

魚のターゲットストレングスの高精度推定に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 水産総合研究センター 公開日: 2024-10-02 キーワード (Ja): キーワード (En): echo sounder; target strength; reverberation volume; split-beam; echo trace analysis 作成者: 澤田, 浩一 メールアドレス: 所属: 水産工学研究所
URL	https://fra.repo.nii.ac.jp/records/2010770

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.



魚のターゲットストレングスの高精度推定に関する研究*1

澤田 浩一*2

Study on the Precise Estimation of the Target Strength of Fish*1

Kouichi SAWADA*2

Abstract Fish target strength is very important as a scale factor to estimate fish abundance from echo integration results in an acoustic survey, as information to estimate fish length and species, and as a parameter to design echo sounders.

In Chapter 2, several methods of target strength estimation are enumerated and the principal of fish length estimation method is presented. This chapter is the starting point of the following chapters.

In Chapter 3, the precise fish target strength pattern measurement system is developed in a tank. Both the preciseness and accuracy of this system are confirmed by the comparison between the target strength pattern measurements of the artificial targets and their exact theoretical calculations. The dorsal target strengths of five species are measured in this system and the precise target strengths available for the abundance estimation are shown.

In Chapter 4, the validity of the theoretical calculations based on the deformed cylinder model is confirmed. The model calculations based on the swimbladder shape obtained by a conventional soft X-ray system or a computed tomography imaging system agree well with the measurements.

In Chapter 5, the indexes for the preciseness of the target strength measurement *in situ* are proposed and the validity of these indexes is confirmed by measurements and computer simulations.

In Chapter 6, the estimation method of fish length and behavior is developed by combining the split-beam method with the echo trace analysis method. The validity of this method is confirmed by the computer simulation and the measurements in a tank and at sea. The effect of the motion of the transducer at sea is considered using a computer simulation.

In the last chapter, Chapter 7, a software for the analysis of the target strength is developed. It can analyze the target strength *in situ* with the proposed indexes and can estimate individual fish length and behavior, seeing the echograms and selecting the arbitrary area. The actual data obtained at sea is used and the estimation results by this software agree well to the fishing results.

This paper is a slightly modified version of the doctoral dissertation proposed to Tokyo University of Fisheries.

Key word: echo sounder, target strength, reverberation volume, split-beam, echo trace analysis

2001年9月26日受理 (Accepted on September 26, 2001)

水産総合研究センター業績 A 第11号 (Contribution No.A 11 from Fisheries Research Agency)

*1 東京水産大学審査学位論文 (掲載するに際し投稿規程に沿って一部修正した)

*2 水産工学研究所 〒314-0421 茨城県鹿島郡波崎町海老台7620-1 (National Research Institute of Fisheries Engineering, Ebikai, Hasaki, Kashima, Ibaraki, 314-0421, Japan)

目 次

第1章 緒 論

研究の背景
研究の目的
研究の概要

第2章 ターゲットストレングス(TS)の推定方法

緒 言
TS の定義と散乱振幅
TS 推定法とエコートレース解析法
体長推定の原理
結 言

第3章 水槽での精密なターゲットストレングス (TS) の計測

緒 言
材料と方法
結 果
考 察
結 言

第4章 鰐形状モデルによるターゲットストレングス (TS) 関数の推定

緒 言
材料と方法
結 果
考 察
結 言

第5章 自然状態でのターゲットストレングス (TS) 推定法の高精度化

緒 言
自然状態 TS 測定精度の指標
実海域試験
単体エコーの検出方法
エコーのコンピュータシミュレーション
結 言

第6章 エコートレース解析法の高度化

緒 言
エコートラッキング
コンピュータによるシミュレーション試験
標準球を用いた水槽実験
自然状態でのエコートレース解析例
結 言

第7章 音響手法による資源量, サイズ, 行動等の高精度推定

緒 言
ソフトウェアの概要
検証と応用
結 言

第8章 結 論

謝 辞
文 献

第1章 緒 論

研究の背景

1988年に1300万トンに達した日本の漁業生産量はその後減少を続け、1997年には741万トンとピーク時の6割弱となった(水産庁, 1999)。これは日本の漁獲の主要な部分を占める沖合漁業での漁獲の減少によるところが多い。この背景としては、漁業白書(水産庁, 1999)で指摘されているような、藻場や干潟の埋め立て、自然海岸の減少等に伴う繁殖や保育の場の喪失による資源の再生産力の低下、マイワシの資源量激減などにみられるような海洋環境の変化による自然変

動に加えて、漁船の大型化、漁労機器の高性能化による漁獲努力量の増大、資源管理の不徹底も指摘せざるをえない。

歴史の中で、科学の発展とともに、基幹となる産業は代わるのが常である。ましてや、過去、一度も基幹産業であった時代のない漁業についてはどうであろうか。もはや、重要ではないのであろうか。そこで、我が国における漁業について、経済、生活といった側面から眺めてみる。まず、経済面から見てみると、ピークの6割となった1997年においても、その漁業生産額は約2.2兆円であった。魚介類の輸入量は1998年において273万トン、額にして1.6兆円(総輸入額の4.6%)と世界第一位であった^{*1}。この輸入額は、原油類

^{*1}大蔵省 貿易統計(1998年度分)

(7.4%), 事務用機器(6.1%), 衣類・同付属品(5.2%)に続く4番目に位置し、テレビ、VTR、ビデオカメラなどの映像機器や音響機器を合わせた輸出額(総輸出額の3.4%に匹敵)にほぼ等しい。水産業は依然として重要な産業であることに変わりない。また、輸入量と漁獲量を合わせると、1996年時点で世界全体の生産量12,985万トンの約8%を消費していることになる。

国民の生活面から見ても、摂取する動物性タンパク質のほぼ4割を魚介類に依存している。また、魚介類は高タンパク低脂肪食品で健康に欠かせない機能性成分(ドコサヘキサエン酸、エイコサペンタエン酸、タウリン、カルシウム)などを多く含んでおり、魚介類は日本人にとって極めて重要な食料である。従って、率先して持続的な利用を進めるための技術開発や資源管理政策を行うことが、魚類の大量消費国として世界に対する責務であろう。

このような状況の下で国連海洋法が1993年に発効し、1996年には日本も批准した。これにより、自国の200海里水域内の水産資源については適正に管理し、有効に利用する義務が生じることとなった。そこで、日本では主要魚種(サンマ、スケトウダラ、マイワシ、マアジ、サバ類、ズワイガニ、スルメイカ)について、資源量評価に基づいた漁獲可能量(TAC)を設定し、その範囲内で漁獲を行うことになった。このため、これまでのような豊富な漁獲データに基づいた資源予測はできなくなる恐れがあり、漁獲によらない資源の評価法が求められている。また、資源の持続的再生産を続けながら採算の取れる漁業を行っていくためには、正確な資源量の推定に基づいて、水産資源の有効利用をはかる「資源管理型漁業」の一層の推進が必要である。さらに、近年では地球環境問題についての議論の活発化により、漁業が環境に及ぼす影響についても関心が高まっており、生態系として海洋を捉えていく必要が指摘されている。

漁獲技術についても、適切なサイズの魚種を必要とだけ獲る技術が必要であり、このためには、魚種やサイズの識別技術が必要とされる。音響手法は広い海域にわたる生物量を比較的短時間に測定できる点で有用であり、魚の量がエコー強度に比例する(Foote, 1983a)ことを利用したエコー積分法が実用化されて以来、重要な資源調査手法としてFAOのマニュアルも作成されている(Johannesson, 1983)。現在では、その適用対象は魚からプランクトンへと発展している。対象識別のためのポンプによる直接サンプリングと組み合わせた、多周波測定法(Holliday et al., 1989)により、種別、サイズ別の現存量推定も行われている。また、エコートレース解析法による個別体長推定の試みや、

魚群の形態、周波数特性を判別因子としたニューラルネットワークによる魚種推定の試みもなされている(Haralabous and Georgakarakos, 1996; Simmonds et al. 1996)。

我が国においても1980年頃から音響水産資源調査の本格的なプロジェクトを組むに至ったが、魚種が多く適用が難しいこと、漁獲データが豊富なために漁獲データを基にした資源量推定が可能であったこと、などの理由から、しばらくの間、音響水産資源調査が定着するまでには至らなかった。

この過程で、筆者らの所属する水産工学研究所においては、計量魚探機の設計を行い、各調査に活用してきた。1988年からベーリング海でスケトウダラの日米共同調査が始まり、備船に搭載可能な日本初の曳航式デュアルビーム送受波器を使用した計量魚群探知機KJ1000(Furusawa, 1993)(株カイジョー、(株)日本無線による共同製作)が1994年まで使用された(Takao et al., 1991; 澤田ら, 1993; 高尾ら, 1994; 澤田ら, 1995)。また、1991年には、水産庁調査船開洋丸の代船に伴い、スプリットビーム式送受波器を船底と曳航体に搭載したKJ2000(古澤ら, 1992)(株カイジョー、(株)日本無線による共同製作)が1999年の冬季産卵群調査まで使用された(澤田ら, 1997)。さらに、2000年からこの装置はKFC3000(株カイジョー)に更新され、現在に至っている。

近年における日本近海での音響調査を見ると、九州西岸でのマイワシ産卵群調査は、1988年より毎年行われており(Takeshita et al., 1988; Ohshimo et al., 1998)、北海道の道東沖のスケトウダラ調査(Ohshimo and Hamatsu, 1996)、東シナ海や黄海でのカタクチイワシ調査(Ohshimo, 1996)などでも、音響調査が精力的に行われている。さらに、今後TAC制の進行とともに、漁獲による統計的手法を資源量推定に使えない恐れがあり、直接手法である音響手法への期待はますます高まっている。

1982年にベルゲンで開かれた水産音響シンポジウムでは、大きな誤差要因として、魚の一尾当たりの後方散乱強度であるターゲットストレングス(以下TS)の変動、装置の較正の問題、自船の騒音による魚の逃避が挙げられた。

このうち較正方法については1987年に標準球を用いる方法が提案され(Foote, 1982; Foote, 1983b; Foote and MacLennan, 1984; Foote, 1990; Sawada and Furusawa, 1993)、マニュアル化もされている(Foote et al., 1987; 古澤ら, 1995)。また、較正を簡単に行うための装置も開発されており(澤田ら, 1996)、現在の計量魚群探知機の較正に関して、大きな問題はなくなった。

自船の騒音による魚の逃避については、調査船の水中放射雑音についての指針となるマニュアルが1995年に ICES から出版されている (Mitson, 1995)。このマニュアルでは、主な魚の可聴域である 1 kHz 以下の低周波域と、音響機器の雑音の原因となる 1 kHz 以上の高周波域とに分けて、それぞれの範囲での推奨値与えている。日本でも、1989年に進水した開洋丸をはじめとする水産庁の船舶を中心として、マニュアルの指針よりもさらに水中放射雑音の低い「サイレントシップ」化が進んでいる (古澤ら, 1992)。また、エコー積分器を用いた雑音測定法の開発を行い、実際の調査でも役立っている (Takao and Furusawa, 1995)。

