

魚類マイクロネクトンの資源量評価のための 音響的調査手法に関する研究*¹

濱野 明*²

Studies on the Acoustic Method for Estimating Biomass of Micronektonic Fish

Akira Hamano

目 次

第1章	緒 言	89
第2章	計測システムの選定と較正	91
2.1	緒 言	91
2.2	鰐モデルによる周波数特性の検討	91
2.2.1	試料と計測方法	91
2.2.2	解析方法	91
2.2.2.1	鰐の計測	91
2.2.2.2	鰐モデルによる周波数特性	92
2.2.3	結 果	92
2.2.3.1	鰐の計測結果	92
2.2.3.2	鰐モデルによる周波数特性	93
2.2.4	考 察	93
2.3	魚類マイクロネクトンの音響調査のための適正周波数帯の選定	94
2.3.1	ソナー方程式	94
2.3.2	信号対雑音比 (SN 比)	95
2.3.3	減 衰	96

水産大学校研究業績 第1438号, 1992年11月9日受付.

Contribution from Shimonoseki University of Fisheries, No. 1438. Received November 9, 1992.

*1 本論文は東京大学審査学位 (博士) 論文 (1991年9月) を基本とし, その一部を改題したものである。

*2 水産大学校漁業学科漁業機器学講座 (Laboratory of Fishery Instrumentation, Department of Fishery Science and Technology, Shimonoseki University of Fisheries).

2.3.4	パルス幅	98
2.3.5	考 察	98
2.4	計測システム	99
2.4.1	システムの概要	99
2.4.2	システムの較正	99
2.4.3	システムの適正な使用方法	103
第3章	ターゲットストレングス(TS)の測定	104
3.1	緒 言	104
3.2	試料と計測方法	104
3.3	解析方法	105
3.3.1	指向性定数の検討	105
3.3.2	懸垂法によるTSの測定	106
3.3.3	鰐の後方散乱断面積の数値計算	107
3.4	結 果	108
3.4.1	懸垂法によるTSの測定	108
3.4.2	鰐の後方散乱断面積の数値計算	108
3.4.3	既報理論との比較検定	110
3.5	考察と論議	111
第4章	エコグラムと環境要因による魚種判別	112
4.1	緒 言	112
4.2	材料及び方法	112
4.2.1	材 料	112
4.2.2	計量魚探機によるDSLの観測	113
4.2.3	中層トロールによる魚種確認	114
4.2.4	水温の測定	114
4.3	結 果	115
4.3.1	DSLの時空間的変動と音響強度	115
4.3.2	中層トロールによる魚種確認	115
4.3.3	魚種判別のための識別基準	120
4.4	考察と論議	122
第5章	船体動揺とエコーレベルの変動および調査条件の変化と体積散乱強度(SV値)補正式	123
5.1	緒 言	123
5.2	材 料	123
5.2.1	調査海域	123
5.2.2	調査船と送受波器装備位置	124
5.2.3	魚探機の設定	124
5.2.4	計測方法	125

5.3	多次元自己回帰モデルによる船体動揺とエコーレベルの変動	125
5.3.1	データ処理	125
5.3.1.1	データ処理	125
5.3.1.2	入射角	126
5.3.2	解析方法	127
5.3.2.1	マルチプルコヒーレンシ	127
5.3.2.2	多次元自己回帰モデルによるパワー寄与率	127
5.3.3	結果	129
5.3.3.1	スペクトル解析	129
5.3.3.2	マルチプルコヒーレンシ	130
5.3.3.3	多次元自己回帰モデルによるパワー寄与率	131
5.3.4	考察	132
5.4	重回帰分析による調査条件の変化とSV値補正式	133
5.4.1	緒言	133
5.4.2	解析方法	134
5.4.3	結果	136
5.4.3.1	船体動揺	136
5.4.3.2	海底エコーに対するSV値の分布	137
5.4.3.3	重回帰分析	137
5.4.4	考察	141
第6章	音響的調査手法の適用	142
6.1	緒言	142
6.2	材料および解析方法	142
6.2.1	材料	142
6.2.2	解析方法	142
6.2.3	現存量推定	143
6.3	結果	144
6.3.1	目的変数の抽出	144
6.3.2	説明変数の選択	146
6.3.3	重回帰分析	148
6.3.4	現存量推定	149
6.4	考察	151
第7章	論議	154
謝辞		157
文献		157
Summary		162

第1章 緒言

音響計測機器としての魚探機は、水中音響工学および水中音響機器の急速な発展にともないその性能が格段と向上し、漁業資源に対して定量的評価を行える水準にまで達したと考えられる。しかし、この計測器を使用し、その資源量の評価に関し精度・確度とも十分と考えられる結果を得るためには、機器の選定や使用法、得られたデータの処理解析において、まだ多くの問題が残されている。特に、資源量評価の基礎となる調査現場で計測される体積散乱強度 (SV 値) に対する補正精度の向上については、その重要性が指摘されながらも、いままでも有効な方法が確立されていなかった。

従来、音響的調査手法に関する多くの研究は、生物学的結果に重点を置くあまりに機器に対する配慮が不十分であったり、また水中音響に関する研究では音響散乱特性をはじめとする工学的な基礎的研究であるか、もしくは機器開発に関する研究が主体であるなどに分れていた。個々の誤差要因について未解決な問題点がまだ多く残っていると、ここで最も欠けている部分はそれらを総括して十分な精度で資源量を評価できる手法を確立することであると考えられる。

本研究はこの立場にたち、他の方法では精度の高い資源量の評価が困難である魚類マイクロネクトンの一つであるキュウリエソ (*Mauvoilicus muelleri*) を対象として取り上げ検討した。すなわち、生物特性から考えたキュウリエソの計測に適した適正周波数の選定、および、ターゲットストレンジス (TS) の測定、中層トロールによるサンプリング並びにCTD 観測と音響情報を組み合わせた魚種判別のための識別基準の設定など、日本海における唯一の魚類マイクロネクトンであるキュウリエソの資源量評価のための音響的調査手法に関する基本的な問題のすべてを包含し、さらに、資源量評価の基礎となる調査現場で計測される SV 値に対する調査条件の変化に対応した定量的補正法を新たに開発した。この補正された精度の高い SV 値をもとに選別処理方式 (青木・杉本, 1988) を用いることにより、日本海における魚類マイクロネクトンの現存量計測の具体的適用例を示した。

一方、漁業の対象となる魚類を対象とした海洋生態系における生物生産機構を考える場合、生産者 (植物プランクトン) から魚食性ネクトンを結ぶ餌料生物としての魚類マイクロネクトンの資源量と分布生態を解明することは、食物連鎖において最もデータが少ない一つの環を明らかにす

る意味で重要である。しかし、魚類マイクロネクトンの分布・生態に関する知見は、この生物が漁業の直接対象でなく、しかも普通の漁法でも混獲されない大きさであることから、漁獲統計、標識放流、試験操業などの結果を解析するといったネクトンに対する最も普通の方法を用いることができず、有用魚種に比べ著しく限られたものとなっている (Gjøsaeter・川口, 1981)。魚類マイクロネクトンの採捕は、その生息深度が深いことや逃避行動のために簡易なプランクトンネットによる定量的な採捕が困難である。このことから、プランクトンの一般的な定量的測定法を適用できない。そのため資源量の推定精度の向上がますます困難になっている。日本海唯一の魚類マイクロネクトンであるキュウリエソの資源量評価に関する研究は、主に卵・稚仔の計量によって行われており、いまだ精度・確度とも十分と考えられる方法は確立されていない (西村, 1959; 沖山, 1978; Okiyama, 1981)。このように生物生産機構上重要であり、しかも従来精度の高い資源量評価法がなかった魚類マイクロネクトンに対して、音響的調査は最も期待される手法の一つであり、それを確立することが特に重要である。また、資源量評価の方法を確立するためには音響特性が明らかでない対象について、第一歩としてそれを解明することからはじめることを考えた。これが対象としてキュウリエソを選んだもう一つの理由である。

本研究ではこの観点から日本海における魚類マイクロネクトンを対象として、それぞれの問題を第2章から第5章までで扱い、第6章においてその実用性を立証した。

第2章ではまず、定量的計測のための適正周波数選定に関し、キュウリエソの魚体より抽出した鰾を Weston (1967) および Andreeva (1964) の鰾モデルを用いることにより、反射に関する周波数特性について検討した。さらに、キュウリエソの分布生態に関する知見 (沖山, 1971) に基づきソナー方程式を基礎として、信号対雑音比 (SN 比: Signal to noise ratio) に対する周波数特性、および各種減衰の周波数特性 (Francois and Garrison, 1982a; 1982b; 石井ら, 1983; 西村, 1969) を考察し、キュウリエソの現存量計測のための最適周波数帯を検討した。

第3章では、音響システムを用いた資源量評価を行う前段階における次のステップとして、密度推定の重要なスケールファクターであるキュウリエソの TS を測定した。また、魚体より抽出した鰾の後方散乱断面積より各個体の TS を数値計算により求め、体長との関係を検討した。

前段まででキュウリエソの音響特性に関する基礎データはそろった。しかし、ここで魚探機の echogram (以下、エ

コグラム) に現れる DSL (Deep scattering layer) からキュウリエソの echo (以下, 映像) だけを分離するという大きな問題が残る。そこで, 魚探機のエコグラムに現れる DSL の主体を確かめるため1986年から1989年の間, 日本海南西海域において中層トロールによる DSL 内生物の種の確認を行った。また, DSL の時刻にともなう変動を観測するため計量魚探機を用い, メソスケールとスモールスケールでの昼夜観測を行った。これらの調査を通して, 日本海において魚探機のエコグラムに DSL の主要構成種として時空間的に特徴的な変化をしながら現れるキュウリエソに関し, 音響調査による音響強度の計測, 中層トロールによるサンプリング並びに CTD・XBT の観測結果を組み合わせた魚種判別法について検討した (第4章)。

音響機器を用いた資源量評価において実際に測定されるデータは SV 値である。したがって, 調査条件の変化およびそれにとまなう船体動揺が SV 値に与える影響を明らかにする必要がある。そこで, 船体動揺がエコーレベルに及ぼす影響を多次元自己回帰モデルを用いることにより検討した。さらに, 減衰の少ない最適な航走条件を見出すために針路, 船速, 風速などの調査条件の変化が SV 値に及ぼす影響について重回帰分析を用いて定量的に補正する方法を検討した (第5章)。

これらの結果を基礎として, 実際の音響調査において得られる SV 値に対する定量的補正法を重回帰分析を用いて明らかにした。その結果を用いて刻々と変わる調査条件の変化に対応した精度の高い補正値が得られた。さらに, 補正された精度の高い SV 値をもとに第4章に示した選別処理方式を用いることにより, 日本海南西海域をモデル海域としてキュウリエソの資源量評価のための音響的調査手法の具体的適用例を示した (第6章)。

最後に, 第7章において, 前章までの成果を総括し, 魚類マイクロネクトンを中心とした実際の音響調査における調査現場に対応した音響的調査手法の確立について論議した。

すなわち, 評価された結果を活用するためには計測から結果を出すまでの時間をできるだけ短縮する必要がある。この点について音響特性が未知の生物を対象とする場合における音響的調査手法の系統的アプローチについて検討し, 今回提案した方法の実用化に対する事前データの収集などについて考察を加えた。

第2章 計測システムの選定と較正

2.1 緒言

近年、音響的調査手法による資源量評価法が整備されるに従って、資源量推定を目的とした音響調査が数多く実施されるようになってきた。しかし、音響的手法による資源量推定法も実用段階に達したとはいえ、いまだ実用上、精度上解決しなければならない問題点は数多い。計量魚探機による資源量推定の結果に大きな誤差を生じさせる原因の一つとして、機器の使用法を含めて、ユーザーが対象魚種の音響的特性と分布生態に合った適正な魚探機の選定を行っていないことが第一にあげられる。すなわち、音響調査を実施する計量魚探機ユーザーとしてまず第一に考えなければならないことは、どのような性能を有した魚探機を選定するかという点である。

計量魚探機が通常魚探機と基本的に異なる点は、定量的な計測を行うという点にある。すなわち、計測システムの性能はSN比が高く、推定誤差が小さいことが第一の要件となる。ここで、計測システムとして重要な要素は、周波数・指向性関数・パルス幅・ソースレベル・ダイナミックレンジであり、このなかで特に周波数の選定が最も重要な問題と考えられる。

したがって、ここでは対象とする魚類マイクロネクトンのキュウリエソの音響的特性に対して、選定すべき最適な魚探機を決定するための問題点について周波数を中心に検討した。この目的を達成するために本章では、まず最初にキュウリエソの反射に関する周波数特性を考察するため、Weston (1967) および Andreeva (1964) の鰾モデルを用

いて検討した。次に、対象とする魚類マイクロネクトンの分布生態に関する知見に基づきソナー方程式を基礎としてSN比に対する周波数、および各種減衰の周波数特性を検討し、日本海産キュウリエソを対象とした現存量計測のための最適周波数帯を決定した。

2.2 鰾モデルによる周波数特性の検討

2.2.1 試料と計測方法

1988年8月に水産大学校練習船耕洋丸(総トン数1990.17トン)が隠岐諸島周辺海域で中層トロールにより採集し、 -20°C で凍結保存されていたキュウリエソの試料を用いた。解凍後、無作為に46尾を抽出し、それらの体長および体重を計測し、その後鰾を摘出し、その長径と短径をノギスを用いて計測した。鰾の表皮は極めて薄いので、計測値に対するその補正は行わなかった。鰾計測に用いたキュウリエソの体長および体重組成をFig.1に示す。

2.2.2 解析方法

2.2.2.1 鰾の計測

摘出したキュウリエソの鰾の長径と短径から、扁長回転楕円体についての式 (Brooks, 1977) を用いて鰾の体積を求めた。

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\phi_L}{2}\right) \left(\frac{\phi_S}{2}\right)^2 \quad (2-1)$$

ここで、 V_0 : 鰾の体積

ϕ_L : 鰾の長径

ϕ_S : 鰾の短径

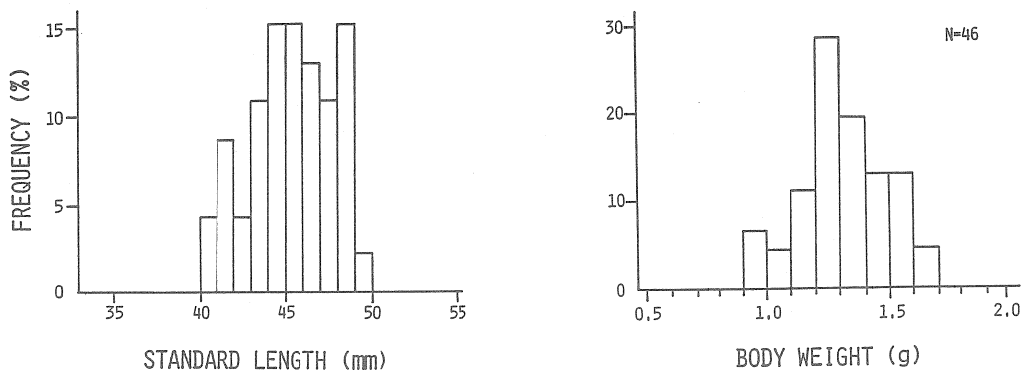


Fig. 1. Frequency distributions of standard length and body weight of material fish (*Mauritius muelleri*) used in swimbladder measurements.

散乱体の形状が共振周波数の変動に与える影響について、Strasberg (1953) は球気泡とそれと等体積の扁長回転楕円体の気泡の長径と短径の比が3:1の場合5%, 2:1の場合2%と極めて小さいことを報告した。このことから、長径と短径の比がこの範囲内にある扁長回転楕円体については、同体積の球とみなし等価半径 a が求められる。後に記するように、摘出したキュウリエソの鰾の長径と短径の比率はこの範囲にあるので、扁長回転楕円体に関する式(2-1)を用いて鰾の体積を求め、さらに式(2-2)から等価半径 a を算出した。

$$a = \frac{(\phi_L \phi_S)^{1/3}}{2} \quad (2-2)$$

2.2.2.2 鰾モデルによる周波数特性

Love (1975) および Johnson (1977a; 1977b) は、超音波散乱層 (Scattering layer) を構成している有鰾魚の音響強度を推定するため、Weston (1967) および Andreeva (1964) の鰾モデルを用いて検討を行った。すなわち、Weston (1967) は有鰾魚の音響散乱断面積について次式を与えている。

$$\sigma = \frac{4 \pi a^2}{|(f_r^2/f^2) - 1|^2 + \delta^2} \quad (2-3)$$

- σ : 音響散乱断面積
- δ : ダンピング定数
- f : 周波数
- f_r : 共振周波数
- a : 等価半径

ここで、ダンピング定数 δ は気泡振動 Q の逆数で、 $Q=5$ とした。

また、Andreeva (1964) は共振周波数 f_r を次式で示した。

$$f_r = \frac{1}{2 \pi a} \left(\frac{3 \gamma P_0 + 4 \mu_1}{\rho_s} \right)^{1/2} \quad (2-4)$$

- P_0 : 静水圧
- ρ_s : 海水密度
- γ : 鰾内ガスの比熱比
- μ_1 : 魚体組織のせん断率

ここで、各定数については Johnson (1977b) と同様に、 $P_0 = (1 + 0.103 D) \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2$ (深度 D : m), $\rho_s =$

1.026 g/cm^3 , $\gamma = 1.4$, $\mu_1 = 10^6 \text{ dyn/cm}^2$ とした。

そこで、式(2-3)および(2-4)を用いることによりキュウリエソの反射に関する周波数特性について検討した。

2.2.3 結果

2.2.3.1 鰾の計測結果

摘出された鰾を Fig.2 に示す。摘出された鰾を水中に浮かせその長径と短径の計測を行った。この結果、キュウリエソの鰾の平均長径は6.52mm (5.3-7.5mm) で、平均短径は4.33mm (2.8-5.8mm) であった。Fig.3 に摘出された鰾の長径と短径の関係を示す。

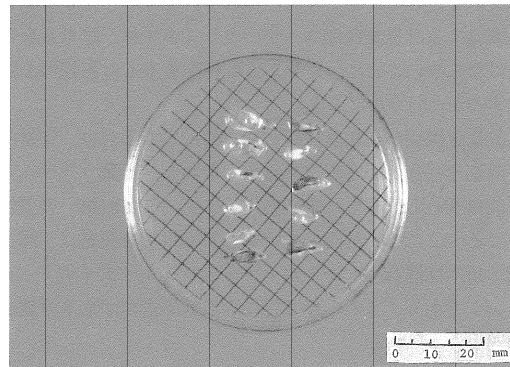


Fig. 2. Dissected swimbladder from the material fish.

Strasberg (1953) の理論を準用すると、鰾の形状を扁長回転楕円体から球に近似できるのは長径と短径の比が3:1以下であることが必要である (Shibata, 1970)。Fig.3 で示したように、今回計測された鰾の長径と短径の比はすべてこの範囲内にあることから、鰾は音響的には球とみなして差し支えない。そこで、計測された長径と短径を式(2-2)に代入し等価半径を求めた。ここで得られた等価半径の最小値と最大値はそれぞれ 1.73mm と 3.12mm で、平均値は 2.48mm であった。

また、体長 (L cm) と等価半径 a の関係を表す回帰式は次式で与えられ、1%水準で有意となった。

$$a = 0.482L + 0.298 \quad (r = 0.46, n = 46) \quad (2-5)$$

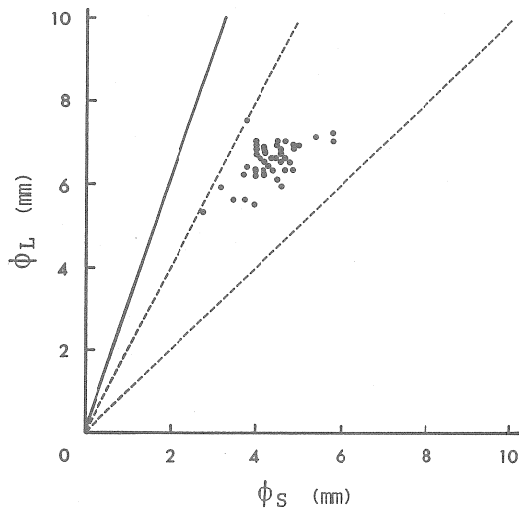


Fig. 3. Major axis—minor one relation of the swimbladder, to examine validity of applying to the Strasberg's criterion.

Note: The points under the solid line (3:1 relation) could be regarded as sphere. The dash lines (2:1 and 1:1 relations) were added for reference.

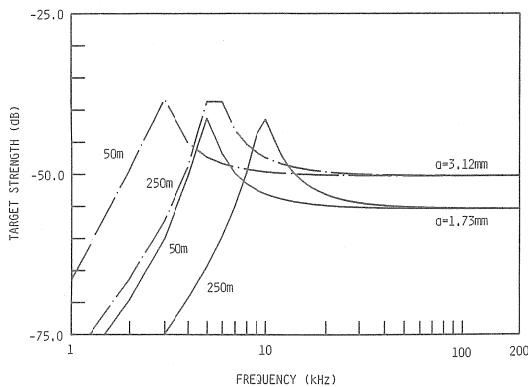


Fig. 4. Predicted frequency responses for material fish with a 3.12- or 1.73 mm- equivalent radius swimbladder at the depths of 50 and 250m.

---: Equivalent radius $a=3.12$ mm.
 —: Equivalent radius $a=1.73$ mm.

2.2.3.2 鰾モデルによる周波数特性

式(2-3)および式(2-4)の Weston (1967), Andreeva (1964) の鰾モデルを用いて、等価半径1.73mmと3.12mmの鰾の共振周波数を深度50mと250mについてそれぞれ求めた。この結果を Fig.4に示す。図中のそれぞれの曲線のピークを示すところが各鰾における共振点を表している。この図から共振周波数帯は、2から10kHz までであると推定された。また、共振周波数は鰾の等価半径が小さく、しかも深度が深ければ深いほど高くなる傾向にある。したがって、共振の影響についてみると、生息深度が深くしかも小さい鰾を有する魚ほど高い周波数帯にまで共振の影響が及ぶことになる。今回の計測では共振の影響は50kHz 付近にまで及んでいたが、60kHz 以上では共振の影響はほとんどみられなかった。これらのことから、今回対象としたキュウリエソの定量的計測を行う場合は、60kHz 以上の周波数が適切であると考えられた。

2.2.4 考察

Holliday and Pieper (1980) は、有鰾魚の共振は生息深度と鰾の大きさの関係によって異なるが、一般的には50kHz 以下の周波数で見られると述べている。これは、今回の鰾モデルによる数値計算の結果とほぼ一致している。一方、深度変化にともなう共振周波数とTSの変動を、生物の日周期鉛直移動にあわせて予測することは極めて困難である。したがって、定量的な資源量評価を目的とした計測に際して、鰾の共振の影響が及ばない周波数帯を選定する必要がある。

TSは対象魚の体長 L と波長 λ によって大きく変動する。このTSの変動は、鰾の共振の影響により L/λ が1程度まで及ぶと考えられている(古澤, 1989)。古澤(1989)は有鰾魚の場合は $1 < L/\lambda < 10$ で示される範囲が変動の少ない領域であると報告した。一般に L/λ が1の付近は Rayleigh 散乱から geometric 散乱への変遷域にあたる (Lytle and Maxwell, 1982)。したがって、共振による変動誤差を少なくするためには L/λ を大きくした方がよい。ここで、体長が4cm程度のキュウリエソを想定すると、 $1 < L/\lambda < 10$ を満足する周波数は、37.5kHz から375kHz になる。Plueddemann and Pintel (1989) は67kHzの周波数を用いた調査で、極くわずかであるが小魚などの鰾からの共振の影響を指摘している。今回の計測の結果では、Fig.4に示すように共振の影響によるTSの変動は60kHz 以上で見られなくなる。以上のことから、魚類マイクロネクトンのように小型

で顕著な日周期鉛直移動をする生物の現存量の計測には、60kHz以上の周波数を用いる必要があると考えられた。ただし、より小型の有鰓生物を計測する場合は、高い周波数帯にまで共振の影響が及ぶので、さらに高い周波数を選定する必要があると考えられた。一方、10kHz帯付近に本種の共振周波数帯があることから、魚種判別のために有効な10kHz帯魚探機を併用する可能性が示唆された。

2.3 魚類マイクロネクトンの音響調査のための適正周波数帯の選定

魚類マイクロネクトンの多くが日周期鉛直移動をすることはよく知られており(川口, 1969; 1974), その代表種であるキュウリエソも顕著な日周期鉛直移動を行う(沖山, 1971)。その生息空間は表層から深層にいたる広い範囲におよんでいる。しかも音響調査の対象としては極めて小型の生物のため、資源量推定の調査手法を検討するうえで考慮しなければならない問題は数多い。また、昼間の生息深度が深いため、超音波の吸収減衰、魚群による音波減衰、海中騒音や船の航走にともなう減衰などさまざまな減衰の影響を受ける。これら減衰は使用周波数により大きく異なるため周波数特性を明らかにしておかなければならない。とりわけ吸収減衰は各種の減衰のなかでも最も大きく、探知距離を制限し、SN比を下げる大きな原因となる。さらに不適当な吸収減衰係数 α の設定は、大きな推定誤差を生む原因ともなる(古澤, 1985)。これらのことから、音響資源調査に際し、使用機器の基本パラメータである周波数選定は、最も注意を払わなければならない問題と考えられる。そこで、ソナー方程式を基礎として、SN比を十分大きくすることと、推定誤差を少なくすることの2つを目的とし、かつ下記の4つの生態的特性を考慮のうえ、キュウリエソを中心とする魚類マイクロネクトンの音響調査のための適正周波数帯について検討した。

1. キュウリエソの昼間の生息深度は深い。
2. 昼間は密集して生息する傾向がある。
3. 音響調査の対象としては極めて小型(平均約4.5cm)の生物である。
4. 表層から深層にいたる広い範囲に分布する。

2.3.1 ソナー方程式

ソナー方程式は元来ソナーによる標的の探知予測を行うためにUrlick(1946)により考え出されたもので、標的からのエコーのSN比とソナーシステムの検出しきい値(スレッシュールド)との平衡式である(飯田, 1988)。また、ソ

ナー方程式で用いられるパラメータはすべて $1 \mu\text{Pa}$ を基準とする対数量(dB)で表される。ソナーパラメータは装置の特性を表すものと、媒質により決定されるものに大別される。すなわち、前者は送波レベル、指向性利得および検出しきい値(スレッシュールド)であり、後者は伝播損失とノイズレベルである。

ここで、送受共用のいわゆるモノスティックの送受波器を用いた魚群探知機において、送受波器から音軸上1mの基準点における送波レベルをSL、ターゲットに達するまでの伝播損失をTL、ターゲットストレングスをTSとすれば、送受波器に再び受波されるエコーレベルELは、

$$EL = SL - 2TL + TS \quad (2-6)$$

で表される。

ここで、送受波器位置における等方性ノイズをNLとすると、背景雑音(ノイズ)も同時に受波されるため、NLは送受波器の指向性利得分DIだけ減少する。

したがって、相対ノイズレベルは $NL - DI$ となり、送受波器端子におけるSN比(SN)は

$$SN = SL - 2TL + TS - (NL - DI) \quad (2-7)$$

となる。

ここで、目標の情報に相当するエコー信号を不要なノイズの中からある確率で抽出することが必要となる(奥島編, 1984)。この探知可能な最小の送受波器端子でのSN比を、検出しきい値DTといい、エコーのSN比がこの検出しきい値を上回っているとき、ターゲットを探知することとなる。したがって、平衡式は

$$DT = SL - 2TL + TS - (NL - DI) \quad (2-8)$$

と表される。

しかし、前述のように、海洋生物資源の定量的な計測を考える場合は、ターゲットの探知が目的ではなく、パラメータの絶対値の推定にある。

したがって、魚群からのエコーを魚探機の記録紙に表示しようとすれば、検出しきい値よりもSN比が大きくなければ、魚群からの反射エコーをノイズより分離識別することはできない。さらに、定量的計測を考える場合は、十分大きなSN比での測定が重要な点となる。

そこで、SN比に対するソナー方程式を単体魚(単体エコー)について考えれば次式で表される(古澤・高尾, 1988)。

$$SN = SL - 40 \log R - 2\alpha R - AT + TS + DI - NL \quad (2-9)$$

ここで、 R は魚の深度、 α は吸収減衰係数、 AT は航走減衰、気泡減衰、魚群減衰の和である。

また単純な音響標的としての魚群を考えれば、次式で表すことができる。

$$SN = SL - 20 \log R - 2\alpha R - AT + TS_s + DI - NL \quad (2-10)$$

ここで、 TS_s は魚群の TS とする。

2.3.2 信号対雑音比 (SN 比)

前項で述べたとおり定量的音響調査を考える場合は、ノイズに対するエコーレベルの比すなわち SN 比をいかに大きくとるかという点が極めて重要となる。SN 比を上げるためには、送信出力を最大とすればよいわけである。しかし出力を上げれば上げるほどノイズレベルが高くなり、またキャビテーションも発生し、音響出力の損失、送波器のビームパターンの悪化などひいては魚探機の能力の低下を引き起こすこととなる (Urlick, 1979)。

西村 (1969) は魚群探知機的设计に必要な最適周波数、すなわち、送受波器端子における魚群からのエコーと海中の騒音との SN 比が最大となるような周波数を導く理論を示した。これは最小の音響出力で、与えられた任意の深度にいる魚の魚探映像を識別できるような周波数が、最適周波数であるという考え方である。古澤・高尾 (1988) はこの考え方をより発展させ、水産資源推定のための計量魚探機的设计方法を明らかにし、周波数、送波レベル、送受波器径、帯域幅、パルス幅の決定のための汎用図を作成した。これらの研究では両者とも設計者からの立場で魚探機あるいは、計量魚探機的设计方法の概念を述べている。そこで、本研究では西村の方法に基づいて利用者の立場から日本海産キュウリエソの音響調査のための適正周波数について考察を行うこととした。さらに得られた結果を古澤・高尾 (1988) の汎用図法を応用して検証した。

式(2-10)で示されたソナー方程式を、音響出力に対する周波数の関数として表すと次式となる。

$$SL = SN + 20 \log R + 2\alpha R + AT - TS_s - DI + NL \quad (2-11)$$

ここで、 $SL = 170.8 + 10 \log WA + DI$ (dB/ μ Pa/m)

であるので、音響出力 (WA : watt) に対する式として整理すると

$$10 \log WA = SN + 20 \log R + 2\alpha R + AT - TS_s - 2DI + NL - 170.8 \quad (2-12)$$

となる。

魚群の TS を TS_s とすれば

$$TS_s = TS + 10 \log N \quad (2-13)$$

ここで、 N は単位体積当りの魚の尾数である。

西村 (1969) は魚の個体および魚群の反射損失 L_p は、周波数 f の増加にともなって減少するとして、次の近似式を示した。

$$L_p = -10 \log f + L_0 \quad (2-14)$$

ここで、 L_0 は 1 kHz における反射損失の値である。

反射損失 L_p とターゲットストレングス TS との関係は $L_p = -TS$ であるので、

$$TS = 10 \log f + TS_0 \quad (2-15)$$

と表される。ここで、 TS_0 は 1 kHz におけるターゲットストレングスの値である。減衰の和 AT は、そのほとんどが航走減衰 q によるものと考えられるので、 $AT \approx q$ として取り扱った。航走減衰 q については、周波数の関数としての近似が次式で示されている。

$$q = 20 f^{-2/3} \quad (2-16)$$

この関係は 220 トン型鋼船の船底送受波器に整流覆のツバを装着し、11 ノットで航走した場合に得られたものである (西村, 1969)。ノイズレベル NL については、

$$NL = SPL + 10 \log \Delta f \quad (2-17)$$

ここで、 SPL : ノイズのスペクトルレベル (dB/ μ Pa/Hz)

Δf : 受信系の帯域幅 (Hz)

で表され (Mitson, 1983)、ノイズのスペクトルレベル SPL と受信系の帯域幅 Δf は、それぞれ次式で示される。

$$\text{SPL} = \text{SPL}_0 - 18 \log f \quad (2-18)$$

$$\Delta f = \beta f \quad (\text{西村, 1969}) \quad (2-19)$$

ここで, SPL_0 : 1 kHzにおけるノイズのスペクトルレベル (dB/ $\mu\text{Pa}/\text{Hz}$)

β : 受信系の帯域幅に関する定数

したがって, 式(2-17), (2-18) および(2-19)より

$$\text{NL} = \text{SPL}_0 - 18 \log f + 10 \log f + 10 \log \beta \quad (2-20)$$

となる。ここで,

$$\begin{aligned} K = & \text{SN} + 20 \log R + \text{TS}_0 + 10 \log N + \text{SPL}_0 \\ & + 10 \log \beta - 2\text{DI} - 170.8 \quad (2-21) \end{aligned}$$

とすれば,

$$10 \log \text{WA} = 2 \alpha f - 18 \log f + 20 f^{-2/3} + K \quad (2-22)$$

と表される。

ここで, 音響出力 (WA) が最小となるような周波数を求めるためには, 式(2-22)を周波数 f で微分し, 左辺の微分値を 0 とすればよい。吸収減衰係数 α は, Francois and Garrison (1982b) の式を用いた。ここで, 水温, 深度, pH の係数については, キュウリエソの昼間の平均生息深度を 200m と考え, 日本海のこの深度における海洋環境の平均的値を与えた。すなわち, 塩分 $S = 34$, 水温 $T = 2^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 7.0$ とした。

いまここで, 式(2-22)を周波数 f の関数として微分すると,

$$\left(\frac{\partial (10 \log \text{WA})}{\partial f} \right)_{f=f_{(\min)}} = 0 \quad (2-23)$$

となる。しかし, 式(2-23)は $f_{(\min)}$ については解けないので, $R = X(f_{(\min)})$ とおけば, 深度 R と周波数 $f_{(\min)}$ の関係が求められる (西村, 1969)。そこで, この関係を Fig. 5 に示した。この図から深度 R の生物を計測する場合, 音響出力が最小になる周波数が求められる。つまり, 求められた周波数が当該深度における魚群からのエコーとノイズとの SN 比が最大となる周波数ということになる。ここで, 今回の計算で求めた深度と周波数の関係を実線で, 西村 (1969) の普遍図表より求めた深度と周波数の関係を破線で示した。この図より, 今回の計算からキュウリエソが昼間

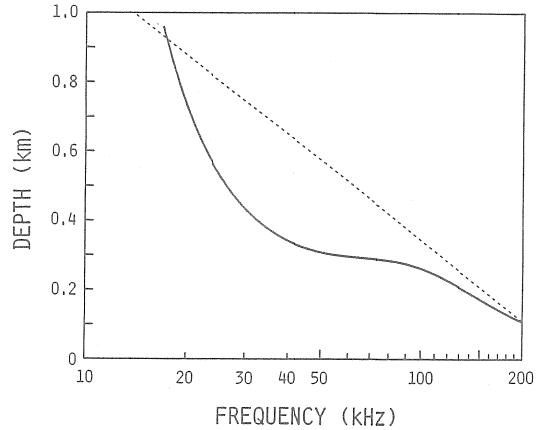


Fig. 5. Estimation of depth depending change of the most effective frequency, with which the target can be detected with the minimum acoustic power. Dashed lines indicate the result of Nishimura's diagram.

