発射回数、進路などをパラメータとするシミュレーションプログラムを Visual Basic 言語を用いて作成し、コンピュータ上で魚探画像を再現することができた。このシミュレーションで得られた結果に基づき、ビーム幅の影響による魚礁の画像拡大効果や探知不可能範囲 (Dead zone) を推定した。この結果、深度変化に伴う画像拡大効果は、高層魚礁及び H10 年魚礁ともに周波数が低くなるにつれ大きくなり、Dead zone の領域は高層魚礁及び H10 年魚礁ともに周波数が低くなるに従って大きくなり、特に、高さのある高層魚礁の方で H10 年魚礁に比べ、約 3.4~4.8 倍大きくなるのが定量的に把握できた。
4. ビーム幅に基づいたシミュレーション法と音響強度分布に基づいた二値化処理による判別分析法を組み合わせることにより、魚礁範囲として魚群を計測できない範囲、すなわち、魚礁エコー範囲を推定することができた。これにより、魚礁エコー範囲以外は、魚群分布を計測できる範囲として容易に解析を行うことが可能となった。
5. 今回の研究では主にビーム幅を中心とした考えに基づいてシミュレーションプログラムを開発してきたが、今後は船体動揺に伴うビームの揺れについて検討する必要がある。また、魚礁をどの方向から探査するかは調査手法とも密接に関連しているので、これらのことを考慮したプログラミングの開発も重要となる。さらに、適切な周波数を総合的に検討するためには、SN 比や音波減衰、パルス幅、対象生物の音響散乱特性に対する考慮も必要である。

6. 参考文献

- 1) 田村秀行, 2002 : コンピュータ画像処理. オーム社, 東京, pp.137-179.
- 2) 飯田浩二・向井 徹・森 英樹, 1999 : 音響散乱層の体積後方散乱強度の周波数特性と構成種のターゲットストレングスに関する考察. 日本水産学会誌, 65(1), 66-72.
- 3) 宮下和士・青木一郎・稲垣 正, 1996 : 2 周波を用いた動物プランクトンの音響計測に関する研究. 日本水産学会誌, 62(1), 68-72.
- 4) K.Miyashita, K.Tetsumura, S.Honda, T.Oshima, R.Kawabe and K.Sasaki, 2004 : Diel change in vertical distribution patterns of zooplankton and wallyey Pollock (*Theregra chalcogramma*) off the Pacific coast of eastern Hokkaido, Japan, estimated by the volume back scattering strength (Sv) difference method. *fish. Oceanogr.*, 13, 99-110.
- 4) C.Devin, 1959 : Study of thermal, radiation, and viscous damping of pulsating air bubbles in water. *J.Acoust.Soc.Am.*, 31, 1654-1667.
- 5) I.B.Andreeva, 1964 : Scattering of sound by air bladders of fish in deep sound-scattering ocean layers. *Sov. Phys. Acoust.*, 10, 17-20.
- 6) R.H.Love, 1978 : Resonant acoustic scattering by swim-bladder bearing fish. *J. Acoust.Soc.Am.*, 64, 571-580.
- 7) A. Løvik nad J.M.Hovem, 1979 : An experimental investigation of swimbladder resonance in fishes. *J.Acoust. Soc. Am.*, 66, 850-854 .
- 8) 古澤昌彦, 1990 : 水産資源推定のための超音波による魚群探知に関する研究. 水産工学研究報告. 11, 173-249 .
- 9) 古澤昌彦 : 気泡と音波 (IX) - 鯿と魚による超音波散乱 -, 1988. 海洋音響学会誌, 16, 181-197 .
- 10) 漁港漁場漁村技術研究所, 2006 : 水産基盤整備生物環境調査 (原単位把握のための調査) - 蛸集量把握のための調査 - 報告書. 1-29.
- 11) 濱野 明, 中村武史, 2004 : 音響リモートセンシング GIS を用いた人工魚礁効果の定量的評価法に関する研究. 平成 13-15 年度水産基盤整備調査委託事業報告書, 水産庁, 1-11.