資源量推定を行う際には、エコー積分により得られる体積後方散乱強度 (以下 SV) を TS で除して、体積あたりの尾数 (魚群密度) を求めるために、TS の変動は資源量評価の際には大きな誤差要因となる。鰐のある魚についてはその反射の90%以上の寄与は鰐によることが明らかにされ (Foote, 1980a)、散乱理論モデルの開発により、鰐の形状から TS の計算が可能となるなど、手法、理論とも大幅な進歩を遂げている (Foote, 1985 ; Furusawa, 1988 ; Clay and Horne, 1994 ; Ye et al., 1997)。

一般に TS は、魚の体長、姿勢分布、鰐や脂質などの生理状態、使用する周波数などの複雑な関数である。このため、自然状態の魚群から正確な TS を知ることができれば一番望ましい。これは、自然状態で得られる平均 TS には、そのときの魚群の体長分布、姿勢分布、生理状態、使用した周波数が反映されているからである。

1980年代後半に実用化されたデュアルビーム法 (Ehrenberg, 1974) やスプリットビーム法 (Ehrenberg, 1979) の出現により、従来のシングルビームではできなかった指向性補正がハード的な手法で可能となり、自然状態での TS 推定が急速に進んだ。しかしながら、魚群密度が高い場合や、魚群の深度が深い場合には、単体エコー検出方法の限界のために、測定した TS に大きい方に偏りが生じることが判明し、SV とともに TS を測定し、これをそのまま密度の換算に利用することはできない (Reynisson, 1993 ; Nainggolan, 1993)。

現在は、理論や測定で得た体長の 2 乗で規準化した TS (規準化 TS) とトロールなどの漁獲により得られる魚の体長分布により平均 TS を求めて、密度の計算を行っている。しかしながら、多魚種の場合、体長分布の範囲が大きい場合、産卵期の魚のように雌雄の比率が遊泳層で大きく異なっている場合には、漁獲による生物サンプルには大きな偏りが生じる可能性がある。この偏りは対象の魚群についての TS 推定の誤差につながり、これがそのまま推定される密度の誤差と

なる。

また、産卵期の魚で見られるように生殖腺の発達により鰐が圧迫される場合や、餌をたくさん補食したために胃袋が大きくなり鰐が圧迫される場合がある (Ona, 1990)。さらに、日周運動を行う魚については、短時間の移動のために鰐はボイルの法則により大きさが変わり、TS が変化する (Mukai and Iida, 1996)。このように、TS の変動については未だ多くの問題を残している。

研究の目的

前節で述べたように、漁獲によらない資源量評価の必要性が高まっており、音響手法を適用する範囲はさらに拡大していくと考えられる。音響手法による資源量評価では、魚種別の正確な TS が不可欠である。また、漁獲によらない魚種、魚体長の推定手法が、資源調査だけでなく、漁労のためにも求められている。

そこで、本研究では、資源量推定のためのスケールファクターとしての正確な TS データを得る方法を開発すること、自然状態にある個々の魚の TS を通じて体長、行動、魚種推定を行う方法を開発すること、を目的とした。

具体的な目的を以下に示す。

- 1) TS 推定方法についての問題点を明確にして、2) 以下の高度化を図る。
- 2) 水槽内で魚や人工ターゲットの TS の傾角に対する特性 (TS パターン) が精密に自動測定できるシステムを製作し、TS パターンの精密測定を行う。
- 3) 2) で得られた TS パターンの測定値と鰐形状による理論計算で得られた TS パターンを比較し、理論モデルの有効性について調べる。
- 4) いろいろな密度の魚群について自然状態での TS 推定精度の指標を確立し、TS の自然状態推定法を高度化する。
- 5) スプリットビーム法と結合したエコートレース解析の有効性をシミュレーションと水槽実験で確認する。また、自然状態で得られた単体エコーのトラッキングと解析アルゴリズムを開発する。
- 6) 自然状態にある魚から得られたエコーデータについて、4) で開発する推定精度の指標の導出と、5) で開発するエコートレース解析を、簡単に行うことができる TS 解析用ソフトウェアの開発を行う。これにより、多数の単体エコーについてエコートレース解析を行い、体長推定、遊泳速度、TS パターンの推定を行う。

研究の概要

研究の概要をフローチャートとして Fig. 1 に示し

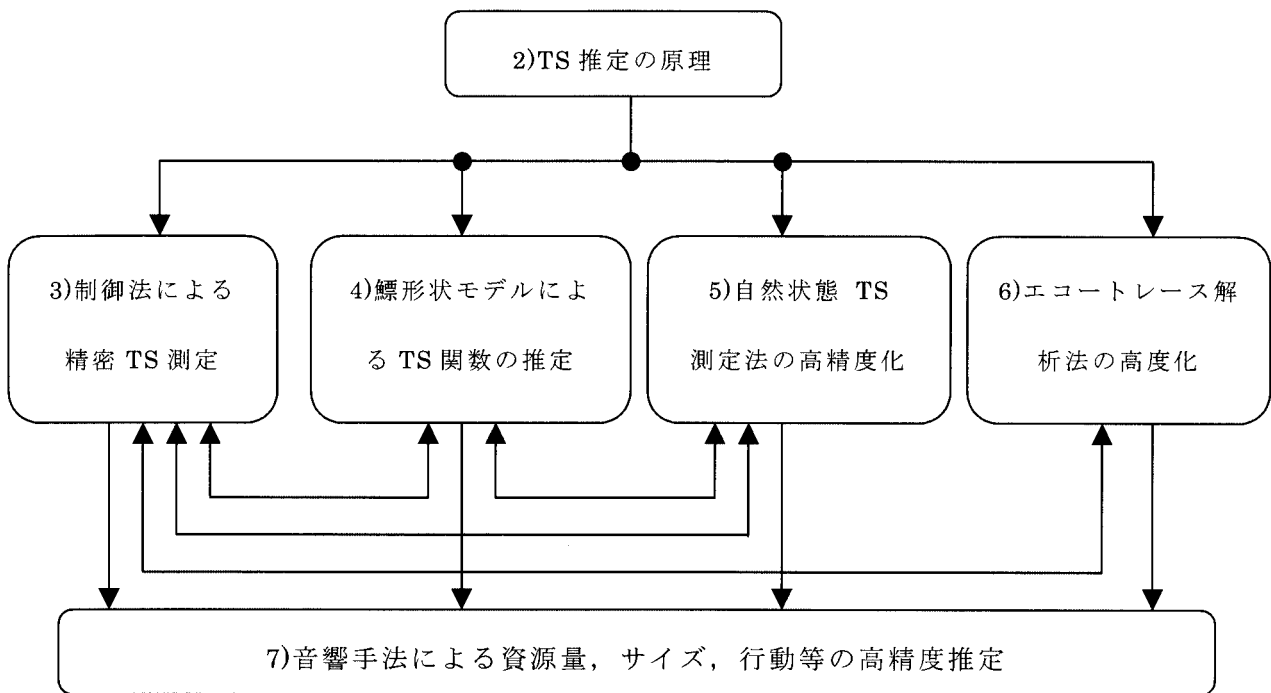


Fig. 1. Skeleton of this paper. The numbers and the titles of chapters are shown in the boxes.

た。

第1章から第5章までは、TS推定手法について、第6章は、エコートレース解析法による体長、行動推定手法、第7章は、6章までの研究成果を従来の自然状態TS解析に取り入れ、自然状態TS推定の高度化について述べる。

第2章は、TS推定方法についての比較と体長推定方法の原理を整理し、以下に続く章の出発点とする。

第3章では、水槽で使用する高精度TS測定システムを構築し、発泡スチロール製の鰐模型及び厳密理論を使い精度の検証を行った。この装置により、資源調査対象魚のTSパターンの測定を行い、資源量評価で使用可能な高精度なTS値を示した。

構築したTS測定システムを用いて行った鰐模型のTSパターン測定結果と厳密な中空楕円体理論モデルの計算結果は、相関係数がほぼ1となり、極めて良い一致を見た。これにより、測定精度が極めて高いことを示せた。

次に、このTS測定システムを用い、スケトウダラ、太平洋ヘイク、クサカリツボダイなどの鰐が閉じている閉鰐魚、ヨーロッパカタクチイワシ、アユなどの鰐が消化管とつながった開鰐魚のTSパターン測定を行った。特にアユは、生きた状態で測定を行い、鰐の状態が自然に近い状態での測定を行った。

測定したTSパターンを姿勢分布により重み付け平均したTSを求め、体長の2乗で規準化を行った。閉鰐魚についてはスケトウダラ稚魚を除き、従来の規準

化されたTSとほぼ同じ値となった。また、開鰐魚は閉鰐魚に比べて測定値のあばれが大きくなった。

第4章では、軟X線発生装置やX線断層撮影装置により得られた鰐形状を用いる変形円筒モデルによる理論計算結果が、水槽でのTSパターンの測定値によく一致することを示し、この理論モデルの有効性について示した。

軟X線発生装置でスケトウダラ、太平洋ヘイク、アユの鰐の形状を推定し、鰐の形状を回転楕円体近似し中空回転楕円体モデルにより、また、円筒薄片の連なりと考える変形円筒モデルにより理論計算を行った。

理論と測定値とは、理論モデルの適用範囲ではよく一致し、理論の有効性が示せた。さらに、変形円筒理論モデルにより、広い周波数範囲についてTSパターンの予測を行い、平均TS等を推定した。

鰐形状を求める方法としてX線断層撮影装置による方法と軟X線による測定結果と比較し、X線断層撮影装置の方が解像度が高いこと、さらに鰐の3次元形状を極めて短時間のうちに推定可能であることを示した。以上により、X線断層撮影装置による鰐形状と変形円筒理論モデルの組み合わせにより有鰐魚のTSの各種の特性が容易に解明できる。

第5章では、自然状態におけるTS測定結果の測定精度の指標について提案し、測定とシミュレーション実験によりその有効性を検証した。

まず、推定精度の指標として、残響体積内尾数と群体エコーの割合と二つの指標を提案した。次に、東部

ベーリング海でスケトウダラからなる同じ魚群に対して、異なるシステムにより、1 昼夜半にわたる連続測定を行った。同じ魚群で分布密度が異なる場合について推定精度の指標を計算し、指標がある値以下の場合に正確に TS 測定が行えることを示した。

次に、指標の一般性を示すため、また、誤差の生じる過程を明らかにするために、測定のとおり同じような TS 分布を持つエコー信号をコンピュータ上でシミュレートし、群体エコーの増加とともに、TS が大きい方に偏ることを示した。一般的に、TS の最大と最小の差が20dB程度ある場合、信号対雑音比が20dB以上で、残響体積内尾数が0.1以下でなければ、正確な推定ができないことを示した。