生息していると考えられる 150–250m 付近を測定する場合には, 50–100kHz 帯が SN 比を最大にすることができる最適な周波数帯であることがわかった。

2.3.3 減衰

キュウリエソ魚群は昼間には 150 から 250m の深度に密集して生息しており, 日没時にはほぼ 50m もしくはそれ以上まで上昇する (沖山, 1971)。本項では, この生態的特性に関連して, 超音波の伝播過程における吸収減衰, および濃密魚群による音波減衰, さらに表層付近における風波に基づく気泡減衰などの, 各種減衰に関する周波数特性について検討する。

吸収減衰についてはこれまでに多くの研究がなされている。海水による吸収減衰は各種の減衰のなかで特に周波数特性が顕著な要因であると指摘されている (古澤, 1985)。従来から使用されてきた吸収減衰係数 α (dB/km) の実験式 (例えば, Murphy *et al.*, 1958) は周波数のみの関数で表されているため, ユーザーにとっては非常に簡便な式であるが, 高周波ではその誤差が極めて大きくなり, 資源量推定値に大きな偏りを生じさせることがわかった (Shirakihara *et al.*, 1986)。現在では, Francois and Garrison (1982a; 1982b) の式が最も新しく, 包括的であると考えられている。この式では吸収減衰係数 α を塩分, 水温,

深度、pHおよび周波数の関数で表しており、中でも塩分と水温の影響が大きく、その変動幅は高周波で非常に大きい(古澤, 1990)。しかし、塩分と、水温の変化にともなう吸収減衰係数 α を水平、垂直方向に連続的に補正する装置がない場合は、これらの補正は非常に困難となる(Foote, 1981)。

そこで、Francois and Garrisonの式(2-24)と、周波数の関数で表される代表的なMurphy *et al.* (1958)の実験式(2-25)

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (\text{dB/km}) \quad (2-24)$$

f : 周波数

f_1, f_2 : 碳酸と硫酸マグネシウムの緩和周波数

P_1, P_2, P_3 : 水圧の補正項

A_1, A_2, A_3 : 水温、塩分、pHによって求められる定数

$$\alpha = \frac{43.5f^2}{7000+f^2} + 0.00033f^2 \quad (\text{dB/km}) \quad (2-25)$$

を比較した (Fig.6)。

この図は日本海でキュウリエソが生息する水深30-250mの上限と下限である30m層と250m層における塩分、水温およびpHの平均的値をそれぞれFrancois and Garrisonの式に代入し、この2層の吸収減衰係数の平均値とMurphy *et al.*の実験式で得られた吸収減衰係数値との差を周波数の関数として表したものである。Francois and Garrisonの式による吸収減衰係数 α の値は、周東(1982)による表層 D=30m, T=25°C, S=33, pH=8.3, 深層 D=250m, T=2°C, S=34.5, pH=7.0を用いて求めた。

この図から、周波数が高くなるに従って誤差が大きくなることわかる。特に100kHzを境に急激に誤差が増加する傾向を示している。吸収減衰係数 α は1kmにおける減衰量(dB)として表されるので、250mの深度において100kHzでは0.33dB, 50kHzでは0.05dBの差ということになる。したがって、周波数の選定にあたっては、不適当な吸収減衰係数 α の設定による推定誤差を小さくするためには100kHz以下の周波数帯を選定することが重要であると考えられた。

次に、密集魚群に対する音波減衰については、間庭(1962), Davis (1973), Foote (1978), 石井ら (1983), 李 (1985), Furusawa *et al.* (1984) など多くの研究者が濃密

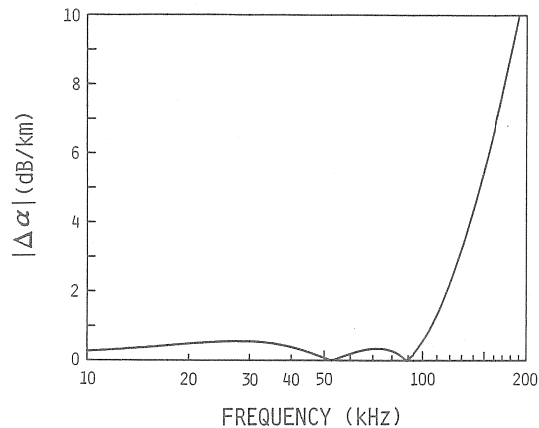


Fig. 6. Frequency depending change of the difference in absorption coefficient between those calculated by using Francois and Garrison's formula (Eq. 2-24) and those by Murphy *et al.*'s one (Eq. 2-25)

魚群や厚い群での音波減衰について研究している。石井ら(1983)は生簀を用いた魚群減衰の実験を行い、魚群による音波減衰が従来考えられていたよりも小さいことを報告した。また、古澤(1990)は魚群減衰の周波数特性は大きくなく、一般の場合には魚群減衰は無視できると報告している。しかし、特に密集した魚群や深度方向に多層に分布する魚群などについては補正を要すると指摘している。ここで、対象とするキュウリエソについて考察すると、キュウリエソは体長が約4cm程度と、非常に小さく、仮に密集していたとしても上層の個体が下層の個体に対し影響を及ぼす遮蔽断面積は4cm²に過ぎない。さらに、キュウリエソが構成している濃密魚群の体積散乱強度(SV値)を-50dB程度と考え、キュウリエソのターゲットストレングスがハダカイワシ(*Diaphus* sp.)のそれである(TS=-60dB, 宮野鼻ら, 1985)と仮定すると、1m³に10から15尾程度の分布となる。これらのことから、キュウリエソ魚群が古澤(1990)のいう特に密集した濃密な魚群とは考える必要はなく、音波減衰に関しては特に考慮する必要はないと考えられた。

風波により海面近くに生じる気泡による音波減衰は、風速が増すにしたがって増加する(Novarini and Bruno, 1982)。特に、表層付近での減衰の影響は大きく、表層付近にある送受波器はこの影響を直接受ける。

気泡減衰について、Novarini and Bruno(1982)は実験的な研究を行い、気泡減衰に対する周波数特性を検討し、気

泡による減衰量を風速、周波数、および送受波器の間数として表した。このなかで送受波器が水面下5mに設置してある場合では、風速10m/s以下の条件で0.3dB、風速14m/sの場合では1dBの減衰があることを示した。したがって、喫水5m前後の調査船に装備されている送受波器を用いて、風速10m/s以下の条件下で音響調査を実施する場合には、気泡減衰に関し特に考慮する必要はないと考えられた。また、キュウリエソ魚群は通常、10m以浅の水面付近には分布生息していないことから、送受波器を浅く設置する必要がなく、水面付近での気泡の影響による減衰については、特に考慮する必要がないと考えられた。

2.3.4 パルス幅

小型の生物を測定する場合には、パルス幅を短くする方が、個体間の分解能を向上させるうえで効果があるが、今回対象とするキュウリエソは魚群として現れるため、個体として分離をする必要はない。したがって、単体エコーとしてではなく群体エコーとしてキュウリエソ魚群を計測する場合の適正なパルス幅について検討した。

Urick (1979) は検出しきい値DTとパルス幅の関係を表式(2-26)で示した。

$$DT = 5 \log (d \Delta f / \tau) \quad (2-26)$$

ここで、 Δf : システムの帯域幅(Hz)

τ : パルス幅(sec)

d : 検出指標

ここで対象魚群の情報に相当するエコー信号を、不要なノイズの中から確実に抽出するためには、検出しきい値をなるべく低くすることが必要である。そのためには、パルス幅を長くするとか、受信機の帯域幅を狭くする必要がある。また、キュウリエソはDSLとして連続した層として現れるため、ノイズレベルが許す限り探知体積をなるべく大きくすることが好ましい。つまり、パルス幅を長くし、指向角を大きくすることが必要と考えられる。一方、パルス幅を短くすると個体間の分解能は向上するが、反射信号を受信増幅するのに、受信回路の帯域幅を広げるため内部ノイズが増加し、その結果最大探知距離が小さくなる。これらのことより、昼間深層に生息しているキュウリエソ魚群を対象とした音響調査においては、パルス幅を短くするより、むしろノイズレベルの許容範囲内でパルス幅を長くの方が適切であると考えられた。すなわち、周波数選定にあたっては、高周波よりむしろパルス幅を長くできる低周

波の方が適していると考えられた。

2.3.5 考察

従来、海洋生物に関連した音響散乱体の研究に30kHz以下の周波数帯が用いられることが多かった(Pieper, 1979; Kinzer, 1970)。しかし、最近ではプランクトンの分布や現存量の計測に30kHz以上の周波数帯が用いられるようになり、Fisher and Squier (1975), Kaye (1978), Greenblatt (1982) らは、88kHz帯を用いて超音波散乱層の観測を行っている。また、浅海域では200kHz帯での音響調査が実施されている(立川ら, 1984)。Beamish (1971), Pieper (1979) は102kHzを用いてオキアミ類(euphausiids)の分布と現存量を計測し、Sameoto (1976) はDSLのオキアミ類(euphausiids)に対して120kHzが最適な計測周波数帯と述べている。また、Holliday and Pieper (1980) は流体球モデルを用いることにより、5-10mmサイズの動物プランクトンの定量計測においては50から500kHzが適正な周波数帯であると指摘した。このように、プランクトンの定量的計測を中心に、対象生物に対応した最適計測のための周波数選定に考慮が払われるようになってきた。しかし、魚類マイクロネクトンを対象とした調査については、まだ十分な研究がなされていない。

魚類マイクロネクトンは、緒言で述べたように漁業の直接の対象とならないことから漁獲統計や標識放流、試験操業といった結果を解析する従来の方法を用いることができない。しかも、生息深度が深いことや逃避行動により簡易なプランクトンネットによる定量的な採捕が困難である。これらのことから、魚類マイクロネクトンの資源量評価にあたっては音響的手法が最も適していると考えられる。

しかし、音響調査の対象としては極めて小型の生物であること、鰾を有していることによる共振の影響、昼間の生息深度が深いなど、計測を実施するにあたって音響特性上の問題点が多い。したがって、使用する周波数帯に対する対象魚の共振の影響、SN比の低下、各種の減衰、特に不適当な吸収減衰係数 α による推定誤差の増加など、資源量の評価に及ぼす影響に関し、対象魚の分布生態に関連した周波数特性を検討し、適正周波数帯を明らかにしておく必要がある。

このような観点から対象魚であるキュウリエソの周波数特性を鰾モデルを用いることにより検討した。この結果、有鰾の魚類マイクロネクトンを対象とし定量的計測を目的とする音響調査に際しては、共振の影響がなくなる60kHz以上が計測に適していると判明した。

また、キュウリエソの分布生態に対応した適正周波数帯の選定を、ソナー方程式をもとに検討した。この結果、SN比を向上させるためには50–100kHz帯、250m付近の生物を計測する場合には100kHzが最も適していることがわかった。

さらに、昼間の生息深度が深いキュウリエソを対象とする場合には、不適当な吸収減衰係数 α の設定による誤差を防ぐために、100kHz以下の周波数帯が望ましいことが明らかにされた。

パルス幅の検討では、キュウリエソは、極めて小型の生物であるが、DSLとして水平的に数マイルに及ぶ層を形成して生息しているため、小さい魚だから高周波というより、むしろ探知体積を大きくでき、ノイズレベルの許容範囲内でパルス幅を長くできる比較的低い周波数が適していると考えられた。

以上の知見を総合した図をFig.7に示す。鯉に起因する周波数特性により周波数の下限を60kHzに設定し、吸収減衰係数 α の推定値に含まれる誤差を防止するため上限を100kHzと設定した。深度150–250mの生物計測のSN比については、この周波数帯域が最適な周波数帯域に入っている。これらのことから、日本海産魚類マイクロネクトンのキュウリエソを対象とした定量的計測を目的とした音響調査には、60–100kHz帯が最も適した周波数帯であることが明らかにされた。

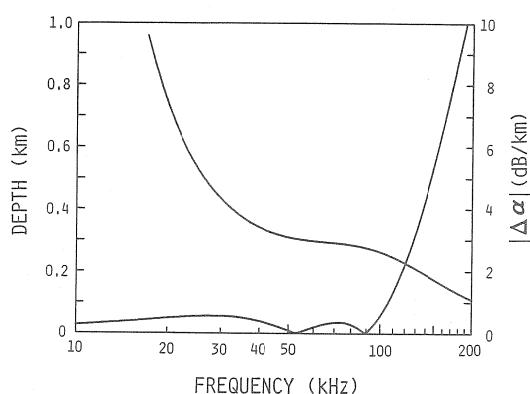


Fig. 7. The diagram showing a clue for choosing the effective frequency (deduced from the previous two figures).

2.4 計測システム

2.4.1 システムの概要

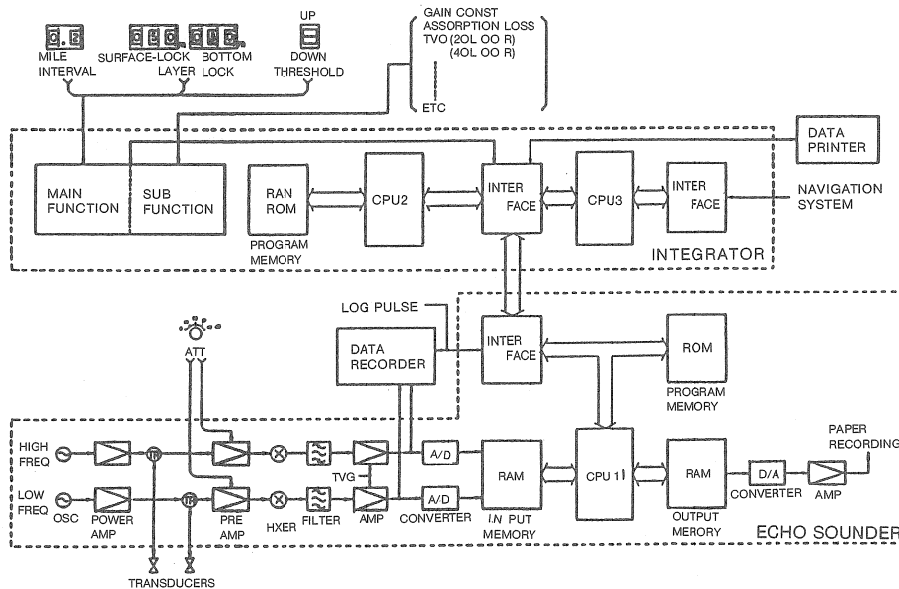
前節までに明らかにしたことおよび論議を踏まえ、本研究においては、キュウリエソの資源評価のための計測用周波数として88kHzを選定することとした。

Fig.8が本研究に用いた計測システムの古野電気製FQ-50型計量魚探機および信号収録装置としてのFQ-60型計量魚探機（曳航式）のブロックダイヤグラムである。本システムの親機器ともいえるFQ-50型計量魚探機は、88kHzと200kHzの2周波の魚探機とエコー積分器から構成されており、送信出力はそれぞれ2kWである。また、FQ-60型の周波数は88kHzで、送信出力は1kWである。本研究においては、88kHzで得られたデータを主に収録解析した。

本システムは積分方式 (Lahore and Lytle, 1970) による計量魚探機である。この方式はエコーのエネルギーを測定し、その内に含まれる魚群エコー信号を体積残響理論 (Urlick, 1979) に基づいて計算、積分し、魚の密度を求める方式である。したがって、中・深層に広範囲に分布するキュウリエソの計測に対しては適した方式と考えられる。受信された魚群からのエコー信号はまずTVG (Time varied gain) アンプによって伝播減衰の補正がなされた後、2乗され、次にシステム定数の乗算が行われる。ここで得られる体積散乱強度は瞬時値であるから、垂直方向、水平方向の積分を行うことにより、平均体積散乱強度SV値が出力される。ここで得られるSV値が、資源量推定の基礎となる情報ということになる。したがって、音響調査を実施するにあたっては、まず、このシステムの電氣的、音響的パラメータに関し、高い精度と定量的取り扱いが要求されることとなる。そこで、次項で本計測システムの較正について述べる。

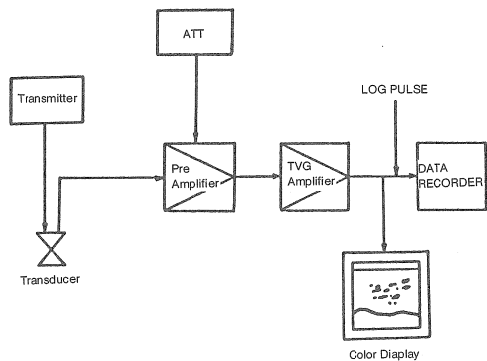
2.4.2 システムの較正

本研究に用いたFQ-60型およびFQ-50型計量魚探機の較正については、FQ-50型が水産大学校練習船天鷹丸（総トン数603トン）に装備されているため、同船が下関停泊中に行った。較正は音響調査実施前に毎回行なっているが、ここでは、1989年7月10日（FQ-60型）、1989年10月24日（FQ-50型）に行った例を示す。較正はJohannesson and Mitson (1985) の方式による水中標準マイクロフォンを用いて行った。また、FQ-50型の送受波器は船底に装備されているため、船にトリムがある場合、送受波器面は水平面に対し少し傾斜した格好となる。したがって、水中標準マ



(FQ-50)

(Cited from Sasakura *et al.*, 1984)



(FQ-60)

Fig. 8. Block diagram of measurement system (Furuno FQ-50, FQ-60).

SE および SL は次式により得られ、測定結果を Table 1 に示す。

$$SE = 20 \log (V_{MIC}/V_{TX}) + MES \quad (2-27)$$

ここで、SE: 送波感度 (V_{P-P})

V_{MIC} : 水中マイクロフォンの受波ピーク電圧 (V_{P-P})

V_{TX} : 振動子送振波形のピーク電圧 (V_{P-P})

MES: 水中標準マイクロフォンの受波感度 (dB)

$$SL = 20 \log (V_{TX}/2\sqrt{2}) + SE \quad (2-28)$$

ここで、SL: 送波レベル (dB)

マイクロフォンを正確に送受波器音軸上 1 m の距離に設置した。

(i) 送波感度および送波レベル

送波感度 (SE) と送波レベル (SL) の測定装置の配置を Fig.9(a) に示す。水中標準マイクロフォンは感度既知のものを使用した。

(ii) 受波感度

受波感度 (ME) は水中標準マイクロフォンを音源としてマイク出力を変化させ (1,3,5V), 送受波器で受波された電圧をアンプゲインを通したのち、プリアンプゲインとして測定した。測定装置の配置を Fig.9(b) に示す。

ME は次式により得られ、測定結果を Table 2 に示す。

$$ME = 20 \log (V_{P.AMP} / V_{PX}) + SES - G_P \quad (2-29)$$

ここで、 $V_{P.AMP}$: プリアンプ出力電圧 (V_{P-P})

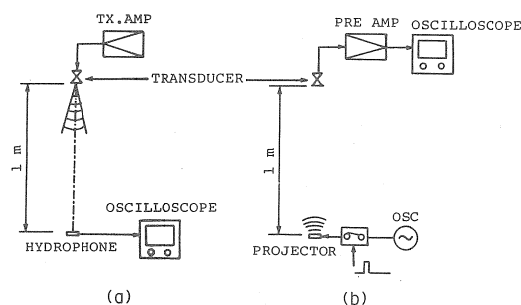
V_{PX} : 水中マイクロフォン(プロジェクター)の送波ピーク電圧 (V_{P-P})

SES : 水中マイクロフォンの送波感度 (dB)

G_P : プリアンプゲイン (dB)

(iii) 指向性関数

送受波器の指向性関数の測定は古野電気(株)実験水槽(西宮市)において行われた。この実験水槽の概要は Fig.10に示すとおりである。この装置は被測定送受波器を固定し、固定リングに取り付けたハイドロフォンが回転することによって指向性を測定することができる(笹倉, 1990)。指向特性の計測にあたっては、天鷹丸装備の FQ-



(Cited and reformed from Sasakura et al., 1984)

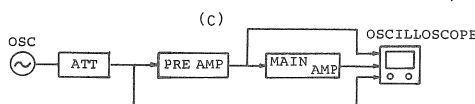


Fig. 9. Calibration of measurement system. (a) Source level. (b) Receiving sensitivity. (c) Amplifier gain.

Table 1. Results of calibration of average transmitting sensitivity, and source level for the transducer used.

a) Quantitative echo sounder, FQ-50 Type, equipped on Tenyo-maru.

Transmitter output power range		V_{TX}	V_{MIC}	MES	SE	Average SE	SL
88 kHz	A	7.5	0.03	-111.6	63.6	65.4	73.9
	B	43.0	0.23	-111.6	66.2		89.0
	C	150.0	0.80	-111.6	66.1		99.9
	D	960.0	4.90	-111.6	65.8		116.0
200 kHz	A	7.2	0.084	-115.3	76.6	77.2	85.3
	B	27.0	0.35	-115.3	77.6		96.8
	C	104.0	1.30	-115.3	77.2		108.5
	D	540.0	6.70	-115.3	77.2		122.8

b) Quantitative echo sounder, FQ-60 Type.

Transmitter output power range		V_{TX}	V_{MIC}	MES	SE	Average SE	SL
88 kHz	A	225	0.85	-111.6	63.14	63.56	101.57
	B	420	1.70	-111.6	63.74		106.99
	C	745	3.04	-111.6	63.81		111.97

Note V_{TX} : Transducer transmitting voltage (V_{P-P})
 V_{MIC} : Hydrophone output voltage (V_{P-P})
 MES : Hydrophone receiving sensitivity (0 dB; 1 V/1 μ bar)
 SE : Transmitting sensitivity (0 dB; 1 V/1 μ bar)
 SL : Source level (dB)

50型と同型の送受波器を使用しているFQ-60型魚探機の送受波器を用いて行った。Fig.11は被測定送受波器である88kHzの指向特性の実測測定結果と、次に示す指向性関数 $b(\theta)$ の理論式によって得た計算値との比較を表している。この結果、方向角が 0° から第1ゼロ角までは両者はほぼ一致していた。したがって、本研究においてはほぼ理論値を使用しても差し支えないと考えられた。

$$\sqrt{b(\theta)} = 2J_1(Z)/Z \quad (2-30)$$

$$Z = (2\pi a/\lambda) \sin \theta$$

ここで、 $J_1(Z)$: 第1種第1次ベッセル関数

a : 送受波器の半径

λ : 波長

θ : 指向角

(iv) 受信器利得

本システムは通常最大利得の状態では用いるので、高密度の魚群からの反射エコーを受波する場合は、入力信号が飽和したり、しきい値以下になったりすることがある。したがって、このような状況に対処するため抵抗減衰器(アッテネータ)により、あらかじめ入力を調整するか、もしくは出力を1ランク減少、すなわち、利得を約-16dB下げで使用するなどの方策を考える必要がある。しかし、キュウリエソ魚群の音響強度は-50dB程度であると考えられるので、アッテネータの調整で十分対応できると考えられた。測定装置をFig.9(c)に示すように配置し、プリアンプゲイン、および、総合アンプゲインを計測した。FQ-60型とFQ-50型のプリアンプゲインは、アッテネータ0dBの場合で、それぞれ49.7dB、49.1dB、総合アンプゲインは両魚探機とも100dBであった。

Table 2. Results of calibration of receiving sensitivity for the transducer used.

	V_{PX}	ATT	V_{P-AMP}	SES	GP	ME	Average ME
88 kHz	1	0 dB	1.70	37.6	49.1	-82.1	-82.0
		10 dB	0.54	37.6	39.2	-82.2	
	3	10 dB	0.70	37.6	39.2	-81.7	
		20 dB	0.54	37.6	29.2	-81.7	
	5	10 dB	2.585	37.6	39.2	-82.5	
		20 dB	0.68	37.6	29.2	-81.9	
200 kHz	1	10 dB	1.30	44.9	39.8	-82.4	-82.5
		20 dB	0.40	44.9	29.8	-82.7	
	3	10 dB	3.80	44.9	39.8	-82.6	
		20 dB	1.20	44.9	29.8	-82.7	
	4.2	10 dB	5.50	44.9	39.8	-82.4	
		20 dB	1.75	44.9	29.8	-82.7	
88 kHz	1	0 dB	3.3	37.6	52.0	-79.23	-79.198
		10 dB	1.05	37.6	42.05	-79.23	
	3	10 dB	3.1	37.6	42.05	-79.37	
		20 dB	0.94	37.6	31.6	-79.28	
	5	10 dB	5.4	37.6	42.05	-78.98	
		20 dB	1.6	37.6	31.6	-79.10	

Note V_{PX} : Projector transmitting voltage (V_{P-P})
 ATT : Attenuator (dB)
 V_{P-AMP} : Pre amplifier output voltage (V_{P-P})
 SES : Hydrophone transmitting sensitivity (0 dB; 1 V/1 μ bar)
 GP : Amplifier gain (dB)
 ME : Transducer receiving sensitivity (0 dB; 1 V/1 μ bar)

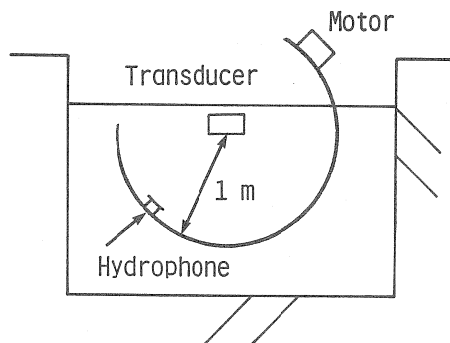


Fig. 10. Measurement system for directivity pattern of the transducer used (Cited and reformed from Sasakura, 1990).

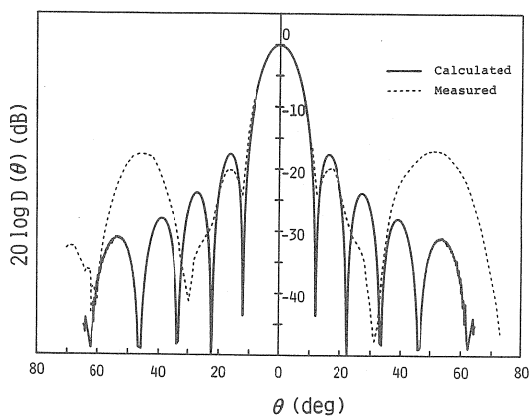


Fig. 11. Comparison between the measured directivity and theoretically calculated one of 88kHz transducer used.

2.4.3 システムの適正な使用方法

システムを適正に使用するためには対象生物の分布・生態に対応した適切な運用方法がいくつか求められる。アッテネータの使用方法がその一つである。和田ら (1986) はマイワシ濃密魚群による音響信号の飽和に関連したアッテネータの使用について問題提起を行っている。すなわち送受波器近くに濃密魚群がいる場合には、計測信号が飽和してしまうおそれがあるというものである。

ここで音響信号が飽和しないで計測できる SV 値とアッテネータの調整値 (ATT) の関係を求めるため、笹倉*は数式解析を行っている。

プリアンプ通過後の信号電圧 E_p は

$$E_p = SL + ME + (EG - ATT) + SV - 20 \log R - 2\alpha R + 10 \log \frac{c\tau}{2} + 10 \log \Psi \quad (2-31)$$

で表される。

ここで EG は増幅器ゲインである。 E_p は TVG アンプへの入力条件として

$$E_p < -15 \quad (2-32)$$

でなければならない (FQ-50型的设计および実測値)。したがって、式(2-31)および式(2-32)より

$$SV < -(SL + ME) - (EG - ATT) + 20 \log R + 2\alpha R - 10 \log \frac{c\tau}{2} - 10 \log \Psi - 15 \quad (2-33)$$

となり SV 値と距離 R との関係を、ATT をパラメータとして求めることができる。本研究ではこの方法で算出し、その結果を Fig.12 に示した。この図から、もし深度 20m のところに -40dB の濃密な魚群がいたとしたら、20dB 以上の ATT でなければ、反射信号が飽和することになる。したがって、深度 30-250m の広範囲に分布する、-50dB の音響強度の魚類マイクロネクトンの計測を本システムを用いて考える場合は、ダイナミックレンジが 50dB あることを考えればアッテネータを 10-20dB の範囲で使用するのが適切な運用方法であることがわかった。

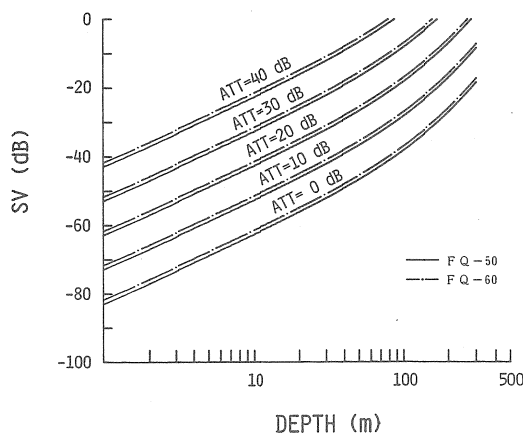


Fig. 12. The level of attenuator to escape from saturation in relation to volume back-scattering strength (SV) at various depths.

*私信(1985)

第3章 ターゲットストレングス(TS)の測定

3.1 緒言

音響システムによる海洋生物の資源量評価の方法は、大別して単体魚(単体エコー)を対象とするエコー計数方式と、魚群(魚群エコー)を対象とする積分方式の2つに分けることができる。マグロ、サケ、マスのように大型で魚群密度が低い場合は、単体エコーを計測するエコー計数法が有効であるが、キュウリエソのように、小型で大陸棚の縁辺部の中・深層に集中的に分布し、しかも、分布範囲が広い(沖山,1971;Gjøsaeter, 1978)種を対象とするような音響調査の場合は、魚群からの反射エネルギーを積分する積分方式が適していると考えられる。

積分方式の計量魚探機から得られる情報は、魚群内の個体密度と個体の反射強度の積として出力される体積散乱強度(SV)である。したがって、SVを魚群密度に変換し、資源量評価を行うためには、対象魚の個体の反射強度であるターゲットストレングス(TS)を知らなければならない。

そこで本章では、音響システムを用いた日本海産キュウリエソの資源量評価を行う前段階として、キュウリエソの資源量評価に対する使用周波数としては極めて適切な周波数帯の計量魚探機(88kHz)を用いて、密度推定の重要なスケールファクターであるキュウリエソの平均TSを実験的に求めた。

一方、実際の音響調査において調査海域・時期が異なれば対象魚の平均体長が変化すると考えられる。したがって、この実験によって求めたTSの適用範囲を拡張するためには、体長にともなうTSの変化量についても検討しなければならない。体長とTSの関係を明かにするためには、異なる体長の魚を用いてそれらのTSを直接計測する方法と理論的に求める方法がある。ここでは後者の一つとして、魚体より摘出した鰾の後方散乱断面から各個体のTSを数値計算により求め、体長との関係について検討した。

3.2 試料と計測方法

用いた試料は1988年8月に水産大学校練習船耕洋丸(総トン数190.17トン)が、隠岐諸島周辺海域で中層トロールにより採集し、5%のホルマリン水溶液で固定したものである。

同年10月山口県宇部市小野湖(最大水深約25m)においてTSの測定を行った。その実験装置をFig.13に示す。こ

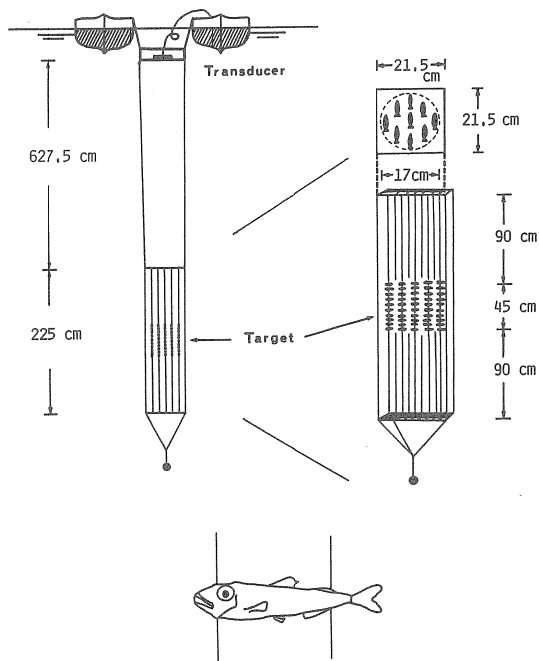


Fig. 13. Configuration of experimental target strength measurement.

の図に示すように2隻のFRPボート(長さ5.73m,幅1.90mおよび長さ4.99m,幅1.45m)を固縛し、送受波器を水面下約1mに超音波を鉛直方向に送受信できるように設置した。また、所定の尾数のキュウリエソを送受波器に背を向け、魚体を傷つけないようにテグスを頭部および尾部に通し送受波器直下に懸垂しターゲットとした。ターゲットと送受波器の距離は7.175mとし、枠体の上部と下部をターゲットから1パルス幅分(90cm)離して、送波ビームの主軸がターゲットの中心に一致するように設置した。ターゲットの尾数を、90尾から順次9尾ずつ減少させながら、各尾数における反射エコーを約5分間(約1000ピング)ずつデータレコーダー(TEAC製R-61)に収録した。しかし、風波の影響による反射エコーの変動(あばれ)などのため反射強度の測定に用いることができた音響データは各設定尾数について約1分間(約200ピング)であった。計量魚探機は、古野電気製FQ-60(周波数88kHz,出力1kW)で、計測システムのブロックダイアグラム、および、実験時の計量魚探機の設定をFig.14に示す。ターゲットからの反射強度の測定は、後日実験室においてそのピーク電圧値をストレージ機能を有するオシロスコープを通して目視に

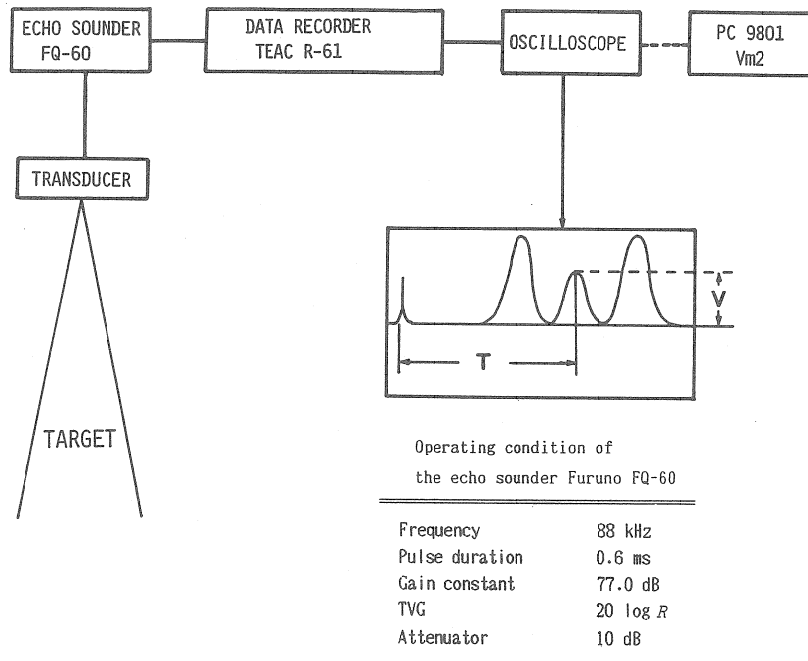


Fig. 14. Block diagram of data acquisition and processing system.

よった。なお、魚探機システムの較正は Johannesson and Mitson (1985) の方式による水中標準マイクロフォンを用いて行った。

一方、体長と TS との関係調べるために計測した鰾は、第 2 章の鰾による周波数特性の検討に使用したのと同じである。測定方法も同様に冷凍保存されていた試料を解冻し体長と体重の計測を行ったのち、鰾 46 個を摘出し鰾の長径と短径をノギスを用いて計測したものである。懸垂法による TS 測定および鰾計測に用いたキュウリエソの体長・体重組成を、それぞれ Fig. 15(a), (b) に示す。

3.3 解析方法

3.3.1 指向性定数の検討

本研究の計測ではターゲットをビーム主軸を中心とした一定の狭い範囲に設置したために、送受波器からターゲット魚群に対する立体角 Ω' の円錐内からの反射強度を測定することとなるので、その指向性定数 $\Psi(\Omega')$ を求める必要がある (Fig. 16)。

円形等方性送受波器の指向性定数 Ψ は、

$$\Psi(\theta_m) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_m} b^2(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (3-1)$$

で示される (李, 1985)。

ただし、 $b(\theta, \phi)$ は指向性関数、 θ_m は等価ビーム幅 Ω_m に対する Z 軸からの平面角度 (以下、平面角という) である。 ϕ 平面内 (X-Y 軸平面) では無指向性としてよいから式 (3-1) は、

$$\Psi(\theta_m) = 2\pi \int_0^{\theta_m} b^2(\theta) \sin \theta d\theta \quad (3-2)$$

と表される。

ここで、ターゲットを配置した Ω' に対する平面角 θ' は小さいので、 $0 \leq \theta \leq \theta'$ の範囲で $b(\theta) \approx 1.0$ とみなせる。したがって、式 (3-2) に $b(\theta) = 1.0$ を代入し、立体角 Ω' における指向性定数を求めると、

$$\Psi(\theta') = 2\pi (1 - \cos \theta') \quad (3-3)$$

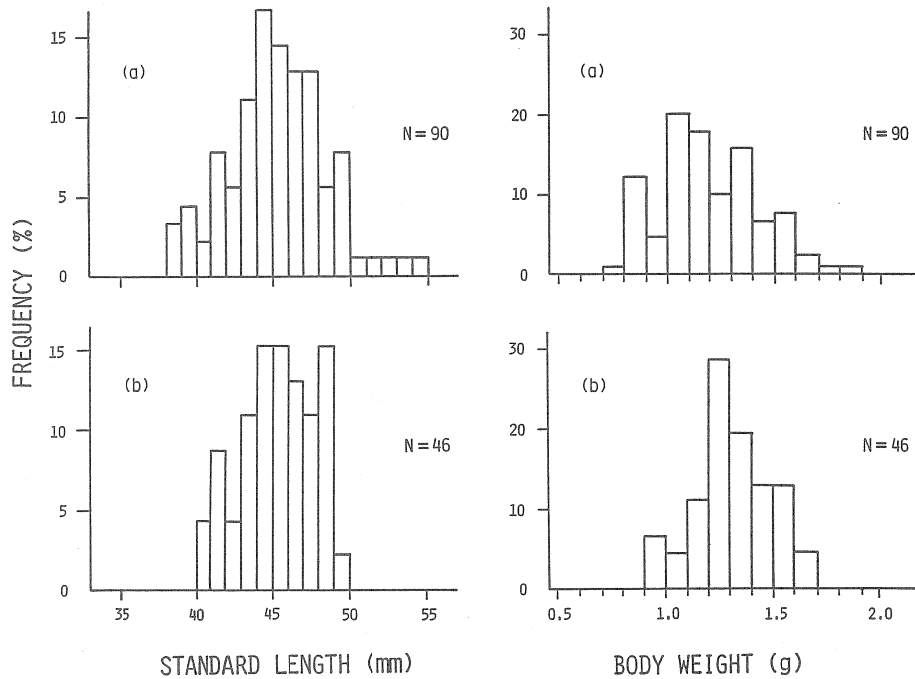


Fig. 15. Frequency distributions of standard length and body weight of material fish (*Maurolicus muelleri*) used in target strength measurement (a) and swimbladder measurement (b).

と表すことができる (Burczynski, 1982)。

そこで、送受波器からのターゲットに対する平面角 θ' ($\theta' = 1.185 \times 10^{-2}$ rad) より式 (3-3) を用い、指向性定数 $\Psi(\Omega) = 4.41 \times 10^{-4}$ を得た。

3.3.2 懸垂法による TS の測定

データレコーダーに取り込まれる音響信号は魚探機の TVG 特性のアナログ補正をうけて磁気テープに収録される。したがって、この補正が理論値と一致していることをあらかじめ確認しておく必要がある。そこで、実験に使用した機器の TVG 特性を調べた (Fig.17)。この結果 $20 \log R$ における収録については 3m 以深、 $40 \log R$ の収録については 7.5m 以深で TVG 補正が有効に機能していることがわかった (ただし、 R は距離)。したがって、本実験で使用した $20 \log R$ の TVG 特性は水深 7.175m のターゲットに対して十分正確に補正がなされたものと考えられた。

今回の解析では、各設定尾数ごとに約 5 分間ずつ収録した音響データの中で、計測状態が連続的に安定している約

1 分間 (約 200 ピング) のデータを解析に用いた。そのなかで異常値を除いた高い方より 30 ピング分を、理想計測状態 (音軸直下にターゲットが存在する状態) における各設定尾数 N に対する平均電圧値 V とした。この平均電圧値 V をソナー方程式の式 (3-4) に代入し SV を求めた。ただし、これら SV のうち、ターゲットと枠・テグスを含んだ場合、および、枠・テグスのみの場合の体積散乱強度をそれぞれ SV_n (dB)、 SV_o (dB) とする。

$$SV_n = 20 \log V - R1 + ATT - 10 \log \Psi - 10 \log \frac{c \tau}{2} + 2 \alpha R \quad (3-4)$$

SV_n : ターゲットと雑音 (枠・テグスなど) を含めた単位体積当りの体積散乱強度 (dB)

$R1$: SL (ソースレベル) + ME (受波感度) + EG (増幅器ゲイン) (dB)

V : 計測電圧値 (dB); (0 dB = 1 V)

Ψ : 指向性定数 (steradian)

- c : 音速 (m/s)
- τ : パルス幅 (sec)
- α : 吸収減衰係数 (dB/km)
- R : 送受波器からターゲットまでの距離
- ATT : アッテネータ (dB)

これら得られた値を式 (3-5) に代入し、雑音を除いた各尾数における SV を求めた。

$$SV = 10 \log \left(10^{\frac{SV_n}{10}} - 10^{\frac{SV_o}{10}} \right) \quad (3-5)$$

ここで、SV と魚群密度 ρ (尾/m³) との関係を次の 1 次回帰式として求めた。

$$SV = a_1 \log \rho + a_0 \quad (3-6)$$

a_1 : 回帰係数
 a_0 : 定数項で 1 尾当りの TS に相当する

なお、魚群密度 ρ (尾/m³) は式 (3-7) により求めた。

$$\rho = \frac{N}{(c \tau / 2) R^2 \Psi} \quad (3-7)$$

また、音速は Leroy (1969) の式により求め、吸収減衰量は送受波器とターゲットの距離が吸収減衰量にほとんど影響しないとみなせるため無視した。

3.3.3 鰾の後方散乱断面積の数値計算

小さな気泡の後方散乱断面積 σ を求めるには、共振の影響により変化する音響的断面積と幾何学的断面積の比について検討しておく必要がある。その際問題となるのが無次元周波数 ka ($=2\pi a / \lambda$) の値である。

Weston (1967) および Andreeva (1964) のモデル式では、無次元周波数 ka が大きい場合、音響的断面積は幾何学的断面積の 4 倍 ($\sigma / \pi a^2 = 4$) となるが、高周波帯域においては両者が等しく ($\sigma / \pi a^2 = 1$) なることを Johnson (1977a; 1977b) は示唆している。

一方、Anderson (1950) は、 $ka = 0.4$ 以上で $\sigma / \pi a^2 = 1$ 、すなわち音響的断面積と幾何学的断面積が等しくなることを示している。今回の計測周波数は、88kHz であるので無次元周波数 ka は 0.64 から 1.15 となり、今回の計測で得られた ka は 0.4 を上回っていることとなる。したがって、本研究では、Anderson (1950) のモデルに基づき $\sigma / \pi a^2 = 1$ として後方散乱断面積 σ を求めた。

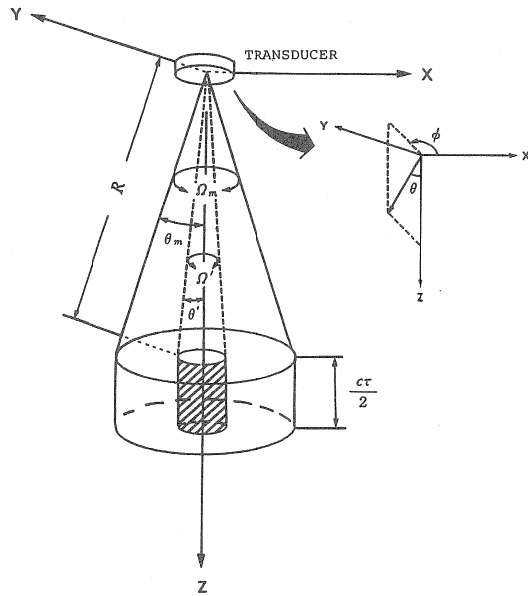


Fig. 16. Diagram of measuring the equivalent beam angle.

