

人工魚礁漁場評価のための音響モニタリング技術の開発

水産大学校 海洋生産管理学科

濱野 明・中村武史

調査実施年度：平成10～12年度

1. 緒言

従来の魚礁設置効果に関する研究では、魚礁近傍に分布する魚類資源に対する集魚効果、あるいは生産効果を把握することに重点が置かれていた。¹⁻⁴⁾しかし、魚礁周辺に分布する魚類は環境の影響を受けて三次元的にしかも短時間に移動するため、迅速かつ広域にわたってモニターしなければならないにもかかわらず、その調査手法が確立されていなかった。従って、魚礁漁場全体の視点から魚礁の設置効果を総合的に評価するためには、魚礁漁場全域を対象とした広範囲な海域を、迅速にしかも定量的にモニタリングできる調査手法の確立が必要となる。ここで、魚礁漁場に分布する魚類の時空間的分布に関する情報を広範囲に、また迅速かつ定量的に収集できる一つの方法として水中音響計測機器による音響モニタリング調査手法があげられる。⁵⁾本研究では、計量魚群探知機とスキャンングソナーによる水中音響情報を活用し、両者の利点を最大限に生かした沿岸域の人工魚礁漁場評価法に関する音響モニタリング調査手法の開発について検討した。すなわち、本研究は沿岸域に造成された魚礁漁場を対象に、そこに分布する魚類の分布特性、さらに魚礁近傍に蟄集する魚群の現存量を定量的にしかも迅速に推定する手法開発を目指すものである。初年度は計量魚探機で得られた音響データをもとに、画像処理技術による三次元画像化に関する基礎的研究を行い、次年度ではスキャンングソナー情報を用いた三次元画像による魚群体積の推定、最終年においては、従来の魚探調査では見落とされていた船の針路の左右方向における魚群をスキャンングソナーを用いて探知し、さらに計量魚探機との同時使用による新しい音響モニタリング技術を用いた調査法について研究した。

2. 調査方法

本研究の計量魚探機データによる三次元画像化のための基礎的調査については、福岡県奈多沖設置された人工魚礁漁場を対象海域として実施し、実験的調査では山口県奈古沖に設置された高層魚礁漁場を対象海域として調査を行った。

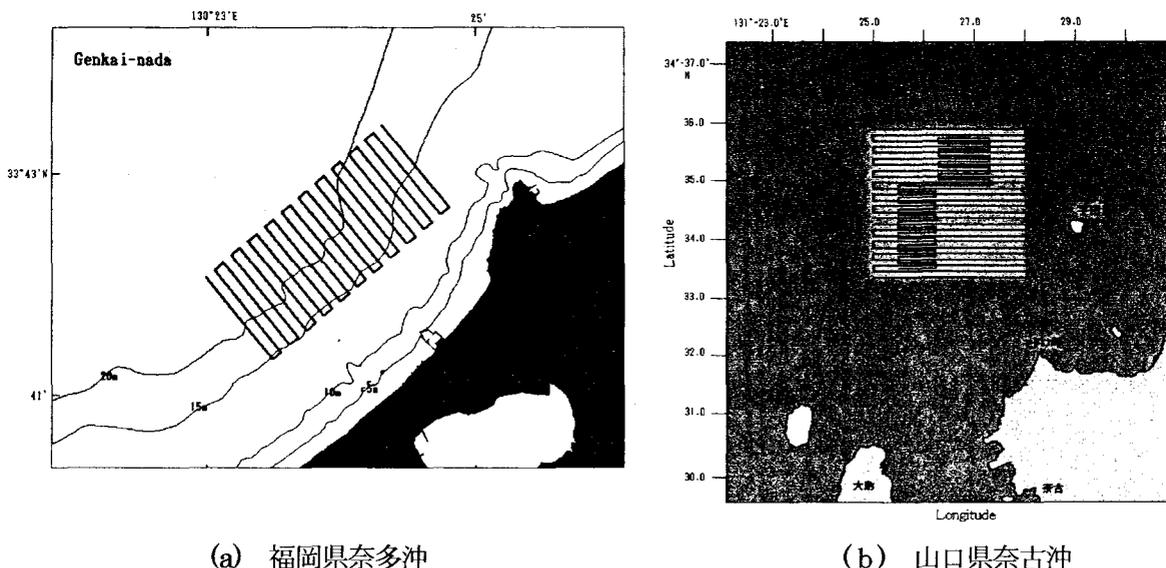


図1 調査海域図

(1) 福岡県奈多沖調査

1998年12月、図1(a)に示す福岡県奈多沖の海域において福岡県水産技術センター調査船「げんかい」(総トン数114トン)により計量魚探機データを用いた三次元画像化に関する基礎的調査を実施した。用いた計量魚探機はスプリットビーム型計量魚探機(SIMRAD製EY-500, 70 kHz)である。奈多沖の音響調査では図1(a)に示すように等深線に直角になるように1マイルごとの調査定線を0.1マイル間隔で設定し3.5ノットの船速で行った。計量魚探機により得られた音響データはリアルタイムでコンピュータ内のハードディスクに収録された。エコーグラムに映し出された魚群の種判別については、調査海域において操業中の漁船から漁獲情報を得るとともに、その一部をサンプルとして持ち帰り、後日研究室で全長、標準体長、及び体重を測定した。