第6章では、スプリットビーム法とエコートレース解析法とを組み合わせることにより、魚の体長及び行動推定を自動的に行う手法を開発した。この手法については、シミュレーションと水槽実験とで検証した。さらに、実海域で得られたエコーについて、エコートレース解析を行い、体長分布、遊泳速度分布を得ることができることを示した。

シミュレーションでは、10尾分のエコートレースを作成し、得られたエコーグラムから、同一の魚から返ってくるエコーのみを検出するためのトラッキングアルゴリズムの検証を行った。トラッキング後に、エコートレース解析を行い、あらかじめ与えた TS パターン、遊泳速度が再現できることを示した。

次に、水槽実験では、標準球を一定速度で上下させ、そのエコーをスプリットビーム式計量魚探機で検出し、エコートレース解析を行った。その結果、標準球の移動速度を精度良く推定できることを示した。

第7章では、第5章、第6章での研究成果を取り入れた、自然状態の魚の TS を推定するための総合解析ソフトウェアを開発した。さらに、実海域で得られた調査データに適用し、その有効性を確かめた。実海域データとして、1996年若鷹丸による北海道沖スケトウダラ調査で得られた音響データから自然状態 TS 解析を試みた。また、2000年6月に行われた照洋丸による小型計量魚探機試験で得られた音響データより、エコートレース解析を行い、魚体長、遊泳速度の推定を試みた。

第8章は「結論」であり、本研究の成果を総括した。

第2章 ターゲットストレングスの推定方法

緒 言

ターゲットストレングス（以下 TS）は、音響水産資源量調査で資源量を算出する際のスケールファクターとして、また、TS が体長の2乗にほぼ比例する

ことを用いる体長推定のための音響データとして、極めて重要である。また、TS の周波数などによる特性は魚種判別の情報ともなる。さらに、計量魚探機の設計においては、信号対雑音比を計算する際の主要な値である。このような意味で、魚の TS は水産音響では中心的な音響パラメータであり、したがってこれまで多くの研究者が研究を行ってきた（Hashimoto, 1953；Shibata, 1970；Love, 1971；Nakken and Olsen, 1977；Midttun, 1984；Miyano, 1990）。

そこで本章では、後章で正確な TS を推定する方法を述べるための準備として、実験的、理論的な TS の推定手法と体長推定の原理について述べ、TS 推定手法の比較検討を行う。

ターゲットストレングスの定義と散乱振幅

ターゲットストレングスの定義

TS は、ターゲットに平面波が入射したときに、入射音波の強さ (I_i) に対するターゲットから1 mでの距離での反射音波の強さ (I_r) の比として、

$$T_s = \frac{I_r}{I_i} \quad (2.1)$$

のように定義される（実吉ら, 1968）。一般に、魚の TS は大きく変動するため、両辺の常用対数を10倍して、

$$TS = 10 \log T_s \quad (2.2)$$

のようにデシベル値として表すことが多い。

本論文で以降、用いる記号については、(2.2) 式のように大文字2文字の場合はデシベル値を、同じ文字で大文字に添え字の場合は、線形値を表すものとする。

散乱振幅

ターゲットからの散乱波が球面波と見なせる距離では、ターゲットからの散乱波は、ターゲットの散乱特性をあらわす遠距離音場での散乱振幅 f_∞ と、距離に依存する項に分けて、

$$P_{scat} = P_i \frac{\exp(ikr)}{r} f_\infty \quad (2.3)$$

のように表現される（時間依存項は省略）。ここで、 P_i は入射音圧、 r はターゲットから観測点までの距離、 i は虚数、 k は波数を表し、 f を周波数とし、 c を音速とすると、

$$k = 2\pi f / c \quad (2.4)$$

の関係がある。

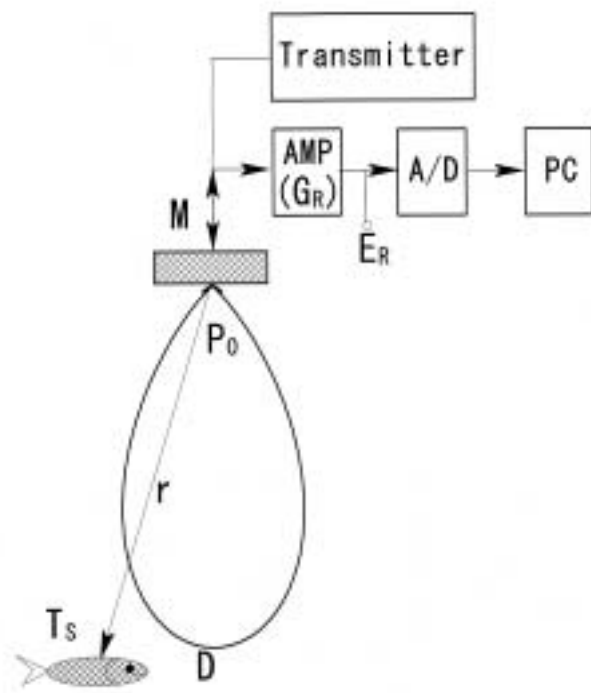


Fig. 2. Principles of the quantitative echo sounder.

また、後方散乱に関して、 f_∞ と TS の間には、 r_0 を基準距離 1 m として

$$TS = 10 \log (|f_\infty|^2 / r_0^2) \quad (2.5)$$

の関係がある。

ターゲットの種類、形状によっては、理論モデルにより f_∞ の計算が可能である。従って、ターゲットストレングスの計算ができる。

ソナー方程式

一尾の魚から返ってくるエコーレベル E_R は、Fig. 2 のように、魚までの距離 r 、魚の TS を用いて、

$$E_R^2 = P_0^2 M^2 G_R^2 \frac{1}{r^4} \exp(-4\beta r) D^4 T_S \quad (2.6)$$

と表される。ここで、 P_0 は送信音圧 (μPa at 1 m)、 M は受波感度 ($\text{V}/\mu\text{Pa}$)、 G_R は受信増幅器ゲイン、 D は送受波器の指向性関数、 β は吸収減衰係数 (neper/m) である。

吸収減衰係数は、Francois and Garrison (1982) などにより精確な実験式が作られている。この実験式では、吸収減衰係数が周波数、水温、塩分濃度、圧力をパラメータとする関数として表される。そこで、これらのパラメータを測定しておくことにより吸収減衰係数知ることができる。古澤 (1985) は、この式に基づき、塩分濃度範囲が 28–36psu、水温範囲が 0–25°C、

深度範囲が 0–500m、pH 範囲が 7.5–8.5 で変動する場合の吸収減衰係数の誤差についての検討を行った。その結果を示す文献 (古澤, 1985) の図 16 によれば、吸収減衰係数は周波数と共に大きくなり、その変動幅は 70kHz 付近を境に急に増えることがわかる。そこで、70kHz 以下の周波数を使用し、数百 m 程度の測定レンジであれば、吸収減衰は大きな誤差要因とはならない。

$T_R = P_0 M G_R$ は、システムによって決まる値であり、送受信係数という。(2.6) 式から、指向性 D の補正を行い、ターゲットまでの距離 r と送受信係数 T_R がわかれば、 T_S がわかる。また、標準球を送受波器の直下に吊す場合のように、 T_S が既知であれば、送受信係数の較正 (古澤ら, 1995) を行うことができる。

距離による減衰項を補正したときのエコーレベルを E_T とすると、

$$E_T^2 = T_R^2 D^4 T_S \quad (2.7)$$

と表される。かつては、距離による減衰項の補正を、時間によりゲインを変える増幅器を用いて行い、これを Time Varied Gain (TVG) 増幅器と呼んでいた。このため距離減衰の補正を TVG 補正という。現在では TVG 補正をソフトウェア的处理によって行っており、精度も高い。

ターゲットストレングスの

推定方法とエコートレース解析法

推定方法の分類

TS の推定もしくは計測方法は、Fig. 3 に示すように、実験的な方法と理論的な方法に分かれる。

また、エコートレース解析法は、一尾の魚から返っ

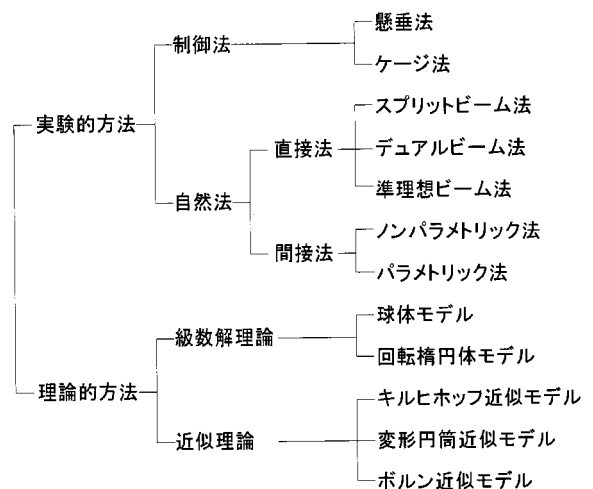


Fig. 3. Classification of the estimation methods for the target strength measurement of fish.

てくる連続したエコーの連なり（エコートレース）の形状や、それらの TS から魚の体長、遊泳速度、方向を推定する方法である。この意味では、TS 推定を行った後の処理方法となる。

実験的方法の中で、制御法は、魚種や、魚体長を制御した状態で TS の測定を行うことができる。自然法は、自然状態にある魚のエコーレベルの測定を行うことにより TS を求める方法であり、送受波器の指向性を装置側の工夫により求める直接法と、エコーレベルを統計的に扱うことにより求める間接法に分けることができる。

以下に各測定法について説明する。

制御法

懸垂法では、死亡した魚や麻酔した魚を送受波器の音軸上にテグスなどを用いて吊り、その姿勢を制御しながら、魚の傾角に対する TS (TS パターン) の計測を行う。懸垂法の場合、魚は指向性主軸上にあり、 $D=1$ と見なすことができるため、魚の TS は、(2.7) 式より、

$$T_s = \frac{E_T^2}{T_R^2} \quad (2.8)$$

とあらわすことができる。逆に、TS のわかっている標準球を吊す場合は、エコーレベル E_T と魚までの距離 r がわかれば、送受信系数 T_R がわかることになる。

ケージ法では複数の生きている魚をケージ内で自由に遊泳させ、TS を測定する。音響ビームに対して魚群が十分大きい場合には、エコー積分により得られる体積散乱強度 S_V と実際の密度 n から、

$$T_s = \frac{S_V}{n} \quad (2.9)$$

により、TS を求める (大ケージ法) (Iida et al., 1998)。

また、ビームの中心と見なせる範囲に N 尾の魚をおき、その合成された TS である T_{ST} から、

$$T_s = \frac{T_{ST}}{N} \quad (2.10)$$

により、TS を求める方法 (小ケージ法) もある (宮野鼻, 1994)。

ケージ内の魚が一尾の場合には、指向性 D をデュアルビーム法、スプリットビーム法などにより得て、(2.7) 式により求めることができる。

自然法

一般に自然遊泳状態にある魚の TS を求めるためには、魚の送受波器に対する位置により、送受波器の指向性を補正する必要がある。自然法では、この補正を

装置の工夫で行う直接法と、統計的な処理で行う間接法とがある。

直接法は、デュアルビーム法 (Ehrenberg, 1974)、スプリットビーム法 (Ehrenberg, 1979)、準理想ビーム法 (笹倉, 1990) に分けられる。