- R : Distance from sound source.
- Ω_m, θ_m : Solid angle and plane angle to the equivalent beam angle.
- Ω', θ' : Solid angle and plane angle to targets.
- c : Sound velocity.
- τ : Pulse duration.
- ▨ : Targets.
- θ, ϕ : Angles of sound beam expressed in cartesian coordinates system.

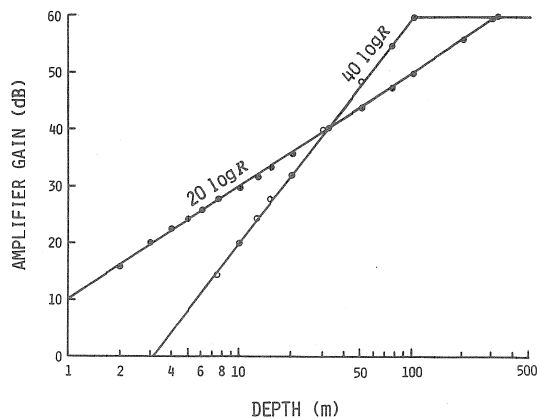


Fig. 17. Characteristics of TVG function. 1.

- : Measured.
- : Measured.
- : Theoretical.

一方, TS は後方散乱断面積を用いて, 次のように表すことができる (Urick, 1979)。

$$TS = 10 \log \sigma / 4\pi \quad (3-8)$$

そこで, 式 (2-2) で求めた等価半径 a から鱗 1 個ずつの幾何学的断面積を求め, これを式 (3-8) に代入し TS 推定値を求めた。

3.4 結果

3.4.1 懸垂法による TS の測定

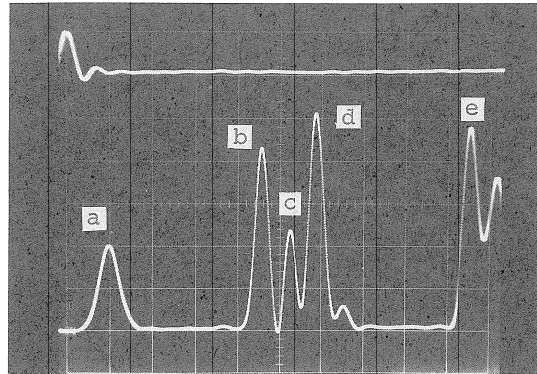
Fig.18にターゲット (キュウリエソ魚群) の反射強度を表すオシロスコープ像を例示する。(I) は魚群と枠を含んだものであり, (II) は枠・テグスの状態を示したものである。a は発振線, b は上部の枠, c は対象魚群, d は下部の枠, e は湖底をそれぞれ示している。各測定尾数における SV はそれぞれのピーク電圧値の平均値を式(3-4), (3-5)に代入して求めた。得られた結果を Table 3 に示す。今回の測定結果ではターゲット尾数が最小の9尾の場合の $(SV_n - SV_0)$ が9.4dBであるほかは, すべて10dB以上であることから, SN比は良好であり, これらの測定値は信頼性が高いと考えられる。そこで, 本測定で得られたデータをすべて用い, 単位体積当りの密度 ρ (尾/m³) に変換したキュウリエソ密度と SV との関係を図.19に示す。図中の黒丸は各密度における SV の実測値であり, 実線は SV の実測値の密度に対する回帰直線 (式3-9) を表し, 破線は回帰係数10として求めた体積残響理論による回帰直線 ($SV = 10 \log \rho - 65.0$) を示している。この図に示すように SV の実測値は分布密度が増加するに従って直線的に増加する傾向を示しており, この直線回帰関係式は 1% の有意水準で有意となった。

$$SV \text{ (dB)} = 8.99 \log \rho - 61.5 \quad (3-9) \\ (r=0.996, n=6)$$

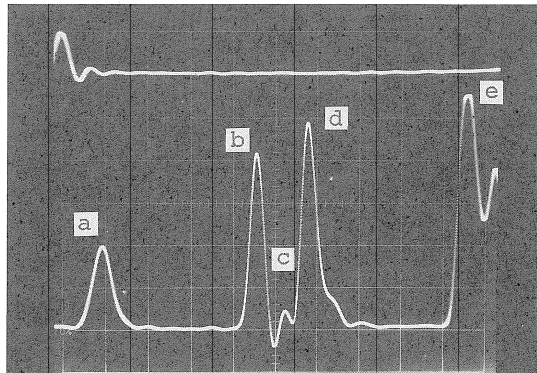
すなわち, 式 (3-6) における a_1 と a_0 は, それぞれ 8.99 と -61.5 であると推定された。

3.4.2 鱗の後方散乱断面積の数値計算

鱗の等価半径 a の計測値幅が 1.73-3.12mm であることから, 得られた等価半径を式 (3-8) に代入し各個体についての TS 推定値を求めた。この結果得られた TS 推定値は



(I)



(II)

Fig. 18. Examples of oscillogram in target strength measurement with (I) and without target fish (II). a: Oscillation line, b: upper frame, c: target, d: lower frame, e: lake bottom.

-56.2から-61.3dBで, その変動幅は5.1dBで, 平均値は-58.14dBとなった。得られた TS 推定値 (dB) と体長 L (cm) の関係を Fig.20に示す。数値計算により求めた TS 推定値と体長 (L) の対数値との関係を表す回帰式は 1% 水準で有意となった (式3-10)。この図における実線は TS 推定値の体長に対する標本回帰直線 (式3-10) を示しており, 破線は体長 (cm) の 2 乗で規準化した 1cm 当りの TS すなわち TS_{cm} の理論回帰直線 (式3-12) を示している。

$$TS = 17.4 \log L - 69.6 \quad (3-10) \\ (r=0.452, n=46)$$

Table 3. Volume backscattering strength measured.

Number of Target fish	Density (Ind. /m ³)	SV _n *1 (dB)	SV _o *2 (dB)	SV*3 (dB)
0	—	—	-43.9	—
9	895	-34.3	—	-34.9
18	1789	-31.8	—	-32.1
36	3579	-29.5	—	-29.6
54	5368	-28.3	—	-28.4
72	7158	-26.7	—	-26.8
90	8947	-25.6	—	-25.6

*1, *2 : Volume backscattering strength with and without target fish, respectively.

*3 : $SV = 10 \log (10^{\frac{SV_n}{10}} - 10^{\frac{SV_o}{10}})$

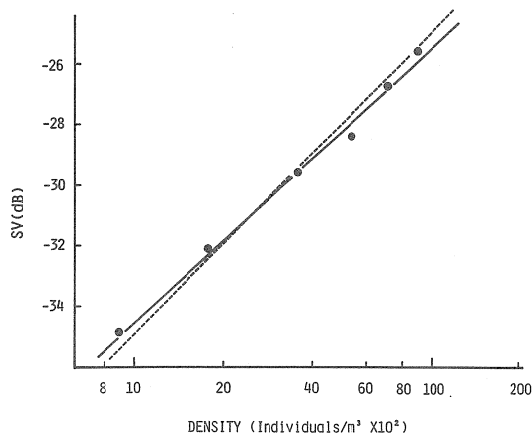


Fig. 19. Regression of volume backscattering strength (SV) on density with the estimated relation (—) and the theoretical one (-----).

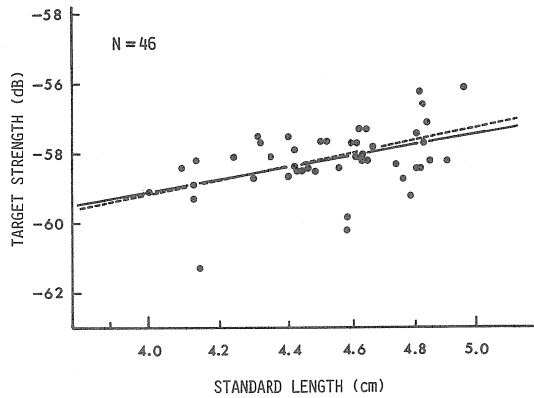


Fig. 20. Standard length-target strength relation, to examine the possibility of extending to the Furusawa's proposal ($TS = 20 \log L + C$; -----) to small fish, with estimated regression line (—).
Note : TS--Target strength ; L--standard length ; C--constant.

3.4.3 既報理論との比較検定

積分方式の基礎となる体積残響理論によると、サンプリング体積中における散乱体（ここでは対象魚）の分布が一樣ランダムであり、しかも多重散乱の影響が無視できる場合、音響強度 SV と魚群密度 ρ との間には

$$SV = 10 \log \rho + TS \tag{3-11}$$

で表される理論式が成立する (Urlick, 1979)。

また、体長と TS との関係については、TS の値が体長 L のほぼ 2 乗に比例することから一般に次式で表される (古澤, 1989; 1990)。

$$TS = 20 \log L + TS_{cm} \tag{3-12}$$

ここで、 TS_{cm} は cm 単位で表わした体長 L における規準化 TS である。

ここで得られた結果について、これらの理論または式が適用できるかどうかを調べるため、懸垂実験により得られた標本 1 次回帰式 (式 3-9) と、数値計算により求められた TS 推定値と体長との標本 1 次回帰式 (式 3-10) を、それぞれの理論回帰式 (式 3-11 と式 3-12) と比較検定を行った (北川・増山, 1976)。この検定結果を Table 4 (a), (b) に示す。この結果、懸垂実験により得られた回帰係数と体積残響理論の回帰係数との差は、5% の水準で有意となり、式 (3-9) の回帰係数は式 (3-11) のそれと等しくないという検定結果になった。しかし、回帰係数と常数項を併せて扱った両式の比較ではこれらの式の差は有意でないと示された。

また、式 (3-10) と式 (3-12) の比較検定では、数値

Table 4. Statistical examination of possibility to apply the Urlick's theory and the Furusawa's proposal.

(a) Urlick's volume backscattering theory

Present result			(Present result)-(Theoretical equation)			
a_0	a_1	F	Equation	Constant	Regression coefficient	Degree of freedom
			F	t	t	df
-61.5	8.99	667.28**	4.265	-0.385	-2.89*	4

Present result : $y = a_1 \log x + a_0$ x : Density of target fish (ind./m³)
 Theoretical equation : $y = 10 \log x - 65.0$ y : Volume backscattering strength (dB)
 ** : Significant at 0.01 level
 * : Significant at 0.05 level

(b) Furusawa's proposal

Present result			(Present result)-(Theoretical equation)			
a_0	a_1	F	Equation	Constant	Regression coefficient	Degree of freedom
			F	t	t	df
-69.6	17.4	11.859**	0.225	-0.525	-0.418	44

Present result : $y = a_1 \log x + a_0$ x : Standard length (cm)
 Theoretical equation : $y = 20 \log x - 71.2$ y : Target strength (dB)

計算により求めた TS 推定値の体長に対する回帰係数17.4と理論式回帰係数20との差は、5%の水準で有意とは認められず、キュウリエソにおけるこの関係は古澤の式(式3-12)とほぼ一致していることがわかった。

3.5 考察と論議

キュウリエソは音響計測の対象としては極めて小型であり、しかも、中・深層に棲むため、生きたままの状態での TS 測定を行うことが非常に困難である。このため、本種のような中深層性魚類マイクロネクトンの TS に関する研究はほとんどなされておらず、わずかに宮野鼻ら(1985)がハダカイワシ(*Diaphus* sp.)の解凍試料を小さなネットケージに入れて測定した報告のみみられるだけである。この方法は実用的ではあるが、対象魚とノイズであるネットケージからのエコーレベルの比(SN比)が十分でなく、この点で問題が残った。そこで、本研究では対象魚以外からのノイズを出来る限り小さくするため、極めて細いナイロンモノフィラメント糸(テグス4号)を用いて対象魚を送受波器直下に吊り下げて行う懸垂法によりキュウリエソの TS を求めた。しかし、このような方法による TS 測定では、凍結もしくはホルマリンによって固定した試料を使わざるを得ない。李ら(1987)および向井ら(1988)はヒメマスを用いそれぞれケージ実験、懸垂法で解凍魚と活魚について TS の比較を行った。いずれも保存魚の TS の方が活魚に比べ小さく、その差は約2.8dB および1.4dB (平均 TS)であることを報告した。しかし、凍結、解凍といった一連の魚体組織の変化のなかで音響散乱特性に及ぼす影響の機構は、まだ十分に明らかにされていない。キュウリエソのような小さな魚の TS 測定に凍結標本を使用すると解凍後、形が崩れて実験に用いることができない。したがって、今回の計測にはホルマリン固定の試料を用いた。このように、固定法や体長の違いなどからこれらの値をそのまま適用することはできない。

また、懸垂法で魚を密集させて測定する場合には、供試個体の並べ方によって、送受波器に返ってくる音響エネルギーが、各個体からの反射エネルギーの和とならない可能性がある。今回の実験で得られた SV 値と密度の回帰直線式の回帰係数は8.99であり理論予測値の10に比べるとわずかに小さい。この理由として、密度の増加につれて回帰係数の傾きが鈍化していることから、本実験のターゲットの配置構造による Shadow effect にともなう音波減衰の影響が大きな原因の一つと考えられた。また、多くの対象物による相互干渉効果など(李ら, 1987)も考えられ、適

正配置、適正密度の問題については今後検討する必要がある。

一方、標本1次回帰式(式3-9)と、体積残響理論による理論回帰式(式3-11)との比較検定では、得られた回帰係数と体積残響理論の回帰係数との差は、5%の水準で有意であるとみなされた。したがって、本研究においてはキュウリエソの平均 TS は理論式の定数-65.0dBではなく、実験式で求められた定数項-61.5dBを用いた。

次に、魚体より摘出した鰾の後方散乱断面積から求めた各個体の TS 推定値と体長との関係について検討する。

この際の TS 推定値は、魚体から摘出した鰾の後方散乱断面積を求めることにより推定された。しかし、ここで摘出された鰾は魚体の体内にある時よりは幾分か大きくなっていることが考えられる。したがって、数値計算により求められる TS 推定値の絶対値そのものの評価については若干問題が残ることとなる。しかし、相対的な TS の値としては、極めて有益な情報と考えられるので、その結果について検討した。鰾の等価半径の体長に対する関係については1%の水準で有意となる1次式(式2-5)が得られた。また、数値計算により求められた TS 推定値と体長との関係は式(3-10)で明らかのように1%の水準で有意となる1次式であり、しかも、回帰係数が体長の2乗で規準化した TS の理論回帰直線にはほぼ一致した。このことからキュウリエソの鰾の大きさは魚体長に比例し、TS と鰾体積にも線型な関係があると考えることができた。このことは対象魚の平均体長が調査海域・時期の違いにより変化する場合にも、体長情報からそれぞれの場合における TS を推定できる可能性を示唆するものと考えることができた。

Greenlaw (1977) は数 cm 程度の反射体も反射指向特性を有しているとしている。したがって、Foote (1980) が報告したように遊泳姿勢によって TS 値を平均化することが望ましい。しかし、実際にキュウリエソのようなマイクロネクトンについて姿勢を制御し、TS 測定するのは非常に困難である。キュウリエソの最も普通の遊泳姿勢は背を上にした水平であると考えられるので、今回は懸垂法でしかも小生物を対象としているためすべて背方向での計測とした。このため遊泳姿勢に対する平均化の考慮は行っていない。この点については今後テレビ・カメラなどを用いた *in situ* 測定を実施するなどの方策を検討する必要がある。

第4章 エコグラムと環境要因による魚種判別

4.1 緒言

日本海における中深層性魚類マイクロネクトンのキュウリエソの資源量計測のための最適周波数帯および、密度推定のためのTSの推定を前章までに行った。

音響計測法を用いた資源量評価において、調査船によって計測線に沿って連続的に得られる情報のなかから、必要な情報だけを抽出する魚種判別法を確立させることは、音響システムによる水産資源量の推定精度を向上させるうえで最も重要な問題の一つである。特に、日本近海のように多数の魚種が混在している海域においてはその重要性は著しい。同一魚種であっても、発育段階(三谷,1987)、昼夜(竹下ら,1987)、季節、分布域などの違いにより、その分布様式が異なるから、魚種判別をますます複雑にしている。この問題は音響資源調査において基本的な問題にもかかわらず、具体的な判別法がまだ確立されていない。

一方、音響調査における魚種判別には、従来、主として魚探機のエコグラムに記録される魚種の映像を経験的知識

や漁獲結果などとの対比から判別する間接的な方法がとられていた。音響調査における魚種判別の精度向上のために、第一に明らかにしなければならない基本的な点は、魚探機から得られる音響情報の実体を、漁獲やサンプリングによる方法と環境情報を併用して、定量的に確認しておくことである。特に、キュウリエソのように直接漁業の対象とならない種を判別する場合は、音響情報の実体の把握が最も基本的なこととなる。

本章ではキュウリエソを対象として、実際の音響調査で必要とされる実用的な魚種判別のための識別基準を明らかにする。そこで、計量魚探機による音響強度の計測、典型的なDSLの映像に対する中層トロールによるサンプリング、並びにCTD・XBTの観測結果を組み合わせた方法により検討する。

4.2 材料及び方法

4.2.1 材料

DSLは日本海において魚探機のエコグラムに時空間的に特徴的な変化をしながら現れる。そこで、1986-1989年の間、水産大学校練習船耕洋丸(総トン数1990.17トン)によ

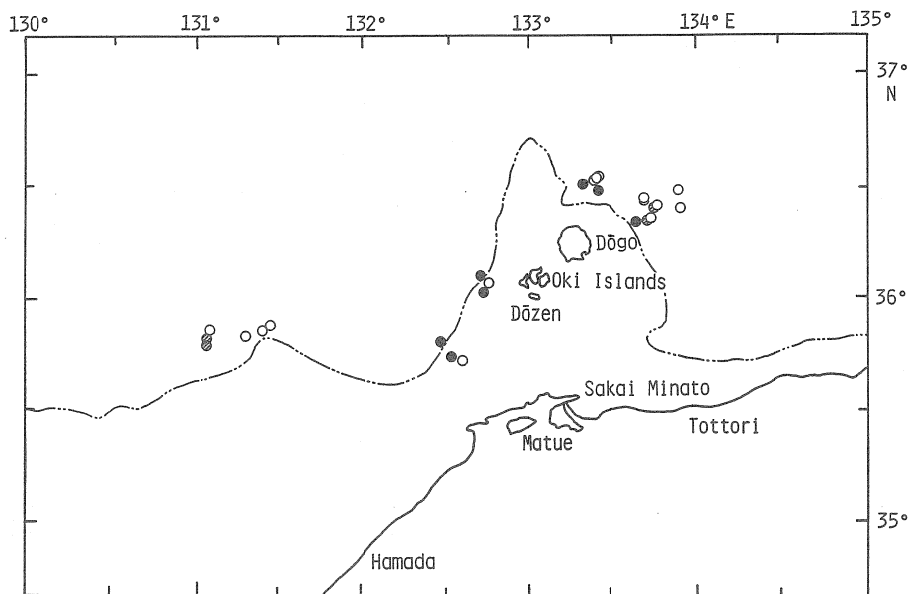


Fig. 21. Locations of midwater trawling.
○: Daytime, ●: night, ◐: twilight.

り、日本海南海域 (Fig.21) の対馬海峡東部から隠岐諸島周辺の200m等深線を中心とした海域で、DSL の観測とDSL の構成種について調べた。

まず、計量魚探機を用いて、DSL の出現パターンと音響強度の時刻にともなう変動を観測するため、メソスケール (10×30マイル) とスモールスケール (10×10マイル) の範囲で調査海域を設定し、昼夜別に同一コースを航走して観測した。また、DSL とその構成種との関係を明かにするため、中層トロールによるDSL 内生物のサンプリング調査を行った。さらに、サンプリングに並行してXBT (鶴見精機製)・CTD (Neil Brown 製) 観測、もしくは各層採水を実施し、DSL と水温との関係を調べた。これら調査実施状況を Table 5 に示す。1989年11月の調査は水産大学校練習船天鷹丸 (総トン数603トン) により行った。

4.2.2 計量魚探機によるDSL の観測

メソスケールの観測は1988年7月31日から8月1日の間、スモールスケールの観測は1989年8月2日から8月3日の間、隠岐諸島北東海域において実施した。調査海域および定線計測ラインを Fig.22 に示す。ここで、実線はメソスケール、破線はスモールスケールの計測ラインを示す。使用した音響システムは、88kHz (出力1kW) の曳航式計量魚

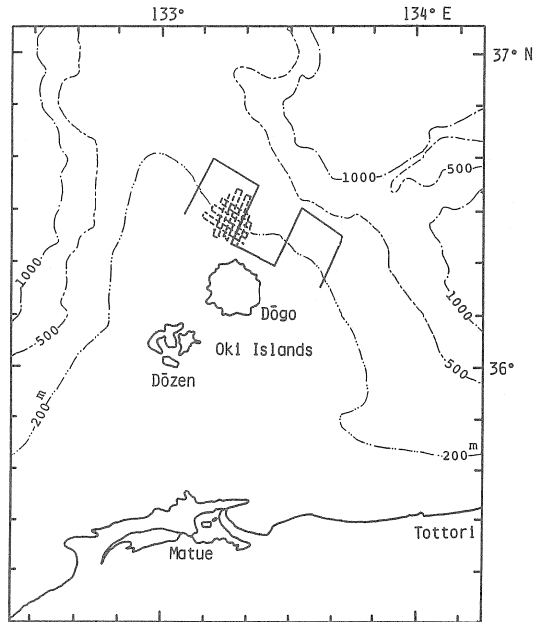


Fig. 22. The transect lines for DSL observation.
— : In meso scale survey.
- - - : In small scale survey.

Table 5. The outline of surveys.

Date	Major subject	Area
July 29-31. 1986	Mid-water Trawl, XBT, Nansen cast	North-East to West of Oki Islands
July 26-29. 1987	Mid-water Trawl, CTD, XBT	West of Oki Islands
July 31-Aug. 1. 1988	DSL observation	North of Oki Islands
Aug. 2-Aug. 3. 1988	Mid-water Trawl, CTD, XBT	North of Oki Islands
Aug. 2-Aug. 3. 1989	DSL observation	North of Oki Islands
Aug. 3. 1989	Mid-water Trawl, XBT, Nansen cast	North-East of Oki Islands
Nov. 18. 1989	Mid-water Trawl, CTD, XBT	North-East of Oki Islands

探機 (古野電気製 FQ-60) で、魚探機システムの較正は Johannesson and Mitson (1985) の方式により水中標準マイクロフォンを用いて行った。魚探機システムの較正と積分設定値を Table 6 に示す。

DSL の音響強度の測定には、体積散乱強度 (SV) の鉛直プロファイルとしてエコグラム上に縦方向の曲線として記録される積分曲線 (Vertical distribution curve) を用いた

(Fig.23)。この積分曲線により任意に設定した周期ごとにSVのアナログ量を求めることができる。DSL の音響強度を求めるにあたっては、積分曲線の積分周期を1分に定めて、DSL 内のSVのピーク値10個ずつを平均して求めた。なお、記録紙上におけるSVの分解能は0.5dBである。

Table 6. Control setting of quantitative echo sounder and integrator (Furuno FQ-60, FQ-510) during acoustic surveys in 1988 and 1989.

	1988	1989
Frequency	88 kHz	88 kHz
Pulse duration	1.8 ms	1.8 ms
Equivalent beam width	0.019	0.019
Absorption coefficient	25.4 dB/km	25.4 dB/km
Gain constant	83.9	82.8
TVG	20 log R	20 log R
Threshold	0 dB	0 dB
Sound velocity	1500m/s	

4.2.3 中層トロールによる魚種確認

Fig.21に示す地点で中層トロールを用いて魚探機のエコーグラムに現れるDSLの構成種を確かめた。ここで、DSLの日周期鉛直移動に関し、日出・没前後におけるサンプリングを昼間・夜間のサンプリングと区別する必要がある。そのため各調査日の日出・没の前後それぞれ約30分間を生物薄明時間（以下、薄明時間という）とした。白丸は昼間、黒丸は夜間、斜線は薄明時間に行ったサンプリングの位置を示す。出現層と出現パターンの異なるDSLについて昼間16回、夜間7回、薄明時間4回の合計27回、それぞれ約30分間の曳網を行った。採捕された生物標本はただちに船上

でソーティングしたのち、種ごとに湿重量を測定した。

1986年から1989年の夏季にサンプリングに使用した中層トロール（内張網を含む）の網構造はFig.24に示すとおりである。なお、中層トロールのコッドエンドにはマイクロネクトンの採捕を考え、目合20mmの内張網を装着した。また、1989年11月に用いた中層トロールは袖網の長さ10.3m、目合800mm、胴網の長さ42.22m、目合は600、400、200、135、90、75および72mm、コッドエンドの長さ8.6m、目合60mmで、コッドエンドに装着する内張網の目合は13mmとした。

中層トロールの網口がDSLを通過するように、網口の深度をネットレコーダー（古野電気製FNR-400Ⅱ, 200kHz）で、モニターしながら船速とワーブ長を調整して曳網した。

中層トロール中におけるDSLの音響強度の計測は、FQ-60およびインテグレーター（FQ-510）を用いて積分周期を0.1マイルに設定して求めた。なお、1989年の天鷹丸による調査では周波数88kHz（出力2kW）の船底装備型の計量魚探機（古野電気製FQ-50）を用いた。また、1988年度における中層トロール中は計量魚探機不良のため音響データが得られなかった。

4.2.4 水温の測定

1986年の調査ではXBTと各層採水、1987年の調査では、CTDとXBT、1988年はCTDおよびXBT、1989年ではXBTによる観測を行った。また、DSLに対する中層トロールに際しては、XBTによる測定を実施した。

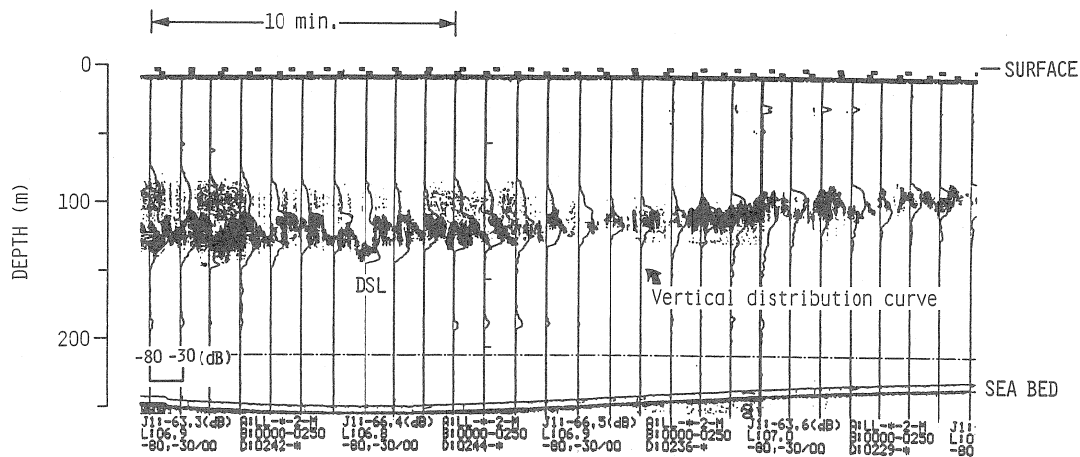


Fig. 23. An example of echogram in DSL observation. Vertical curves, so-called vertical distribution ones, indicate vertical profiles of volume backscattering strength (SV) at 1 minute intervals.

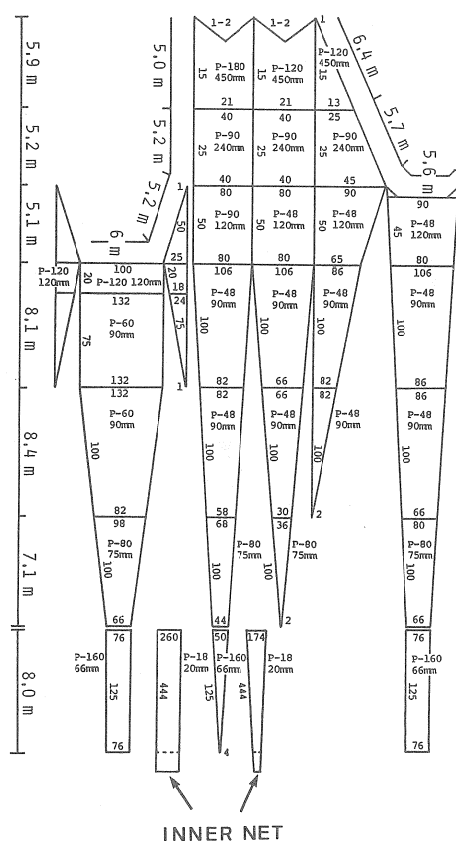


Fig. 24. Net plan of midwater trawl and inner net attached.

4.3 結果

4.3.1 DSLの時空間的変動と音響強度

DSLの分布が時空間的にどのように変動しているかを明らかにするため、エコグラム上に記録される積分曲線からDSLの音響強度を求め、得られたSVを5段階に分け、模式図に示した (Fig. 25, Fig. 26)。

Fig. 25に示すように、1988年夏季におけるメソスケールの観測では、2層のDSLが現れ、昼間上層のDSLは140m付近、下層のDSLは200-225m付近にほぼ一定の深度を保ちながら連続的に記録された。上層のDSLは日没前の16時頃から浮上をはじめる傾向を示したが、観測位置がDSLからずれたため、上昇過程は記録できなかった。しかし、日没後にDSLは20-75mと120mの2層で記録された。また、

薄明時の4時頃から2層とも降下を始め、再び昼間の深度(上層140m, 下層200m付近)に移動して定着することが認められた。

1989年夏季に行ったメソスケールのDSLの観測 (Fig. 26)の結果においては、メソスケールの観測と異なり1層のDSLしか現れなかった。日周期鉛直移動については、昼間150-200m層に一定の深度を保ちながら連続的に現れていた層が16時頃から浮上しはじめ、夜間には25mまで上昇した後、見られなくなった。しかし、少し遅れて、125-150m付近に断続的な層がみられ、薄明時の4時頃から再び深層に下降する現象が記録された。

このように日本海南西部海域における200m等深線を中心としたDSLは、顕著な日周期鉛直移動を行うことが明らかにされた。

4.3.2 中層トロールによる魚種確認

これらのDSLの構成種を明らかにするため、DSLを対象として中層トロールを曳網した。その結果をTable 7に示す。この表では採捕重量は、結果を規準化するため、30分間の曳網で得られた採捕重量に変換して表した。

合計27回実施したサンプリングの結果、キュウリエソが採捕されたのは16回で、そのうち昼間には16曳網中10回、夜間には7曳網中3回、薄明時には4曳網中3回であった。そこで、時空間的に変化するDSLの動きと各曳網時の深度がどのように対応しているかを知るため、時刻にともなう曳網層と単位時間当りの採捕重量の変化をFig. 27に示した。なお、調査航海ごとの航海番号は省略した。この図からキュウリエソが採捕された曳網層はDSLの動きとほぼ一致していることがわかる。エコグラムに記録された映像からは夜間に表層近くまで浮上したキュウリエソのその後の移動を確認できなかったが、曳網調査の結果、薄暮時に上昇したキュウリエソ群は日没後分散し、夜間は100-120m付近に滞留していることがわかった。このことは、川口 (1971a; 1971b) が行った魚探機によるキュウリエソの観測結果とほぼ一致した。また、キュウリエソが密集している時間帯は単位時間当りのキュウリエソの採捕重量から、日没前後の薄明時間であると考えられる。

代表的なエコグラムの一例をFig. 28に示す。この図は下層のDSLを対象に曳網を試みたときのエコグラムである。破線はトロールの網口の通過層を示し、下図は同時に計測したネットレコーダーの記録で、キュウリエソが網口を通過している状況を示している。エコグラムに記録された映像は1989年8月3日18:45から19:12 (日没は19:11)に観

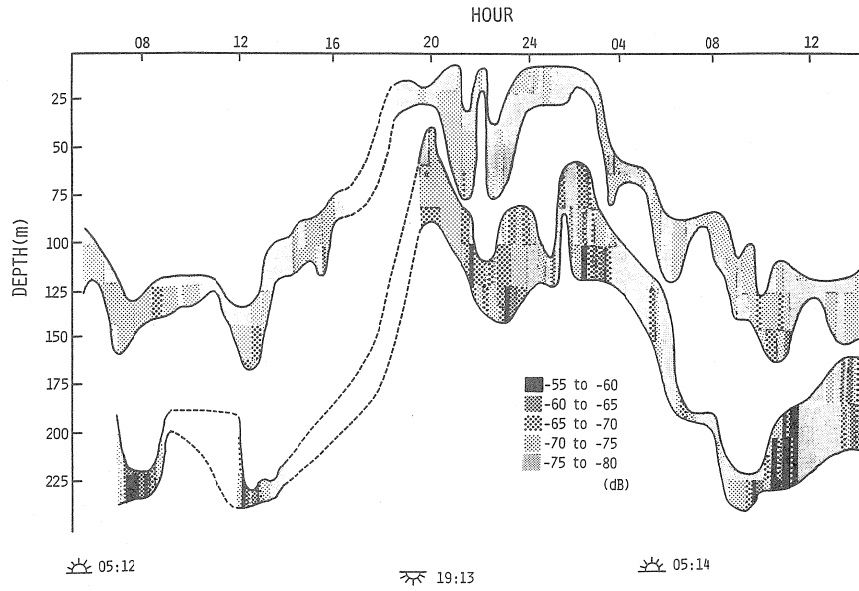


Fig. 25. Time depending vertical variation of acoustical scattering layer observed in the meso scale survey (July 31–Aug.1, 1989).

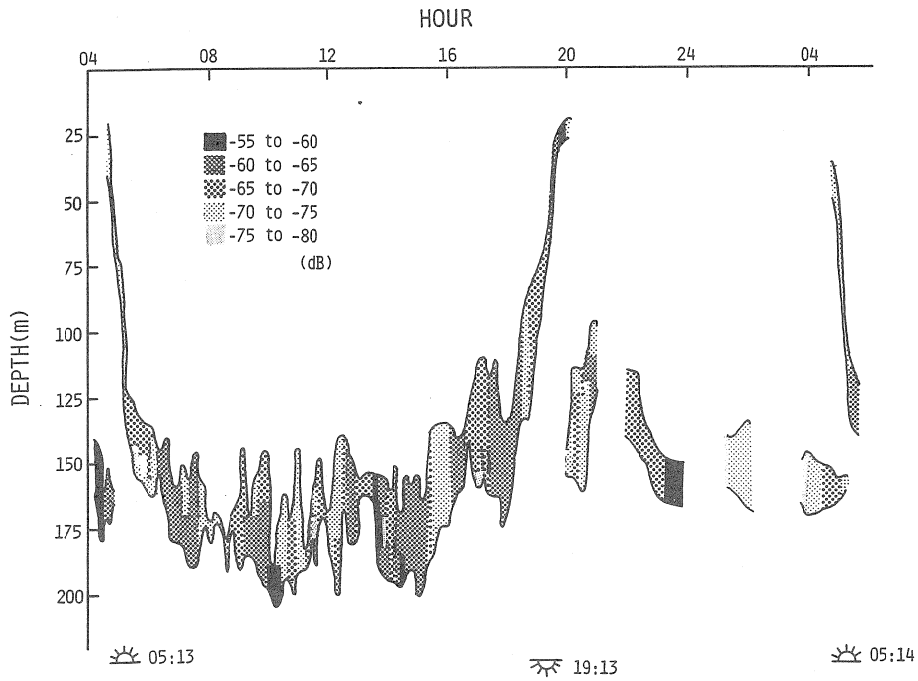


Fig. 26. Time depending vertical variation of acoustical scattering layer observed in small scale survey (Aug.2–Aug.3, 1988).

Table 7. Catch by respective tows of midwater trawl.

No.	Sampling			Catch (kg/0.5 hours)					
	Date	Hour	Depth range (m)	<i>Maurolicus muelleri</i>	<i>Thammanonus modestus</i> (GÜNTHER)	<i>Enoplotenthis chunii</i> ISHIKAWA	<i>Arctoscopus japonicus</i> (STEIND-ACHNER)	<i>Todarodes pacificus</i> STEENSTRUP	Other species
1	July 29, '86	20:12-20:32	55-64	11.25	7.35	0.3			
2	29	21:30-22:02	30-60		204.2	3.15			
3	30	13:15-13:45	125-150						*1
4	30	14:20-14:55	150-206	2.14		0.15			
5	30	19:12-19:45	27-65	60.3					
6	30	20:15-20:53	50-60	0.81	2.2				
7	31	08:47-09:55	179-189	31.8					
8	July 26, '87	16:47-17:16	140-150	0.73					
9	26	19:53-20:23	110-130		75		5	*2	
10	26	21:17-21:44	40-50			0.2			
11	27	10:15-10:45	167-177	0.25					
12	27	13:28-13:51	70-85						
13	27	14:36-15:00	90-100						*3
14	28	04:10-04:40	40-50		17.5	1.1			
15	28	05:29-06:00	130-145	0.73	1.65	0.48			
16	28	08:51-09:51	170-195	0.25					
17	29	08:52-09:30	147-157	3.79					
18	Aug. 2, '88	09:45-10:15	209-219	5.8	0.3	0.4			
19	2	11:39-12:10	134-146						
20	2	13:09-13:40	137-148						
21	3	22:03-22:35	97-112	8.34	49.22				
22	3	23:25-23:55	45-52		18.1				
23	Aug. 3, '89	09:59-10:42	198-208	0.84					
24	3	13:02-13:42	208-223	8.55					
25	3	18:45-19:05	113-123	40.2					
26	Nov. 18	07:49-08:24	115-140						*4
27	18	09:11-10:09	211-221	2.28					

Note: *1 Two *Trachurus japonicus* and a siphonophor.
 *2 Two individuals.
 *3 15.27 kg of siphonophor per 0.5 hours towing.
 *4 An individual of *Etrumeus teres*.