(2) 山口県奈古沖調査

1999年から2000年、図1(b)に示す山口県奈古沖に設置された人工魚礁漁場を対象海域として、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)によりスキャニングソナーと計量魚探機を組み合わせた実験的調査を行った。用いた水中音響計測機器は準理想ビーム型計量魚探(古野電気製FQ-70, 50 kHz)及びカラーセクタースキャニングソナー(古野電気製CH-34, 162 kHz)である。魚探機システムの較正を調査直後または直前に直径38.1 mmのタングステンカーバイド球を用いて行った。⁶⁾ 音響調査では図1(b)に示すように東西方向に2.5マイルで0.1マイル間隔の調査定線を設定し、計量魚探機のみでの調査では約7ノット、スキャニングソナーとの併用調査では約3.5ノットの船速で実施した。図2に示す計量魚探機とスキャニングソナーとの同時使用による調査では、計量魚探機で計測定線直下の魚群密度のSV値(体積後方散乱強度)を測定し、スキャニングソナーでは船の針路に直角な横方向における魚群情報を調べた。計量魚探機により得られた音響データはデータレコーダ(SONY製, PC-208A)、スキャニングソナー信号はビデオ装置(SHARP製, VC-LX2)にそれぞれ収録し、後日研究室にて解析した。また、エコーグラムに映し出された魚群の種判別については、一本釣り漁船を用船し、漁獲物のすべてをサンプルとして持ち帰り、後日研究室で全長、標準体長、及び体重を測定した。

3. 解析方法

3.1 計量魚群探知機データによる海中空間の三次元画像化

調査海域の海中空間全体の三次元画像を作成するために、計量魚探機で得られた音響データ(体積後方散乱強度: SV)をデジタル化して用いた。福岡県奈多沖ではスプリットビーム型計量魚探機で得られた音響データを用い、エコー積分器の設定を深度方向10 cm×250セル、針路方向1 m×1848ピングとしてSV値を求めた。一方、山口県奈古沖での調査では、準理想ビーム型計量魚探機で得られた音響データを、エコー積分器(古野電気製, FQ-74)の設定を水平方向50 m、深度方向0.39 mとしてSV値を求めた。これらデジタル化されたSVデータを画像処理ソフト(Spygrass社: Transform)を用いて、1トランセクトラインごとの二次元画像を作成し、さらにラインごとの二次元画像をファイル化したのち、三次元画像解析ソフト(Spygrass社: Slicer)を用いて調査海域における海中空間の三次元コンピュータ画像を作成した。

3.2 スキャニングソナーデータ

スキャニングソナーは電子的に音響ビームを旋回させ、自船周囲の海中を高速に可視化することができるので、より広範囲の魚群を探知することが可能である。図2に示すように半円状のソナービームを船の進行方向と直角に、下方向に向けて使用することにより、船の針路に直角な垂直断面画像が得られる。これを船の進行方向に連続的に観測することにより、自船の真横方向の魚群分布や魚群の三次元的構造に関する情報を把握することができる。今回の解析では、ビデオ装置に収録されたソナー画像を、ビデオキャプチャーでパソコンに取り込み、画像解析ソフトCosmos32(Library Co., Ltd.)

を用いてデジタル化し、さらにデジタル化したデータを 0-255 の範囲で数値化し、魚群領域とそれ以外の領域とを閾値を設定することにより魚群だけを抽出した。抽出された魚群画像から画像解析ソフト Cosmos32 を用いて魚群断面積を求め、この結果をその魚群規模の大きさに応じて、調査定線に沿って表示した。魚群体積を求めるに当たっては、数値化されたソナー画像データをもとに画像処理ソフト Slicer を用い、三次元画像を作成し、この三次元画像で得られた Voxcel⁷⁾ から魚群の広がり と体積を求めた。

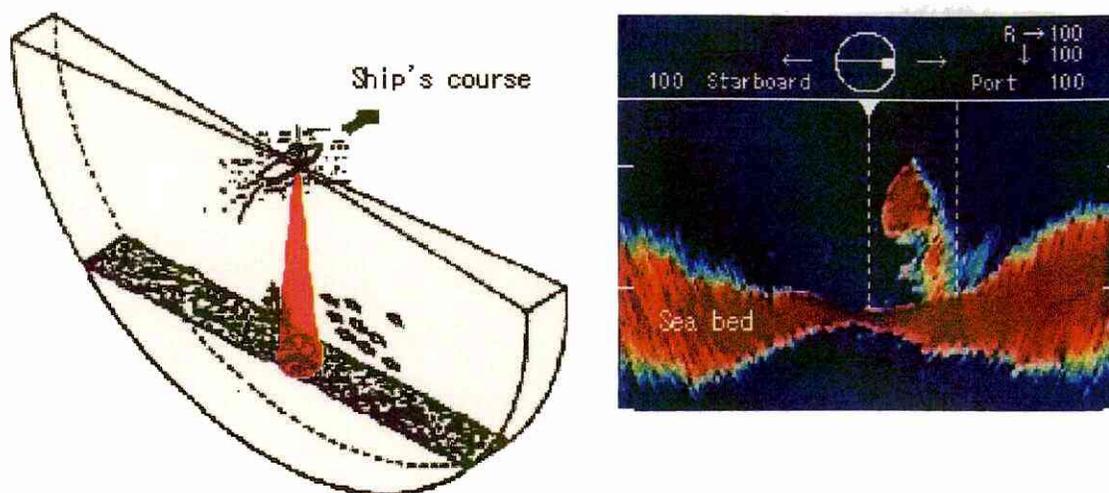


図2 スキャニングソナーと同時に観測された垂直断面映像

3.3 計量魚群探知機とスキャニングソナーデータによる魚群密度の推定と現存量推定

山口県奈古沖で得られた魚群密度の解析にはエコー積分器（古野電気製、FQ-74）の設定を水平方向 50 m、深度方向 0.39 m として体積後方散乱強度 (SV) 及び面積後方散乱強度 (SA) を求めた。さらに、魚礁近傍付近での計測では水平方向約 5 m、深度方向 1 m として微細に計測し、SV 値を求めた。