間接法は、Craig et al. (1969) がはじめたエコーレベルの分布に仮定をおかないノンパラメトリック法や Ehrenberg et al. (1981) によるエコーレベルの分布を関数で当てはめるパラメトリック法に分けられる。

Fig. 4(a) はデュアルビーム法の原理を示す。デュアルビーム法では、送受波器全体で送波し、受波する狭ビーム (図中で黒実線) と、送受波器全体で送波し、その一部で受波する広ビーム (図中赤実線) を使用する。ターゲットが送受波器の中心にあれば、広、狭 2 つの受波ビームにレベル差は生じないが、中心からずれた位置にあれば、レベル差が生じる。あらかじめ、このレベル差と指向性との対応表があれば、レベル差から指向性を知ることができる。

狭、広ビームを添え字 N , W で区別し、指向性を D_N , D_W 、送受信系数を T_{RN} , T_{RW} とすると、TVG 補正後のエコーレベルは下式で表される。

$$E_N^2 = T_{RN}^2 D_N^4 T_s \quad (2.11)$$

$$E_W^2 = T_{RW}^2 D_W^2 D_N^2 T_s \quad (2.12)$$

(2.11), (2.12) 式より、 D_N を消去すると、

$$T_s = (E_W^4 / E_N^2) (T_{RN}^2 / T_{RW}^4) (1 / D_W^4) \quad (2.13)$$

となり、ビームの中心付近であれば、ほぼ $D_W = 1$ とみなせるので、送受信系数 T_{RN} , T_{RW} をあらかじめ較正により求めておけば T_s がわかる。

また、(2.11), (2.12) の比をとると、

$$D_N / D_W = (E_N / E_W) (T_{RW} / T_{RN}) \quad (2.14)$$

となり、較正で決まる狭、広ビームの送受信系数、測定により求まるエコーレベルより、指向性の比がわかる。そこで、あらかじめ広ビームと狭ビームの指向性の比と狭ビームの指向性の対応表を作っておけば、エコーレベルの比より、広ビームと狭ビームの指向性の比がわかる。従って、対応表から狭ビームの指向性 D_N がわかり、これを (2.11) 式に代入することにより正確に T_s を求めることができる。

Fig. 4(b) にスプリットビーム法の原理図を示す。スプリットビーム法の原理は音響測位における Super Short Base Line (SSBL) 法とほぼ同一であり、送受

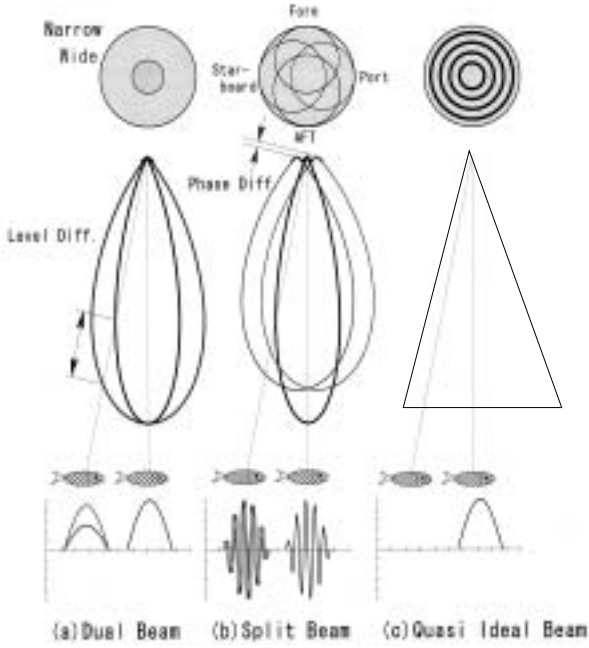


Fig. 4. Principles of the direct methods.

波器を分割し、前方 (Fore) と後方 (Aft)、左方 (Port) と右方 (Starboard) というように位相測定用アレイ (位相アレイ) のペアを2つ作り、それぞれの位相アレイに到達するエコーの時間差より前後方向、左右方向の位相差の測定を行う。

得られた位相差から、ターゲットの方向を推定できる。方向がわかれば、指向性がわかり、TS がわかる。

Fig. 5にターゲットの位置と位相ビームの位置関係を示す。ここで、 l をターゲットから各位相ビームまでの距離とし、添え字 F, A, S, P で Fore, Aft, Starboard, Port を表すものとする。 k を波数、 d を位相アレイの中心間の距離とすると、 l_f は、

$$l_f = r \sqrt{1 - \frac{d}{r} \sin \theta \cos \phi + \left(\frac{d}{2r}\right)^2} \quad (2.15)$$

$$\cong r - \frac{d}{2} \sin \theta \cos \phi$$

のように表すことができる。

同様に、

$$l_a \cong r + \frac{d}{2} \sin \theta \cos \phi \quad (2.16)$$

と表すことができる。よって、Fore, Aft 間の位相差 δ_x は Fore と Aft の距離差を位相差に変換したものであるため、

$$\delta_x = k(l_a - l_f) = kd \sin \theta \cos \phi \quad (2.17)$$

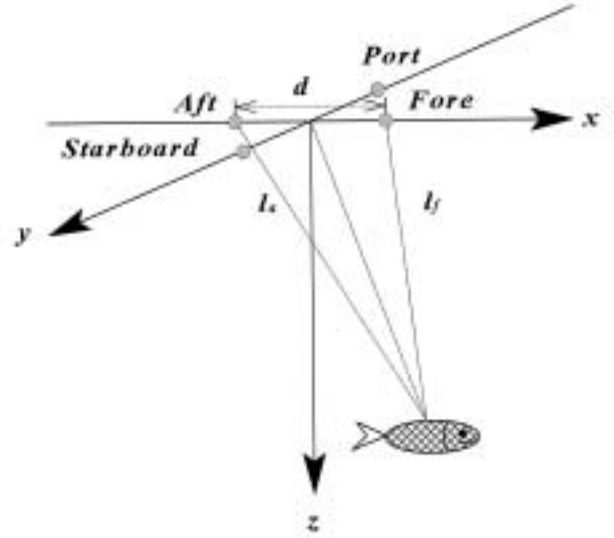


Fig. 5. Principles of the split-beam method.

となる。

また、Port, Starboard 間の位相差 δ_y についても、(2.14) 式で $\cos \phi$ をと $\sin \phi$ すればよいので、

$$\delta_y = k(l_p - l_s) = kd \sin \theta \sin \phi \quad (2.18)$$

と表すことができる。したがって、(2.17)、(2.18) 式により、方向 (θ, ϕ) は以下の式で表される。

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}}{kd} \right) \quad (2.19)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\delta_y}{\delta_x} \right) \quad (2.20)$$

準理想ビーム法では、送受波器の振動子の電極を **Fig. 4(c)** のようにいくつか分割して、与える電圧を変えることによりウェイトを与え、ビームの形状を円錐型に近づける。理想的には、ビーム内では指向性が1、ビーム外では0となる指向性となる。実際は、振動子の大きさは有限なので、理想的なビームの形成はできないが、中心付近で指向性が平坦な範囲は従来の送受波器より広い。そこで、式 (2.7) で $D=1$ として TS を得ている。

次に間接法について簡単に説明する。Craig and Forbes 法では、**Fig. 6** のように、魚から返ってくるエコーを TVG 処理後にレベル別に m クラスに分ける。

ここで、エコーレベル、送受波器指向性、TS それぞれについての確率密度のクラスを E_i , b_i , n_i とする。明らかに、一番大きなレベル E_1 が起こる確率は、一番大きな TS である確率 T_{S1} のときに、ビーム中心にある確率 b_1 の時に起こる。次のレベルである

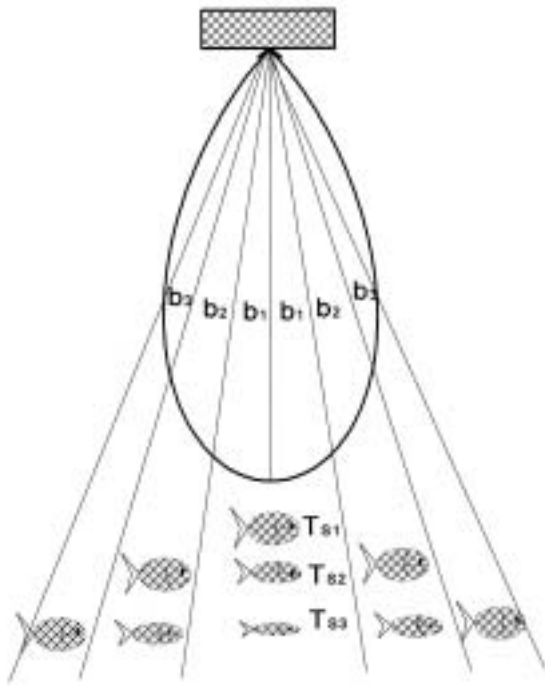


Fig. 6. Principles of the indirect method.