測された2層のDSL映像で、80-90mに薄い層、120-150mに濃い層が記録された。この曳網ではキュウリエソ40.2kg以外は採捕されなかった。次に、Fig.29の(1)は、1986年7月30日の日没前後(日没は19:14)にかけて上昇中のDSLを対象に19:12から19:45の33分間、曳網した結果を示している。曳網の結果、キュウリエソが66.2kg採捕され、他種の混獲はみられなかった。さらに(2)では、1987年7月28日8時頃から観測された2層のDSL(上層125-150m、下層180-200m)のうち、下層(175-195m)を曳網した。この結果は0.5kgのキュウリエソが採捕された。しかし、上層のDSLは曳網できなかった。この上層のDSL

とはほぼ同様の音響強度、深度層のDSLを1989年11月18日に観測した。この曳網(No.26)の結果は、ウルメイワシ(*Etrumeus teres*)1尾のみが採捕され、キュウリエソはみられなかった。

(3)は、1987年7月26日19時頃から観測されたDSLを対象として19:53から20:23の30分間、曳網した結果を示している。ウマヅラハギ(*Thammanonus modestus*)75kg、ハタハタ(*Arctoscopus japonicus*)5kg、オキアミ(*Euphausia pacifica*)、スルメイカ(*Todarodes pacificus*)が数個体採集されただけで、キュウリエソは採捕されなかった。

以上、代表的な曳網の例を示した。これら魚探機のエコ

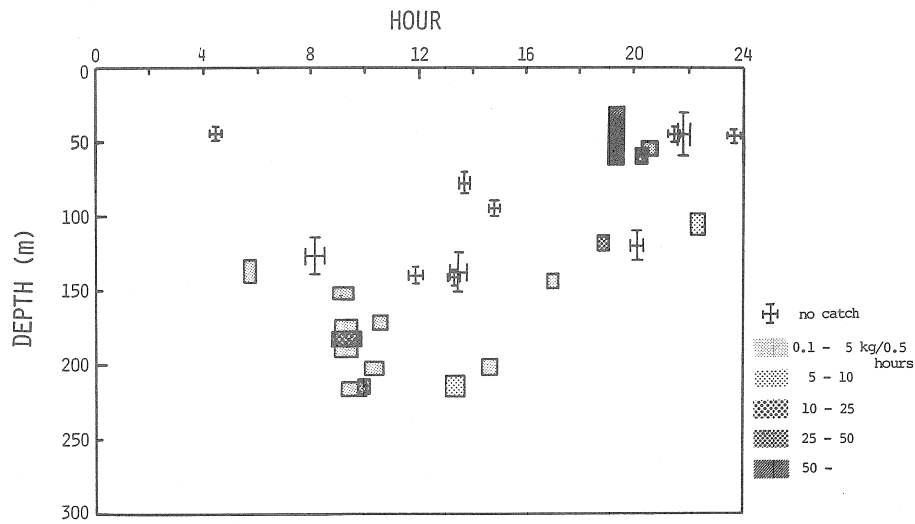


Fig. 27. Catch per half hour of target species by midwater trawl for DSLs detected at various layers in various hours.

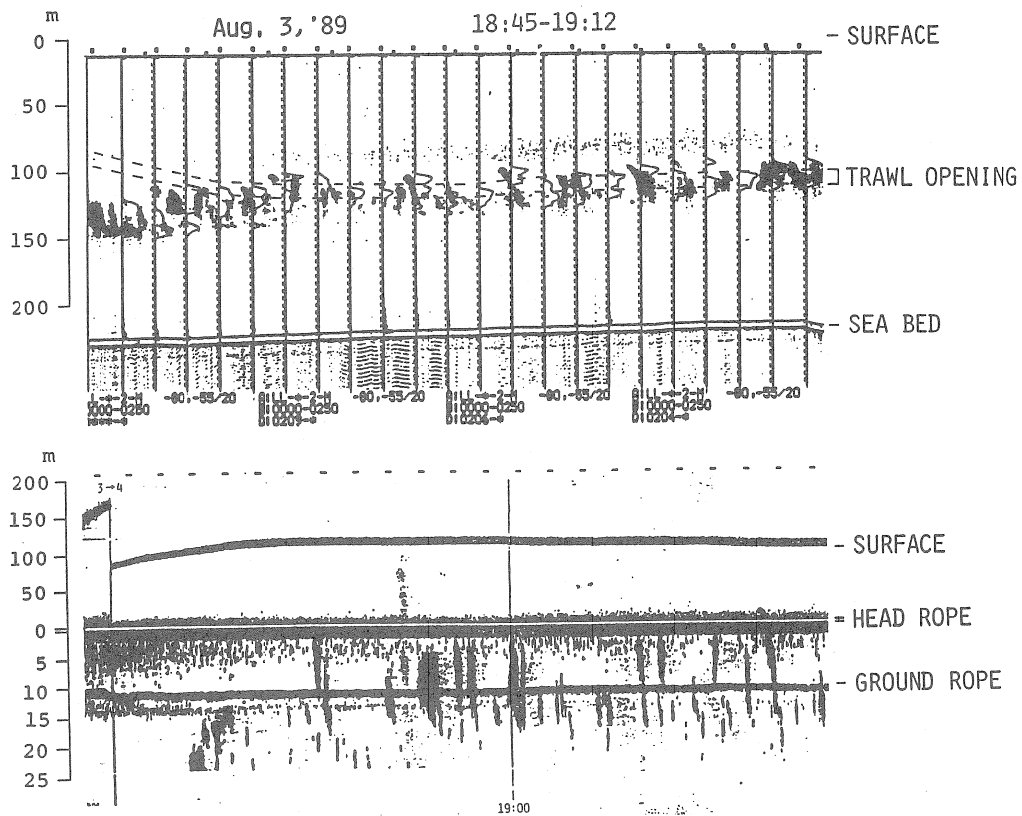


Fig. 28. Echogram of quantitative echo sounder with track of trawl and record of net-telemetry.

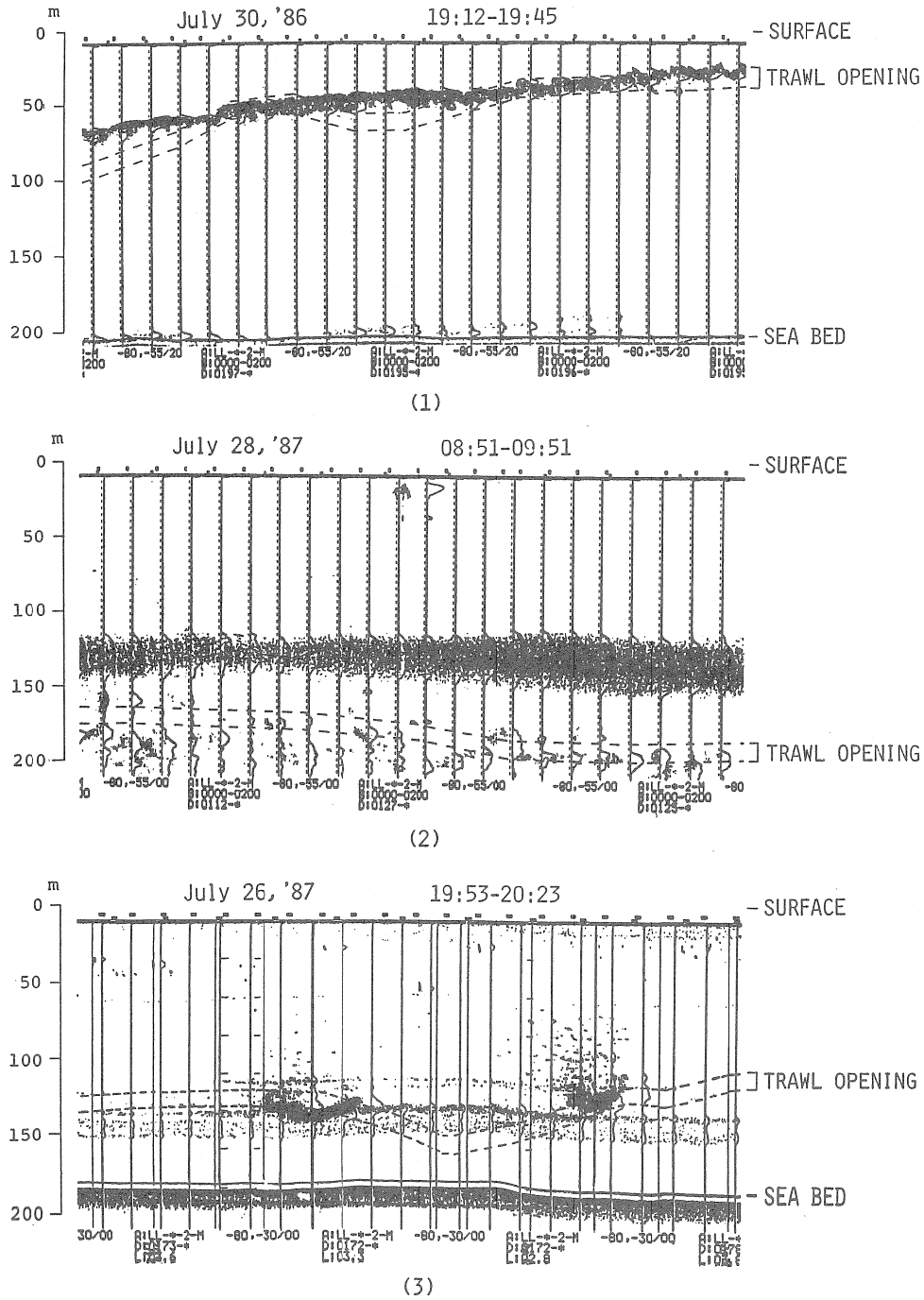


Fig. 29. Examples of track of midwater trawl in relation to DSLs, with vertical distribution curves of SV.

グラムで得られた映像からキュウリエソが採捕されたときのDSL映像を定性的に表すと、ほぼ次の3つの特徴が認められた。

1. 小塊群が連続的に現れる。
2. 16:00頃より濃密群が連続的に形成され、日没時に上昇する。
3. DSLが2層現れる場合は、第2層の構成種として現れる。

4.3.3 魚種判別のための識別基準

前項までに得られた結果と、さらに調査期間中に得られた水温および積分曲線の結果に基づき、魚種判別のための定量的識別基準について検討した。

キュウリエソの生息深度と水温との関係を明らかにするため、中層トロールによる曳網層のCTD・XBT観測の結果を用い、キュウリエソが採捕された場合とされなかった場合の関係を昼間(a)、薄明時(b)、夜間(c)に分けてFig.30に表示した。この図からキュウリエソは深度、水温とも極めて広い範囲に分布していることがわかる。しかし、時刻によって分けると分布範囲は限られる。すなわち、昼間(a)に深度70mから230m(水温14.0℃-1.1℃)の範囲で16回曳網したが、キュウリエソが採捕されたのは150m以深で水温6.5℃以下の場合に限られていた。薄明時(b)にはDSLの鉛直移動が激しいが、時間が短いので深度40mか

ら150m(水温はそれぞれ21.5℃から7.2℃)にわたって4回しか曳網できなかった。この4曳網の中でキュウリエソが採捕されなかったのは1回だけであったので、採捕の有無と深度・水温との関係については論議できない。夜間(c)には30mから130m(水温26℃-12.5℃)の範囲で7回曳網し、キュウリエソが採捕されたのは3回であった。しかし、採捕された曳網と、採捕されなかった曳網がいずれの深度・水温でもみられた。したがって、夜間の深度、水温情報からキュウリエソの分布を識別することは困難である。

以上の結果からキュウリエソは、広範囲の日周期鉛直移動を行っているが、昼間における分布は150m以深に限られており、キュウリエソの識別はこの深度帯でみられる映像について検討すればよいことがわかる。また、もし夏から秋における水温情報が得られれば水温7℃以下において得られた映像を対象とすれば推定精度はさらに向上する。したがって、キュウリエソの魚種判別と資源量計測をするためには成群性も考慮して昼間計測が最適であると考えられる。

資源量の推定精度を上げるために追加できる情報として、音響調査中、魚探機のエコグラム上に記録されるSVの鉛直プロファイルとしての積分曲線がある。そこで、曳網ごとに網口が通過した深度層における0.1マイルごとの音響強度の分布について調べた。なお、天鷹丸で行った11月の曳

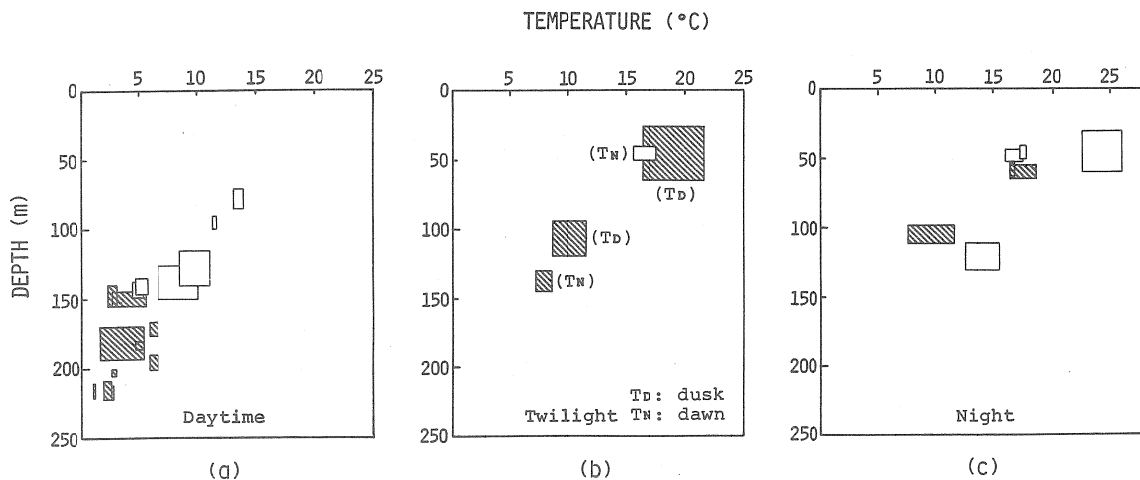


Fig. 30. Catch in daytime (a)—, twilight (b)—and night (c)—trawling in respect of depth and temperature.
□: Catch, ▨: no catch.

網については季節が異なることや魚探機と中層トロール内張網の目合が異なるので、この検討からは除外した。

合計20回の曳網実験で得た音響強度の分布を、キュウリエソのみが採捕された場合 [A]、他種の混獲があった場合 [B]、およびキュウリエソが全く採捕されなかった場合 [C] に分けて Fig. 31 に示す。この図において、0.1マイルごとに得られた積分曲線の曳網深度層におけるピークがほぼ同じ値で連続している場合、すなわち、映像に連続性がある場合を●印、それ以外のものを×印として表した。また、曳網時刻については、昼間 (D) 薄明時 (日出 T_N, 日没 T_D)、夜間 (N) と表した。キュウリエソが採捕された場合は曳網番号と採捕重量 (kg/0.5 hours) を併記した。この図から次のことがわかる。

(1) キュウリエソが採捕されなかった場合：映像に連続性があるのは7例中4例 (No.2, 3, 9, 14) あり、これらの

音響強度は-67dB以下であった。したがって、映像に連続性があっても-67dB以下の反応は用いた中層トロール網では採捕できない小型の散乱体 (網に付着した生物からアミの可能性もある) によると考えられる。一方、No.9では一部に連続性がない映像がみられた。この部分の音響強度は-67dB以上であり、ウマヅラハギが多数漁獲された。したがって、音響強度が強くても映像に連続性がない場合はキュウリエソ以外による反応と考え、識別対象から除去する必要がある。

(2) キュウリエソだけが採捕された場合：(i) 日没直前の2例を含めるとすべて昼間の曳網である。(ii) -67.5dB以上の映像が連続的であった。また、(iii) -67dB以下の音響データは、映像が途切れた場合のものである。したがって、キュウリエソの識別は、映像に連続性があり、かつ-67dB以上のDSL映像を対象とすればよい。

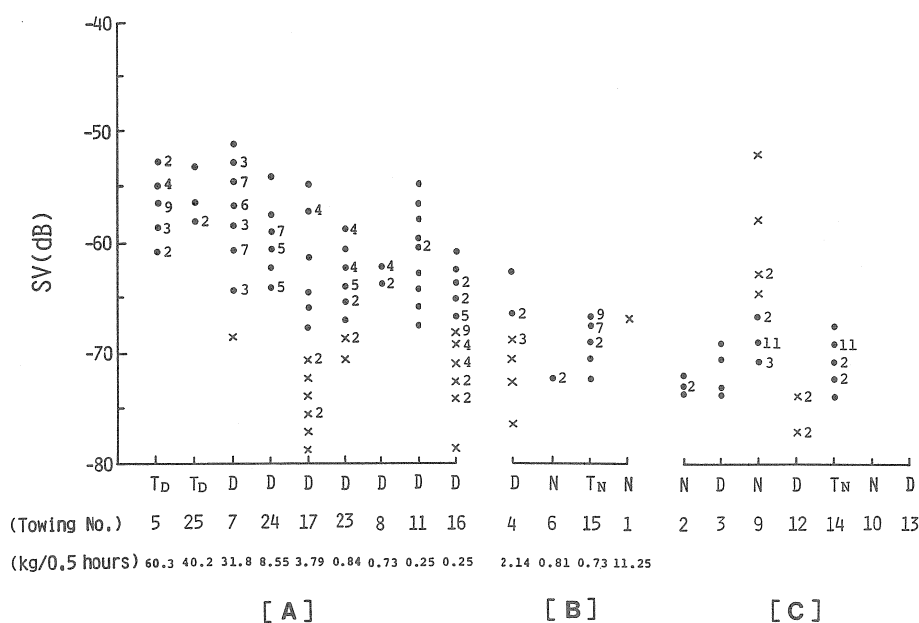


Fig. 31. Different continuity and peak values of SV between the tows with and without catch of target species (SV taken at 0.1 mile intervals). For the tows No.10 and 13, all the echoes are lower than -80 dB in SV. For the towing No.1, only a part of echoes was recorded. D: Daytime tows, T_D: twilight (dusk) ones, T_N: twilight (dawn) ones, N: night ones. ●: Continuously recorded echoes, ×: isolated ones (Subscripts show data frequency. Here, subscript is omitted in case of single value.) [A]: Catch exclusively of target species, [B]: target species and other ones, [C]: target species not caught (whether other species was caught or not was not dealt).

(3) 他種が混獲されている場合：曳網回数は少ないがNo.4の昼間を除くと、3例 (No.1, 6, 15) が夜間および、日出前における曳網である。ここで、日本海においてキュウリエソを対象とした音響調査を行う場合、同じマイクロネクトンであるホタルイカモドキ (*Enoploteuthis chunii* Ishikawa) を分離することを考えなければならない。昼間のNo.4でキュウリエソとホタルイカモドキが混獲されているが、この際の曳網は不安定で曳網層が上下した。したがって、目的の層より上層を曳網した部分でホタルイカモドキが混獲された可能性が高い。このNo.4以外では昼間ホタルイカモドキはキュウリエソと混獲されていない。このことから昼間においてはこれらの種は同一の層には生息していないと考えられる。以上のことから他種との分離識別が困難な夜間および日出前の調査は避ける必要がある。

資源量計測を目的とした音響調査では、計測線に沿って連続的に得られる情報のなかから、対象とする種以外の不必要な情報を取り除かなければならない。そこでこれまで得られたエコグラムに記録された映像、生息水深と水温との関係および音響強度に関する知見をキュウリエソの魚種判別のための識別基準としてまとめると次のとおりとなる。

1. キュウリエソとそれ以外の種の分離識別が非常に困難な夜間および、日出前は計測の時期としては避ける。
2. 小塊群が連続して分布する昼間が最適な計測の時期である。
3. 昼間、2層のDSLがある場合はその下層を計測対象とすればよい。
4. 昼間に深度150m以深、水温7℃以下でみられるDSL映像を対象とすればよい。
5. -67dB以上のDSLを対象とし、かつ積分曲線のピーク値がほぼ同じ値で連続している映像がキュウリエソによるものである。

4.4 考察と論議

音響調査、中層トロール、およびCTD・XBTによる水温観測結果を組み合わせた計測手法を用いて、日本海の大陸棚の200m等深線を中心とした海域に、集中的に、しかも濃密に分布していると考えられているキュウリエソの魚種判別のための識別基準を検討した。

日本海の唯一の魚類マイクロネクトンであるキュウリエソは、イカ類マイクロネクトンとともに日本海におけるDSLの主な構成種として、その生物量は莫大なものと推定されている (西村, 1959; 沖山, 1971; 1978)。一方、超音

波散乱層として魚探機のエコグラムに現れるDSLは、その構成体として、動物プランクトン、マイクロネクトン、魚類稚仔などの生物 (Moore, 1950; Urick, 1979; Baird *et al.*, 1974; 柴田, 1963; 鈴木・伊藤, 1967; 内田ら, 1986)、また、水温躍層などの海水の密度差 (稲垣, 1987)、懸濁物、漂砂、気泡等の非生物など、さまざまな要因によって構成されており、その実態については十分に明らかにされていない。

本研究では、日本海大陸棚周辺において魚探機のエコグラムに現れるDSLの中から、資源量評価の対象とするキュウリエソのみを抽出することを目的として、中層トロールを曳網してDSLの調査を行った。

ここで、Hersey and Backus (1960) はトロールを用いて海洋生物の垂直分布と音響散乱の垂直分布との関連を検証する際に生ずる問題として、次の3つの点を指摘している。まず第一に、用いた採集器具が対象とする生物に対して適切であるか。キュウリエソのような中深層性魚類マイクロネクトンは、遊泳力は弱いのが、プランクトンと異なり逃避能力がある。したがって、4cm程度のマイクロネクトンの採集には、プランクトンネットやIKMT (Isaacs and Kidd, 1953) といった採集器具では十分でない (Gjøsæter・川口, 1981)。本研究で用いた中層トロールはマイクロネクトンの網からの逃避は無視できるほど小さい。すなわち、通常1.5m/sのスピードで曳網することや、網口が十分に大きいからである。したがって、魚類マイクロネクトンの採集に際しては、十分な能力をもっていると考えられる。しかし、内張網の目合がプランクトン採集用の目合より大きいためプランクトンの採集ができず問題が残った。したがって、すべてのDSL構成種を採捕することを考える場合には、各種の採集器具を組み合わせた使用方法を検討する必要がある。

第二に、目的のDSLを曳網中に他の海洋生物が入網する問題である。本研究に用いた中層トロールは目合が13mmまたは20mmであることから体長13mm以上の生物が混獲採集されることはあるが、それ以下の場合には考慮する必要がない。したがって、採集時間内に数多く採捕された生物種とその映像の連続性と音響強度を考えれば、十分判別がつくものと考えられる。

第三に、一回の曳網で多種多様の海洋生物が採集されることにより、観測された音響散乱層と採捕された生物が真に一致しているかという問題である。本研究において中層トロールにより採捕された生物のほとんどはキュウリエソもしくはウマヅラハギおよびホタルイカモドキである。こ

これらの種との識別において、ウマヅラハギの映像は不連続であること、ホタルイカモドキは昼間の生息層がキュウリエソと異なっていることから、昼間に計測を行えば容易に識別できると考えられる。このように、混獲された種との識別についてはエコグラムにおける映像の連続性、計測時刻および生息層を考慮することによりキュウリエソの識別が可能と考えられる。ただし、季節的にマイワシなどの浮魚類が混獲される場合も考えられることから、産卵回遊を行う種に対する生態的知見も検討しておく必要がある。

もう一つの問題として、網口が表層から曳網層まで移動する間の混獲があげられる。しかし、目的の層に対する曳網時間に比べて、この通過時間は短いと考えてよい。したがって、この間に他の生物が採捕されたとしても全体の採捕量に占める割合は少ないと考えられる。このことから表層から曳網層までの移動は、曳網層と採捕された種とを判別するのに影響を及ぼさないと考えてよい。

本研究における曳網調査のほとんどが夏期において行われており、11月にわずかに2回実施した。したがって、季節的差異についての検討が必要となる。

以上、マイクロネクトンの現存量評価のための魚種判別の基準を日本海産キュウリエソについて検討した。この結果、音響調査、中層トロール、および水温観測を組み合わせることにより魚種判別のための確度の高い基準を設けることができた。しかし、ここで得られた魚種判別のルールのほか、蓄積された定性的情報、経験的知識も魚種判別に活用できるはずである。このような経験的知識や、従来断片的であった定性的、定量的情報をコンピュータにデータベースとして組み込み利用する、人工知能を応用した(青木ら, 1989; 青木・三谷, 1991)魚種判別のためのエキスパートシステムの構築は、魚種判別の新しい判別方法として今後検討しなければならない課題である。

第5章 船体動揺とエコーレベルの変動および調査条件の変化と体積散乱強度 (SV 値) 補正式

5.1 緒言

音響調査を行う場合の最良の調査条件は、風波や船体動揺などが全くない場合である。しかし、実際に音響資源調査は、さまざまな条件下で行わなければならない。調査条件の変化が、計測結果に誤差をもたらす要因の一つに、船の動揺、船速、針路、および海況の変化にともなうエコー

レベルの減衰があげられる。風波により海面近くに生ずる気泡による減衰 (Dalen and Løvik, 1981)、船の航走により送受波器の下を通る気泡によって起こる航走減衰 (西村, 1969)、また船体のローリング (以下、ロールという) の影響 (Stanton, 1982) やピッチング (以下、ピッチという) の影響 (柴田ら, 1970) についての報告は既にみられる。しかし、このような船体動揺や調査条件の変化が体積散乱強度 (SV 値) に及ぼす影響機構については、まだ十分に明らかにされていない。このような要因による減衰を回避するために、曳航式送受波器を用いる場合もあるが、曳航式は曳航速度に限界があることや、浅海域での調査には使用できないなど、調査範囲に制限を受ける。このため音響調査の主体は船底装備の魚探機によることとなる。したがって、船底装備型魚探機による資源量調査において、体積散乱強度 (SV 値) の減衰を出来る限り少なくする方法 (最適計測法) を確立することは、音響的調査手法による資源量評価の精度を向上させるうえで極めて重要であると考えられる。

一方、調査日程が定まっている場合、音響調査におけるさまざまな調査条件のなかで、選択できるのは、船速と針路の2つだけである。この船速と針路の選び方によって、SV 値が大きく変動する。しかし、船速と針路は船体動揺と密接な関係があり、これら調査条件の変化が、船体動揺を通してエコーレベルに影響を及ぼすと考えられる。

船体動揺とエコーレベル変動との関係について、Shibata (1987) は風波を横または後方から受けて航走すればエコーレベルの変動を少なくできると報告した。しかしこの報告では船体の動揺を表す6自由度運動のうちでピッチ、ロール以外を含めていない。

そこで、本章では、まず第一に、船体動揺のエコーレベルに及ぼす影響をさらによくわしく調べるため、ピッチ、ロール、ビーム主軸の鉛直方向に対する角度 (入射角) の他に、X、Y、Z 軸加速度を変数として追加した。そして、海底に対する各パルスのエコーレベルを出力とする多入力システムとして検討を行い、エコーレベルの変動の機構について検討した。さらに、針路、船速、風速などの調査条件の変化がSV 値に及ぼす影響について重回帰分析を用いて定量的に補正する方法を検討した。これは、減衰の少ない最適な航走条件および計測されたSV 値の補正値を導き出す実用的な補正法を検討するためである。

5.2 材料

5.2.1 調査海域

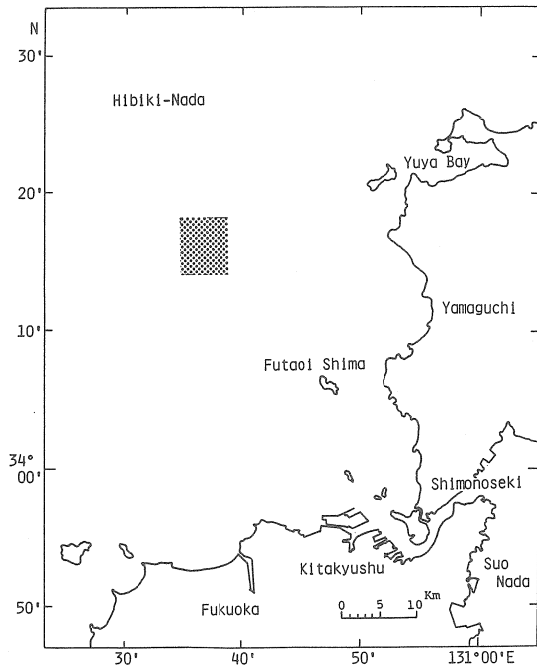


Fig. 32. Map of Hibiki-Nada showing the location of acoustic experiment area (■).

1986年11月11日, Fig.32に示す山口県響灘の平坦で, 底質が均一と考えられる海底(水深96-102m)を基準標として計測を行った。底質は山口県(1980)の調査によれば細砂であり, 海図によれば細砂ないし砂であった。計測中の天候は曇, 風向・風浪とも北北東, 風速は5.0-7.3 m/s(海況3), 波高1.0m, うねり北東1.5mであった。

5.2.2 調査船と送受波器装備位置

用いた調査船はスタートロール型漁業練習船の天鷹丸(総トン数603トン)である。送受波器の装備位置および計測時の船体動揺計測装置の設置位置ならびに天鷹丸の要目は, Fig.33とTable 8のとおりである。送受波器は, Fig.33に示すとおり船首から垂線間長の40%の船首尾線上に, 送受波器面がFalse keelの下面に一致するように装備されている。送受波器を取付けるドームの突出量は30cmで, 形状は流線形である。

5.2.3 魚探機の設定

使用した計量魚探機は, 200kHzと88kHz(古野電気製FQ-50型)であり, 計測においては, 両周波を同時に作動させた。計測中の魚探機の設定はTable 9のとおりである。海底に対するエコーレベルが飽和しないように両周波とも

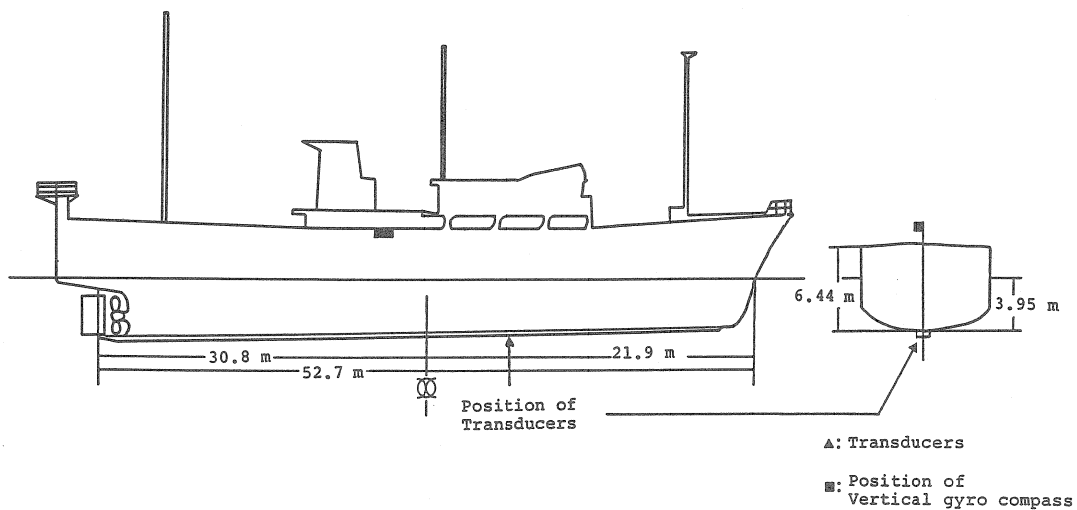


Fig. 33. Schematic diagram of the fisheries training ship "Tenyo-maru", showing position of transducers and vertical gyrocompass.

送信出力およびアッテネータを調整した。音速はCTD観測から得られたデータをもとに求めた。

Table 8. Principal dimension of "Tenyo-maru" in the acoustic survey.

Length (Registered)	52.7 (m)
Breadth (Registered)	10.4 (m)
Depth (Registered)	6.44 (m)
Fore draft	2.58 (m)
After draft	5.14 (m)
Trim	2.56 (m)
Gross tonnage	603 (ton)
Displacement	1145.05 (ton)

Table 9. Operating condition of the echo sounder Furuno FQ-50.

Frequency	88 kHz	200 kHz
Pulse duration	1.2 ms	1.2 ms
Equivalent beam width	0.019	0.007
Absorption coefficient	25.4 dB/km	50.4 dB/km
Gain constant	58.4 dB	66.6 dB
TVG	20 log R	20 log R
Attenuator	20 dB	20 dB
Threshold	0 dB	0 dB
Sound velocity	1522m/s	

5.2.4 計測方法

計測は海面に存在する波の主成分方向と船首方向との相対角を考え、Fig.34に示すとおり、船首尾線に対して船首から0° (Head), 45° (Bow), 90° (Beam), 135° (Quarter), 180° (Follow) になるように航走コースを設定した。しかし、主成分波の方向を決定することは非常に困難 (川島ら, 1968) ため、本計測では風向と風波の方向がほぼ同じ方向であったことから、観測された風向を風波を受ける方向とした。そこで、各コースについて、船速を2から12ノットまで2ノット間隔で変化させ、それぞれ約8分間ずつ航走した。送受波器が船首尾線上に装備されているため、風波を受ける舷を右舷のみとして行った。なお、計測では風波を受ける相対角を風向として度数 (degrees) で表現した。

また、船体動揺のピッチ、ロールおよびX、Y、Z軸加速度の計測にはパーチカルジャイロ (東京航空計器製) を用いた。エコー (反射) 信号とトリガーはデータレコーダー (共和電業製) に同時収録した。なお入射角の求め方は、5.3.1.2に示す。

5.3 多次元自己回帰モデルによる船体動揺とエコーレベルの変動

5.3.1 データ処理

5.3.1.1 データ処理

音響信号と船体動揺データの収録および処理方法をブロックダイアグラムで示す (Fig.35)。すなわち、データレコ

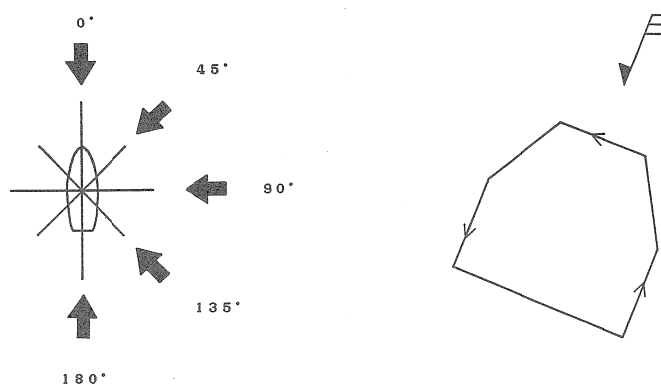


Fig. 34. The course of the vessel relative to the direction of the wind. The bold arrows show the wind direction.

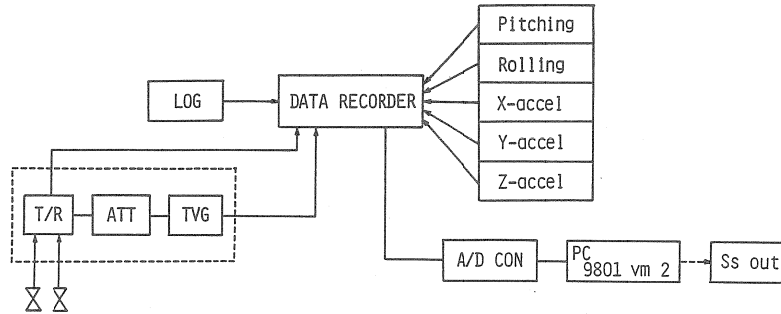


Fig. 35. Block diagram of data acquisition and processing system.

ーダーに同時収録されたデータはA/Dコンバータを通してアセンブリおよびベーシック言語で記述されたプログラムによりパソコンで処理した。このプログラムでは海底エコー波形のピーク電圧値をサンプリングすると同時に、船体動揺のピッチ、ロール、X、Y、Z軸加速度のアナログ電圧値をサンプリングする。したがって、パソコンで行ったデータサンプリングの間隔は、魚探機のパルス発射間隔と同一の0.55秒である。サンプリングの数は512個である。Fig. 36にパソコンで処理し、再現した音響信号の波形の例を示す。

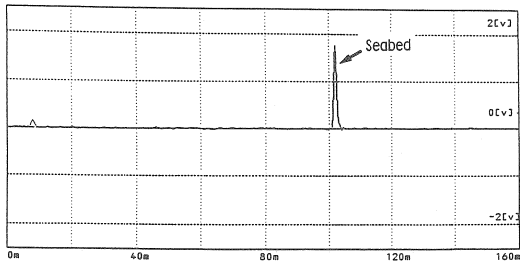
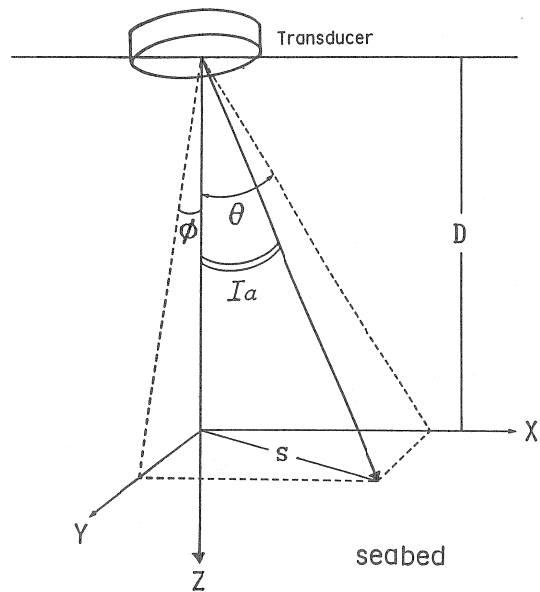


Fig. 36. Example display of echo reflection level from an acoustically stable seabed.

5.3.1.2 入射角

船体動揺にともなってビーム主軸が鉛直方向、または海底面に対してどのような角度であるかを知るため、サンプリングされた時系列データのピッチ・ロールの角度からビーム主軸の鉛直方向に対する角度を Ia (Incident angle) として求めた (Fig.37)。得られた時系列データの一部を Fig.38に示す。本研究では、音響信号の解析には計測値 (電圧値) を用いたが、海底エコーレベルの表示 (Fig.38)

には表面残響理論のソナー方程式 (Urlick, 1979) により求めた表面散乱強度 S_s (dB) を用いた。



$$S = \sqrt{(D \tan \theta)^2 + (D \tan \phi)^2}$$

$$Ia = \tan^{-1} (S/D) \quad Ia : \text{Incident angle}$$

Fig. 37. Principle of measuring the incident angle to seabed. The arrow shows the axis of echo beam.