ここで、計量魚探機とスキャニングソナーで得られたデータによる現存量推定のための解析手順について述べる。

まず最初に、魚群密度を推定するための前段階として、スケールファクターとしてのターゲットストレンジスを求める必要がある。Foote⁸⁾ は多くの実測結果から、魚のターゲットストレンジス (TS) が魚体長 l cm の 2 乗にほぼ比例することを明らかにし、次式を与えている。

$$TS = 20 \log l + A \quad (1)$$

ここで、TS： ターゲットストレンジス (dB)

l ： 魚体長 (cm)

A： 定数、閉鰓魚では -67.4 dB 開鰓魚では -71.9 dB

一方、魚群からの反射エコーは個々の魚からのエコーの合成波として観測される。計量魚探機で得られる体積後方散乱強度 SV (dB) は単位体積当たりの後方散乱係数 sv を対数表現したものである。ここで、体積後方散乱係数 sv は 次式で表される。

$$SV = \rho_v \sigma_{bs} \quad (2)$$

ここで、 sv : 体積後方散乱係数
 ρ_v : 魚群密度
 σ_{bs} : 後方散乱断面積

あるいは、

$$SV = 10 \log \rho_v + TS \quad (3)$$

ここで、 $TS = 10 \log \sigma_{bs}$

このことから、体積後方散乱係数 sv は魚群密度 ρ_v に比例する量と考えてよい。従って、ターゲット 1 尾当たりの後方散乱断面積 σ_{bs} で除することにより、魚群の魚群密度 ρ_v が求まる。さらにこの値に平均重量 w を乗じることにより単位体積当たりの平均重量密度 na が求められる。

$$na = \rho_v w \quad (4)$$

この平均重量密度 na にスキヤニングソナーで得られた魚群体積 V を乗じることにより、式(5)により魚群現存量が求められる。

$$Q = na \times V \quad (5)$$

Q : 現存量
 V : 魚群体積

4. 結果

4.1 三次元コンピュータグラフィック

垂直魚探機で得られる水中音響データは計測定線方向と深度方向によって与えられる二次元情報である。従って、魚探機のエコーグラムに表示される魚群の分布や、形状は、計測定線直下で得られる一断面に過ぎず船の左右舷方向への魚群の広がりを見ることはできない。しかし、魚礁漁場全域に分布する魚群や海洋生物の分布を知る一つの方法として、垂直魚探機で得られる二次元の音響情報データ — 計測定線と深度方向 — を調査定線ごとに重ね合わせるにより、調査海域全体の海中空間を三次元的に表示する方法が考えられる。図3は調査定線ごとに得られたエコーグラムをコンピュータグラフィック技術を用いて多層表示したものである。そこで、X軸を深度方向、Y軸を針路方向、Z軸を計測定線方向とすることにより、水深、針路、計測定線座標系に関する三次元コンピュータグラフィック画像の作成を試みた。図4は調査海域面積 (2.1 mile²) × 深度 (25 m) の調査海域全体の海中空間を 10, 164, 000 個 (250 × 1848 × 22) のデジタル化された音響データ (体積後方散乱強度: SV) をもとにして描いたコンピュータグラフィックである。ここでは -60 dB のスレッシュホルド (閾値) を設定することによりプランクトン層や反射に寄与しない海水からの情報などの魚群以外の音響データを取り除いて表示した。この図は沿岸から沖合いに向けて表示された図であるが、コンピュータグラフィックの特性を生かして、自由に視点を変えることができたため、魚礁漁場全体に分布する魚群の分布の広がりや魚群の連続性などを容易に把握できることが分る。今回対象とした福岡県奈多沖での調査では、調査海域付近で操業中の漁船で漁獲されていた魚種のほとんどがカタクチイワシ (平均標準体長 4.68 cm) であったことから、三次元画像化で得られた結果から当調査海域に分布していた魚群の大きさは垂直方向 8-13 m、水平方向 約 30-655 m の広がりを持つカタクチイワシ魚群であると推定された。