確率 E_2 は、一番大きな TS である T_{S1} がビーム b_2 にあるときか、2 番目に大きな TS である T_{S2} がビーム中心 b_1 にある時に起こる。このように考えていくと、 E , b , n について以下のような正規方程式

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \vdots \\ E_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ b_2 & b_1 & 0 & \cdots & 0 \\ b_3 & b_2 & b_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_m & b_{m-1} & \cdots & b_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ \vdots \\ n_m \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

で、表すことができる。そこで、この行列式を n について解くことで、TS の分布を知ることができる。

Clay (1983) は魚から返ってくるエコーレベルの確率密度関数 w_E は、魚の TS の確率密度関数 w_F と送受波器の指向性の確率密度関数 w_T とのコンボリューションで表されるということを示した。すなわち、あるエコーレベルを持つ確率は、 w_F と w_T を用いて、

$$w_E(e) = \int_0^1 w_T(b) w_F\left(\frac{e}{b}\right) \frac{db}{b} \quad (2.22)$$

のように表される。ここで、 e は単体エコーの包絡線のピークレベル、 b は指向性を表す。そこで、以下のように、変数、 b , e を x , y で表して、

$$\begin{aligned} b &= \exp(-x), \quad 0 < b \leq 1 \\ e &= e_0 e^{-y}, \quad 0 \leq e \end{aligned}$$

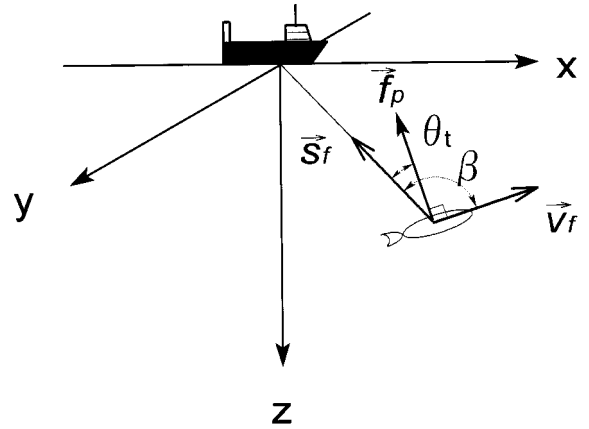


Fig. 7. Principles of the echo trace analysis.

$$\frac{db}{b} = -dx$$

とし、 x , y の関数として新たにを定義すると、(2.22) 式は、

$$w_E(y) = \int_0^\infty w_T(x) w_F(y-x) dx \quad (2.23)$$

のように、コンボリューションの形式で表される。

さらに (2.22) 式は、

$$W_E(\alpha) = W_T(\alpha) W_F(\alpha) \quad (2.24)$$

のように確率密度関数のフーリエ変換の積として表される。ここで、 $FT\{\}$ をフーリエ変換を表すものとする、 $W_E(\alpha) = FT\{w_E(y)\}$ である。送受波器の指向性は既知であるため、送受波器の較正を行った上でエコーレベルの分布を測定すれば、(2.24) 式のデコンボリューションにより、魚の TS についての確率密度関数 w_F の推定ができる。

エコートレース解析法

送信毎に同じ魚からエコーが返ってくることがある。このような同じ魚から返ってくる連続したエコーの連なりをエコートレースという。このエコートレースの形状やエコーレベルから魚の遊泳速度や魚体長などを推定する方法がエコートレース解析法である。

Fig. 7 に示すように、船と魚が等速直線運動をしていると仮定する。

ここで、 $\vec{s}_f$ は魚から船に対するベクトル、 $\vec{v}_f$ は魚の遊泳ベクトル、 $\vec{f}_p$ は $\vec{v}_f$ ベクトルと $\vec{s}_f$ ベクトルのなす平面上にあり、魚の進行方向に対して垂直に立てたベクトルである。また、 θ_t は魚の傾角、 β は $\vec{v}_f$ と $\vec{s}_f$ のなす角とする。2つのベクトル $\vec{f}_p$ と $\vec{s}_f$ の挟む角で近似される傾角 θ_t は、2つのベクトル $\vec{v}_f$, $\vec{s}_f$ を用

Table 1. Comparisons of experimental TS estimation methods.

Item	Control		<i>in situ</i>				
	Suspension	Cage	Direct			Indirect	
			SB	DB	QIB	C&F	Parametric
Species	○	○	×	×	×	×	×
Length	○	○	△	△	△	△	△
Fish condition	×	△	○	○	○	○	○
Average TS	×	△	○	○	○	○	○
SNR ^{*1}	○	○	△	△	△	△	△
TS pattern	○	△	△	△	×	×	×
Directivity correction	—	—	Hardware	Hardware	Hardware	Normal equation	Deconvolution
Position	—	—	r, θ , ϕ	r, θ	r	r	r

^{*1}Signal to Noise Ratio

いて、

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\frac{\vec{s}_i \cdot \vec{v}_i}{|\vec{s}_i| |\vec{v}_i|} \right) \quad (2.25)$$

により計算が可能である。

実験的 TS 推定方法の比較

Table 1に、これまで概略を見てきた実験的 TS 推定法について、項目別に比較した結果を示す。○は他の手法に比べて特に優れていることを、△は状況によることを、×は原理的に不可能であることを示す。

制御法では、魚種、魚体長が既知であるため、得られたエコー信号と測定魚の対応づけが可能であるが、自然法では、常に不確定さがつきまとう。一方、魚の生理状態に関しては、言うまでもなく自然法が優れている。得られたエコー信号と生物との対応付けができて、かつ、魚の密度が薄く、魚群までの距離が近いというような測定誤差の少ない状況であれば、姿勢分布、体長分布、生理状態を反映した自然法での TS 測定が優れている。自然法の中でも間接法は、正規方程式を解いたり、デコンボリューションを行うことにより、TS の確率密度関数を求める必要がある。このために、十分な数の単体エコーが必要であり、また、ノイズの影響がある状況では、プラスであるべき解がマイナスになったりするなど、必ずしも安定な解が得られるとは限らない。直接法では、個々のエコーについての指向性の影響をハード的に取り除くことができるために、間接法に比べて制約が少なくなっている。

以下、各方法の特徴を挙げる。

懸垂法は、ターゲットの姿勢を関数とした TS (TS パターン) の測定が可能であるために、散乱理論による検証が可能であり、自然状態での測定が難しい魚に

ついて TS 測定を行う場合に優れている。欠点は、資源量推定のための規準化 TS を計算するためには姿勢分布が必要であること、生理状態が自然状態とは異なる可能性があること、測定の際に鰓などに付着する気泡が大きな測定誤差となること、など測定上の問題がある。

ケージ法では、懸垂法では測定の難しいような TS の小さな魚についても、ケージ内に多数入れることにより、生きている状態での測定が可能となる。しかしながら、ケージ内での遊泳状態は、必ずしも自然状態と同じとはいえないため、得られた平均 TS については、遊泳姿勢等の検証が必要となる。

デュアルビーム法では、比較的簡単なシステム構成で、指向性の補正を行うことができる。このために、スプリットビーム法の実現が難しい高周波でも使用可能である。Ehrenberg (1979) は、デュアルビーム法とスプリットビーム法との比較を行い、デュアルビーム法はスプリットビーム法よりもノイズの影響を受けやすいことをシミュレーションで示している。

また、広ビーム及び狭ビームの両方でエコー積分を行うことにより、実際の調査でビームの広がり差を利用した魚の逃避、ノイズ検知等に使用可能である (Takao, 1996)。

スプリットビーム法では、ビーム内での魚の位置がわかるため、魚の行動についての情報を得ることが可能である。しかしながら、これまでの方法の中で一番システムが複雑となる。

間接法は、装置が簡単で済むというメリットはあるが、十分な数の単体エコーが必要などの制約があり、河川や湖での調査を除いて、現在では余り使用されていない。

本研究では、広い角度範囲にわたって精確に TS パ

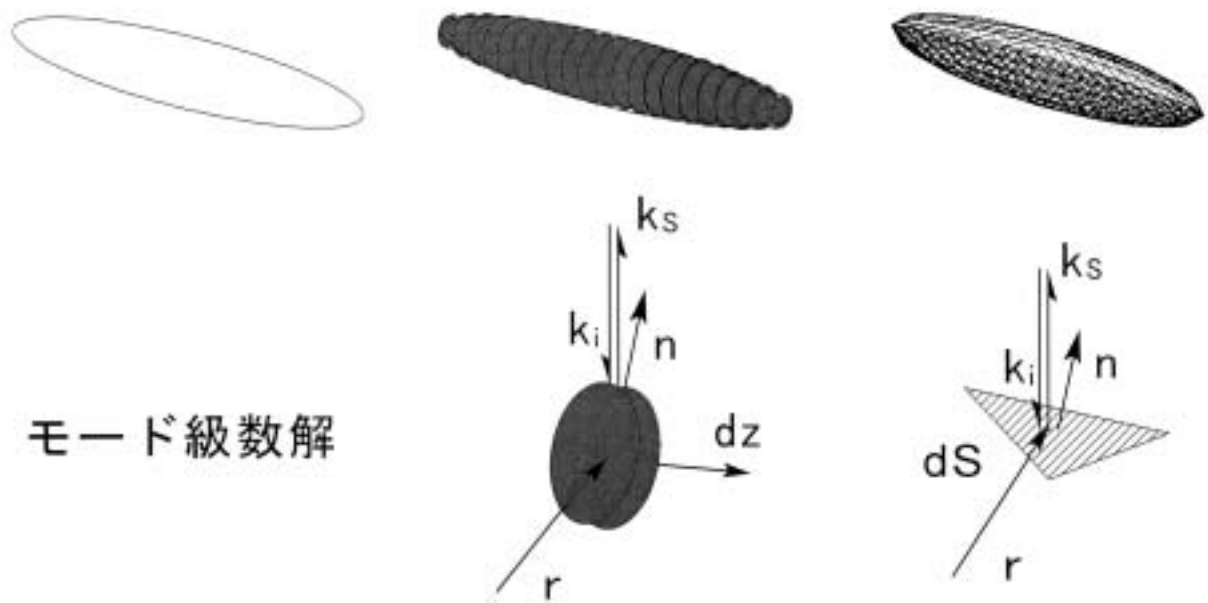


Fig. 8. Principles of the theoretical scattering models. (a)Prolate spheroid scattering model, (b)Deformed cylinder scattering model, (c)Kirchhoff approximation.

ターンの測定を行うことができる懸垂法によるシステムを水槽内で構築し、より高精度な TS パターンの測定を行う。さらに、体長分布や姿勢分布を反映しているために、資源量推定を行うために最も良いと思われる自然状態での TS 測定の高度化を図る。また、位置までわかるスプリットビーム法とエコートレーン解析法を組み合わせ、個々の魚の体長、遊泳速度、方向などを推定する手法の実用化を図る。

理論的推定法

理論的な方法では、魚を物理的なモデルとして、その散乱振幅を計算することにより、TS を求めることができる。以下に、理論モデルを使用する利点を挙げる。

- 1) 測定を減らすことができる。
- 2) 各種の特性の予測を行うことができる。
- 3) 実験で得られる体長と TS の関係式などに理論的根拠を与える。
- 4) プランクトンの多周波測定で、サイズ別密度推定に必要である。
- 5) 周波数特性の予測と測定との比較により魚種判別に使用できる。
- 6) 計量魚探機的设计時に TS のおおまかな目安を与える。

以上のように、理論モデルを使用することのメリットは多い。しかしながら、万能のモデルはなく、モデルにより、適応条件が変わり、計算の複雑さ、近似度も異なる。そこで、使用する目的に応じて、適切なモ

デルを選ぶ必要がある。

使用可能な理論としては、解析的に計算可能な厳密理論と、近似理論に分けられる。厳密理論では、理論上はすべての周波数範囲についての計算が可能であるが、実際には、計算機の精度上の問題があり、高周波での計算は難しい。また形状に対する制約があり、魚に適用可能な理論は、現在のところ、球と回転楕円体である。**Fig. 8**に本論文で使用する回転楕円体理論モデルや変形円筒理論モデルと、キルヒホッフ近似理論についての原理を模式的に示す。

以下、各モデルについて説明する。液体球モデルは Anderson (1950) が開発した。その後、その近似モデルである Johnson のハイパスモデル (Johnson, 1977; Johnson, 1978) などが開発された。液状球体モデルの適用対象は、無鰾生物で、大きさが波長に比べてかなり小さいものである。

魚や魚の鰾の形状は、近似的に回転楕円体と考えられる。そこで、魚の一般的な音響散乱特性を研究するために Furusawa (1988) は魚に回転楕円体散乱理論を適用した。現在、計算可能なものとして、中空回転楕円体モデル、液状回転楕円体モデルがある。中空回転楕円体は、鰾のモデルとして使用され、液状回転楕円体モデルは、プランクトンや無鰾魚の散乱、鰾を含まない魚体からの散乱の影響などに使用可能である (Furusawa, 1994)。

近似理論では、高周波領域での近似であるキルヒホッフ近似、厳密理論である無限円筒モデルで得られた円筒表面での音圧分布を有限円筒に適用した変形円筒

Table 2. Comparisons of theoretical methods.