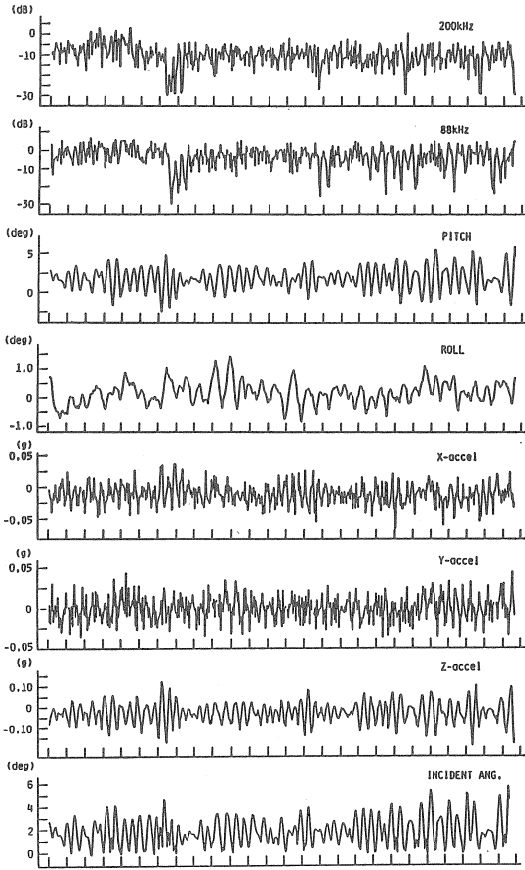


Fig. 38. Example of change, with progress of examination of echo reflection levels, ship's motions, and incident angle. Sampled echo levels (voltage) were indicated as surface scattering strength (dB).

5.3.2 解析方法

船底装備の魚探機による資源量調査において、観測プラットフォームである調査船の動揺とエコーレベル変動との関係をフィードバックシステムとしてとらえ、船体動揺および Incident angle を入力とし、海底からのエコーレベルを出力とする多入力システムとして解析を行った。

多入力システムの解析の際に重要なことは、出力の変動機構において、入力変数のどの変数が出力変動に最も影響を及ぼしているかを見出すことである。そこで、変動機構解明の解析手法としてスペクトル解析と次に述べるマル

チプルコヒーレンシおよび多次元自己回帰モデルによるパワー寄与率を用いた(赤池, 1976; 川島・天下井, 1976; 天下井・川島, 1984; 山内, 1986; 赤池・中川, 1987)。

5.3.2.1 マルチプルコヒーレンシ

船体動揺および Incident angle $x_j(n)$ ($j=1, 2, \dots, 6$) を入力、エコーレベル $x_0(n)$ を出力とする多入力システムにおいては、出力 x_0 が入力 x_j と線形関係にある部分と、これらと全く線形関係にない部分の和として表されるとする。このとき、各入力の $x_j(n)$ 、 $x_i(n)$ 間のクロススペクトル密度関数を $p_{ji}(f)$ 、入力に対するフィードバックシステムの周波数応答関数を $A_j(f)$ とすれば、船体動揺など $x_i(n)$ とエコーレベル $x_0(n)$ とのクロススペクトル密度関数 $p_{0i}(f)$ は、

$$P_{0i}(f) = \sum_{j=1}^6 A_j(f) P_{ji}(f) \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (5-1)$$

と表すことができる。

ここで、入力と線形に対応する部分の占めるパワースペクトル密度は、

$$P_{pp}(f) = \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^6 A_j(f) \overline{A_i(f)} P_{ij}(f) \quad (5-2)$$

で与えられる。

そこで、 $x_0(n)$ のパワースペクトル密度を $P_{00}(f)$ とすると、出力 $x_0(n)$ のなかで入力 $x_i(n)$ と線形関係で表現される割合を示すマルチプルコヒーレンシは次式で表現される。

$$\gamma_{0,1,2,\dots,6}^2(f) = \frac{P_{pp}(f)}{P_{00}(f)} \quad (5-3)$$

5.3.2.2 多次元自己回帰モデルによるパワー寄与率

海底エコーレベルの変動、船体動揺などを含む k 次元の定常時系列データを線形定常自己回帰モデルで表すと

$$x_i(n) = \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^M a_{ij}(m) x_j(n-m) + u_i(n) \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (5-4)$$

$a_{ij}(m) : k \times k$ の回帰係数行列

となる。ただし、 $u_i(n)$ と $u_j(n)$ は $n \neq m$ で独立なホワイト

トノイズである。さらに $x_i(n)$ は変数 $x_j(n)$ からの影響と固有のノイズ $u_i(n)$ から成り立っていると考える(ただし、 $j \neq i$)。

ここで、この多変数のフィードバックシステムにおける j ループから i ループへの周波数応答関数 $a_{ij}(f)$ は

$$a_{ij}(f) = \sum_{m=1}^M a_{ij}(m) \exp(-2\pi f m) \quad (5-5)$$

で与えられる。

いま、ノイズ $u_j(n)$ のパワースペクトル密度関数を $p(u_j)(f)$ 、各 $u_j(n)$ に対する $x_i(n)$ のパワースペクトル密度関数を $q_{ij}(f)$ とし、各 $x_i(n)$ のパワースペクトル密度を $p_{ii}(f)$ とすると、これらは各 $u_j(n)$ からの寄与分の和として表現できる(天下井・川島, 1984)。つまり、エコーレベルのパワースペクトル密度関数は船体動揺などの変数全体におけるノイズ分に対応するものの和として表される。

$$q_{ij}(f) = |b_{ij}(f)|^2 p(u_j)(f) \quad (5-6)$$

$$p_{ii}(f) = \sum_{j=1}^k |b_{ij}(f)|^2 p(u_j)(f) \quad (5-7)$$

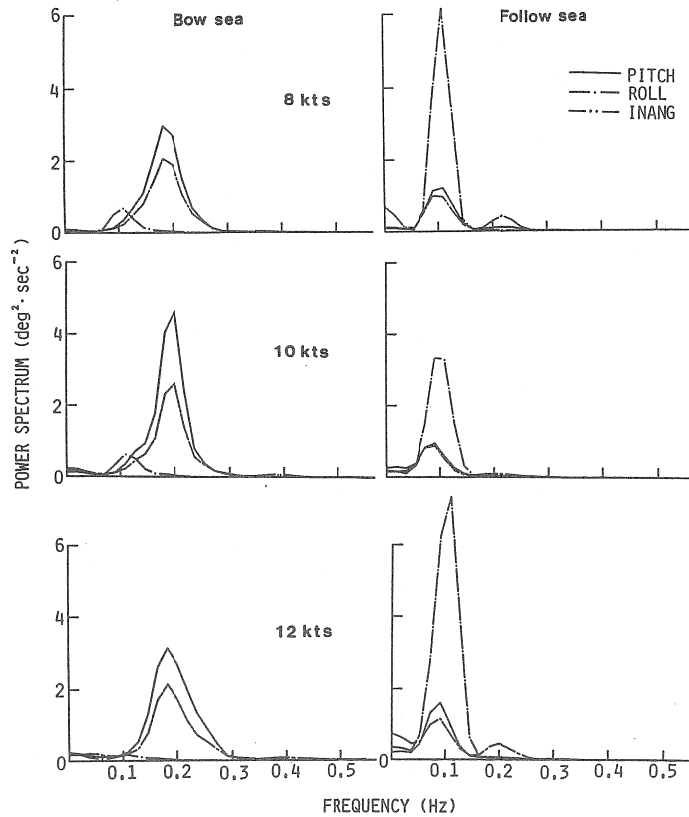
ただし、 $b_{ij}(f)$ は $x_j(n)$ から $x_i(n)$ への閉ループの周波数応答関数である。

そこで、周波数 f における $x_i(n)$ のパワースペクトル密度 $p_{ii}(f)$ のなかで $u_j(f)$ に起因する部分の占める比率、すなわちパワー(ノイズ)寄与率は、次式により求められる。

$$r_{ij}(f) = \frac{q_{ij}(f)}{p_{ii}(f)} \quad (5-8)$$

このパワー寄与率を用いることにより、エコーレベルの変動に対する寄与率の大きい変数についての情報が得られる。

本研究のデータ解析結果の検討にあたっては、主に音響



(continue)

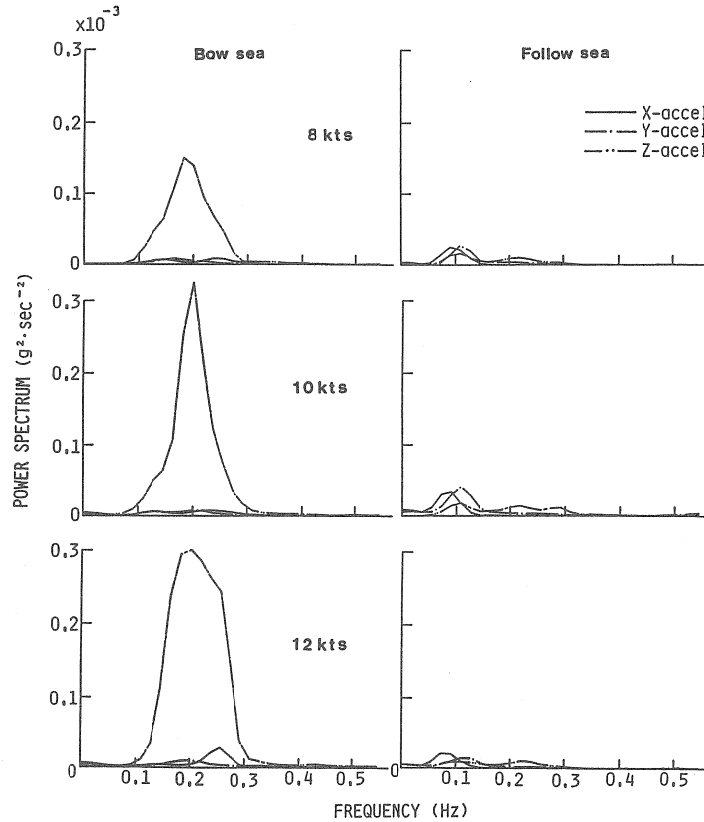


Fig. 39. Power spectra of ship's motions and incident angle in wave scale 3 at bow sea and follow sea.

調査を行う 8 から 12 ノットの船速で、海底に対する SV 値の減衰が最も大きかった船首斜め前方から風波を受ける場合（以下、Bow sea という）と比較的安定した SV 値を示した船尾方向から風波を受ける場合（以下、Follow sea という）の 2 つの場合を比較検討した。なお、本研究の計算には時系列の解析と制御のためのプログラムパッケージ TIMSAC（赤池・中川、1987）を使用した。

5.3.3 結果

5.3.3.1 スペクトル解析

入力である船体動揺と、Incident angle および出力である海底反射エコーレベルについて、これら不規則変動の特性を検討するため周波数領域でスペクトル解析を行った。Fig.39 に船速 8 から 12 ノットにおける船体動揺と Incident

angle のパワースペクトル、Fig.40 に船速 8 ノットにおけるエコーレベルのパワースペクトルを示す。

まず、入力である船体動揺のパワースペクトルのパワーが存在する周波数帯は、ほぼ 0.08–0.3 Hz の範囲であった。Bow sea では、ピッチ、Incident angle、Z 軸加速度のパワースペクトルが大きく、0.2 Hz 前後にピークがみられた。ただし、ロールのみ 0.1 Hz のところに小さなピークがみられた。特に、Z 軸加速度は、他の加速度より常に大きく、しかも船速の増加とともに大きくなる傾向がみられた。一方、Follow sea の場合は、ロールのパワースペクトルが大きいほかは一般にパワースペクトルは小さく、すべての変数のピークはほぼ 0.1 Hz 前後にみられた。特に、加速度は Bow sea と Follow sea に顕著な差がみられ、Follow sea の場合には Bow sea に比べて、3 軸とも顕著なピークがない

平坦なスペクトルを示した。

次に、出力である海底エコーレベル変動のパワースペクトルについては、Bow sea の場合では200kHz と88kHz の両周波とも0.2Hz 前後にピークがみられた。これは船体動揺におけるパワースペクトルのピーク周波数帯と一致しており、この周波数帯においては、エコーレベルの変動と船体動揺の両者の間に密接な関係があることが示された。一方、Follow sea の場合については、船体動揺との関係が明確に見い出せなかった。

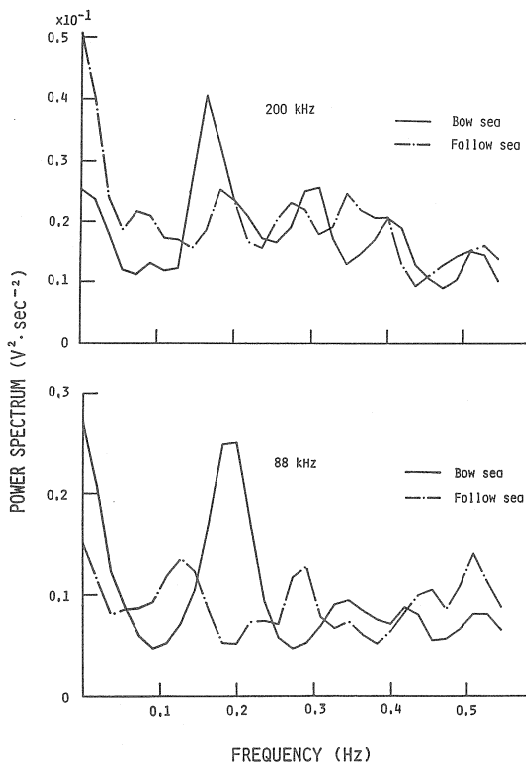


Fig. 40. Power spectra of echo reflection levels from an acoustically stable seabed at ship's speed of 8 knots.

5.3.3.2 マルチプルコヒーレンシ

入力と出力の周波数領域における周波数成分ごとの線形関係を調べるため、コヒーレンシ関数を用いて検討した。Fig.41に船速 8ノットにおける200kHz と88kHz の両周波のBow sea と Follow sea の解析結果を示す。Bow sea の場合

は、200kHz と88kHz の両周波とも0.1–0.25Hz の周波数帯においてほぼ0.6–0.7であった。この周波数帯はFig.39に示したピッチ、ロール、Z軸加速度のパワースペクトルのピーク周波数帯とほぼ一致している。したがって、この周波数帯では船体動揺とエコーレベル変動は線形関係があると考えてよい。一方、Follow sea の場合は、200kHz と88kHz の両周波とも0.5前後のピークがランダムにみられ、そのなかで0.7程度の値が0.08–0.1Hz の狭い範囲で示された。これはBow sea の200kHz においてもみられ、この周波数帯はFig.39に示したロールのパワースペクトルのピーク周波数帯とほぼ一致した。したがって、この周波数帯では、船体横揺れとエコーレベルの変動に線形関係があり、これは200kHz においても同様である。

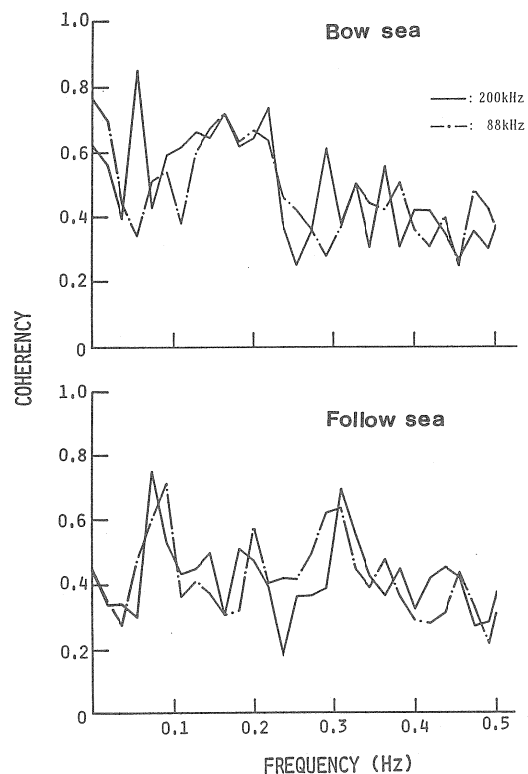


Fig. 41. Multiple coherency at ship's speed of 8 knots. Solid lines show 200kHz. Dashed lines are 88kHz.

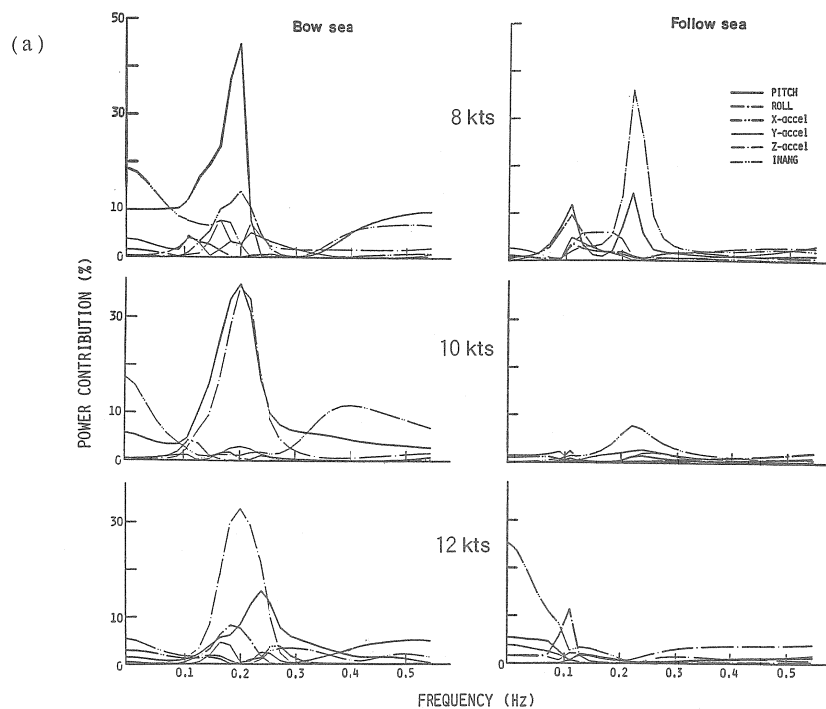
5.3.3.3 多次元自己回帰モデルによるパワー寄与率

これまでの研究では、どの周波数帯で線形関係があるかを検討してきた。ここでは、取り上げた変数のうちどの変数が最もエコーレベルの変動に寄与しているかを検討する。式(5-4)に示すとおり、取り上げた変数を線形定常自己回帰モデルで表し、Fig.42(a)に200kHzの場合、Fig.42(b)に88kHzの場合の各変数のパワー寄与率についての解析結果を示した。これらの図は周波数を横軸に、それぞれの変数の出力変数に対するパワー寄与率(%)を縦軸にとってある。

まず、200kHzについては、Bow seaの場合、8ノットではピッチのパワー寄与率が45%となり最も高い値を示した。つづいてX軸加速度13%、Z軸加速度8%を示し、Incident angleが0.1Hz以下の周波数帯で17から8%の寄与率を示した。10ノットではピッチとZ軸加速度がそれぞれ37%とほぼ同程度の高い寄与率を示し、12ノットではZ軸加速度が33%と高いほか、ピッチ16%、ロール8%となっ

た。以上から Bow sea においては、船速が増加するに従って、エコーレベルの変動に影響を与える変数がピッチからZ軸加速度へと変化することが示された。また、ピークが存在する周波数帯は、0.2Hzを中心とした0.1-0.3Hzの範囲に集中していた。一方、Follow seaの場合は、8ノットでIncident angleが35%、ピッチが14%、X軸加速度が10%の寄与率を示しているが、10ノットではIncident angleが7%のほかは、各変数とも極めて低い値となった。12ノットではロールの11%のほかは0.1Hz以下でIncident angleが25から10%の値を示した。Bow seaと比較して、8ノットでIncident angleがやや影響を与えているものの、各変数ともその寄与率は低い。

次に、Fig.42(b)に示した88kHzでは、Bow seaの場合、8ノットにおいてZ軸加速度が57%と特に高く、つづいてY軸加速度16%、X軸加速度12%の順となった。Incident angleとピッチが0.1Hz以下で15-22%の寄与率を示した。10ノットではZ軸加速度20%、ピッチ12%であり、最もエコーレベルの減衰の大きかった12ノットではZ軸加速度とX軸加速度が12-16%の寄与率を示した。また、ピークが



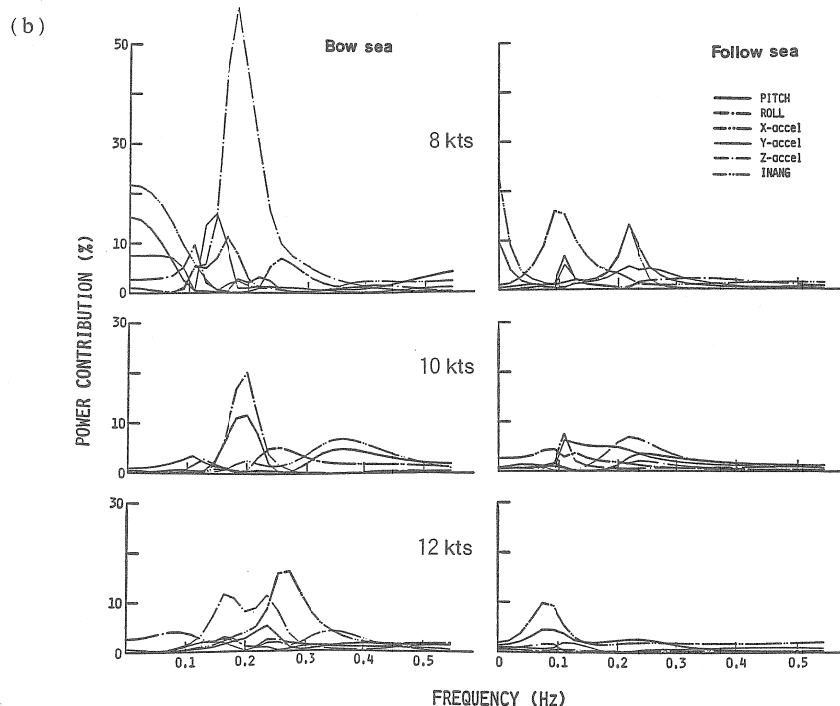


Fig. 42. Power contribution of ship's motions and incident angle (input variables) to echo reflection level from an acoustically stable seabed (output variable) of 200kHz (a) and 88kHz (b).

ある周波数帯は、200kHzと同様に0.2Hzを中心とした0.1–0.3Hzの範囲に集中していた。これらのことから、加速度の影響はどの船速においても大きいことが示され、特にZ軸加速度の影響が大きい傾向が示された。しかし、その寄与率は船速の増加とともに低下する傾向が認められた。一方、Follow seaの場合は8ノットでX軸加速度、ピッチ、Incident angleが13–16%、10ノットでZ、Y、X軸加速度およびロールの順でそれぞれ7%、12ノットではX軸加速度が10%の寄与率を示した。これらの結果から、Follow seaについては200kHzと同様に、各変数がエコーレベルに及ぼす影響は、X軸加速度が若干影響しているものの、一般に低いことが示された。

5.3.4 考察

最適計測法を考える場合は海況の変化や対象生物の生態に基づいた調査設計も含めて論ずるべきである。しかし、ここでは海況3における船体動揺と海底エコーレベル変動

との関係について、600トン型スタートロール船をモデルとして調べた。船底装備型魚探機を用いた音響調査において、船体動揺がエコーレベルの変動に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。これは海洋波という極めてランダムな不規則外力を受ける調査船に送受波器が装備されているために生ずる問題である。調査船の動揺特性は船によって異なっており、船体動揺にともなう生ずる気泡などのノイズの発生パターンも変化する。つまり、同機種種の魚探機であっても、装備状況によっては違った性能の魚探機になる側面がある。したがって、各調査船における船体動揺にともなうエコーレベル変動のメカニズムを明らかにすることは、エコーレベルの変動と減衰を出来る限り少なくする最適計測法を確立するうえで重要な問題である。

本研究では、200kHzと88kHzのそれぞれの周波数について、エコーレベルの変動に対してどの入力変数が最も影響を与えているか調べた。船体動揺を表す6自由度運動のうちヨーイングを除くすべての動揺運動およびビーム主軸の

鉛直方向に対する角度を変数として検討を行った。これら変数の値は波浪特性、船速、および出会い波向などの相互影響で大きく変化する。したがって、船速、針路の変化によりエコーレベルの変動に与える変数もそれぞれ変化する事となる。

そこで、エコーレベルの変動に与える要因を、動揺運動にともなうフィードバックシステム（以下、システムという）そのものと、船体動揺にともなう生ずる送受波器と媒質の境界面周辺の擾乱などによるノイズとに分けてエコーレベルの変動と各入力変数との関係を調べた。Fig. 43(a), (b)に、エコーレベルのパワースペクトルに対する各変数のパワー寄与率を比例配分して表した。つまり、これらの図は、Fig. 42(a), (b)に示した各変数の寄与率を周波数ごとにエコーレベルのパワースペクトルに対する比として表してある。

200kHz (Fig. 43(a)) の場合、Bow sea では0.2Hzを中心とした0.1-0.3Hzの周波数帯において、各船速ともに船体動揺に基づく変動が顕著にみられた。特に、10ノットでは、この周波数帯におけるエコーレベル変動はそのほとんどが、船体動揺に起因していると考えられる。一方、Follow sea では、エコーレベルのパワースペクトル自体に大きなピークが現れず、小ピークがランダムにみられた。また、Incident angleの影響が8ノットでわずかにみられる以外、システムからの影響はほとんど認められなかった。

次に、88kHz (Fig. 43(b)) についてみると、Bow sea では船体動揺の影響、特にZ軸加速度の影響が200kHzと同様に、0.2Hzの周波数範囲を中心と大きいことがわかった。しかし、船速の増加にともなう、各変数の相対的寄与率の低下が200kHzに比べ顕著に示され、システム以外からの影響が増加していることが示唆された。一方、Follow sea については200kHzと同様に、エコーレベルのスペクトルそのものにピークがみられず、ホワイトノイズの傾向を示した。

これらのことから、エコーレベルの減衰が大きいといわれている前方から風波を受けて航走する場合のエコーレベル変動のメカニズムと要因については、船体動揺によるシステムそのものとノイズとに分解させることにより、より鮮明にその変動機構を考察することができた。すなわち、0.2Hzを中心と0.1-0.3Hzの周波数範囲においては、エコーレベルの変動はそのほとんどがフィードバックシステム、すなわち、船体動揺に起因しており、具体的には、Z軸加速度、次いでピッチが、エコーレベルの変動に強く影響していることが明らかになった。しかし、一方で船速の増加につれてシステム以外のノイズの相対的寄与率が増える傾

向がみられた。この傾向は特に88kHzに顕著にみられた。これは、低周波の方が気泡による音波減衰の影響を受けやすい（西村、1969）ことから、船体動揺にともなう媒質の擾乱により発生した気泡が、それまで船体動揺運動とエコーレベル変動とに存在した線形関係を非線形、非定常状態にさせるためと考えられた。これは風波により海面付近に生じた気泡による音波減衰（Novarini and Bruno, 1982）だけではなく、船体の動揺により新たに引き起こされた気泡による影響が大きいと考えられた。しかし、船速の増加にともなう主機関の航走雑音、船体と波浪による衝撃音、さらにプロペラ翼の空洞現象による影響（Johannesson and Mitson, 1985）も重要なノイズの原因と考えられる。したがって、これらシステム以外の雑音の発生機構および周波数特性については、さらに検討する必要がある。

以上、平坦で底質が均一であると考えられる海底を対象として、船体動揺にともなう海底エコーレベル変動のメカニズムについて考察した。船体動揺に起因するエコーレベルの変動は、音響資源調査における魚群反射エコーについても同様の影響を及ぼすものと考えられる。また、エコーレベル変動の制御を考えた最適計測法を考えるうえで、多次元自己回帰モデルによる解析法は、エコーレベルの変動を船体動揺運動に対する応答として定量的に表現できる有効な手法であると考えられる。

5.4 重回帰分析による調査条件の変化とSV値補正式

5.4.1 緒言

前節で多次元自己回帰モデルを用いて、船体動揺がエコーレベルの変動に及ぼす影響を検討した。そこで、前方から風波を受ける場合は、エコーレベルの変動に最も影響のある変数はZ軸加速度、ついでピッチであることがわかった。しかし、船体の動揺は、主に波によって引き起され、波浪特性、出会い波向（針路）、および船速などの相互影響により大きく変化する。したがって、調査条件の変化にともなうSV値の変動と減衰を考える場合、船速、針路、風速のような調査条件の変化が、SV値にどのような影響を及ぼすかを定量的に明らかにしておく必要がある。

Dalen and Løvik (1981) は船尾方向から風を受ける方が、正横方向から前方方向にかけて風を受ける場合よりエコーレベルの変動が小さく安定していると報告している。これは、船体動揺が最小に保たれ安定している場合には、エコーレベルの減衰が少ないことを示唆したものである。そこ

で、針路、船速、風速などの条件のほかに、船体動揺を表す最も基本的なピッチとロールを加え、重回帰分析を用いてそれらの変化がSV値に及ぼす影響を定量的に検討した。一般の調査船において、加速度計測装置を搭載している船はまれで、加速度を変数として用いるのは一般的でないと考えたためピッチおよびロールのみを取り上げた。したがって、本節ではSV値に対する補正値を導きだす実用的な手法の検討を重回帰分析を用いて行った。

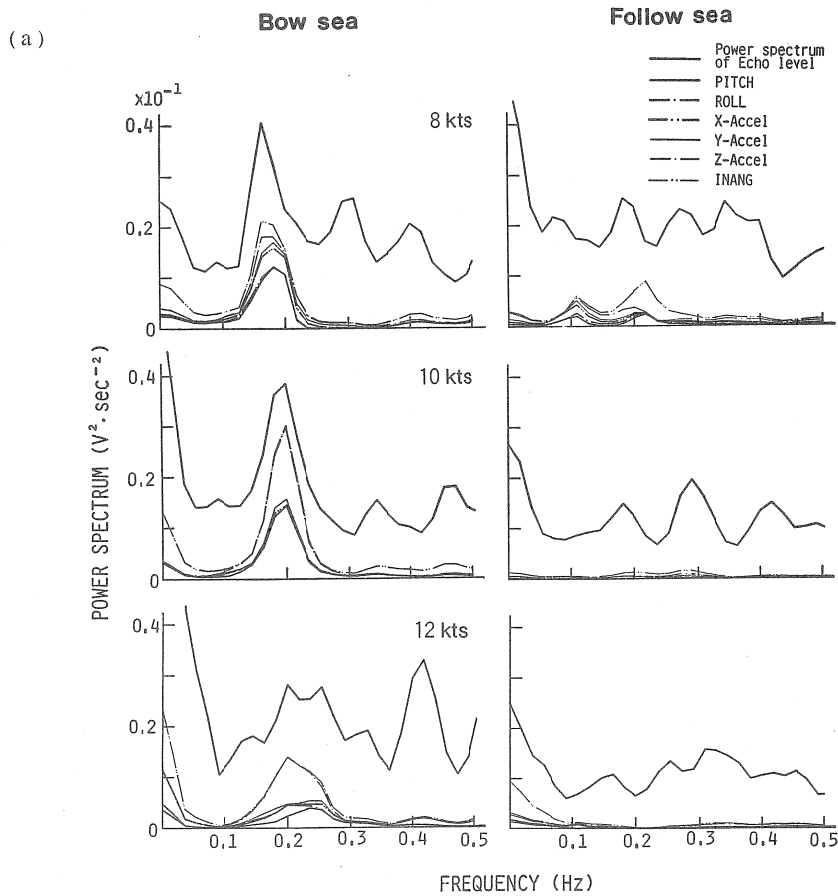
5.4.2 解析方法

収録された音響データは、インテグレーター（古野電気製 FQ-510）を用いて、海底エコーが積分範囲（幅10m）のほぼ中央になるようにその範囲を設定し、SV値（dB）

を10秒ごとに算出した。ここで、一定の海底層を積分することにより得られるSV値は、本来の意味でのSV値ではない（古澤・宮野鼻, 1983）。しかし、船の動揺と調査条件の影響による海底のエコーレベルの減衰に関しては相対値を問題とするので、本研究ではDalen and Løvik (1981) および古澤・宮野鼻 (1983) と同様にこのSV値を用いた。重回帰分析に用いたピッチとロールの値は、10秒ごとのSV値に対応させるため、次式の平均偏差値を用いた。

$$PP = \frac{1}{NN} \sum_{n=1}^{NN} |ppi - \overline{pp}| \quad (5-9)$$

$$RR = \frac{1}{NN} \sum_{n=1}^{NN} |rri - \overline{rr}| \quad (5-10)$$



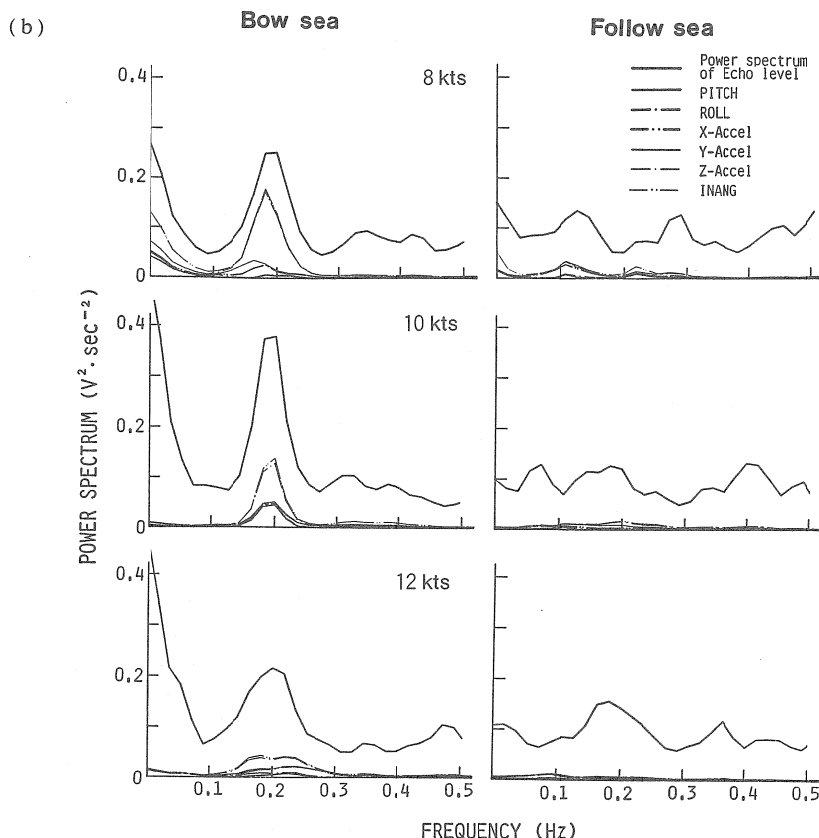


Fig. 43. Contribution of each input variable to power spectra of echo reflection levels from an acoustically stable seabed of 200kHz (a) and 88kHz (b).

$PP, \overline{ppi}, \overline{pp}$: ピッチの10秒間における平均偏差値, 0.1秒ごとにサンプリングした動揺角および1つのコースにおける動揺角の平均値。

$RR, \overline{rri}, \overline{rr}$: ロールの10秒間における平均偏差値, 0.1秒ごとにサンプリングした動揺角および1つのコースにおける動揺角の平均値。

NN : 10秒間におけるサンプリング回数。

次に、計測中の各船速、各コースごとに得られたデータの中から回頭惰力の影響を除いた6分間の記録をデータとして用いた。得られた200kHzと88kHzのSV値の変動の結果をFig.44に示す。この図から均一な海底を標的としたデータとしてはSV値の変動が大きいことがわかる。SV値のばらつきは船速差、針路差、海底反射強度の違い、

気泡による減衰などがあげられる。このうち海底反射強度の違いについては、マクロ的には均一な海底であっても、一部に特に強い反射強度の海底があったとも考えられる。そこで、こういった影響を除くため、各船速、各コースごとに得られた36個のデータの中から反射強度の強い方から1/4、すなわち、9個のデータを削除することとした。特に強い反射強度を示す海底が一部分あったとしても、この処理によりその影響を解消できると考えた。

得られたSV値を目的変数、船の動揺・調査条件を説明変数とし、変数最良選択法による重回帰分析(大崎ら, 1981)を用いて解析を行った。

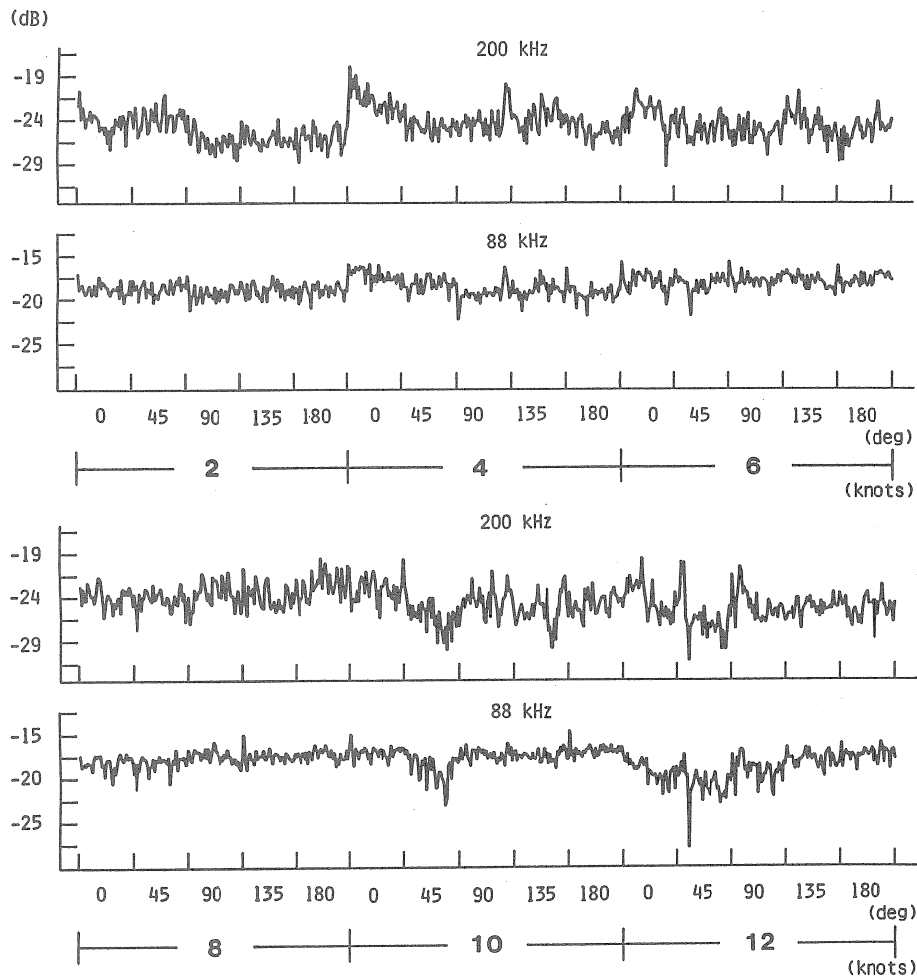


Fig. 44. Change, with progress of examination, of volume backscattering strength from an acoustically stable seabed.