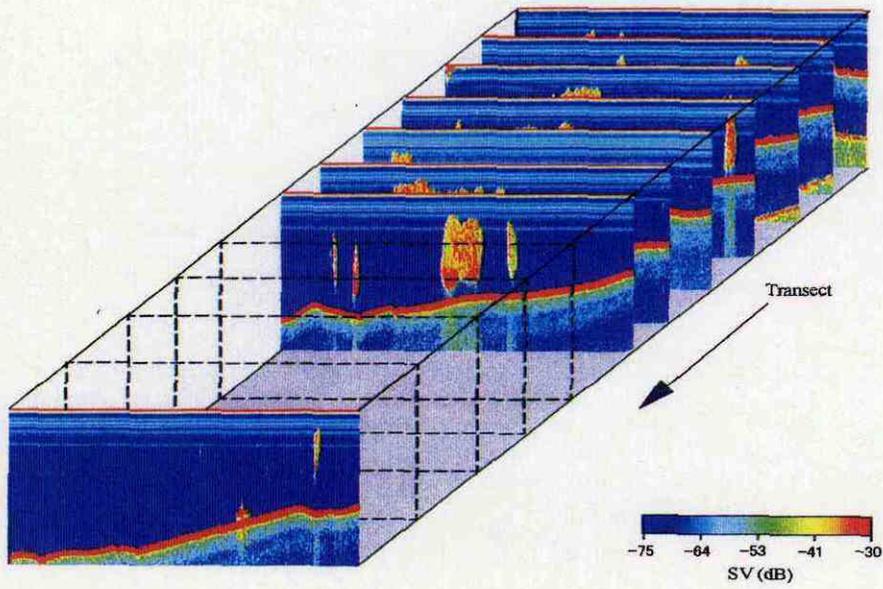


図3 デジタル化された音響データによるエコーグラムの多層表示

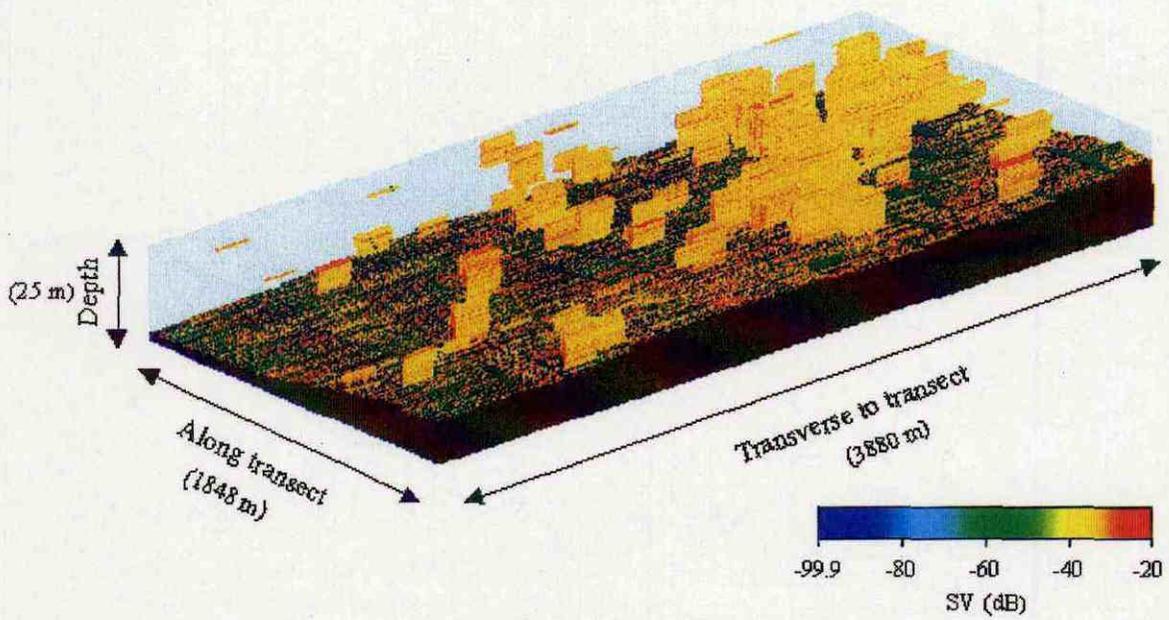


図4 魚群分布構造の三次元画像

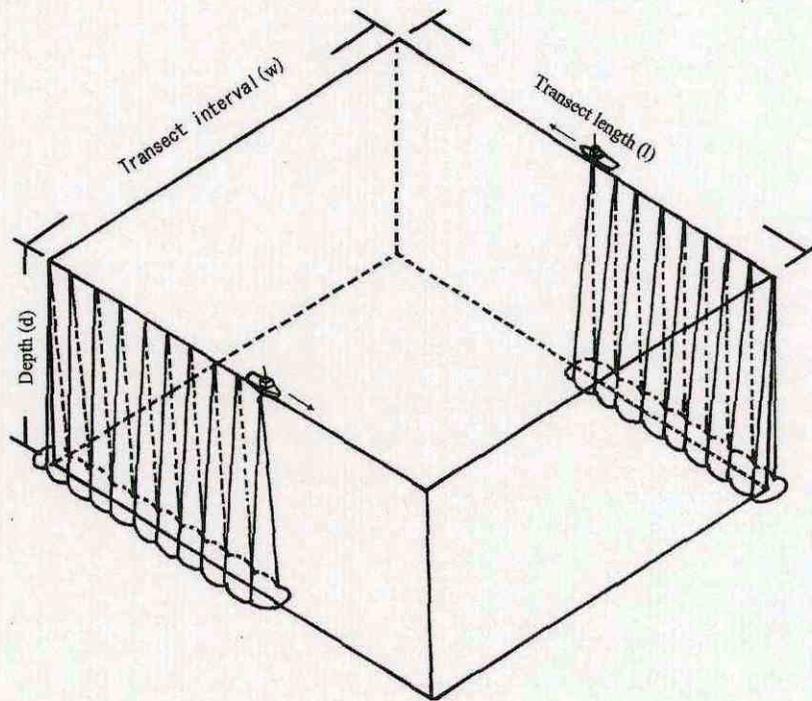


図5 垂直魚探機による水中探査

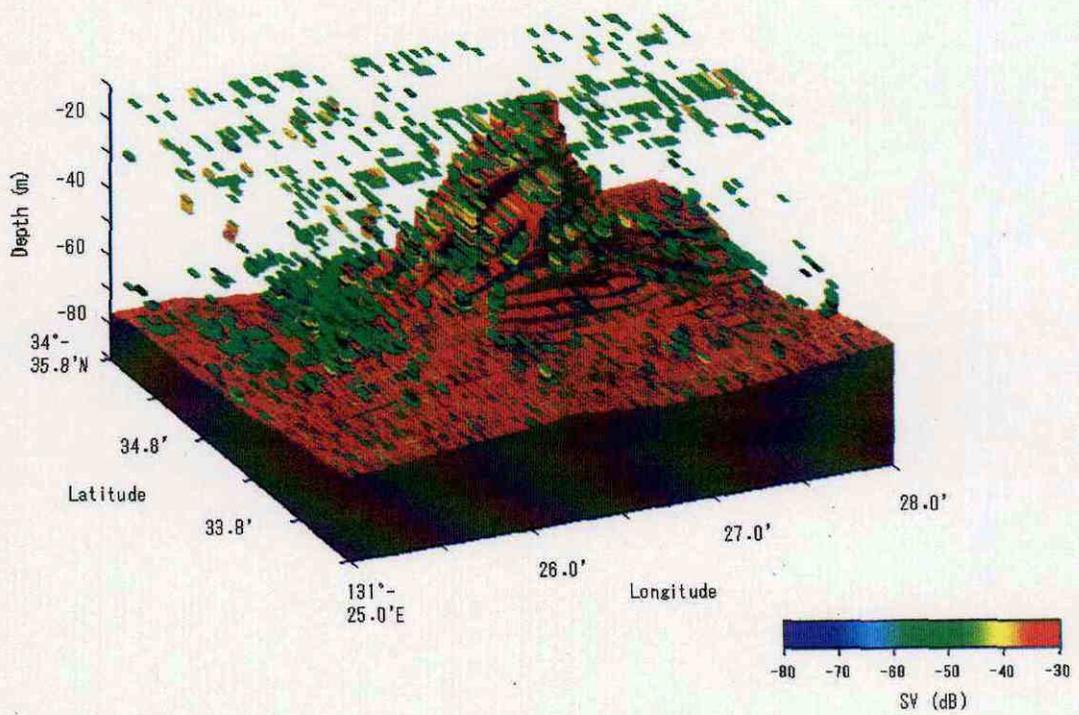


図6 海洋生物の三次元分布画像

4.2 スキャニングソナーによる船の針路の左右方向における魚群の分布計測

前項において述べたとおり、画像処理技術を応用することにより計量魚探機による二次元情報を三次元情報に拡張することができた。しかし、垂直魚探機による水中探査情報は、ビーム幅の範囲内における情報でしかなく、図5に示すように船の針路の左右方向における三次元空間に広範囲に分布する魚群の音響計測には限界がある。図6は奈古沖で得られた2000年5月に観測された魚探データをもとにして4.1と同様の方法で作成した三次元画像の結果である。調査海域の上層に浮魚類、また南部海域の低層にはプランクトン反応のような分布が広がっているのが見られる。このように三次元画像を用いることにより調査海域の海中空間状況を立体的に把握することができた。しかし、この三次元画像は調査海域における海中空間の約3.9%の探知体積をもとにして作成されたものに過ぎない。すなわち、垂直魚探機による水中探査は船の針路の左右方向における情報を補間法を用いて推定するので、実際には計測線における直下情報を左右方向に拡張して表示することになる。そこで、本研究では、船の針路の左右方向に分布する魚群情報を、スキャニングソナーを用いて抽出し、その魚群断面積を画像処理技術を応用することにより求める方法を考えた。この得られた魚群断面積を指標化し、その頻度分布を示したのが図7である。またこの情報をGIS技術⁹⁾を応用したマッピングにより調査海域図上に示したのが図8である。この図から調査海域の北東部に位置する二島グリ周辺、特に西側の水深35-60mの水深帯に魚群が多く密集しており、高層魚礁周辺、4年礁、10年礁周辺にも魚群の蟻集が見られることが分かった。このように、スキャニングソナーによる計測は調査定線の直下情報だけでなく、左右方向の水中探査が可能のため、魚礁漁場における魚群分布を詳細に調べるには極めて有効な方法であると考えられた。