Condition	Exact		Approximation		
	Liquid sphere	Prolate spheroid	Kirchhoff	Deformed cylinder	Born
Frequency	○	○	$8 < L/\lambda < 36$	○	○
Shape	sphere	Prolate spheroid	○	Finite cylinder	○
Angle	○	○	○	Near broadside	○
Target species	Plankton	Bladdered fish, Plankton	Bladdered fish	Bladdered fish, plankton	Plankton
Data	Radius	Minor and major Radius	3D shape	Radius and position of each slice	3D shape
Approximation	×	×	○	△	○
Computation	Low ka	Low ka	Easy	Easy	Easy
etc.	Verification of another model				

モデル, 周りの媒質に対し, ターゲット内部の音速, 密度といった物理パラメータがあまり変わらないものに適用可能なボルン近似がある。

キルヒホッフの積分定理 (Medwin and Clay, 1998) によれば, ターゲット表面での散乱波がわかれば, 遠方での散乱がわかる。そこで, キルヒホッフ近似モデルでは, 平面による反射率が, 曲面でも成り立つと仮定し, 散乱波をこの反射率と入射波の積として, キルヒホッフの積分定理に代入して得ることができる。Foote (1985) によれば, キルヒホッフ近似は鰐のある魚で体長を L , 波長を λ としたとき, $8 < L/\lambda < 36$ の範囲で適用可能である。

変形円筒理論モデルは, Stanton (1988a, 1988b, 1989) が開発し, さらに Ye et al. (Ye and Furusawa, 1995; Ye et al., 1997) はより厳密に導出した。Ye et al. による, このモデルと回転楕円体理論モデルとの比較によれば, ブロードサイド入射付近 (垂直入射を 0 度とすると, -20 度から 20 度の範囲) では, 両者はあらゆる周波数で一致した。**Fig. 8** に示す変形円筒理論モデルでは, 散乱体からの散乱を, 散乱体を円筒薄片のあつまりと見なして, 各円筒薄片の散乱の和が散乱体からの散乱であるとする。そこで, 円筒の軸方向を z 方向とし, 入射波の波数ベクトルを K_i , 反射波の波数ベクトルを K_s , 各円筒薄片の散乱振幅を df とすると,

$$f_{\infty}(\vec{k}_i, \vec{k}_s) = \int df dz \quad (2.26)$$

と表すことができる。ここで, df は, 入射波ベクトルと反射波ベクトルのなす角をあらわす $\phi(z)$ と各円筒薄片の中心を示す位置ベクトル $r(z)$ を用いて,

$$df = \frac{-i}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} B_n(z) F_n(z) (-i)^n \cos(n\phi(z)) e^{i(\vec{k}_i \cdot \vec{r}(z) - \vec{k}_s \cdot \vec{r}(z))} \quad (2.27)$$

と表すことができる。ここで, i は虚数単位を表し, $B_n(z)$, $F_n(z)$ は境界条件によって決まる係数である。

ボルン近似で, ターゲット内の波動の波数を内部の物理パラメータで計算したものを変形ボルン近似とよんでいる。Chu et al. (1993) は, 変形ボルン近似が, 動物プランクトンの散乱の計算に利用できることを示した。変形ボルン近似は, ターゲットの内部と外部の物理パラメータが近い場合, あらゆる周波数範囲, あらゆる形状のターゲットにも適用可能である。各理論の比較結果を **Table 2** にまとめた。

回転楕円体モデルは, 対象の形状が回転楕円体と見なせるものにしか適用ができないが, 他のモデルの理論的な検証を行うことが可能である (Ye and Furusawa, 1995)。

本研究では, 回転楕円体理論モデルとの理論間での比較により有効性が示された変形円筒理論モデル (Ye et al., 1997) の実験的な検証を行う。具体的には, 軟 X 線装置で得られた魚の鰐形状より, 変形円筒理論モデルにより TS パターンの計算を行い, 測定結果と比較を行う。これにより, 測定との比較による変形円筒モデルの有効性の検証を行う。理論モデルの導入により, 測定によらず, 広い範囲の TS の特性を知ることが可能になることを示す。

体長推定の原理

平均 TS と体長

魚の TS は, 姿勢により大きく変動する。また, 一般に魚の姿勢は一樣でなく, 調査で得られる平均 TS 値は, 主として体長分布や姿勢分布により変わる。こ

こで、尾叉体長 L の魚について、姿勢について平均した TS を平均 TS とよぶ。

この平均 TS は、ほぼ尾叉体長の 2 乗に比例することが実験的 (Miyanohana et al., 1990) にも、理論的 (Furusawa, 1988) にも知られている。

すなわち、尾叉体長 L (以後、特に断らない限り、体長とよぶ) と平均 TS (TS_A) の間には、

$$TS_A = kL^2 \quad (2.28)$$

の関係がある。これをデシベル表示し、

$$TS_A = 20 \log L + TS_{cm} \quad (2.29)$$

$$TS_{cm} = 10 \log k \quad (2.30)$$

と表されることが多い。このとき、通常の使用で便利のために、体長 L は cm 単位で使用される。(2.29) および (2.30) 式中で示した TS_{cm} が規準化 TS である。本論文では、平均 TS についての規準化 TS を規準化平均 TS とよぶ。

TS の平均を行う際には、ビームの指向性を考慮しなければならないが、ビームの半減半角が 10 度を超えない場合、平均方法は、次式のように姿勢について行う姿勢平均でよいことが Foote (1980b) により示された。

$$\langle TS \rangle = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} TS(\theta) f(\theta) d\theta \quad (2.31)$$

宮野鼻ら (1986) によれば、通常の計量魚探機のビーム幅は 10 度より狭いため、(2.31) 式による平均 TS で大きな誤差とならない。よって、本論文でも平均は (2.31) 式によって得ることとした。

最大 TS と体長

平均 TS と同じように、最大 TS についても体長の二乗にほぼ比例するという関係がある。最大 TS を TS_{MAX} とすると、

$$TS_{MAX} = 20 \log L + TS_{cm} \quad (2.32)$$

となる。このときの規準化 TS を規準化最大 TS と呼ぶ。

Miyanohana et al. (1990) によれば、規準化最大 TS は多くの魚種で $-59 \sim -61$ dB となり、最大 TS から個々の魚体長推定を行うことができる可能性を示した。

結 言

本章では、以降の章で必要となる既往の TS の推定方法を整理した上で比較を行い、以下のことを示した。

- (1) 懸垂法は広い角度範囲にわたって、精度良く TS パターンを測定できる唯一の方法である。
- (2) 理論により TS の推定を行うことは、測定数を減らすだけでなく各種の特性の予測ができるという点で大きなメリットがある。万能なモデルはなく、必要性に応じて、適切なものを使用することが大切である。
- (3) このため、新しい理論モデルについて、測定によりモデルの有用性を検証していく必要がある。
- (4) TS の自然状態推定法 (以下、自然法と略す) では、生理状態、姿勢分布等を反映した TS を測定できるが、濃い分布や、魚までの距離が大きい場合には測定誤差が大きくなる。このため何らかの指標が必要である。
- (5) 平均 TS から平均体長、最大 TS から個々の魚の体長を推定できる。

第 3 章 水槽での精密なターゲットストレングスの計測

緒 言

音響水産資源調査では、資源量計算を行う際に必要なスケールファクターとなる魚のターゲットストレングス (TS) の値を知ることが必須である。そこで、水産工学研究所では、音響水産資源調査に必要な TS データベース作成のため、静岡県戸田湾に浮かべたイカダに魚体懸垂機構を設置し、ハイドロホンを用いた同時校正法 (Hashimoto., 1953) により、4 周波 (25, 50, 100, 200 kHz) を用いた TS の測定を行ってきた (宮野鼻ら, 1984)。この成果は公表され実用に供されている (Miyanohana et al., 1990, 宮野鼻ら, 1990)。しかし、以下のような問題点が挙げられる。

- 1) 湾内のイカダ上での測定では、朝に測定機器を配置し、夕方には撤収しなければならない、時間的な制約が大きく、短時間に大量の測定ができない。
- 2) 自然状態の中での測定では、対象外の魚群からの不要エコーや、風や波の影響など外乱が多い。
- 3) 上記 4 周波以外に計量魚探機で主に使用される周波数 38 kHz での測定を行う必要が出てきた。
- 4) 精度の高い標準球校正方法が確立し、この方法で校正する方法が有利である。すなわち、水槽での測定は、湾内に比べて狭く、無指向性に近いハイドロホンを使用する方法では、壁からの反射エコーの重量が起りやすくなり、信号対雑音比を下げるもと

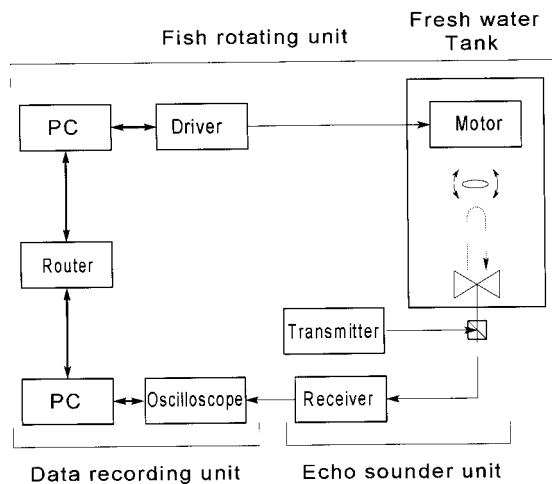


Fig. 9. Block diagram of the developed TS measurement system.