5.4.3 結果

5.4.3.1 船体動揺

船体動揺によるエコーレベルの減衰については、船型・排水量・出会い波向・送受波器の装備方法により大きく条件が異なるので、普遍的なデータを求めることは困難である。しかし、動揺中の船体運動を知ることは、船体装備の送受波器の水中での動きを知るうえで必要不可欠なものである。そこで、今回計測を行った天鷹丸の動揺特性につい

て全振幅解析によりピッチとロールについて検討を行った。バッチカルジャイロから得られた船体動揺のデータを0.1秒ごとにサンプリングし、動揺（ロール・ピッチ）の極小から極大、極大から極小の振幅の値を計算し、有義値を各船速、各風向での動揺角としてFig.45に示した。この結果ロールは、各船速とも風向が0°から45°では小さく、90°から135°で大きく、135°のときピークがみられた。ただし、4ノットのみ180°でピークを示した。一方、ピッチにおいては、Fig.45に示すとおりピークは45°付近にみられ、風向が

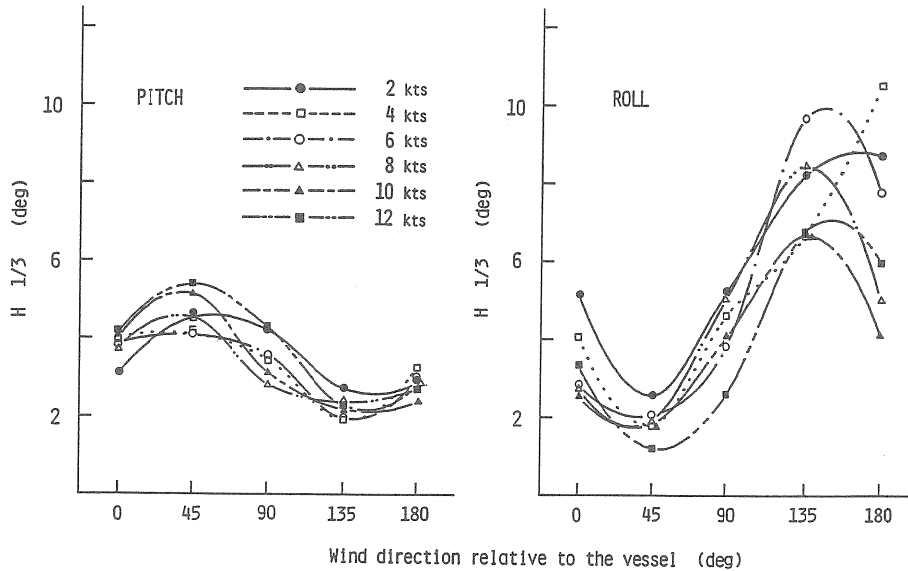


Fig. 45. The significant double amplitudes of roll and pitch.

船尾方向に移るに従って動揺角が小さくなり、135°のとき極小値を示した。

5.4.3.2 海底エコーに対するSV値の分布

200kHzと88kHzの両周波それぞれのSV値の変動と、諸要因の関係を解析するに先だち、これらSV値の分布が正規分布に適合するかどうかを検討する必要がある。もし適合しなければ頻度分布の型に応じて変数変換しておかなければならない。そこで、適合する分布の型を検討した結果、 χ^2 検定により、200kHzにおける頻度分布は5%の水準で正規分布に適合するとみなせた。しかし、88kHzでは正規分布には適合せず、5%水準で対数正規分布とみなせた。これらの実測頻度分布をFig.46に示す。そこで、88kHzについては、SV値を変数変換した方がよいので、SV値rdBを $\log(-14-x)$ に変換して以下の計算に用いた。

5.4.3.3 重回帰分析

前述のとおり、海底エコーに対するSV値の変動に影響を及ぼす変数として、1) ロール、2) ピッチ、3) 船速、4) 風向、5) 風速の5つを考えた。そのうち船速と風向については極値がある場合を考慮して、それぞれ2次項を

加えた。これらの2次項は1次項と常に切り放さずに組み合わせを考えた。すなわち、2次項を加えたものを1つの変数群とし、変数群を5群として説明変数を考えた。重回帰分析を行う前に、SV値と各説明変数群との単相関(Table 10(1))を調べた。この結果、ロールはピッチほどSV値の変動には密接な関係にないと考えられた。これは、前節の解析結果と一致した。

次に、Table 10(2)の回帰式に示す説明変数(独立変数)から目的変数(従属変数)であるSV値を求める重回帰式を変数最良選択法(大崎ら, 1981)により求めた。この結果、200kHzではロール、ピッチ、船速、風向の4群(6変数)、88kHzではこの4群に風速を加えた5群(7変数)を説明変数に用いると1%で有意とみなせる式が得られた。Table 10(2)の各周波数欄上段に偏回帰係数および対応する説明変数で構成される式を示す。

重回帰式の再現性を表示するためには、データ番号ごとに、それぞれの説明変数の実測値を代入してSV値を求め、それらと実測SV値とを対比させなければならない。しかし、図を簡略化するために、実測値は各船速と風向における平均で表し、計算値は船速と風向の項にそれぞれの既定の値を、またそれ以外の項には、全データより求めた説明

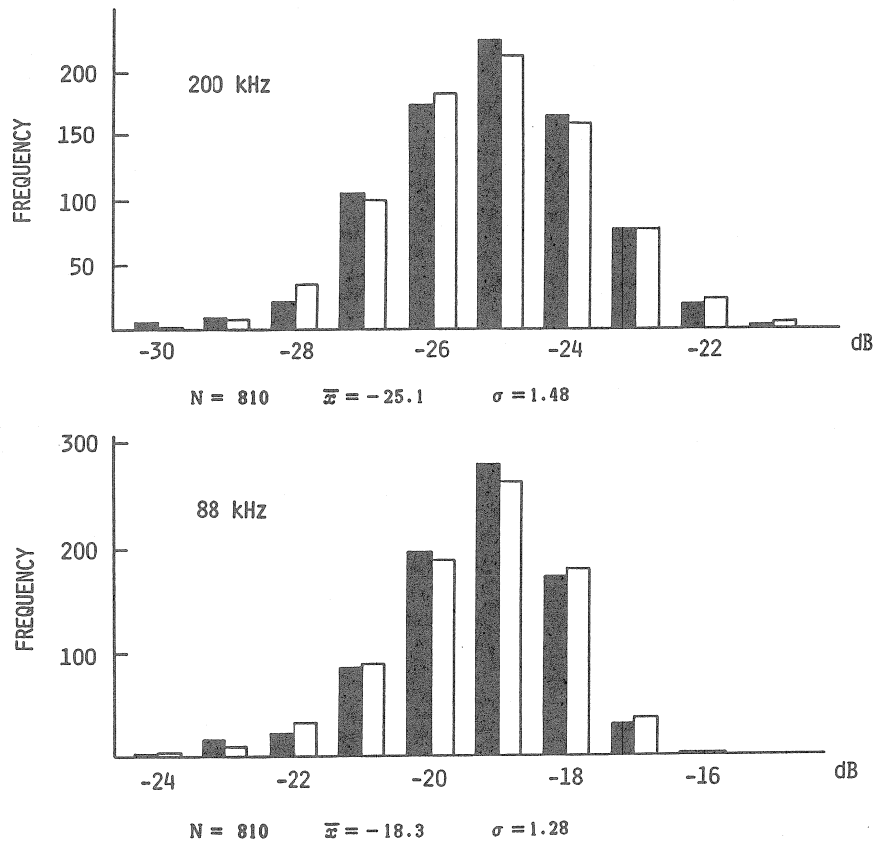


Fig. 46. Frequency distributions of volume backscattering strength from an acoustically stable seabed. Solid bars: observed value; open bars: theoretical value.

変数の平均値を代入して求めた。このようにして得られたSV計算値と実測値(各船速でのコースごとの平均SV値)をプロットしたのがFig.47(a)である。したがって、船速、風向以外の各説明変数の平均は、船速・風向によって異なるので、全データの平均値との間にいくらかの差がある。そのため差が、この図ではSV計算値と実測値の差に含まれる。したがって、Table 10(2)の各周波数欄上段に示した重回帰式の再現性は、この図にみられるよりよい。しかし、それでもこの重回帰式はSV値の補正式としては十分な精度とは考えられない。

そこで、これまで取り上げた説明変数だけでは、SV値の補正に用いるのに不十分と考え、補正項を加えることを

試みた。ここで、補正項としては、前節で指摘したZ軸加速度および、その他本研究で取り上げていない他の要因が考えられる。しかし、一般の計測で求められる要因の組み合わせで説明精度が向上できれば、より実用的である。ここで、上記の回帰式に取り入れられた要因のうち、計測にあたって選定できるのは船速と風向の2要因である。したがって、これらの1乗と2乗を掛け合せた値を補正項として考えた。すなわち、(1)1次項だけ考えた場合、(2)船速の1次項に対して風向の1次項と2次項考えた場合、(3)風向の1次項に対して船速の1次項と2次項考えた場合、(4)1次項と2次項考えた場合である。以上のことをまとめると次のようになる。

Table 10. Results of multiple regression analysis of volume backscattering strength.

a_0	x_1 a_1	x_2 a_2	x_3 a_3	x_3^2 a_6	x_4 a_4	x_4^2 a_7	x_5 a_5	$x_3 \times x_4$ a_8	$x_3^2 \times x_4$ a_9	$x_3 \times x_4^2$ a_{10}	R	n_1	n_2	AIC
1) $y = a_0 + a_i x_i + a_{j+3} x_j^2$ ($i = 1, 2, \dots, 5, j = 3, 4$)														
-24.9	-0.198										0.102**	1	808	625.86
H -24.5		-0.788									0.189**	1	808	604.82
• -26.8			0.702	-53.505	-2.459	1.081					0.377**	2	807	511.92
F -24.2							0.285				0.332**	2	807	541.41
-26.9											0.155**	1	808	614.56
-0.607	-0.004										0.022**	1	808	-3318.80
L -0.532		-0.107									0.294**	1	808	-3391.50
• -0.835			0.073	-4.687	-0.110	0.074					0.408**	2	807	-3463.87
F -0.602											0.223**	2	807	-3357.89
-0.397							-0.034				0.213**	1	808	-3355.87
2) $y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 + a_6 x_3^2 + a_7 x_4^2 + a_8 x_3 x_4 + a_9 x_3^2 x_4 + a_{10} x_3 x_4^2$														
H -24.7	-0.11	-1.09	0.67	-0.051	-2.58	1.07					0.56**	6	803	341.23
• F -23.7		-0.97	0.39	-0.039	-3.99	1.05		0.32	-0.014		0.59**	7	802	299.44
L -0.414	-0.013	-0.098	0.076	-0.0054	-0.120	0.073	-0.048				0.59**	7	802	-3648.44
• F -0.385		-0.083	0.086	-0.0072	-0.174	0.071	-0.049	-0.0087	0.0019		0.66**	8	801	-3769.39

Note x_1 : Rolling angle in degrees. x_2 : Pitching angle in degrees. x_3 : Ship speed in knots. x_4 : Wind direction relative to the vessel in degrees ($\times 10^{-2}$). x_5 : Wind speed (m/s).
 a_i : Partial regression coefficient of the i -th independent variable.
 R: Multiple correlation coefficient.
 **: Significant at 0.01 level.
 n_1, n_2 : Degree of freedom.
 AIC: An information criterion.
 H: F: 200 kHz L: F: 88 kHz

- (1) $x_3 x_4$
 - (2) $x_3 x_4, x_3^2 x_4$
 - (3) $x_3 x_4, x_3 x_4^2$
 - (4) $x_3 x_4, x_3^2 x_4, x_3 x_4^2, x_3^2 x_4^2$
- ただし, x_3 : 船速 x_4 : 風向

ここで、補正項の項を多くすれば重回帰式の再現性はよくなる。しかし、少ない項で再現性が向上するのであれば、これらの補正項で説明するのが望ましい。(1)から(4)に示した補正項のうち、項数が少ないのは(1)である。(2)は変数が1つ増えるが、200kHzと88kHzの両周波に関する式のAIC (An information criterion) はともに下がる。しかし、(3)の場合は(1)に比べて200kHzに関する式のAICが上がる。したがって、補正項(2)を用いた補正式をSV値補正式とした。200kHzについては式(5-11)、88kHzについては式(5-12)にそれぞれのSV補正式を示す。Table 10(2)に示す各周波数の欄の下段にこの結果を示す。

$$y = -23.7 - 0.97x_2 + 0.39x_3 - 0.039x_3^2 - 3.99x_4 + 1.05x_4^2 + 0.32x_3x_4 - 0.014x_3^2x_4 \quad (5-11)$$

$$y = -0.385 - 0.083x_2 + 0.086x_3 - 0.0072x_3^2 - 0.174x_4 + 0.071x_4^2 - 0.049x_5 - 0.0087x_3x_4 + 0.0019x_3^2x_4 \quad (5-12)$$

Fig. 47 (b) は式(5-11), (5-12)を用いて Fig. 47 (a) と同様の計算をした結果である。次に、Fig. 48は Table 10(2)の下段の重回帰式で相対風向 (degrees) を変えた場合のSV値計算値と、対応する実測値 (コース (風向) ごとの平均SV値) を Fig. 47と同様の計算によって求め、プロットしたものである。Fig. 47と Fig. 48について各船速・風向によるロール、ピッチ、風速の変化を加味すると、200kHzも88kHzもともに6から8ノットの場合は、SV値の減衰が少ないと考えられる。また、Fig. 48では風向が90°周辺で極小値、すなわち、減衰が大きい傾向がみられ、200kHzでは

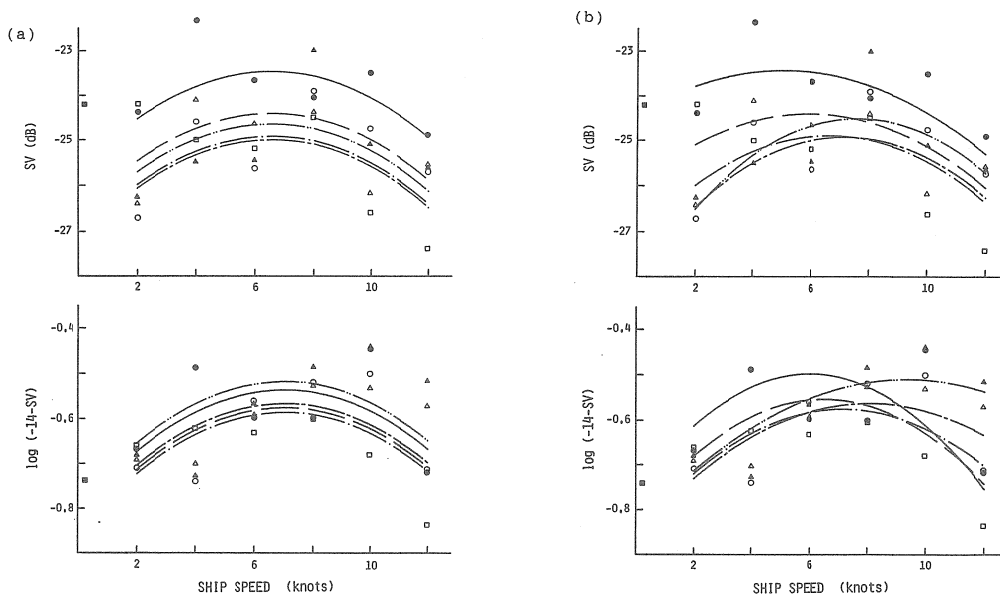


Fig. 47. Comparison observed values (symbols) and calculated value (lines) for 200kHz (upper) and 88kHz (lower). For each wind direction, SV are plotted against ship's speed. Calculated values were obtained from the regression equation, using the partial regression coefficients in the top line (1) and those in the bottom line (2) for each frequency shown in Table 10-2).
 ● —, 0°(Head); □ —, 45°(Bow); ○ —, 90°(Beam);
 △ —, 135°(Quarter); ▲ —, 180°(Follow); ■ —, (Drifting).

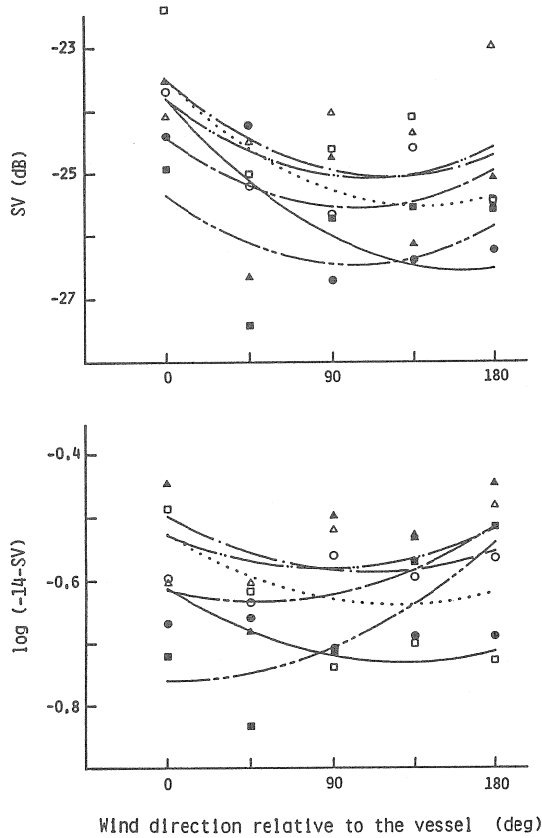


Fig. 48. Comparison between observed values (symbols) and calculated values (lines) for 200kHz (upper) and 88kHz (lower). For each ship's speed, SV are plotted against wind directions. Calculated values were obtained from the regression equation, using the partial regression coefficients in the bottom line for each frequency shown in Table 10-(2).
 ● —, 2 knots; □ ·····, 4 knots; ○ — · —, 6 knots, △ — — —, 8 knots; ▲ — · · —, 10 knots;
 ■ — · · · —, 12 knots.

やや後方に極小値がある。さらに、風向が0°と180°については、88kHzの場合、両者に大きな違いはなかったが、200kHzでは0°方向の方が減衰が少ない傾向を示した。しかし、88kHzの10ノットと12ノットについては、90°より後方に風向が変化するにつれてSV値が上昇する傾向を示し

た。これらのことから、船速は6から8ノットがおおむね安定した航走条件であると考えられる。しかし、風向については周波数、船速により最適な航走条件が若干異なることがわかった。

5.4.4 考察

エコーレベルの減少を引き起すと考えられる航走減衰(西村, 1969; 古澤・宮野鼻, 1983) 船体横揺れ(Stanton, 1982), 気泡の影響(Dalen and Løvik, 1981; Berg et al., 1982; Novarini and Bruno, 1982) といった問題について、個別に論じたものはあるが、実際の計測のなかで複合的に、しかも調査船の特性により大きく変化する要因について検討した研究例はみられない。このため、調査船ごとにこれらの影響を明らかにすることが必要であるが、ここでは600トン型スターントロール船を例にとり、船速、風向、風速のような調査条件と、船体動揺(ピッチ、ロール)が海底エコーに対するSV値に及ぼす影響について、重回帰分析を用いて検討した。

船速の変化がSV値に及ぼす影響は、航走減衰に関する報告(西村, 1969; 古澤・宮野鼻, 1983)によると、一般に船速の増加とともに減衰が増加するとされている。しかし、今回の計測結果から求めたSV値曲線では、風向によって若干異なるが、200kHz, 88kHzの両周波ともおおむね6ノットと8ノットに極大(すなわち減衰が極小)を示す傾向となった。このことから、海況3における天鷹丸による音響調査では、6ノットと8ノットにおける計測が最適であると考えられる。このことは、得られた回帰曲線から、海況が3以下の場合では、船速8ノット以上で音響計測が可能であることが予想される。すなわち、得られた回帰曲線が音響調査における船速決定の一つの指針となると考えられる。

一方、針路の変化がSV値に与える影響は、各船速ごとにそれぞれ異なった傾向を示し、重回帰式による検討で、風向が90°より前方か、後方かでその影響は異なり、しかもそれは船速と連動するなど複合的な影響を示している。また、風向がSV値に与える影響は、200kHz, 88kHzでは、その周波数特性、特に、ビーム幅の違いのため大きく異なる場合もある。本研究では、ピッチが大きい風向45°の場合では、両周波とも減衰は大きく、特に、高速時に顕著であった。この場合8ノット以下に船速を調整すれば、エコーレベルの減衰を12ノットのときに比べて200kHzで約2.8dB, 88kHzで約2.7dB, それぞれ抑制することができ、これによって安定した音響データを得ることができる。す

なわち、出会い波向や船速を適切に調整変更することができれば、それにもなうエコーレベルの減衰もかなり軽減することができることになる。したがって、得られた回帰曲線は、風向に対する船速調整のための有益な指針になるものと考えられる。

風速が大きくなればSV値が減少することは、88kHzの重回帰式のなかで十分反映されており、風速の変化の影響は今後多くの計測を行うことにより解決していく必要がある。

以上、600トン型スターントロール船に装備された200kHzと88kHzの海底エコーに対する体積散乱強度の測定から、調査条件の変化がSV値に及ぼす影響について重回帰分析を用いて考察を行った。この結果、SV値の変動は船速および風波を受ける方向に密接な関係があり、船体動揺を通してエコーレベルの変動減衰に影響していることがわかった。本研究では、海況3における最適針路、さらに、針路ごとにおける最適船速を知る指針を得ることができた。

このように、重回帰分析によって得られるSV値補正式は、調査船によってそれぞれ異なるものの、一定の海況のもとで行われる音響調査において、音響エネルギーの減衰の少ない、最適な航走方法の指針を得るために有効であると考えられる。そのほか、資源量推定に必要なSV値の補正曲線として利用することもでき、適正な補正値を導くのに非常に役立つものと考えられる。

今後、より実用的な指針とするためには、得られた重回帰式の非線形項をさらに詳しく検討する必要がある。

第6章 音響的調査手法の適用

6.1 緒言

急速な水中音響工学の発達にともない計測機器の性能は格段に向上した。実験室内での研究についてはターゲットストレングス(TS)の理論的検討をはじめ多くの研究がなされている(Love, 1977; 青山ら, 1982; 李, 1985; Foote and Ona, 1985; Foote, 1985; Furusawa, 1988)。しかし、資源量評価についてのこれら理論的研究の成果と、実際の調査現場における成果との間にはまだ多くの問題が残されている。とりわけ、風向、風速の気象変化を含む針路、船速の調査条件の変化にともなうSV値の変動に対する補正の問題は、いままで有効な指針や方法が確立されていなかった。そこで前章において、SV値が調査条件の変化によって大きく影響を受けることを明らかにした。そのなかで、

音響的方法を用いて高い精度で資源量を推定するためには、その音響調査で得られたSV値を調査条件の変化に応じて補正する必要があることを指摘した。

本章では、音響調査において得られるSV値に対する定量的補正法を重回帰分析を用いて明らかにする。次に、刻々と変化する調査条件に対応して高い精度で補正値を求める。さらに、補正された精度の高いSV値をもとに、魚類マイクロネクトンのキュウリエソの現存量を計測した具体的な適用例を示す。

6.2 材料および解析方法

6.2.1 材料

Fig. 49に示すとおり、1989年11月10日から11月12日の間、水産大学校練習船天鷹丸(総トン数603トン)により隠岐諸島周辺海域における200m等深線付近に調査定線を設定し計測を行った。調査中の船速は、原則としてほぼ10ノットに設定したが、荒天のため一部8ノットにした。

調査定線はジグザクにコースを設定し、隠岐諸島の西側より時計回りに順次Line 1-24とした。理由はキュウリエソの分布が多いと考えられる200m等深線付近の計測を多くするためである。また、昼間と夜間における調査定線をそれぞれ実線と破線で区別して表示した。

魚探機は周波数が88kHz(出力2kW)の計量魚探機(古野電気製FQ-50型)を用いた。インテグレーター(FQ-510)の設定はアッテネータ20dB、しきい値0dB、積分周期は0.2マイル、積分範囲は10-200m(第1層が10-20mの10m幅、以下は20m幅)である。このようにして水平方向0.2マイル、鉛直方向20m(ただし、第1層は10m)ごとに単位メッシュ(積分メッシュ)の平均体積散乱強度(SV値)が得られる。ただし、キュウリエソ魚群が200m以深にあるときは、データレコーダー(共和電業)に収録した音響信号を再生してSV値を求めた。この場合のインテグレーターの設定はしきい値10dBである。なお、本研究における現存量推定にはデータとして昼間に観測されたSV値だけを用いた。これは第4章で示したように、夜間データについては魚種判別に問題があるためである。

6.2.2 解析方法

前章において、SV値の補正値を導きだす実用的な補正法を重回帰分析を用いて検討した。その際、目的変数(従属変数)として平坦で底質が均一と考えられる海底を基準標的としてその海底に対するSV値を用いた。しかし、実際の音響調査では調査範囲が広域にわたるため、底質、海

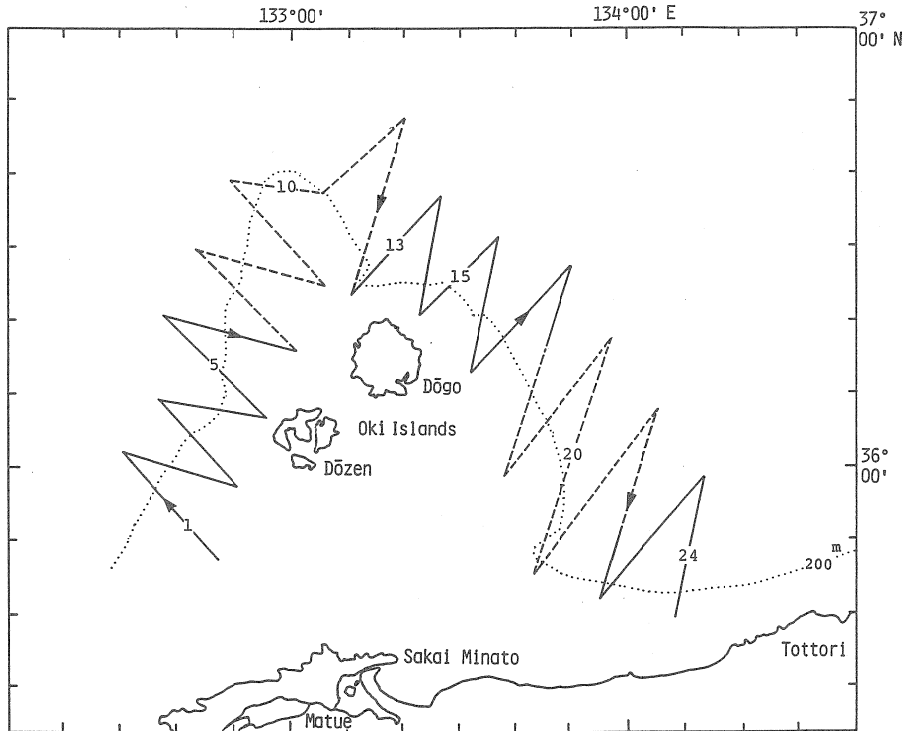


Fig. 49. The transect lines of the acoustic survey off Oki Islands. Solid lines indicate the daytime survey, and dashed ones are night one.

底の反射強度が一定とは考えにくく、海底を標的とした方法を用いることができない。一方、海中からの体積散乱強度において、反射に寄与する生物的影響がない積分メッシュのSV値であっても、調査条件の変化によって変動するとすればその変動傾向を見出すことによってSV値に及ぼす調査条件の影響を知ることができる。そこで、本章では調査条件の変化に対応した補正値を求めるため、目的変数として、海中において反射に寄与する生物的影響がなく、かつ、海底判別回路のような機械的影響を受けていない積分メッシュから抽出したSV値に着目した。ここで、海況などの調査条件の変化によるエコーレベルへの減衰効果は積分メッシュごとのSV値に等しく影響を及ぼすと考えられる。しかし、船底直下の第1層については送受波器付近における擾乱や機械的ノイズ、さらに、風波による気泡などの影響を強く受けるため、第1層から抽出されるSV値は上記に述べた値として適切でない場合があると考えられる。したがって、本研究では、第2層から第10層までのSV

値を目的変数抽出の対象とした。

そこで抽出したSV値を目的変数とし、前章の式(5-12)で取り入れられた説明変数を用いて変数最良選択法による重回帰分析を行った。ここで得られた重回帰式に基づき音響調査における調査条件の変化にともなう補正値を求めた。なお、説明変数となる風向、風速は、調査期間中に得られた20分ごとの気象観測データを、説明変数に対応するように補間した。また、船速については、0.2マイルごとのSV値の最小値が得られたときの値を用いた。

6.2.3 現存量推定

現存量の推定方法として、第1段階では単位メッシュにおけるSV値を求め、第2段階としてそのメッシュを魚探記録紙上の映像と対応して係数 m を決める2段階の選別処理方式を用いた。すなわち、第1段階では単位メッシュの平均体積散乱強度(SV値)を求め、第2段階では第4章で

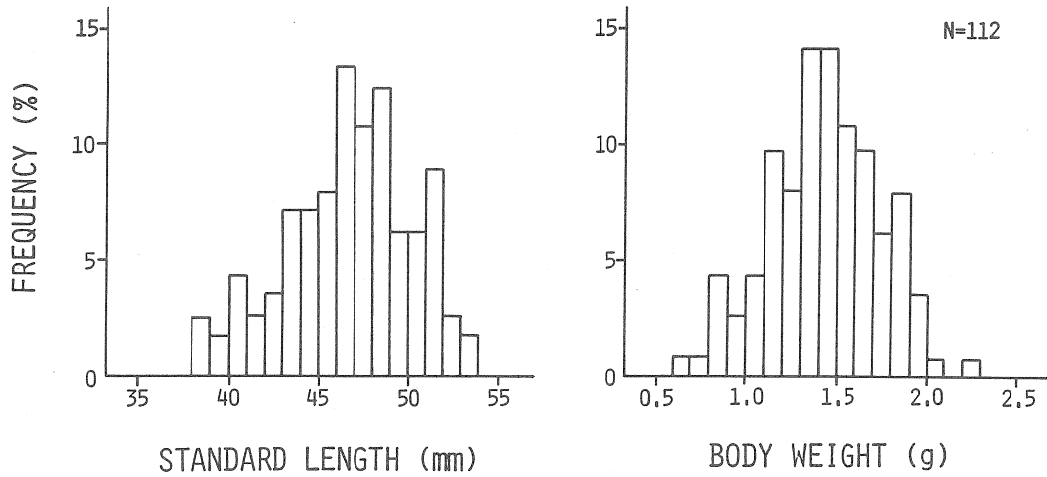


Fig. 50. Frequency distributions of standard length and body weight of *Maurolicus muelleri* captured in survey area by midwater trawling.

得られたキュウリエソの識別基準に基づき、キュウリエソ反応とみられるメッシュには $m=1$ 、それ以外のメッシュには $m=0$ を与え、式(6-1)によって水平方向 i 番目の平均積散乱強度 $Sa(i)$ を求めた(青木・杉本, 1988)。

$$Sa(i) = 10 \log \sum_{j=1}^n m \cdot sv(i,j) \cdot R(i,j) \quad (6-1)$$

$$\text{ただし, } sv(i,j) = 10 \frac{SV(i,j)}{10}$$

ここで、 $sv(i,j)$ と $R(i,j)$ はそれぞれ i 番目の積分周期における j 番目の層の体積散乱強度と層の幅で、 n は層の数である。したがって、 i 番目の単位海表面積当りにおける平均魚群密度 $nf(i)$ (尾/ m^2) は次式により求められる。

$$nf(i) = 10 \frac{Sa(i) - TS}{10} \quad (6-2)$$

次に、 i 番目の単位海表面積当りの重量密度 $na(i)$ (g/m^2) は、この値に1尾当りの平均重量 w (g) を乗じることにより求められる(式6-3)。調査海域における平均重量密度 \bar{na} は、式(6-4)により求めた。

$$na(i) = nf(i) w \quad (6-3)$$

$$\bar{na} = \left(\sum_{i=1}^k na(i) \right) / k \quad (6-4)$$

k : データ数

さらに、この値にモデル海域における昼間の調査海域面積 S を乗じることにより現存量が得られる。

$$Q = \bar{na} S \quad (6-5)$$

なお、キュウリエソの平均体重は、中層トロールで採捕された標本の値 (1.76 g) を用いた。中層トロールで得られたキュウリエソの体長と体重の頻度分布を Fig.50 に示す。

6.3 結果

6.3.1 目的変数の抽出

本研究では、積分周期を0.2マイルとしているため、水平方向0.2マイル、鉛直方向20m(ただし、第1層は10m)ごとに単位メッシュの平均体積散乱強度 ($SV(i,j)$) が得られる。1マイルごとの45個のメッシュ(以下、ブロックという)のなかから指標となる第1層を除いたほぼ同様の調査条件と考えられる SV 値を抽出することとした。ここで、Fig.51に魚探記録と積分メッシュごとに得られた SV 値を対比させて示した。この図は5つのブロックの例を示している。図に示したように水深が積分範囲の境界付近になる

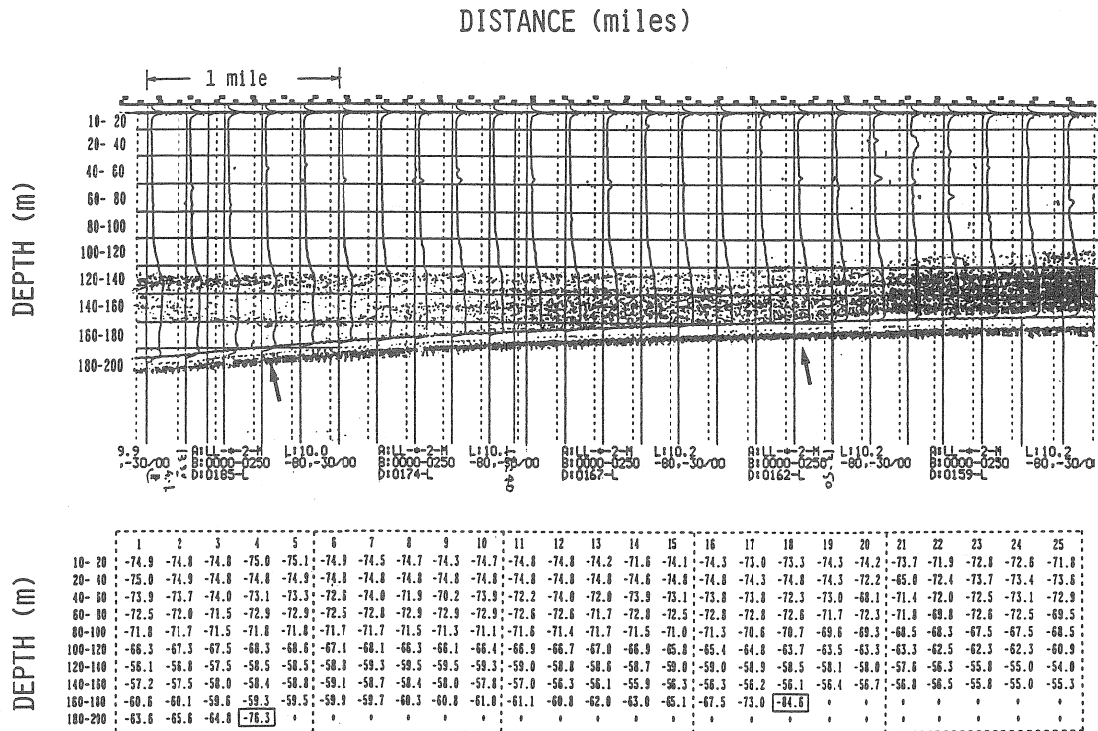


Fig. 51. An example of the echogram and corresponding digital output of volume backscattering strength (SV) from quantitative echo sounder FQ-50. Arrows indicate the portion causing extraordinary values in digital output (marked with square) due to overlapping of the bottom lock with one of the integration layer boundaries.

と海底判別回路が正常に機能しなくなり、異常に低い値が現れる。さらに、1ブロックの中におけるSV値の分布を調べるためにブロックごとにおけるSV値の頻度分布を示した(Fig.52)。ここで高い値のSV値は生物の分布によって変動するため、これらのSV値を指標として用いることはできない。したがって、目的変数となるSV値を求めるためには、使用機器の海底判別回路のような機械的な問題やノイズ、さらに、生物的要因を取り除いた値でなければならない。そこで、本研究では、機械に起因する異常に低い値を取り除いたSV値の最小値を目的変数とした。

しかし、この最小値を目的変数とするためには前述のとおり機械的に取り出された最小値では不十分で、さらに2段階の処理をする必要がある。その具体的な手法を以下に述べる。ここで、1マイルごとのブロック(45個のメッシュ)から1個ずつ抽出された最小値の時系列データを

Fig.53に示す。この図からわかるように、機械的に抽出した最小値には、極端に小さいSV値がいくつか不連続かつ不規則な間隔で取り込まれている。そこで、これら2段階のデータ処理を行った結果をFig.54に示す。第1段階の処理は、除去を必要とする装置などに起因する異常に低い値の除去である。この異常値についてはすべて機械的作業によって取り除き、それらにかわる最小値を抽出した。この段階で取り除いた値をFig.54に×印で示した。

次に、第2段階の処理は、生物などのために真の最小値と考えることができない値の除去である。すなわち、最小値として取り入れられても、そのメッシュに生物からの反射がある場合ではその影響のため得られるSV値は正しい最小値とみなすことができない。ここでは、上記の機械的作業ののち最小値として取り入れられたメッシュのすべてについて、魚探機のエコグラムを対応させ、そのメッシュ

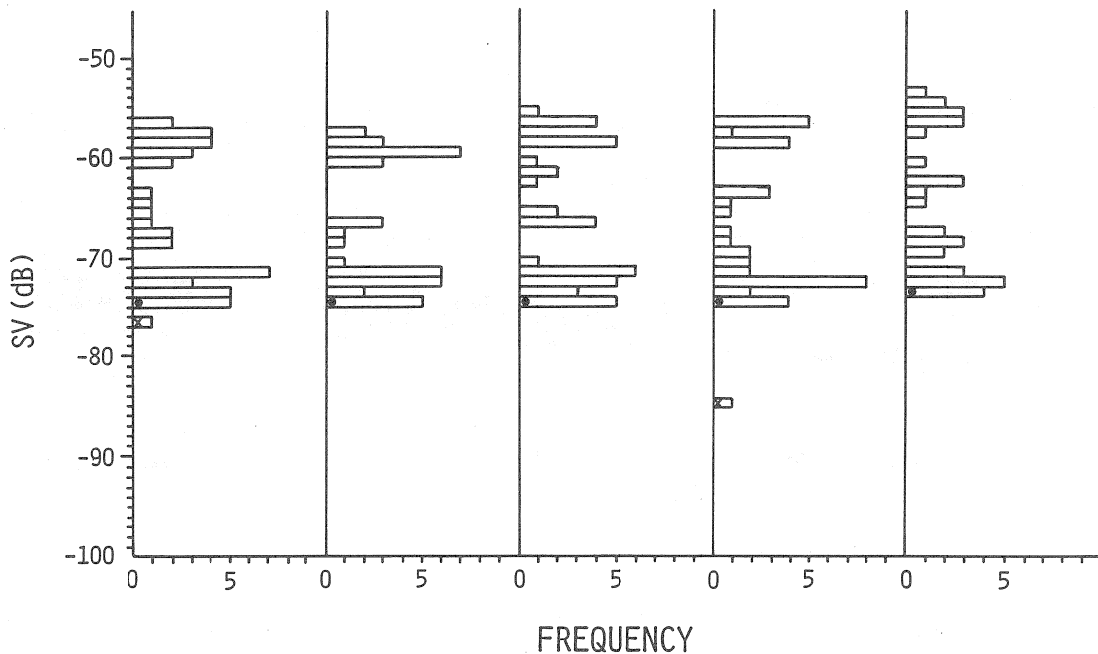


Fig. 52. Frequency distribution of SV (the mean volume backscattering strength) in each integration cell of 1 mile width observed in respective blocks shown in Fig. 51.