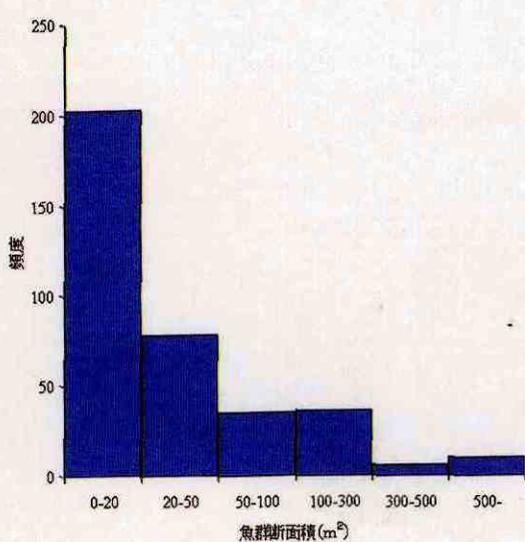


図7 魚群断面積の頻度分布

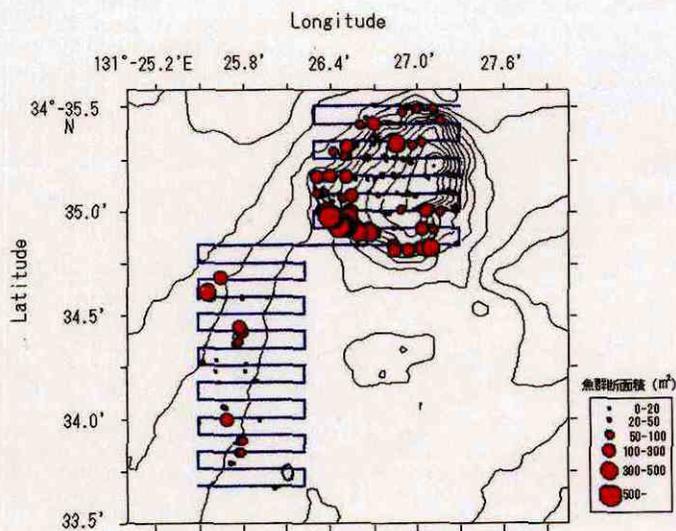


図8 スキャニングソナーにより得られた魚群分布図

4.3 計量魚探機とスキャニングソナーの同時使用による魚群密度と現存量推定

4.3.1 ターゲットストレンジスと魚群分布密度

スキャニングソナーは、計測定線の左右方向を感知することができるため、垂直魚探で見落とされていた魚群分布を、視覚的かつ迅速に把握できることが分かった。しかし、スキャニングソナー情報だけでは、魚群の現存量を推定することはできない。そこで、本研究では、計量魚探機とスキャニングソナーを同時に使用することになり、密集魚群の現存量推定を行う方法を試みた。ここで、密集している魚群の現存量を三次元画像技術を用いて推定するためには、計量魚探機及びスキャニングソナーの情報から、その魚群の分布密度さらに魚群体積を求める必要がある。そこで2000年12月に観測された高層魚礁及び4年魚礁に分布するの密集魚群を対象に、その分布密度の推定法とその結果について述べる。

ターゲットストレンジス： この密集魚群の魚種を確認するために、一本釣り漁船を用いて魚礁に蟻集する魚種を漁獲した。この結果、アジ類（マアジ、マルアジ）が17尾漁獲された。そこで、漁獲されたアジ類の平均全長、平均体重を求め、これらの値を用いて一尾当たりのターゲットストレンジスを求めた。平均全長、平均体重はそれぞれ、17.4 cm、46.5 gであったので、この平均標準体長を Foote⁸⁾による式(1)に代入し、1尾当たりのターゲットストレンジス $TS = -42.6$ dBを得た。

魚群分布密度： 図9はスキャニングソナーと計量魚探機で同時にとらえた魚群の映像を示したものである。計量魚探機で得られた音響データは深度方向1 m、水平方向5 mの間隔でデジタル化され、これをSV値の鉛直断面図として表したのが図10である。図の右側に大きく拡大して示した数値が魚群密度に比例する値を表すSV値である。この値を上記で得られた1尾当たりのターゲットストレンジスで除することにより単位体積当たりの魚群密度を求めることができる。そこで、対象とした密集魚群をアジ類の魚群とみなしてこれら魚群の魚群密度を推定した。この結果、表1に示すとおり山口県奈古沖の対象とした魚群の密度はほぼ0.1-0.2尾/m³程度であると推定された。

4.3.2 現存量推定

現存量を推定するためには、魚群密度のほか魚群体積を求める必要がある。この魚群体積求め方はスキャニングソナーで得られた画像を画像処理技術を用いてデジタル化し、針路方向（調査定線方向）にソナー画像を重ね合わせることにより、三次元画像化するものである。さらにこの三次元画像をもとにして魚群の体積が求められる。すなわち、魚群体積は三次元画像で得られる単位体積としてのVoxelに、X（左右方向）、Y（針路方向）、Z軸（深度方向）のそれぞれ実距離を掛けることにより実際の魚群体積が求められる。このようにして求められた魚群の三次元画像を図11(a)、(b)、(c)に示す。これらの魚群規模（高さ×長さ×幅：m）、魚群体積（m³）は、それぞれ(a) 40×56×67 m、33.4×10³ m³、(b) 36×67×63 m、37.3×10³ m³、(c) 40×89×46 m、21.6×10³ m³であった。

そこで、上記で得られた魚群密度と魚群体積を式(5)に代入することにより、魚群の現存量を求めることができる。この結果、2000年12月に実施された山口県奈古沖の高層魚礁及び4年礁に蟻集していたアジ類の魚群現存量は表1に示すとおり(a) 0.30トン、(b) 0.14トン、(c) 0.17トンと推定された。