になる。

そこで、水産工学研究所（水工研）の大型水槽（縦15m×横10m×深さ10m）で使用するこのできる高精度のTS測定システムを新規に開発し、必要に応じいつでも高精度TS測定を行えるようにする。

本章では、まず、水槽で使用するための高精度TS測定システムを構築する。次に、測定システムの精度を、回転楕円体模型を用いた実験で確かめる。さらに、本装置を用いて、スケトウダラ（稚魚、成魚）、太平洋ヘイク、アユ、ヨーロッパカタクチイワシ、クサカリツボダイなどの、いずれも鰾を持った魚のTS測定を行い、実際の資源調査で使用できる値を得る。本章で述べる高精度計測システムは、後に述べる理論モデルの検証（第4章）に活用する。

有鰾魚の場合、鰾は魚による後方散乱の主体であることが知られている。そこで、鰾のある魚については、鰾が自然状態と同じ形状でなければ、そのような魚のTSは資源量算出のパラメータとして使用できない。そのためには、自然状態での鰾の形状を知ることが必要である。

また、マイワシ、カタクチイワシ等の鰾が消化管と

つながっている開鰾魚については、鰾の形状が変化しやすく、測定例自体が少ないため、自然状態に近い形状の鰾を持ったサンプルについてTSの測定例を増やす必要がある。

そこで、TS測定の前後に、軟X線で鰾の形状の確認を行い、測定前後で形状が変わっているもの、変形していると思われるものは、規準化TSの算出の際に使用しないようにして、魚種別にできるだけ精度の高い規準化TSを求めた。

材料と方法

TS測定システム

音響水産資源調査では、船底などに装備した送受波器から超音波を鉛直下方に発射し、魚の背方向からの反射の強さを測定する。そこで、魚群から得られるエコー強度は、個々の魚の背方向からの反射の強さによって決まる。自然状態の魚の遊泳姿勢は、一定でなく、姿勢角はある分布をもつ。背方向TSにもっとも影響を及ぼすのは傾角（ピッチ角）である。そこで、魚の傾角の関数として表される背方向TS特性（これをTSパターンと呼ぶ）を測定できる装置とする。

水槽でのTS測定システムの開発にあたり、以下の点に留意した。

- 1) 新規開発をできるだけ少なくするために、これまでに使用してきた魚の回転機構部（石井ら,1985）を生かす。
- 2) いろいろな魚探機や計量魚探機の送受信部をそのまま使えるようにする。
- 3) キャリア付きエコー波形をデジタル収録し、高度な信号処理を可能とする。
- 4) データ取得から解析まで、極力、自動化する。

開発したTS測定システムのブロックダイアグラムをFig. 9に示す。このシステムは送受信部（Echo sounder unit）、収録部（Data recording unit）、回転機構部（Fish rotating unit）の3つの部分からなる。回転機構部は同時較正法で使用したものを、プログラムのわずかの変更により使用している。収録部と回転機構部とは

Table 3. Specifications of the transmitting and receiving systems.

Parameter	Symbol[Unit]	Echo Sounder	
		KJ1000	ES400
Manufacturer		Kaijo	Simrad
Frequency	[kHz]	38	70
Beam width	[deg]	6.2	11.0(Fore-Aft) 10.8(Port-Starboard)
Source level	[dB re 1 uPa at 1 m]	223	
Pulse width	[ms]	0.6	0.5
Band width	[kHz]	2.5	

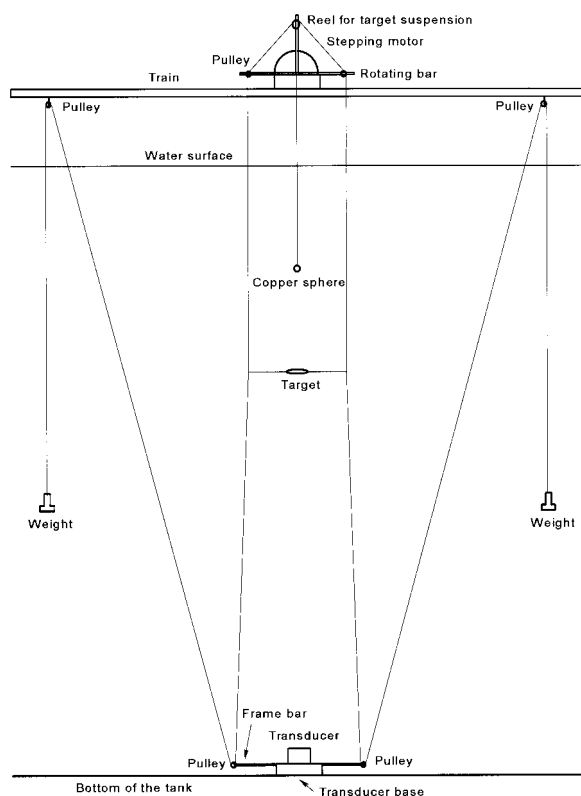


Fig. 10. Fish rotating system. The target fish is suspended between the two suspension lines over the transducer mounted on the bottom of the tank. One end of the line is attached to the weight through the pulley system. The stepping motor controlled by the computer rotates the rotating bar.

GP-IB で結ばれている。送受信部では、トリガーとエコー波形出力のある魚探機であればどのようなものでも使用が可能である。現在は、KJ1000 (Furusawa et al. 1993) の送受信部 (カイジョー, 38kHz), および, ES470 (シムラッド, 70kHz) の送受信部を使用している。Table 3に使用する送受信システムの諸元を示す。

Fig. 10は、水槽中の回転機構部を示す。コンピュータ制御によりステッピングモーターで回転するアームを装着した回転機構部は台車に取り付けられている。回転機構部のリールに巻いた2本のテグスは、それぞれ回転アームの両端に取り付けた滑車や、底に設置した送受波器台に固定した2本のフレームアームの先端に取り付けた滑車を通り、上に戻って、さらに台車に固定した滑車を通してウエイトにつながっている。垂直方向に伸びたこの2本のテグスの途中にスナップが装着されており、一方は魚の上顎に取り付けられたテグスと、もう一方は尾部につけられたテグスと固定される。スナップ位置は測定前に水面と比較し、できるだけ水平になるように調整する。送受波器から

水面まで約9mである。

魚を吊す場合には、背方向を送受波器側に向けるために発泡スチロール製の浮きを魚の腹から伸ばしたテグスの端につける。このときに、浮きからの反射が魚からの反射と重なり合わないようテグスの長さを調節する。水圧により鰾の形状が変化しないように、また、魚の取り付け操作などを容易にするために、魚はできるだけ水面に近い深度(水面から約2m)に吊す。コンピュータ制御により、回転アームを -50 度から 50 度まで回転させ、一つの傾角あたり5ピング分のエコーデータを収録する。

装置の較正は、測定の前あるいは後に、標準球を吊して行う。標準球のTSは、水温測定結果を、Medwin (1975) による音速計算式に代入して、音速を求め、較正マニュアル (古澤ら, 1995) にある音速に対するTS値を示す表より求める。実験を行った6月4日から7月12日までのKJ1000の較正結果をTable 4に示す。表の左から、日付、時間 (日本標準時)、エコーレベル、標準球までの往復時間、往復時間と音速から計算した標準球までの距離、得られた送受信係数、ビームの種類 (Nは狭ビーム, Wは広ビーム)、音速、標準球のある深度での水温を示す。較正結果である送受信係数TRの値は1ヶ月にわたり安定していることがわかる。

得られたエコー波形は、収録部のデジタルオシロスコープ (レクロイ9304AM, 8ビット200M サンプリング/s, 以下デジタルオシロ) 内のハードディスクに、5MHzのサンプリング周期でキャリア付きの状態に収録する。このときに、8ビットを有効に使うため、デジタルオシロの電圧感度を自動感度調整して、受信エコーが画面上で非飽和最大となるようにする。

送受波器の指向性主軸上の深度 r_0 にある魚から得られるキャリア付きエコー波形 E_R は、

$$E_R(t) = E_{RS}(t) + E_{RN}(t) \quad (3.1)$$

で与えられる。ここで、

$$E_{RS}(t) = P_0 M G_R \frac{1}{r_0^2} \exp(-2\beta r_0) \sqrt{T_s} w\left(t - \frac{2r_0}{c}\right) \quad (3.2)$$

はエコー信号であり、 $E_{RN}(t)$ はエコーに干渉する雑音である (Sawada and Furusawa, 1993)。ただし、 P_0 は送波音圧、 M は受波感度、 G_R はゲインを表す。 r_0 は送受波器からの距離を表し、 $r_0 = ct/2$ で時間と結びつけられる。 β は吸収減衰係数を表す。 $w(t)$ は最大値が1であるような波形関数である。また、このときのエコー波形の例をFig. 11(a)に示す。ノイズの影響が大きい場合には、ノイズ成分を除去した (3.2)

Table 4. Calibration results of KJ1000.

Date	Time	Epp ^{*1} (V _{pp})	Range (ms)	Range (m)	TR (dB)	Beam ^{*2}	Sound speed (m/s)	W.T. (deg)
6/4/96	20:59	3.555	9.022	6.69	71.55	N	1482	
6/5/96	21:27	3.477	9.022	6.69	71.36	N	1482	20
6/7/96	19:30	3.477	9.022	6.69	71.36	N	1482	19
		3.438	9.022	6.69	71.26	W	1482	19
6/10/96	10:23	3.438	8.997	6.67	71.21	W	1482	19
6/13/96	10:56	5.19	7.287	5.40	71.13	W	1482	19
6/17/96	19:57	5.19	7.301	5.41	71.16	W	1482	20
6/19/96	11:08	5.41	7.309	5.42	71.54	N	1482	20
	11:08	5.33	7.309	5.42	71.41	W	1482	
6/20/96	8:57	4.8	7.332	5.43	70.56	N	1482	20
7/12/96	13:53	2.82	10.149	7.52	71.58	N	1482	20
					N	W		
Average					71.33	71.23		
+ σ					71.70	71.34		
- σ					70.95	71.12		

*1Peak to peak level, *2Narrow beam (N), Wide beam (W)

式に、較正によって求まる送受信係数 P_0MG_R 、エコーの立ち上がりまでの時間 r_0 、波形のエコーレベル E_{RS} を代入して T_s の計算を精確に行うことができる。 r_0 と E_{RS} を自動的に正確に求めるため、以下の処理を行う。 r_0 は、あらかじめ収録しておいた標準球のエコー波形と E_{RS} との相互相関関数のピークにより精確に求める。次に、エコーレベルを求めるために、キャリア付き波形のエンベロープ抽出が必要となる。ここで、

$$w(t) = A(t) \sin(\omega t + \phi) \quad (3.3)$$

とおくと、時間 $t + \Delta t$ での波形は、

$$w(t + \Delta t) = A(t + \Delta t) \sin[\omega(t + \Delta t) + \phi] \quad (3.4)$$

と表すことができる。そこで、 $\omega \Delta t = \pi/2$ となるように Δt を選ぶと、

$$w(t + \Delta t) = A(t + \Delta t) \cos(\omega t + \phi) \quad (3.5)$$

となる。よって、通常 $A(t + \Delta t) \cong A(t)$ と見なせるので、エンベロープ波形は

$$A(t) = [w(t)^2 + w(t + \Delta t)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