× : The values marked with square in Fig. 51.

● : SV values adopted as the minimum one in respective 1 mile blocks.

のなかに生物からの反射が認められた場合については、解析データから取り除くこととした。この場合は、そのブロック内のすべてのメッシュに生物がみられることになるのでわかりとなる値は抽出できない。ここで、第2段階の処理で取り除かれたデータを●印で示した。第1段階で取り除いた値のうち水深が200m未満のために取り除かれたものは連続している。しかし、それ以外の理由による値は分散している。第2段階で取り除いた値のうち生物の分布が広い場合には、連続した値が除去されることが避けられない。このように2段階処理の後に残った実線で示されるSV値は、生物の分布による影響や、魚探機の機械的問題を取り除いた最小値と考えることができる。したがって、得られたSV値の変動は、調査条件の変化の影響を表していると考えてよいから、残った161個のSV値データを目的変数とした。

6.3.2 説明変数の選択

前章においてSV値の補正式を求めるために、船体動揺を表す基本的パラメータであるピッチとロールを調査条件に加えて考察した。その結果、前章のTable 10で明らかにしたように88kHzの場合、ピッチ、船速の1次項と2次項、風向の1次項と2次項および風速、さらに補正項として、船速×風向、船速の2次項×風向の各説明変数で構成される重回帰式が得られた。前章で得られた補正式の中で、ピッチは船体動揺を表す説明変数として必要であるが、それを計測するためには特殊な計測器（例えば、パーチカルジャイロなど）が必要である。このような特殊な計測器を搭載している調査船はほとんどない。したがって、SV値補正式は、一般の調査船においても適用、利用できる汎用性のある式を考える必要がある。また、ピッチは影響の程度（偏重回帰係数×変域の幅）が低いので、このピッチを除いても精度に影響しない式が得られれば、計測が容易な説明変数で構成された式で十分である。以下に示す式が前章で得られた重回帰式とピッチを除いたときの重回帰式である。

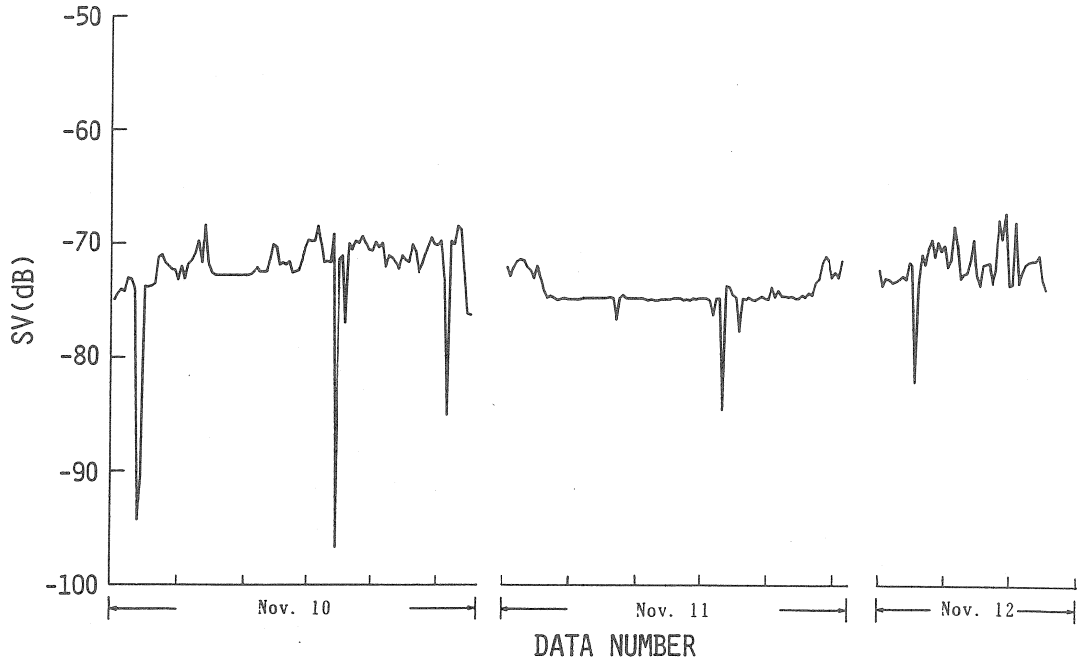


Fig. 53. Time series variation of minimum values of SV in each block of 1 mile width. SV used here were denoted to be those within respective depth zones (20-40m, 40-60m and so on to 180-200m) integrated at 0.2 sailing distance (mile), in consequence, the minimum values shown in the graph were estimated from the values in 9 depth zones \times 5 horizontal ranges.

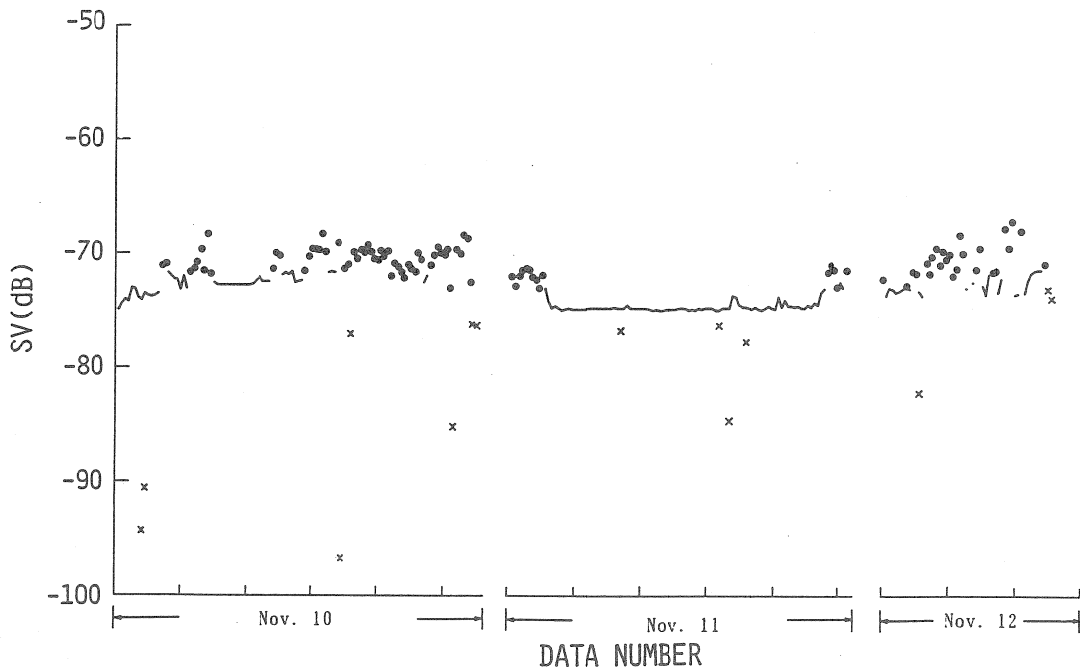


Fig. 54. SV time series after the twofold of filtering-out. \times : Excluded by the first filtering to reject the isolated extraordinary values due to overlapping of an integration layer boundary. \bullet : Excluded by the second one, to reject high values with clear traces in the echogram of the corresponding parts. —: SV values which were extracted as dependent variable.

$$y = -0.385 - 0.083x_2 + 0.086x_3 - 0.0072x_3^2 - 0.174x_4 + 0.071x_4^2 - 0.049x_5 - 0.0087x_3x_4 + 0.0019x_3^2x_4 \quad (6-6)$$

$$R = 0.66^{**}, \text{ AIC} = -3769.39$$

$$y = -0.437 + 0.086x_3 - 0.0074x_3^2 - 0.176x_4 + 0.074x_4^2 - 0.051x_5 - 0.007x_3x_4 + 0.0018x_3^2x_4 \quad (6-7)$$

$$R = 0.63^{**}, \text{ AIC} = -3711.85$$

ただし、 x_2 :ピッチ(degrees), x_3 :船速(knots)
 x_4 :風向(degrees $\times 10^{-2}$), x_5 :風速(m/s)

ピッチを取り除いた式(6-7)は説明変数の個数が1つ少なくなるので重相関係数はやや低く、AICがやや高くなる。しかし、各説明変数の偏回帰係数の値にはほとんど変わらない。すなわち、少ない数の説明変数を用いても、重回帰式による再現性はほとんど変わらないと考えられる。したがって、本章においては、前章で得られた説明変数のうちピッチを除いたパラメータを説明変数として取り上げた。

6.3.3 重回帰分析

SV値の最小値を目的変数として変数最良選択法による重回帰分析を行った。この際、次に示す8通りの組み合わせの各々を説明変数にして用いた。

- (1) x_3, x_3^2, x_4^2, x_5
- (2) $x_3, x_3^2, x_4, x_4^2, x_5$
- (3) $x_3, x_3^2, x_4, x_5, x_3x_4$
- (4) $x_3, x_3^2, x_4, x_4^2, x_5, x_3x_4$
- (5) $x_3, x_3^2, x_4, x_5, x_3^2x_4$
- (6) $x_3, x_3^2, x_4, x_4^2, x_5, x_3^2x_4$
- (7) $x_3, x_3^2, x_4, x_5, x_3x_4, x_3^2x_4$
- (8) $x_3, x_3^2, x_4, x_4^2, x_5, x_3x_4, x_3^2x_4$

この組み合わせのなかで、すべての説明変数を用いた8番目の組み合わせの結果をTable 11に示す。この結果、全説明変数を用いれば重相関係数は0.812と高いが、AICの値は大きい。このAICが小さいほど変数群の回帰に対する効率が低いとみなせる。したがって、重相関係数はわずかに低くなるがAICが最も小さいTable 11の3段目に示した式が、最良重回帰式として求められた。これを次式に示す。

$$y = -71.84 - 0.779x_4 + 0.836x_4^2 - 0.374x_5 \quad (6-8)$$

Table 11. Results of multiple regression analysis to estimate correction equation.

a_0	x_3 a_3	x_4 a_4	x_5 a_5	x_3^2 a_6	x_4^2 a_7	x_3x_4 a_8	$x_3^2x_4$ a_9	R	n_1	n_2	AIC
-71.545			-0.397					0.725**	1	159	-84.195
-72.011			-0.390		0.423			0.805**	2	158	-129.937
-71.843		-0.779	-0.374		0.836			0.810**	3	157	-131.591
-71.844		-1.814	-0.369		0.835	0.102		0.810**	4	156	-130.137
-71.844		-11.763	-0.367		0.827	2.305	-120.746	0.811**	5	155	-128.666
-71.318		-16.128	-0.375	-5.568	0.758	3.126	-157.658	0.812**	6	154	-127.183
-76.321	1.167	-11.587	-0.376	-72.144	0.765	2.050	-95.569	0.812**	7	153	-125.346

$$y = a_0 + a_3x_3 + a_4x_4 - a_5x_5 + a_6x_3^2 + a_7x_4^2 + a_8x_3x_4 + a_9x_3^2x_4$$

x_3 : Ship speed in knots.
 x_4 : Wind direction relative to the vessel in degrees ($\times 10^{-2}$)
 x_5 : Wind speed (m/s).
 a_i : Partial regression coefficient of the i -th independent variable.
R: Multiple correlation coefficient.
**: Significant at 0.01 level.
 n_1, n_2 : Degree of freedom.
AIC: An information criterion.

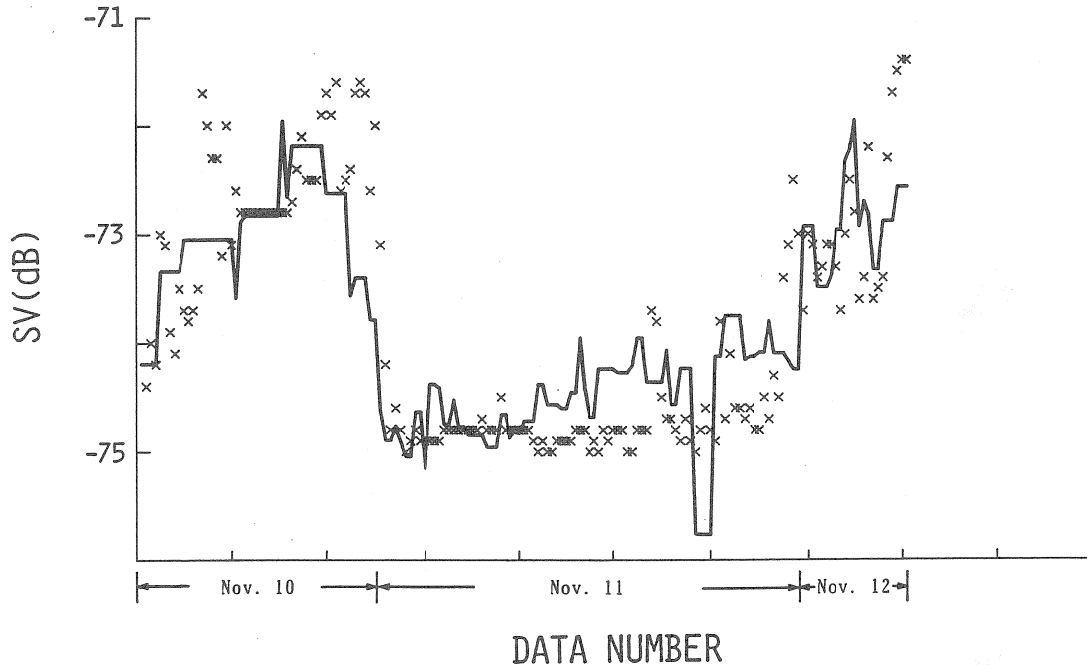


Fig. 55. Validity of the estimated multiple linear equation (Eq.6-8) in respect of expressing the time depending variation of SV. × : Observed values. — : Estimated ones.

$R=0.810^*$, $n=161$, $AIC=-131.59$
 R : 重相関係数 n : データ数
 x_4 : 風向 (degrees $\times 10^{-2}$) x_5 : 風速 (m/s)

ここで重回帰分析に用いたデータ数は161個、重相関係数は0.810であり、極めて高い相関係数が得られた。したがって、この回帰式の再現性はフィールドデータとしては極めて良く、高精度な回帰式と考えられた。

得られた重回帰式の各説明変数に実測値を代入して、SV値(目的変数)を求め、それらに対応する実測SV値を示したのがFig.55である。縦軸はSV値を示し、横軸はデータの時系列である。この図に示されるように、重回帰分析で得られた回帰式は実測値の変動をよく再現しており、極めてよく適合していると考えられる。一方、調査日が変わることによりSV値が大きく変化することがわかる。これは、調査日ごとに变化した風速がSV値の変動に大きく影響しているためである。しかも、同じ調査日でも風速が変わるので補正值が変動することがわかる。このようにそれぞれの

SV値に対して補正ができることが、ここで用いた方法の長所の一つである。

ここで得られた計算値の最大値を基準とし、この値と各調査条件における計算値との差を、各調査条件の変化における補正值とした。この結果補正值の最大値は3.8dBで、平均値は1.8dBとなった。

6.3.4 現存量推定

式(6-4)では平均重量密度の求め方を単純な形で示したが、実際には音響調査における単位海表面積当りの重量密度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あたっては頻度分布型に応じて重量密度を変数変換しなければならない。

ここで、調査海域における積分周期(0.2マイル)ごとに得られた単位海表面積当りの重量密度の頻度分布をFig.56に示す。Fig.56(a)は補正前の重量密度分布で、Fig.56(b)は補正後の分布を示している。重量密度の範囲は補正前が0-488.5g/m²、補正後の場合は0-631.5g/m²であり、図に示すとおり分布は正に歪んだ非対称型である。

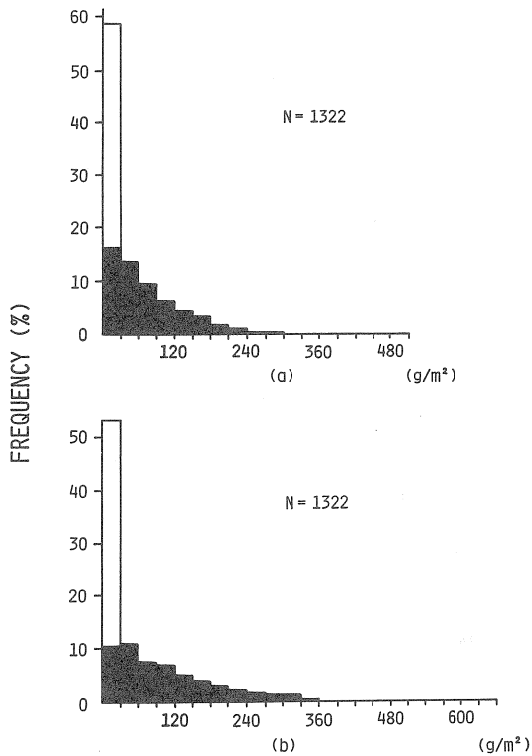


Fig. 56. Frequency distribution of the mean surface densities for integration interval of 0.2 mile width.
 (a) Before correction, (b) after correction by using Eq.6-8.
 ■ : Distribution in the 0.2 mile intervals which were agreeable with criteria showing in 3 in the summary.
 □ : That in other intervals.

このなかでキュウリエソが全く探知されなかったデータ ($na(i) = 0$) は全体の42.5%を占めており、このような分布に対して算術平均値を平均密度とするのは適当でないと考えられる。そこで、キュウリエソが探知されたデータ ($na(i) > 0$) とキュウリエソが全く探知されなかったデータ ($na(i) = 0$) を区別して取り扱った。すなわち、 $na(i) > 0$ のデータについては、Elliott (1971) が示す分布型に応じた置換式を用いて正規分布に変換し、 $na(i) = 0$ のデータについては、そのまま $na(i) = 0$ として取り扱った。この結果 $na(i) > 0$ のデータの分布については、 $na(i) = \sqrt{na(i) + 0.5}$ の置換式を用いると、 χ^2 検定により5%の水準で正規分布に適合するとみなせた。したがって、重量密

度の平均値を推定するにあたっては、変数変換した $na(i) > 0$ のデータと、キュウリエソが全く探知されなかったデータ ($na(i) = 0$) を加えて平均重量密度を求めた。この $\sqrt{na(i) + 0.5}$ に変数変換した理論頻度とキュウリエソが探知された ($na(i) > 0$) の実測頻度を Fig.57に示す。

この結果、平均重量密度は補正前と補正後がそれぞれ 20.8g/m^2 , 30.9g/m^2 となり、補正後の調査海域におけるキュウリエソの現存量は、補正前は約10.2万トン、補正後は約15.1万トンと推定された。このことから、SV 値を補正することにより現存量の推定値は補正前より約48.6%高くなることが示された。

一方、キュウリエソの重量密度の水平分布を Fig.58に示す。この図から200m等深線付近を中心にキュウリエソが濃密に分布しているのがわかる。キュウリエソは隠岐諸島西方海域に広く分布するが、高密度な分布は隠岐諸島の北東部海域にみられ、重量密度は地域によって変動することがわかる。

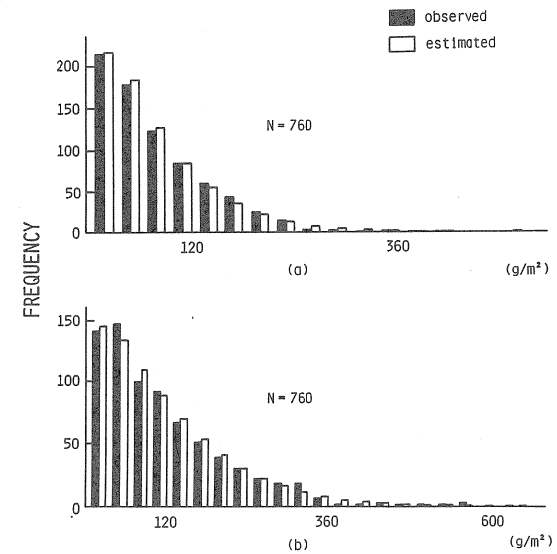


Fig. 57. Frequency distribution of the mean surface densities of target species.
 (a): Before correction, (b): after correction.
 ■ : Observed distribution.
 □ : Estimated ones under the supposition that the distribution may agree with normal distribution after transformation of $na(i)$ into $\sqrt{na(i) + 0.5}$

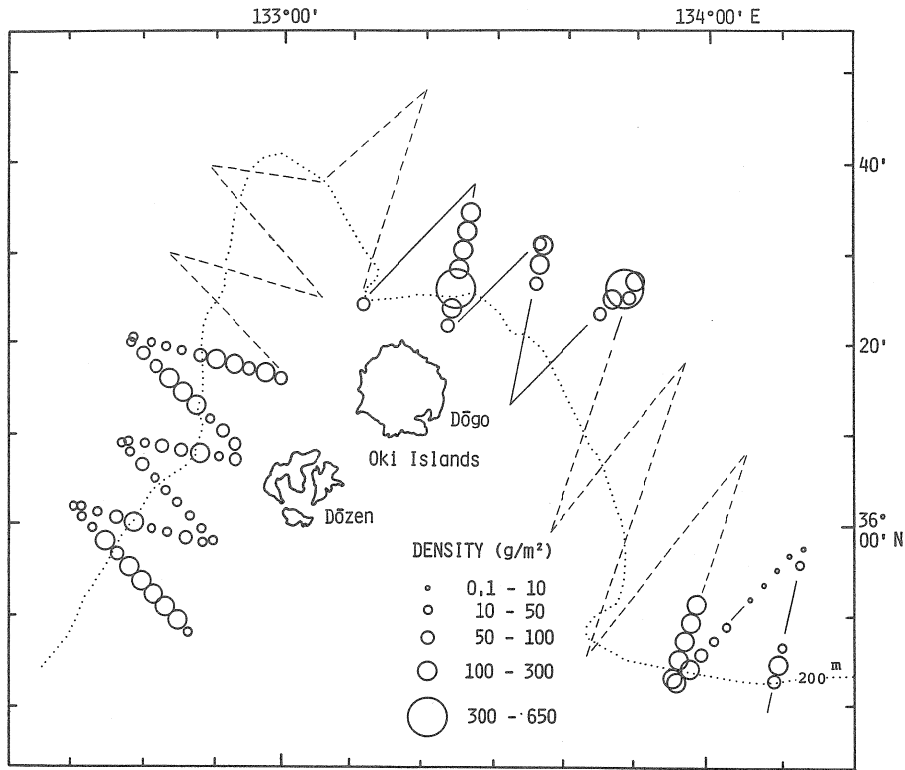


Fig. 58. Distribution of biomass after correction for variation in survey conditions. Circle (○) indicates the density (g/m^2) at respective 1 miles interval of sailing. Solid line indicates daytime survey for the area not agreeable with the criteria shown in 3 of summary. Dashed one indicates surveyed course at night and the records in the corresponding parts were excluded from the density estimation.

6.4 考察

音響調査では、風波が引き起こす表面付近の気泡によりエコーレベルが減衰する。これは気泡減衰としてよく知られている。特に、悪天候や海況が急変するときは、気泡減衰のため多くの誤差がSV値に含まれると考えられる。このような海況のもとで得られるSV値を補正する試みは、Berg *et al.* (1982), Dalen and Løvik (1981) によって、行われている。例えば、Berg *et al.* (1982) は気泡の発生を数値計算で求めることにより、風速の変化とその変化に対応したエコーレベルの減衰量(dB)との関係を12kHz, 38kHz, 120kHzの各周波数帯について求め、風速の変化に対応したSV値の補正値を示した。しかし、音響調査における減衰要

因については風速の変化だけではなく、針路の変更にもともなう相対的風向、船速などの変化にも考慮する必要がある。したがって、音響調査における減衰量を推定するためには針路、船速、風向のような調査条件の変化を含めて論ずる必要がある。しかし、これまで針路、船速、風向のような調査条件の変化に対応した減衰量を定量的に補正し、実際の資源量推定に適用する有効な方法は全く得られていなかった。これは、各調査船ごとに動揺特性、使用周波数が異なるため、すべての調査船に適用できる補正値を求めることが不可能であることや、刻々変化する調査条件に対応して定量的に補正値を明らかにすることが非常に困難であったからだと考えられる。

そこで、基準値としてSV値の最小値を選定し、重回帰

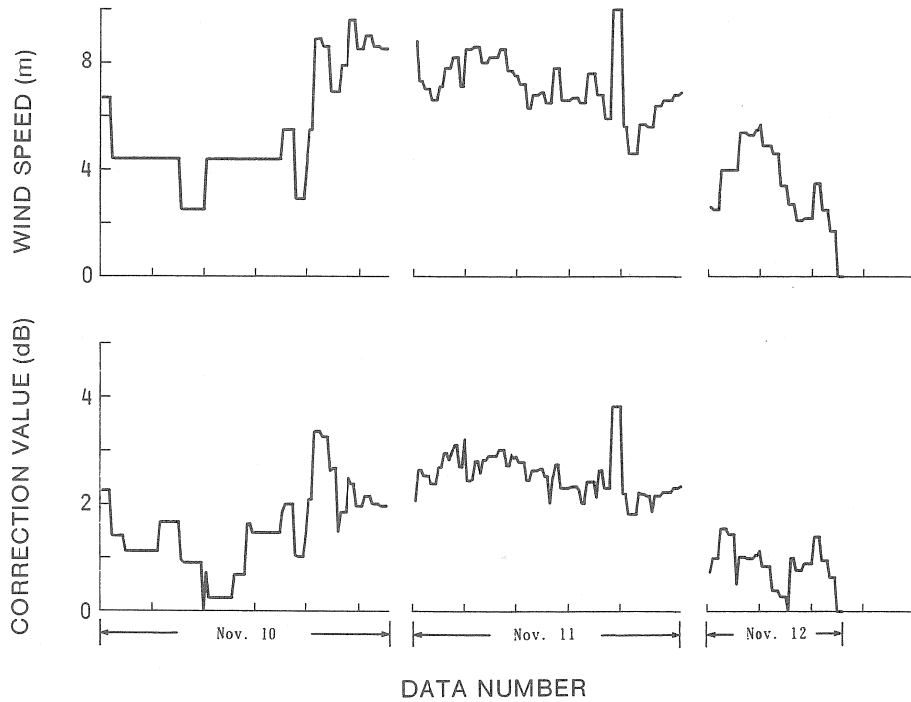


Fig. 59. Time series of variation of wind speed (upper) and correction value (lower) using Eq.6-8.

分析を用いて SV 値に対する調査条件の変化に対応した補正値を定量的に求める手法を明らかにし、その具体的適用例を示した。

ここで、調査期間中における補正値が、全体的な風速の変化と突風などの影響や船の針路と真風向による相対風向の変化によりどのように変化したか、さらに補正を行ったことで SV 値の精度向上について十分の効果があったかどうかを検討しておく必要がある。Fig.59に調査期間における風速の変化と重回帰式を用いて得られた補正値の時系列結果を示す。この図から調査条件の変化により補正値が大きく変動することがわかる。この変動は Fig.59に示すとおり風速の変化とはほぼ一致している。このことは重回帰分析の結果で示されているように、風速と SV 値の単回帰における相関係数が $R=0.725$ というフィールドデータとしては極めて高い相関が得られたことからわかる。

Berg *et al.* (1982) および Dalen and Lovik (1981) も風速の変化と減衰量について述べており、この結果を Fig.60 に示す。この Berg *et al.* の図を用いて、今回の調査におけ

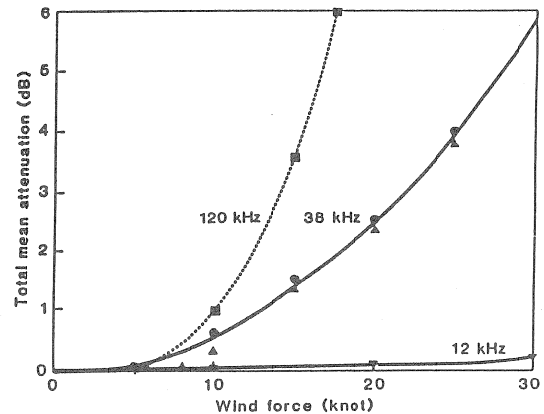


Fig. 60. Total mean attenuation from bubbles versus wind velocity at 12, 38 and 120 kHz (∇ —, \bullet —, \blacksquare ····) based on the reverberation, and on the bottom integration data (\blacktriangle). (Cited from Berg *et al.*, 1981)

る平均風速 (5.8m/s) での120kHzにおける減衰量を求めると、約1.5dBとなった。この値は、今回得られた平均補正値の1.8dBにほぼ近い値を示している。今回の最小SV値を目的変数とする重回帰式により求めた補正値が気泡分布から求めた減衰量とほぼ一致した値であることから、目的変数として用いたSV最小値がその適正な指標であることがわかった。

一方、変針点付近における針路の変更は、どの方向から風波をうけて航走するかという相対的風向の変化がSV値に及ぼす影響として非常に重要である。針路の変更による相対的風向の変化のSV値への影響は、船速の変化と密接な関係があり、これらが連動してSV値の変動に大きく影響すると考えられている。しかし、今回の補正値の結果は、風速が5m/s前後のLine 1-6 (Fig.49)においては、針路の変更にもない補正値が変化する傾向がみられたが、風速が8m/s前後のLine 13-18においては変針点付近での補正値の変化は顕著ではなかった。これは、1) 今回の調査においては、ほぼ同一の船速 (10ノット) に保って行ったため重回帰式に船速の影響が取り入れられなかったこと、2) Line 13-18においては風速が大きかったため船速を適宜8ノットに減速したため、針路の変更にもなう相対的風向の変化によるSV値への影響が顕著でなかったためと推察された。また、相対風速ではなく真風速を用いたため、針路変更による風速変化の影響がほとんどなかったと考えられた。

補正値を加えることによって得られたデータがどのように変化したかを考察するため、突風などの急激な気象変化における補正効果を調べた。データは全層 (10-200m層) のSV値を平均した平均体積散乱強度 (SV値) を用いた。Fig.61 (a)は補正値であり、Fig.61 (b)は補正を行う前のデータで、Fig.61 (c)は補正後のSV値の変化を示している。部分的にSV値が不連続な変化をしているが、Fig.61の矢印で示した区間では、補正値を加えることにより不連続であったデータがかなり連続したデータとして再現された。この場合、生物の分布が不連続でないことがわかり、補正値を加えることによる効果を明瞭に認めることができた。また、現存量の推定では、今回の補正値の平均値が1.8dBで、資源量に置換えると約1.5倍になる。したがって、補正をしなければ資源量は約50%少なくな見積られることが明らかになった。Berg *et al.* (1982) に代表されるような従来の補正方法は、風速や海況に対する一律的な補正方法であるため、定常的な風が吹いている場合や均一に分布している魚群に対しては有効であるが、突風などによって風が不規

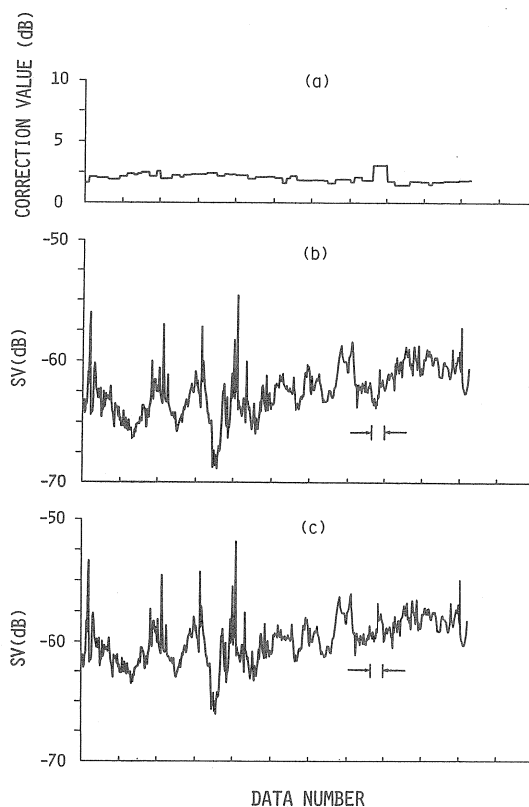


Fig. 61. Time series variation of the correction value (a), observed SV (b) and that after correction (c), to show effectiveness of making correction for abrupt change in survey conditions, as an example.