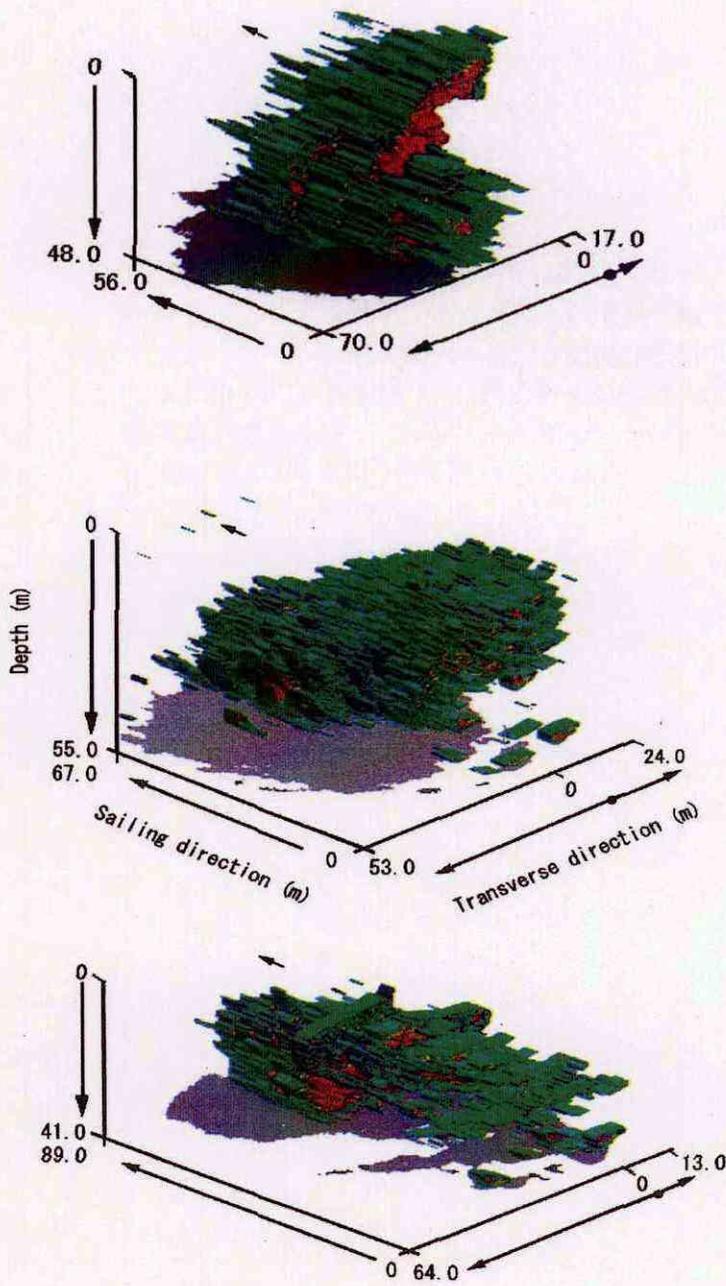


図 11 魚群の三次元画像

表 1 推定された魚群規模

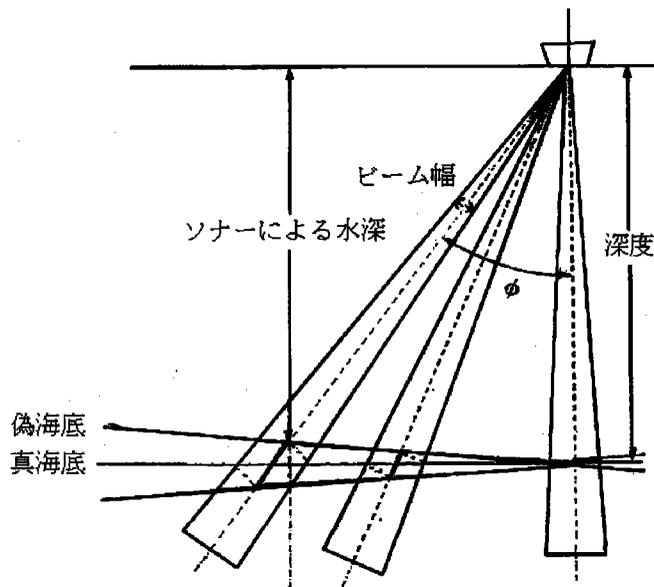
Size (in m) height×length×width	Volume ($m^3 \times 10^3$)	Average density (g/m^3)	Biomass (t)
(a) 40×56×67	33.4	8.89	0.30
(b) 36×67×63	37.3	3.86	0.14
(c) 40×89×46	21.6	7.73	0.17

5. 考察

本研究では、魚礁漁場全体の視点から魚礁の設置効果を評価するため、水中音響計測機器による音響モニタリング技術を取り上げ、沿岸域に造成された魚礁漁場を対象とした調査手法の開発研究を行ってきた。音響機器による海中探査は水中リモートセンシング技術として、三次元空間に生息する海洋生物の分布状況を、迅速、広域にしかも定量的に計測することができる重要な計測法の1つとして位置付けられている。

最近の電子機器やコンピュータ技術の目覚ましい発展は、膨大な量の音響データを、高速処理することにより、従来困難であった海中空間の三次元画像化を考えた音響調査手法を飛躍的に一変させることになった。すなわち、水中音響計測技術によって得られたデータを画像処理技術やGIS技術を応用することにより、三次元画像化や他の音響情報以外の情報による解析により、魚群の分布状況を立体的に、かつ定量的に表現することが可能となった。しかし、計量魚群探知機による音響計測法は、魚種の識別が直接できないことや直下情報しか得られないこと、さらに魚礁内部に分布する魚群を計測できないなど、単独の調査方法では解決できない、いくつかの問題点を抱えている。そこで、本研究では、計量魚探機による単独の調査方法に加えて、計量魚探機とスキャニングソナーとを組み合わせた音響モニタリング調査手法の開発を考えた。この結果、従来垂直魚探機では見落とされていた船の針路の左右方向の魚群情報をスキャニングソナーによって探知し、さらに魚礁近傍に分布する密集魚群の現存量と規模を推定する新しい音響モニタリング手法を開発することができた。しかし、今後精度の高い計測をするためには、以下のような問題点を検討する必要がある。

まず第一に、スキャニングソナーのビーム幅が持つ方位分解能による画像の歪みと、送受波器から遠ざかるに従って増加するビーム断面積についての問題である。これはスキャニングソナーをファンビーム方式で使用する場合、図12に示すようにビーム幅の方位分解能に起因する独自の歪みとビーム断面積の増加がある。¹⁰⁾ すなわち、ソナー画像において、船の直下から遠ざかるに従って、海底が湾曲して表示されるソナー画像特有の特性、さらに画像面積の過大評価である。今回の報告においては、この補正を行わなかったが、今後この補正を行い精度の高い体積を求める必要がある。



(飯田, 1996 改変)

図12 スキャニングソナーの画像の歪み

次に、魚群と調査船との相対運動に伴う魚群体積推定値の誤差である。これは魚群が調査船と同じ方向に遊泳している場合には、探知される実際の魚群規模はより大きく観測されるという問題である。反対に逆方向に遊泳している魚群の場合には、実際の魚群規模より小さく観測されるため、過少評価される可能性がある。これは調査船の騒音に伴う魚群の逃避行動^{11),12)}とも密接な関係があるため今後とも検討する必要がある。

第三の問題として魚群密度の推定に関する問題である。今回の報告では平均魚群密度を求めるのに、算術平均を用いた。しかし、実際の魚群の分布は一様でなく、計量魚探機で得られる1セルごとの重量密度(g/m^3)の頻度分布は正規分布であるとは考えられない。このような分布に対する現存量の推定に当たっては頻度分布に応じて重量密度の変数変換する必要がある。今回の報告では、現存量計測にいたる手法開発を主な目的としたことから、統計的な検討を行わなかった。しかし、今後は統計的な取り扱いを行って平均密度の推定値の信頼性を高める必要があると考えられる。

以上本研究についての問題点と今後の課題について考察を行った。魚礁に蟄集する魚群量の把握は魚礁効果を考える上で、最も重要な基礎データであると考えられる。従って、漁獲を伴わず、直接魚群の現存量を定量的に評価できる音響モニタリング技術の開発は今後益々重要になってくるものと思われる。

6. 摘要

1. 計量魚探機データによる三次元画像化

計量魚探機による水中音響データを画像処理技術を応用することにより、二次元情報を三次元情報に拡張するシステムを構築した。これにより魚礁漁場全体における海中空間の三次元画像化が可能となり、魚礁漁場において広範囲に生息する海洋生物の分布状況を短時間にかつ立体的に表示することができた。

2. スキャニングソナーによる船の針路の左右方向における魚群の分布計測

スキャニングソナーで得られた画像を画像処理技術を用いて、その魚群断面積を求め、魚群規模を推定した。この結果、従来の垂直魚探機だけでは見落とされていた調査定線間に分布する魚群および魚群規模を明かにすることができた。すなわち、山口県奈古沖での調査では高層魚礁や魚礁設置周辺および天然礁周辺に多くの魚群が分布していることが分かった。特に天然礁の二島グリ周辺では断面積 500 m^2 以上の大きさの魚群が分布していた。

3. スキャニングソナー情報を用いた三次元画像化による魚群体積の推定

スキャニングソナーによる断面画像を医療工学における超音波断層画像のような情報として取り扱い、画像処理技術を用いて三次元画像化を行い、魚群を立体的に表示した。この結果、山口県奈古沖における高層魚礁周辺に蟄集していた魚群の規模はほぼ $21.6\text{--}37 \times 10^3\text{ (m}^3\text{)}$ であることが分かった。

4. 計量魚探機とスキャニングソナーの同時使用による魚群密度と現存量推定

計量魚探機で得られる密度情報とスキャニングソナーで得られた魚群体積を掛け合わせるにより魚礁に蟄集する魚群の現存量を推定した。この結果その現存量は $0.14\text{--}0.30$ トン程度であると推定された。

謝 辞

この報告書を作成するに当たっては、福岡県水産技術研究センター秋元技師、山口県水産研究センターの小林主任、吉岡専門研究員、さらに調査船“げんかい”（福岡県水産技術研究センター）および“くろしお”（山口県水産研究センター）の船長他乗組員に暖かいご支援を頂いた。また水産大学校海洋生産管理学科漁業計測学分野の卒論生諸君のご協力をいただいた。ここに記してお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 荻野 静也, 1988 : 人工魚礁の効果解析手法について(1) — 昭和 59, 60 年度の調査結果 —. 水産工学研究技報, 水産土木, **10**, 1-25.
- 2) 武内智行・乃万俊文・安永義暢・日向野純也, 1985 : 魚礁漁場における物理化学環境と魚類の蠕集機構に関する研究—I, 天然礁における流動環境調査の一事例—, 水産工学研究技報水産土木, **6**, 31-54.
- 3) 安永義暢・日向野純也・乃万俊文・武内智行, 1985 : 魚礁漁場における物理化学環境と魚類の蠕集機構に関する研究—II, 天然礁における魚類の蠕集生態に関する—考察—, 水産工学研究技報水産土木, **6**, 31-54.
- 4) 柿元 皓, 1998 : 人工魚礁の生物学的機能解析に関する研究, 水産工学, **35**, 1-7.
- 5) 中村武史, 1999 : 人工魚礁漁場における海洋生物の定量化のための音響モニタリング手法に関する研究, 水産大学校水産学研究科修士論文, 84 pp.
- 6) Foote, K., Knutsen, H., MacLennan, D. and Simmonds, J., 1987 : Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide. Cooperative Research Report, ICES No. 144, 57 pp.
- 7) Hamano, A. and Nakamura, T., 2001: Combined use of quantitative echo-sounder with scanning sonar to visualize semi-quantitative three-dimensional image of fish schools. J.Nat. Fish. Univ., **50**, 1-11.
- 8) Foote, K., 1987 : Fish target strength for use in echo integrator surveys. J. Acoust. Soc. Am., **82**, 981-987.
- 9) Star, J. and Estes, J., 1990 : Geographic Information System. Prentice-Hall, New Jersey 303 pp.
- 10) 飯田浩二, 1996 : 計量魚探データ解析手法の高度化に関する研究, 平成 7 年度科学研究研究成果報告書, 61 pp.
- 11) 飯田浩二・向井 徹・堀内則孝, 1998 : スキャニングソナーを用いた表中層魚群の三次元分布と形状解析, 海洋音響学会誌, **25**, 30-39.
- 12) Misund, O., 1990 : Sonar observation of schooling herring: school dimensions, swimming, and avoidance of vessel and purse seine. Rapp. P.-v. Réun. Cons. Int. Explor. Mer, **189**, 135-146.