則に変化し、しかも魚群が均一な分布をしていない場合には不必要な補正をする場合が生じ、逆に、多くの誤差を生じさせる原因ともなる。したがって、このことがフィールドデータに対する補正の重要性が認識されながらも、定量的補正が一般的に行われなかった一因とも考えられた。しかし、本研究における補正方法は、刻々と変化する調査条件に対応した補正値を求めるため、不均一な魚群分布に対しても適正な補正を行うことができ、不必要な補正による誤差が含まれない。したがって、本研究における補正方法は、従来解決できなかった調査条件の変化に対応した補正値を定量的に求める最初の試みとして非常に有効な手法と考えられる。

得られた結果は限られた海況のもとで行われた計測結果

であるが、しかし、このような補正方法は調査船、海況が変化しても適用できるはずである。したがって、本研究における成果は音響調査において調査条件の変化にともなうSV補正値を適正に導く手法として非常に役立つと考えられる。

第7章 論議

資源量評価を目的としたこれまでの音響的調査手法に関する研究は、限定した魚種を対象とし、しかも風向、風速などの調査条件の変化を特に考慮しなくてよい湖沼や、限られた内湾を調査水域として行われることが多かった（白石, 1972; 田中, 1978; 大川・三瀬, 1978; 欧, 1980; 立川ら, 1984; 飯田, 1987）。一方、マイクロコンピュータを中心とする半導体技術の急速な進歩は、従来の魚探機を定性的な計測器から海洋生物の定量的計測が可能な計量型魚探機へと発展させてきた。このように急速な計測機器の性能向上に支えられて、資源量調査を目的とした音響調査が数多く実施されるようになってきた（例えば、水産庁研究部, 1985; 1986; 1987; 水工研, 1988）。しかし、計測器を用いたこれらの音響調査において、魚種判別の問題や、海況の変化にともなうエコーレベルの減衰によるSV値の補正については、その重要性が指摘されながらも、具体的方法や補正方法が検討されないうまま調査が実施されてきた。このため、資源量推定値に多くの誤差を含むこととなっている。そこで、資源量評価の精度向上に関し、最も基本的で重要な問題は、対象魚種の形態学的・生態学的特徴を考慮した最適機種を選定、および、それらの計測器を実際の調査現場で適正に使用する方法と、得られたデータの処理解析をいかにするかであろう。

本研究は、これまで述べてきたように、音響的調査手法の精度・確度を考慮した資源量評価に関する計測法確立を目的とし、音響的な特性がほとんど調べられていないうえに従来精度の高い資源量評価法がなかった魚類マイクロネクトンのキュウリエソを対象として、音響的手法に関する基本的問題点を個別に解決する一方で、それらを総括して対象生物に適した形の計測法を構築することにある。この考えに従えば、本研究は音響計器を用いた資源量評価の調査手法の確立に関し、湖沼などで行われていた緩やかな条件における研究から条件が厳しい実際のフィールドへ継承発展させる研究として位置づけられる。

本研究では、第2章で対象魚種の形態学的・生態学的特性に基づいた適正周波数の選定、第3章でTSの測定、第

4章で中層トロールによるサンプリング並びに水温観測と音響情報を組み合わせた魚種判別のための識別基準の設定など基礎的な問題をすべて包含し、さらに、第5章、第6章で資源量計測の基礎となるSV値の補正について調査条件・船体動揺を考慮した航走方法と補正法を確立することにより、音響的調査手法の確立に関する検討を行った。各章で扱った問題に関する論議はすでに行った。したがって、ここでは魚類マイクロネクトンに対する音響的調査手法に関する検討を通して未利用資源および有用魚種に関する音響調査に対して本研究の手法を適用する際の課題についての論議を進める。

1. 計測システムの選定と較正

従来、音響調査を実施するにあたり、対象魚種の形態学的・生態学的特性に基づいた周波数の選定が適切に行われていなかったと考えられる。最近、マイワシなどの浮魚を中心とした音響調査（水産庁研究部, 1985; 1986; 1987）が多く行われているが、使用周波数の選定に関する検討例は見あたらない。一方、西村(1969)、古澤(1990)らの周波数選定に対する考え方は、設計者としての立場から、SN比を最大にするための最適周波数の検討であるが、計量魚探機としての最適な標準周波数の決定であった。これらの研究は、どの対象魚種と海域（水深）においても使用できるような汎用性のある周波数としてそれを求めている。しかし、生物の資源量を求めることが目的であれば、対象生物の形態と分布生態に応じて周波数帯を考えるべきであろう。この観点から本研究では対象魚（キュウリエソ）の反射体としての周波数特性や、分布生態に基づき、鰐モデル、SN比、吸収減衰係数をはじめとする各種減衰を検討することにより資源量評価のための適正周波数帯を明らかにした。その結果、音響調査実施に際して対象魚種に応じた周波数帯を、事前に検討する必要があることがわかった。

それぞれの海域では重要魚種と分布深度は限られている。したがって、それらの魚種について上記の諸項目に関する基礎データを作り、最適機種の選定を一度行っておけば、調査航海ごとに検討し直す必要性は少ないと考えられる。

2. ターゲットストレングスの測定

音響調査で得られるSV値すなわち体積散乱強度を資源量に換算するためにはターゲットストレングス（TS）を与えなければならないが、この値に $\pm 3\text{dB}$ の誤差があれば推

定される資源量は2倍から1/2に評価されることになる。したがって、TSの推定に対しては多くの研究が行われて、有用魚種に関するTSのデータベースが整備された(水工研, 1984)。しかし、TSの値は、同一魚種であっても、使用周波数、体長、体重、生息深度、姿勢の違いなどによりその音響的動態はさまざまで、汎用性のある理論の構築を困難にしてきた。最近のTS測定はデュアルビーム法(Ehrenberg, 1974)やスプリットビーム法(Foote *et al.*, 1984)などによる自然状態における直接推定や、回転楕円体理論モデルによる推定(Furusawa, 1988)も行われるようになりその推定精度は著しく向上した。しかし、キュウリエソのように未利用資源で、生息深度が深くしかも小型の生物に関するTSについての研究例はほとんどみられず不明な点が多い。したがって、本研究においてはTS測定の最も基本的な測定法である懸垂法を用いて行った。得られた推定値は宮野鼻ら(1985)がハダカイワシを対象として計測した値とほぼ近い値を示した。また、鰹を計測することにより鰹と体長に線形な関係があることも明らかにされた。このように得られた結果は日本海におけるキュウリエソの資源量推定のための貴重な基礎データとなった。また、今後鰹計測にx線写真などを活用し、鰹の測定精度をさらに向上させることができれば鰹からTSをさらに精度よく推定できる可能性が考えられた。

それぞれの海域では資源量評価の対象となる魚種に限られており、各漁場漁期における漁獲対象の体長組成は既知である。しかも、漁業の対象となる魚種はここで扱ったキュウリエソよりはるかに大型でしかも測定用の標本を入手しやすい。したがって、既知のデータベースを利用するか、事前に必要データを揃えておけば各調査ごとに準備する必要はないと考えられる。

3. エコグラムと環境要因による魚種判別

第4章で述べたとおり魚種判別の問題は、音響資源調査における基本的な問題であるにもかかわらず、いままで具体的な判別法が確立されていなかった。最近では判別関数を用いる方法(Vray *et al.*, 1990)や、ワイドバンド魚探機による周波数特性を利用した方法(Simmonds and Armstrong, 1990)など新しい試みがなされている。本研究の対象生物であるキュウリエソは漁業の直接の対象でないため、魚種判別のための基礎データが十分でない。したがって、本研究では基礎データ蓄積の第一歩として中層トロールによるサンプリング、並びにCTD観測と音響情報を組み合わ

せることにより魚種判別のための識別基準作りを行った。このように、生態的知見が十分でない種を対象とする場合は本研究のような手法が有効となろう。今回の識別基準は3つの要素(映像パターン、水温、音響強度)で行ったが、さらに反射エコーのスペクトルなどの情報を加味することができればより高精度の魚種判別が期待できる。

一方、対象が有用魚種である場合には、生態的知見はすでに集積されており、魚種判別についての漁労長などの豊富な経験や既存のデータを活用できる。しかも、多くの調査船は対象魚種に対する漁労設備も備えており経験も豊富なことから、キュウリエソなどの未利用資源に比べると魚種判別は容易であろう。しかし、これらは補助資料にすぎない。したがって、対象魚種に対する魚種判別に関しては、実際の音響調査で使用する機種を用い、本研究で行ったような水温との関係を調べるとともに、多くの対象魚種に対する分布生態に関する知見に基づいた人工知能を応用した魚種判別のデータベースの構築が今後考えられる。

4. 船体動揺とエコーレベルの変動および調査条件の変化によるSV値補正式

湖沼や内湾で行われる音響調査と、海上で行われる調査の大きな違いは、海況の変化による調査条件の変化がSV値に及ぼす影響を特に考慮する必要があるかどうかという点である。調査現場において、風速や相対的風向の変化の影響が無視できないと認識されながらも、いままで具体的な補正がほとんど行われていなかった。このような問題を回避するため曳航式送受波器を用いる例もみられる(古澤・高尾, 1990)。しかし、多くの音響調査が船底装備型魚探機で行われていることを考えれば、これらの問題は音響調査を行う際に解決しなければならない基本的問題であると考えられる。

音響調査のプラットフォームとなる調査船の動揺特性は調査船ごとに異なっており、船底に装備されている送受波器も同様の影響を受ける。したがって、調査船ごとにその特性を明らかにする必要がある。さらに、調査条件の変化がSV値の減衰に及ぼす影響を明らかにしておく必要がある。調査船ごとに本研究で示したように、減衰の少ない最適な航走方法、船速を知り、補正実験式を求めておけば次項で述べる調査条件の変化にともなう補正値を導きだすことができる。したがって、音響調査を実施する調査船は事前に船体較正を行い、必要な基礎データを得ておく必要がある。しかし、この補正式はそれぞれの調査船についてあらかじめ

め調べておけば音響調査を行う都度作り直す必要はない。

5. 音響的調査手法の適用

第5章、第6章では、船速、風向、風速の変化がSV値の減衰に大きく影響することを示した。したがって、音響調査の実施にあたって、調査条件によるSV値の減衰を極力少なくするためには、風を船の正横ないし後方から受けるように調査定線の設計を行うなどの方策を考えれば精度を上げることができる。多くの音響調査において調査定線は出港前に定められている。しかし、この考え方に従えば、現場付近において風向を考えて選択できるようないくつかの案を作成しておく必要がある。

一方、SV値の補正值を求めるためには、魚群の分布が全く見られない海域を航走し、生物の影響がない最小SV値の抽出を容易にすることや補正用のデータをとるため数分間ずついくつかの方向で航走するなどを考慮する必要がある。さらに、海底判別回路などの機械的問題や、生物の影響の除去については、魚探機のエコグラムを十分検討し慎重に行う必要がある。すなわち、前者の影響の除去については機械的操作によってできるので客観性がある。しかし、後者の生物の影響の除去については機械的な操作だけでは、基準となるデータの抽出は困難である。したがって、本研究で述べたエコグラムと対照する確認作業は、データ抽出上、極めて重要な作業として十分検討して慎重に行う必要がある。

第6章において隠岐諸島周辺におけるキュウリエソの現存量は平均重量密度が $30.9\text{g}/\text{m}^3$ と推定された。一方、Gjøsaeter (1978) はインテグレート付魚探機を用いて英国沖、ノルウェー南部沖でキュウリエソの現存量調査を行い、その分布密度が一般的には $10\text{--}35\text{g}/\text{m}^3$ 程度の生物量であると報告している。しかし、この報告ではいくつかの仮定を設けている。まず第一にキュウリエソの超音波反射特性が未知のため、他魚種 (capelin) の値を用いたこと。第二に反射エコーのすべてをキュウリエソとみなしたことである。また使用周波数が 38kHz であることから、共振の影響により幾分高い反射エコーが受波されるため、資源量の評価をやや過大に評価している可能性がある。その反面、調査条件の変化にともなう補正については全く検討されていないことから過小評価となる。ここで、本研究で得られた推定値と、Gjøsaeter (1978) が行ったノルウェー沖でのキュウリエソの資源量推定結果とはほぼ同じ値となっているが、計測精度が全く異なることや、日本海とノルウェー沖での

生態系の構造と基礎生産量に違いがあるはずなので (Gjøsaeter・川口, 1981; 沖山, 1985), 結果の比較は避けるべきであろう。一方、ノルウェー沖におけるキュウリエソ資源の季節的変動は顕著ではないと報告されている (Gjøsaeter, 1978)。したがって、季節変化の影響は考えなくてよいと考えられる。

本研究では、昼間のデータだけを扱った。これは、夜間にはキュウリエソが群を解き、他のプランクトン層やイカ、エビなどのマイクロネクトンと混在するため、エコグラムのなかからキュウリエソの映像を分離することが困難であったためである。夜間における魚種判別法が容易な魚種を対象とする場合は、限られた調査期間内に広範囲な調査が可能となる。一方、主要有用魚種が調査対象の場合、特に、その漁業が夜間にも行われる場合には、漁労長などが集積した魚種判別法が活用できるので夜間にも連続して観測できる可能性がある。

以上、音響的調査手法についてキュウリエソなどの未利用資源を中心に検討を進めてきたが、音響的調査手法の確立を考える場合、対象とする魚種、海域などが変化すれば当然その具体的な方法は異なってくる。しかし、基本的な系統的アプローチの手法については変わらないと考えられる。したがって、日本海におけるキュウリエソを対象として検討した手法は、対象とする魚種が変わっても幅広く適用できると考えられる。また、調査条件の変化に対応した補正方法の確立は、音響調査を行うすべての調査船に適用できるはずであり、従来解決できなかった定量的補正值を求める手法として極めて有効であると考えられる。

本研究の成果は魚類マイクロネクトンをはじめとした音響的特性が未知の魚種に対する音響調査の系統的アプローチのためのモデルとして、また、有用魚種の資源量評価においても今後有効に活かされると考えられる。

謝 辞

本研究を取り纏めるにあたり、終始懇切なる御指導、御鞭達を賜り、さらに本論文の御校閲をいただいた東京大学海洋研究所教授石井丈夫博士に謹んで感謝の意を表す。同研究所助教授青木一郎博士には本研究の遂行上多くの御助言と御指導をいただいた。ここに深く感謝申し上げる。また、東京大学農学部教授清水 誠博士、東京大学海洋研究所教授杉本隆成博士、同所助教授岸野洋久博士には本論文の御校閲をいただくとともに、有益な御教示をいただいた。厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたっては、前水産大学校長青山恒雄博士、前同校広瀬 誠教授、同校名誉教授前田 弘博士、同教授竹下貢二博士、同校内田和良助教授から種々の御理解ある便宜と御指導をいただいた。特に、前田 弘名誉教授には終始有益な御助言と御鞭達に加えて本論文の御校閲をいただいた。また、内田和良助教授には数々の御助言をいただいた。長崎大学水産学部名誉教授柴田恵司博士には、著者が本研究に携わるきっかけと御助言をいただくとともに、数々の御便宜をはかっていただいた。これらの方々への御高配に対し厚く御礼申し上げます。

本研究で用いた資料の多くは水産大学校練習船耕洋丸、および天鷹丸によって観測、計測されたものである。著者の乗船調査にあたっては、元耕洋丸船長片岡昭吉氏、元天鷹丸船長隅川芳雄氏、前耕洋丸船長大村千之氏、耕洋丸船長乾 栄一氏、前耕洋丸首席一等航海士武田靖昭氏（現北海道区水産研究所北光丸船長）、並びに、士官、乗組員の方々の暖かい御理解と御協力をいただいた。特に、耕洋丸首席一等航海士実藤 了氏には共同研究者として多くの現場計測の御協力と御支援をいただいた。ここにこれらの方々に心から感謝申し上げます。また、宮城暁美氏には図作成について多大の御協力をいただいた。ここに記して御礼申し上げます。

最後に、著者の東京大学海洋研究所での国内留学中、数々の御配慮をいただき、その後も、数々の御指導と御鞭達を賜った前漁業測定部門、川口弘一博士（現東京大学海洋研究所プランクトン部門教授）、山下 洋博士（現東北区水産研究所室長）に厚く御礼申し上げます。また、同部門助手小松輝久博士、同技官稲垣 正博士、青山碩子（旧姓清水）技官はじめ大学院生諸兄には、有益な御助言並びに御便宜をいただいた。改めてこれらの方々へ心より御礼申し上げます。

文 献

- 赤池弘次 (1976) : 情報量基準. 数理科学, **153**, 5-11.
- 赤池弘次・中川東一郎 (1987) : ダイナミックシステムの統計的解析と制御. サイエンス社, 東京, 30-189.
- 天下井 清・川島利兵衛 (1984) : 船尾トロール漁船におけるワーブ張力の予測について. 日水誌, **50**, 1487-1494.
- Anderson, V.C. (1950) : Sound scattering from a fluid sphere. J. Acoust. Soc. Am., **22**, 426-431.
- Andreeva, I.B. (1964) : Scattering of sound by air bladders of fish in deep sound-scattering ocean layers. Sov. Phys. Acoust. **10**, 17-20.
- 青木一郎・杉本隆成 (1988) : 音響調査による熊野灘沿岸域の魚群分布と環境. 日水誌, **54**, 1747-1755.
- 青木一郎・稲垣 正・三谷 勇・石井丈夫 (1989) : カタクチイワシの漁況予測へのエキスパートシステムへの応用. 日水誌, **55**, 1977-1983.
- 青木一郎・三谷 勇 (1991) : カタクチイワシ漁況予測のための知識工学的モデリング. 水産海洋研究, **55**, 1-8.
- 青山恒雄・石井丈夫・青木一郎・稲垣 正 (1982) : ネクトンおよびマイクロネクトンのクイックアセスメント技法開発に関する基礎的研究. 昭和56年度科学研究費補助金 (一般研究B) 研究成果報告書, 106 pp.
- Baird, R.C., D.F. Wilson, R.C. Beckett and T.L. Hopkins (1974) : *Diaphus taaningi* Norman, the principal component of a shallow sound-scattering layer in the Cariaco Trench, Venezuela. J. Mar. Res., **32**, 301-312.
- Beamish, P. (1971) : Quantitative measurements of acoustic scattering from zooplankton organisms. Deep-Sea Res., **18**, 811-822.
- Berg, T., A. Løvik and J. Dalen (1982) : Increased precision of echo integration recordings under weather conditions. FAO Fisheries Report, No. 300, 45-51.
- Brooks, A.L. (1977) : Oceanic sound scattering prediction. Edited by N.R. Anderson and B. J. Zahuranec. Plenum Press, New York, 565-590.
- Burczynski, J. (1982) : Introduction to the use of sonar systems for estimating fish biomass. FAO Fish. Tech. Pap., **191** Rev. 1, 1-89.
- Dalen, J. and A. Løvik (1981) : The influence of wind-induced bubbles on echo integration surveys. J. Acoust. Soc. Am.,

- 69, 1653-1659.
- Davis, I.E. (1973) : Attenuation of sound by schooled anchovies. *J. Acoust. Soc. Am.*, **54**, 213-217.
- Ehrenberg, J.E. (1974) : Two applications for a dual-beam transducer in hydroacoustic fish assessment system. 1972 IEEE Conf. on engineering in the ocean environment, **1**, 152-155.
- Elliott, L.M. (1971) : Some methods for the statistical analysis of samples of benthic invertebrates. *Sci. Publ. Freshwat. Biol. Assoc. Ambleside, U.K.*, No.25.
- Fisher, F.H. and E.D. Squier (1975) : Observation of acoustic layering and internal waves with a narrow-beam 87.5kHz echo sounder. *J. Acoust. Soc. Am.*, **58**, 1315-1317.
- Foote, K.G. (1978) : Analysis of empirical observation on the scattering of sound by encaged aggregation of fish. *FiskDir. Skr. Ser. HavUnders*, **16**, 422-455.
- Foote, K.G. (1980) : Averaging of fish target strength functions. *J. Acoust. Soc. Am.*, **67**, 504-515.
- Foote, K.G. (1981) : Absorption term in time-varied gain functions. *FiskDir. Skr. Ser. HavUnders*, **17**, 191-213.
- Foote, K.G., F.H. Kristensen and H. Solli (1984) : Trial of a new, split-beam echo sounder, ICES C.M.1984/B: 21.
- Foote, K.G. and E. Ona (1985) : Swimbladder cross sections and acoustic target strengths of 13 pollack and 2 saithe. *FiskDir. Skr. Ser. HavUnders*, **18**, 1-57.
- Foote, K.G. (1985) : Rather-high-frequency sound scattering by swimbladdered fish. *J. Acoust. Soc. Am.*, **78**, 688-700.
- Francois, R.E. and G.R. Garrison (1982a) : Sound absorption based on ocean measurements. Part I : Pure water and magnesium sulfate contributions. *J. Acoust. Soc. Am.*, **72**, 896-907.
- Francois, R.E. and G.R. Garrison (1982b) : Sound absorption based on ocean measurements. Part II : Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Am.*, **72**, 1979-1890.
- 古澤昌彦・宮野鼻洋一 (1983) : 計量用魚群探知機の船間校正及び走航減衰調査. *水工研報告*, **4**, 61-71.
- Furusawa, M., K. Ishii, Y. Miyano-hana and Y. Maniwa (1984) : Experimental investigation of an acoustic method to estimate fish abundance using culture nets. *Jpn. J. Appl. Phys.* **23** Suppl. 23-1, 101-103.
- 古澤昌彦 (1985) : 魚群探知機の TVG の検討. *水工研技報 (漁船工学)*, **6**, 33-49.
- Furusawa, M. (1988) : Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength. *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)* **9**, 13-24.
- 古澤昌彦・高尾芳三 (1988) : 計量魚探機の設計方法. *日本音響学会講演論文集*, 827-828.
- 古澤昌彦 (1989) : 気泡と音波(鰾と魚による超音波散乱). *海音誌*, **16**, 181-197.
- 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. *水工研報告*, **11**, 173-248.
- 古澤昌彦・高尾芳三 (1990) : 総合計量魚探システム, 写真測量とリモートセンシング, **29**, 139-147.
- Gjøsaeter, J. (1978) : Resource study of mesopelagic fish. Ph.D. Thesis, University of Bergen, Bergen, 203 pp.
- Gjøsaeter, J.・川口弘一 (1981) : 世界の中層性魚類の資源量に関する総説 (川口弘一訳). *海洋水産資源開発センター*, 東京, 157 pp.
- Greenblatt, P. (1982) : Distribution of volume scattering observed with an 87.5kHz sonar. *J. Acoust. Soc. Am.*, **71**, 879-885.
- Greenlaw, C.F. (1977) : Backscattering spectra of preserved zooplankton. *J. Acoust. Soc. Am.*, **62**, 44-52.
- 濱野 明・実藤 了・水谷壮太郎・隅川芳雄・内田和良 (1988) : 後方体積散乱強度に及ぼす船体動揺と調査条件の影響. *日水誌*, **54**, 1533-1543.
- 濱野 明・実藤 了・内田和良 (1990) : 音響資源調査におけるエコーレベルに及ぼす船体動揺の影響. *日水誌*, **56**, 1089-1098.
- 濱野 明・内田和良 (1992) : キュウリエソ (*Murollicus muelleri*) の 88kHz 帯計量魚探機によるターゲットストレングスの測定. *水産海洋研究*, **56**, 283-293.
- 濱野 明・内田和良・武田靖昭 (1992) : 音響的調査手法による日本海産キュウリエソの資源量評価のための魚種判別法について. *水産海洋研究*, **56**, 295-308.
- Hersey, J.B. and R.H. Backus (1960) : Sound scattering by marine organisms. *In*, The sea, Vol.1, ed. M. N.Hill, Interscience, New York, 498-539.
- Holliday, D.V. and R.E. Pieper (1980) : Volume scattering strengths and zooplankton distributions at acoustic frequencies between 0.5 and 3MHz. *J. Acoust. Soc. Am.*, **67**, 135-146.
- 飯田浩二 (1987) : 魚群探知機を用いた低密度魚群の資源量

- 推定および生態計測に関する研究. 北海道大学学位(博士)請求論文. 187 pp.
- 飯田浩二(1988):音響資源調査法の基礎. 水産音響シンポジウム講演資料, 1-10.
- 稲垣 正(1987):魚群探知機による生物量の測定及び海洋構造の計測. 海音研誌, **14**, 132-134.
- 石井 憲・古澤昌彦・宮野鼻洋一(1983):魚群減衰係数の測定. 水工研技報(漁船工学), **4**, 73-94.
- Isaacs, J.D. and L.W.Kidd (1953): Isaacs-Kidd midwater trawl. Scripps Inst. Oceanogr. Ref., (SIO Ref. 53-3), 21 pp.
- Johannesson, K.A. and R.B.Mitson (1985): 水産音響学(柴田恵司・見元孝一訳). 海洋水産資源開発センター, 149-171.
- Johnson, R.K.(1977a): Sound scattering from a fluid sphere revisited. J.Acoust.Soc.Am., **61**, 375-377.
- Johnson, R.K.(1977b): Acoustic estimation of scattering-layer composition. J.Acoust.Soc.Am., **61**, 1636-1639.
- 川口弘一(1969):西部北太平洋における魚類マイクロネクトンの日周垂直移動. 日本プランクトン学会報, **16**, 63-66.
- 川口弘一(1974):海洋プランクトン(丸茂隆三編). 東京大学出版会, 東京, 173-189.
- 川口哲夫(1971a):日本海におけるキュウリエソに関する研究-I, 魚群探知機に記録されるキュウリエソ魚群映像と日周期活動. 鳥取水試報告, **17**, 37-54.
- 川口哲夫(1971b):日本海におけるキュウリエソに関する研究-II, 魚群探知機の映像よりみたキュウリエソ魚群の生息環境. 鳥取水試報告, **17**, 55-61.
- 川島利兵衛・天下井 清・増田紀義(1968):漁船の耐航性について(その1)波浪中の船体運動の立体表示. 北大水産彙報, **18**, 345-356.
- 川島利兵衛・天下井 清(1976):多変量ARモデルによる船体運動と漁具との関係について. 日本航海学会論文集, **54**, 93-98.
- Kaye, G.T.(1978): Backscattering from discrete targets at 87.5kHz. J.Acoust.Soc.Am., **64**, 556-562.
- 北川敏男・増山元三郎編(1976):統計数値表. 九州大学理学部数学教室内統計科学研究会, 生産技術センター, 104-125.
- Kinzer, J.(1970): On the contribution of euphausiids and other plankton organisms to deep scattering layers in the eastern north Atlantic. *In*, Proc. Int.Symp.Biol. Sound Scattering in the Ocean, ed. G.B.Farquhar, Maury Center for Ocean Science, 476-489.
- Lahore, H.W. and D.W.Lytle (1970): An echo integrator for use in the estimation of fish populations. Circ.Fish.Res.Inst.Univ.Wash., (70-1), 38 pp.
- 李 国添(1985):音響システムによる海洋生物量のクイックアセスメント技法に関する基礎的研究. 東京大学博士学位論文, 262 pp.
- 李 昊在・鈴木恒由・飯田浩二(1987):ケージ内魚群密度と超音波散乱強度との関係について. 北大水産彙報, **38**, 253-258.
- Leroy, C.C.(1969): Development of simple equations for accurate and more realistic calculation of the speed of sound in sea water. J.Acoust.Soc. Am., **46**, 216-226.
- Love, R.H. (1975): Predictions of volume scattering strengths from biological trawl data. J.Acoust. Soc.Am., **57**, 300-306.
- Love, R.H.(1977): Target strength of an individual fish at any aspect. J.Acoust.Soc.Am., **62**, 1397-1403.
- Lytle, D.W. and D.R.Maxwell (1982): Hydroacoustic assessment in high density fish schools. FAO Fish.Rep., **300**, 157-171.
- 間庭愛信(1962):mm波超音波を応用した水中測器の開発に関する研究. 漁船研研報, **4**, 1-137.
- 三谷 勇(1987):相模湾奥部シラス漁場におけるカタクチイワシ魚群の仔稚魚組成の魚探映像による判定. 水産海洋研報, **51**, 120-123.
- Mitson, R.B.(1983): Fisheries sonar, Fishing News Books, Farnham, Surrey, England, 287 pp.
- 宮野鼻洋一・石井 憲・古澤昌彦・津久井文夫(1985):小ケージを用いたサクラエビ, ハダカイワシのターゲットストレングスの測定. 水工研技報(漁船工学), **6**, 111-122.
- Moore, B.H. (1950): The relation between the scattering layer and the Euphausiacea. Biol. Bull., **99**, 181-212.
- 向井 徹・鈴木恒由・佐野典達・飯田浩二(1988):ヒメマスのターゲットストレングスにおよぼす鰯の影響について. 北大水産彙報, **39**, 106-114.
- Murphy, S.R., G.R.Garrison and D.S.Potter (1958): Sound absorption at 50 to 500kc from transmission measurements in the sea. J.Acoust.Soc.Am., **30**, 871-875.
- 西村三郎(1959):1955年春季能登半島近海におけるキュウ

- リエソの産卵ならびに卵・仔魚の生態. 日水研年報, **5**, 61-75.
- 西村 実 (1969): 魚群探知機の最適周波数に関する研究, 学位論文. 東北大学, 仙台, 155 pp.
- Novarini, J.C. and D.R. Bruno (1982): Effects of the sub-surface bubbles layer on sound propagation. *J. Acoust. Soc. Am.*, **72**, 510-514.
- 大川 浩・三栖 寛 (1978): 魚群探知機により魚群量を推定する一つの試み. 西水研研報, **51**, 141-157.
- 沖山宗雄 (1971): 日本海におけるキュウリエソの初期生活史. 日水研研報, **23**, 21-53.
- 沖山宗雄 (1978): 日本海における中・深層性魚類マイクロネクトン・イカ類マイクロネクトンの生物学. 海洋科学, **109**, 895-900.
- Okiyama, M. (1981): Abundance and distribution of eggs and larvae of a sternoptychid fish, *Maurolicus muelleri* in the Japan Sea, with comments on the strategy for successful larval life. *Rapp. P.-V. Réun. Cons. Int. Explor. Mer*, **178**, 246-247.
- 沖山宗雄 (1985): 日本海々域の生物学的特性. 対馬暖流-海洋構造と漁業, 恒星社厚生閣, 東京, 42-55.
- 奥島基良 編 (1984): 海洋音響-基礎と応用-, 海洋音響研究会, 東京, 259 pp.
- 大崎絢一・菊池 進・緒方正名 (1981): コンピュータプログラムによる統計技術, 1. 同文書院, 東京, 91-97.
- 欧 錫祺 (1980): 魚群探知機による個体記録の反射パルス数に基づく魚群量推定. 東京大学学位 (博士) 請求論文. 203 pp.
- Pieper, R.E. (1979): Euphausiid distribution and biomass determined acoustically at 102kHz. *Deep-Sea Res.*, **26**, 687-702.
- Plueddemann, A.J. and R. Pinkel (1989): Characterization of the patterns of diel migration using a Doppler sonar. *Deep-Sea Res.*, **36**, 509-530.
- Samecto, D.D. (1976): Distribution of sound scattering layers caused by euphausiids and their relationship to chlorophyll *a* concentration in the Gulf of St. Lawrence estuary. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **33**, 681-687.
- Sasakura, T., H. Shiraishi, H. Iino, K. Minohara and H. Aoki (1984): Acoustic system for the assessment of fisheries. *FAO Fish. Circ.*, **778**, 31-43.
- 笹倉豊喜 (1990): 準理想ビーム送受波器の最適設計と水産資源推定への応用に関する研究, 学位 (博士) 論文. 東京水産大学, 東京, 109 pp.
- 柴田恵司 (1963): 魚群探知機に現われた記録解析の試み-IV. DSLとマグロ類の食物環境について, 長大水研報, **15**, 59-81.
- 柴田恵司・西ノ首英之・天下井 清 (1970): 船体動揺と海底 echo 音圧の変動-I. 日本航海学会誌, **44**, 23-28.
- Shibata, K. (1970): Study on details of ultrasonic reflection from individual fish. *Bull. Fac. Fish., Nagasaki Univ.*, **29**, 1-82.
- Shibata, K. (1987): Fluctuation of seabed echo due to ship's motion. *International Symposium on Fisheries Acoustics*, **113**, Seattle, USA.
- Shirakihara, K., K. Nakayama and Y. Komaki (1986): Acoustic estimate of krill biomass in R.V. Kaiyo maru Sibex I survey area (Indian Sector of the southern Ocean).
- 周東健三 (1982): 日本海の場合 (II). 海と空, **57**, 171-186.
- 白石芳一 (1972): 魚群探知機による湖沼調査法. 海外技術協力事業団, 130 pp.
- Simmonds, E.J. and F. Armstrong (1990): A wideband echosounder: measurements on cod, saithe, herring and mackerel from 27 to 54kHz. *Rapp. P.-V. Réun. Cons. Int. Explor. Mer*, **189**, 381-387.
- Stanton, T.K. (1982): Effects of transducer motion on echo-integration techniques. *J. Acoust. Soc. Am.*, **72**, 947-949.
- Strasberg, M. (1953): The pulsation frequency of non-spherical gas bubbles in liquids. *J. Acoust. Soc. Am.*, **25**, 536-537.
- 水産工学研究所 (1984): 国内・国外の TS 測定値一覧表, 178 pp.
- 水産工学研究所 (1988): 水産音響シンポジウム講演論文集, 110 pp.
- 水産庁研究部 (1985): 昭和58年度漁業資源評価システム高度化調査実施報告書, 344 pp.
- 水産庁研究部 (1986): 昭和59年度漁業資源評価システム高度化調査実施報告書, 393 pp.
- 水産庁研究部 (1987): 昭和60年度漁業資源評価システム高度化調査実施報告書, 382 pp.
- 鈴木恒由・伊藤 準 (1967): 北西部太平洋水域における DSL について-I. 垂直移動・水中照度およびプラン

- クトン量などについて. 日水誌, **33**, 325-337.
- 立川賢一・稲垣 正・春日清一・北島能房・田中昌一 (1984): 魚群探知機による霞ヶ浦のイサザアミ資源量の推定に関する研究. 国立公害研究所研究報告, **53**, 29-60.
- 竹下貢二・小川信次・三谷卓美・浜田律子・乾 栄一・久保田勝彦・築山一雄・濱野 明 (1987): 音波散乱 (SL) における生物サンプリング調査とマイワシ産卵群を対象とするサンプリング調査及び魚群量分布調査. 昭和60年度漁業資源評価システム高度化調査結果報告書, 223-251, 水産庁研究部.
- 田中 実 (1978): 魚群探知機による資源量推定法に関する基礎研究. 淡水区水研研報, **28**, 77-139.
- 内田和良・濱野 明・巽 重夫・広瀬 誠 (1986): 東シナ海大陸棚斜面における DSL について. 水産大研報, **34**, 105-114.
- Urlick,R.J.(1946): Principles of underwater sound. Nat. Def.Res.Comm.Div.6 Sum.Tech.Rep.7, 175-199.
- Urlick,R.J.(1979): 水中音響の原理 (土屋 明訳). 共立出版, 東京, 414 pp.
- Vray,D., G.Gimenez and R.Person (1990): Attempt of classification of echosounder signals based on the linear discriminant function of Fisher. Rapp.P.-V. Réun.Cons.Int.Explor.Mer, **189**, 388-393.
- Weston,D.E.(1967): Sound propagation in the presence of bladder fish. In Underwater Acoustics 2, ed. V.E. Albers, Plenum Press, New York, 55-88.
- 山口県 (1980): 昭和54年豊岡地区人工礁漁場造成事業調査結果報告書, 1-28.
- 山内保文 監修 (1986): 不規則現象論. 海文堂, 東京, 3-62.
- 和田時夫・中村好和・藤井 浄・入江隆彦・村田 守・新宮千臣 (1986): 昭和59年度漁業資源評価システム高度化調査結果報告書 (北海道区水産研究所), 9-61, 水産庁研究部.

Studies on the Acoustic Method for Estimating Biomass of Micronektonic Fish

by

Akira Hamano

Micronektonic fish are an important link of the productivity in marine environment, though are not included in the direct subject of fisheries. At the present time, an egg and larva production method has been mainly adopted to estimate its biomass. And a method to estimate it, including that by using acoustic approach, is in the stage hardly regarded to be established. The present study describes step by step ways to establish an acoustic survey method for biomass estimation. This is done by examination of acoustic signals from the target organism to correct for modification by environmental conditions presented during the field survey. This is accomplished by examination of characteristics of the acoustic signal and equipment and setting of criteria for sorting out echoes considered to be exclusively from the target organism.

Acoustic instruments and techniques for estimating the abundance of fish have shown a rapid and remarkable development in recent years. There remain many problems regarding the accuracy and precision of estimates obtained, especially, in correction methods for volume backscattering strength (SV) measured during field surveys and how to sort the information on target species from the echogram of the echo sounder.

Hitherto, many studies on the acoustic method were classified into (1) basic studies on underwater sound, (2) development of the instruments, and (3) the biological survey without adequate consideration of the instruments used. To establish an echo survey system for estimating the biomass of micronektonic fish with adequate precision, requires an integrated consideration of all three of these types of studies and is not restricted to any one type alone.

In the Japan Sea the target species was the sternoptychid fish, *Maurolicus muelleri*. As fundamental steps, the following problems were studied: (1) selection of an optimum frequency for measuring the biomass of this target species from morphological and acoustical points of view, (2) measurement of target strength (TS), and (3) sorting echoes of target species from echograms using a verification by midwater trawl. A new quantitative correction method for the influence of survey conditions on SV measured in field surveys was proposed. An acoustic survey was conducted, for the purpose of verifying the results of the systematic considerations outlined in the previous steps.

Maurolicus muelleri was studied as a specific target species, although it is only one species among several mesopelagic micronektonic organisms in the surveyed area, because it plays a leading role as the major vertical transporter of organic matter in the marine ecosystem. A clear understanding of the distribution and ecology of this species is very important clarifying an important mechanism contributing to the productivity in Japan Sea, and provides another reason why this species was chosen as the object of the present study.

The results obtained can be summarized as follows:

1. Selection and calibration of measurement system

In selecting an optimum frequency suitable for the target species, *Maurolicus muelleri* has several problems from biological and practical points of view. It is too small (about 4.5cm) as a target for echo survey, it exhibits a strong effect of resonance from its swimbladder, and its preference of habitat is mainly in deep water (150 – 250m) during daytime.

The acoustic resonance of the target species was estimated by using Weston and Andreeva's model for a swimbladder. It was found that a frequency beyond 60kHz was suitable to measure the biomass of this micronektonic fish (and swimbladder) because of a lack of resonance at higher frequencies. The selection of the optimum frequency in light of its distribution and ecology also was determined by using the sonar equations. From these considerations, it was clear that

- (1) the frequency band between 50 and 100kHz was suitable to improve S/N ratio (Signal to noise ratio) in the case of the present target species, and that
- (2) the frequency band below 100kHz was suitable for avoiding errors in the absorption coefficient.

Based on those considerations, it was determined that the frequency band from 50 to 100kHz was the most suitable one for measuring the biomass of the target species using a quantitative echo sounder.

2. Target strength measurement

In order to make it possible to apply the acoustic method to quantitatively estimate the abundance of the target organism, a mean target strength and its size dependence, were estimated experimentally by using an 88kHz quantitative echo sounder and by using Anderson and Urick's theory for a dissected swimbladder.

The volume backscattering strength (SV) at various densities of suspended fish (ρ individuals/m³) was measured. It was computed that the ρ to SV (dB) relationship could be expressed by the following highly significant linear equation:

$$SV = 8.99 \log \rho - 61.5 \quad (r=0.996, n=6) \quad (1)$$

This equation indicated that the mean target strength of this species was estimated to be -61.5 dB.

The size composition of fish changes depending on the surveyed area and season. It is necessary to know the relationship between standard length (L in cm) and target strength in order to expand the applicable range to results from the present experiment. Measuring the target strength (dB) of swimbladder cross sections, it was found that the target strength (depending on the standard length of fish) could be estimated using the following significant linear equation:

$$TS = 17.4 \log L - 69.6 \quad (r=0.452, n=46) \quad (2)$$

This result implied that the target strength of this species was nearly proportional to the

square of standard length and suggested the possibility of making size corrections for the mean target strength using composition information from the detected school.

3. Sorting echoes of target species from quantitative sounder echograms with verification by midwater trawl

One of the key elements to increase the accuracy of biomass estimation using quantitative echo sounders, is how to sort out the data for the target species from continuous records along transect lines.

The probable source of echoes was determined by midwater trawling aimed at various types of DSLs found in the area along 200m isobath off Oki Islands, in the summers of 1986 to 1989 and in November of 1989. Immediately before or after trawling, XBT and CTD casts were done to collect water temperature data.

Detailed examination of these records and vertical profiles of volume backscattering strength (usually the directly obtained analogue during an echo survey) made it possible to establish the following criteria to sort out the echo of the target species, *Maurolicus muelleri*, from the continuous records.

- (1) Sounding at night and dawn is unsuitable for biomass estimation, because of the difficulty in separating echoes from the target species from those due to other sources, as indicated by the results of trawling. Therefore, daytime sounding is preferable.
- (2) Sort the information from DSLs found in the layer deeper than 150m of the cold water area (below 7°C). As shown in Fig.30, DSLs with a catch of the target species and that without it were separated vertically and with respect to water temperature.
- (3) When DSLs are stratified into shallow and deep categories, the deep layer should be chosen, as can be shown by comparison of Trawl No.16 with No.26 (Table 7).
- (4) Adopt the information from the continuously recorded echoes of over -67 dB in small clusters, as indicated by Fig.31.

4. Correction of volume backscattering strength (SV) due to fluctuation in survey conditions by using multiple regression analysis

SV varies with survey conditions and the ship's motions. The effects of the motion of the research vessel on variation of echo level in an acoustic survey were investigated by measuring echo level from an acoustically stable seabed and using a multi-dimensional auto-regressive model in which the echo level was used as the output variable, incident angle, pitch, roll and acceleration in 3 dimensions as the input. In a bow sea the power spectra of echo levels showed a good correspondence to those of the ship's motions, which were mainly concentrated at 0.2 Hz.

The power contribution of Z axis acceleration to echo level variation was the highest among the 6 input variables. With an increase in the ship's speed, however, the correspondence of echo level variation to the ship's motions became obscured. In a following sea the echo level showed small variation without any clear correlation to the ship's motions. In order to find the optimum sailing condition for a quantitative echo survey, the influence of survey conditions, such as ship speed, wind direction, and wind speed on SV was also investigated using a multiple regression analysis. It was concluded that a speed between 6 and 8 knots was opti-

mum to reduce attenuation, though the result varied a little with wind direction, i.e., SV had a close relation to the speed of the vessel and the course of the vessel relative to the wind by considerably affecting the motion of vessel. In general, a beam sea to following sea is good sailing conditions for preventing attenuation of the echo level.

Even if circumstances do not allow the ship to sail along the above-mentioned recommended course, the multiple regression equations (the correction equation of SV) obtained is useful in making a correction of the SV in echo surveys for estimating the abundance of fish stocks.

5. Application to the practical echo survey

The method generally used to correct the observed values of SV was to adjust the observed values by adding or subtracting a constant value, in spite of the following 2 facts:

(1) the survey conditions including relative speed and direction of wind varied unintermittingly and irregularly or abruptly hour to hour or even minute and (2) the echoes from organisms other than the target were not distributed uniformly but rather in patches. The undesired echoes needed to be excluded from the counting.

Therefore, a correction method (proposed in the present report) in which this unintermitting variation and patch formation were taken into account by estimating the multiple linear regression equation of SV on the survey conditions using results obtained in parts of the survey area without any echo traces. It is expected that the estimated correction equation is not valid for all surveys without modification, and it is necessary to estimate the correction equation on a survey by survey basis. However, the method itself of estimation is applicable regardless of the conditions.

It was concluded that this correction method is very useful to get quantitative correction values corresponding to the variation of survey conditions, for the following reasons: from the echo survey carried out off Oki Islands in the Japan Sea, it was found that the correction values had a maximum value of 3.8 dB, and an average value of 1.8 dB, and that the biomass in the model area was estimated as 50% too low unless a correction using the proposed method had been applied. This is a remarkably large difference not only in the correction value but also in the estimated biomass. This fact is a good proof of the indispensability of careful correction of the observed SV due to the unintermitting fluctuation of the survey conditions, in which uncontrollable factors such as meteorological ones and unequal distribution of other objects are included.