で与えられる。このときの波形を **Fig. 11(b)** に示す。さらに、求めたエンベロープの移動平均（キャリア周波数の1周期分、例えば、キャリア周波数38kHzで5M サンプル/s の場合は131個分の移動平均となる）をとり、平滑化する（**Fig. 11(c)**）。

以上述べた方法により、 T_s は、エンベロープのピークレベルの $E_{RS}(t_p)$ と、相互相関関数により正確に求めた r_0 により (3.2) 式を用いて、

$$T_s = E_{RS}(t_p)^2 r_0^4 \exp(4\beta r_0) / T_R^2 \quad (3.7)$$

と表される。ただし、 $T_R = P_0MG_R$ である。デシベル表示では、

$$TS = ES + 40 \log r_0 + 2\alpha r_0 - TR \quad (3.8)$$

となる。ここで、ピークレベルのデシベル表示を ES とした。また、 $\alpha [\text{dB/m}] = 8.68\beta [\text{Np/m}]$ の関係がある。

回転楕円体模型

Goldsberry ら (1967) や宮野鼻 (1994) の研究によれば、水中での発泡スチロールによる音響散乱は水中での空気による散乱とほぼ等しいと考えられる。このため、発泡スチロールで回転楕円体模型を作り、そのパターンを測定し、厳密理論と比較をすることにより、TS パターン測定装置の精度の検証ができると考

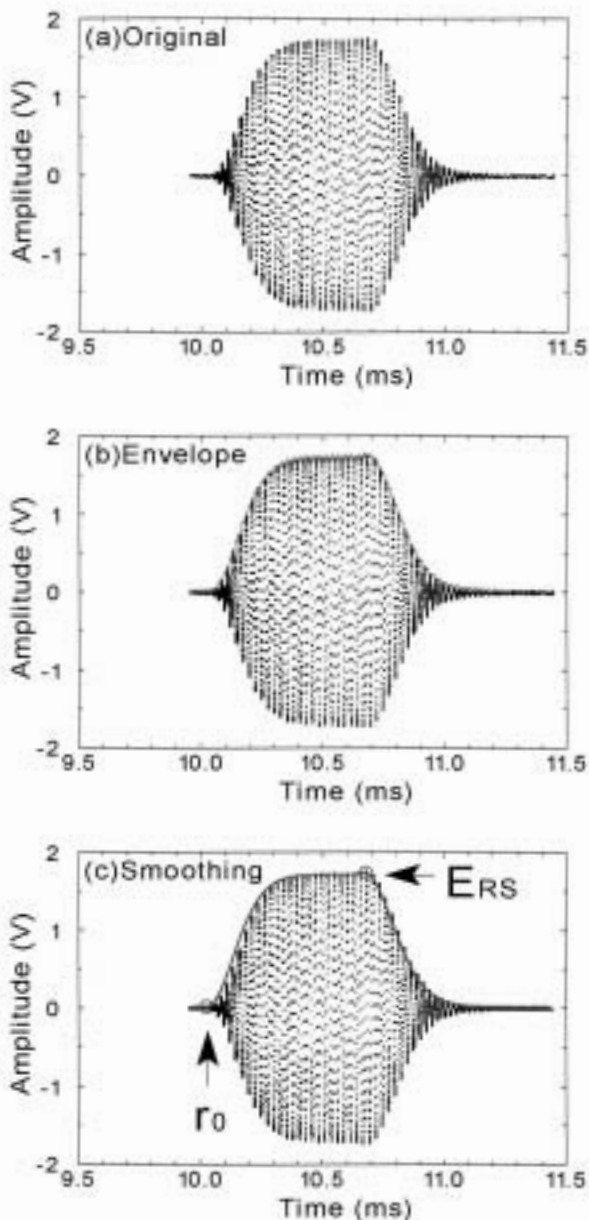


Fig. 11. Process of the envelope derivation : (a) dot line shows original wave with carrier, (b) thin line is the envelope of the original wave, and (c) thick line shows the running average. The distance from the transducer to the target is calculated from ' t_0 ' and the echo level is calculated from ' E_{RS} '.

えられる。そこで、機械製作により発泡スチロール製の精巧な回転楕円体模型を作り、装置の検証を行う。

発泡スチロール (Expanded Polystyrol, EPS) は、工業材料的には発泡ポリスチレンと呼ばれている。発泡スチロールはビーズ状あるいはペレット状のポリスチレン樹脂に発泡剤を加えたものを加熱軟化させると同時に、気体を発生させて発泡樹脂としたものである。製造法の違いにより、型内発泡法によるものと、押し出し発泡法によるものに区別されている。国内で手に



Fig. 12. Physical model of the prolate spheroid (Type A3) and supporting lines to measure end-on scattering.

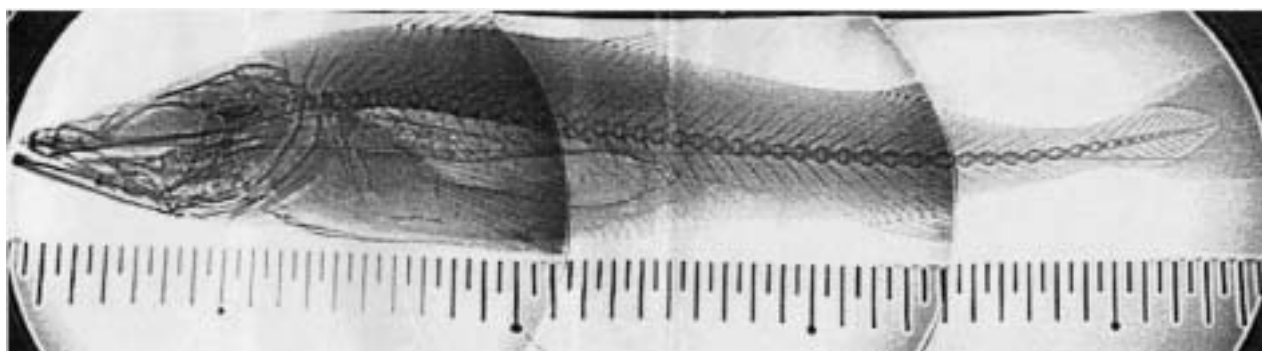
入る発泡スチロールは、密度の異なる6種類 (材料マニュアル作成ワーキンググループ, 1992) からなる (そのうち型内発泡法で作られたもの5種類) が、製造法により、物理定数に大きな違いがある。回転楕円体の製作時に使用した発泡スチロールは、密度の測定結果より判断すると、型内発泡法で作られ、密度が $12 \pm 1.0 \text{ kg/m}^3$ 及び $16 \pm 1.0 \text{ kg/m}^3$ を示す D-12, D-16 と考えられた。

これらの発泡スチロールの板を、適当な大きさの直方体に切断し、旋盤に固定した。高速度鋼用の刃を用いて、この刃を回転楕円体の軌道で移動させることにより、**Fig. 12** に示すような回転楕円体の形状をもった発泡スチロール模型を作製した。この模型の作製の際に、発泡スチロールの直方体に直径 1 mm 程度の細い針金を通すことで、旋盤での固定と回転楕円体の先端付近の加工はるかに容易になることがわかった。そこで、針金を通して加工した模型と針金を通さないで加工した模型を製作して、測定結果を比較した。それぞれの測定結果にはほとんど差がなかったため、模型はすべて針金を通した状態で加工した。このために、ブロードサイド (横方向) からの反射の測定を行う際には、針金を抜いた穴に、2 号テグス (直径 0.235 mm) を通し、前後の穴を少量のエポキシ系接着剤で接着し、空洞の両端を閉じるとともにテグスからずれないようにした。このテグスの両端を懸垂装置の垂直に伸びた 2 本のテグスにスナップを介して結び、極力模型自体に張力がかからないようにした。また、エンドオン (端方向) からの反射を測定するときには、**Fig. 12** に示すようにテグスを取り付け、測定中に模型がテグスの周りに回転しないようにした。

古澤 (1990) によれば、標準的な魚の鰭は体長の約 $1/3$ である。さらに、鰭の長径と短径の比であるアスペクト比は $0.1 \sim 0.2$ の範囲にあり、標準的なもので 0.15 程度である。余り小さな模型は製作が困難である

Table 5. Specifications of the artificial targets.

Type	Diameter		b/a	Density (kg/m ³)	Water Temp. (°C)	Measurement Date
	2 a (cm)	2 b (cm)				
A 1	10	1.0	0.10	13.3		
A 2	10	1.5	0.15	13.3	20.3	31 May, 1996
A 2	10	1.5	0.15	13.3	19.0	2 June, 1996
A 3	10	2.0	0.20	13.3	20.0	11 June, 1996
B 1	5	0.5	0.10	16.6	20.0	19 June, 1996
B 2	5	0.75	0.15	16.6		
B 3	5	1.0	0.20	16.6	20.0	12 July, 1996
C 1	16	1.6	0.10	13.3		
C 2	16	2.4	0.15	13.3		
C 3	16	3.2	0.20	13.3	20.0	10 July, 1996

**Fig. 13.** Soft X-ray image of the walleye pollock (WP00_5). Centerlines of the fish body and the swim-bladder are drawn on the image.

こと、大きすぎると理論での計算ができなくなることなどを考慮して、長さが5cm, 10cm, 16cmで、アスペクト比が、0.1, 0.15, 0.2の9種類の模型について各10個ずつ製作した。これらの模型は体長15cm, 30cm, 48cm程度の魚に相当する。

Table 5に今回製作した模型の一覧表を示す。各模型について、それぞれ10個ずつの平均重量と短径、長径から求めた体積から密度の計算を行った。

供試魚

資料的にも重要な、以下に示す5種の魚のTSを計測した。TS計測前に軟X線により鰾の状態を確認した。また、TS測定後にも軟X線により鰾の状態を確認することにより鰾の状態に変化がないことを確かめた。

1) スケトウダラ

スケトウダラ (*Theragra chalcogramma*) は、北海道沖、ベーリング海の陸棚域に幅広く分布する底魚である。測定に使用した成魚については、1994年にアラスカのウナラスカ島、マクーシン湾で30~40mの深

度から手釣りにより漁獲し、船上に用意した水槽で1日以上馴致させ、頭部の打撃により即殺後、ただちに冷凍したもの、1999年ベーリング海スケトウダラ産卵群調査で、トロールで得られたサンプルのうち、生きていたものを水槽で馴致後に即殺したもの (**Fig. 13**)、また日没1時間後のトロールで漁獲後冷凍したものを使用し (**Table 6**)、稚魚については、1997年6月20日、定置網での漁獲後に北海道大学におけるケージ実験で使用された後、即殺し冷凍したものを使用した (**Table 7**)。測定周波数は成魚、稚魚とも38kHzで行った。

2) 太平洋ヘイク

ヘイク (*Merluccius productus*) は、1994年5月にカナダのバンクーバー島周辺で行われたヘイクの音響調査時に、トロールにより深度90mより得られたサンプルのうち、生きていたものを選び冷凍した (Hamano et al., 1996)。測定は周波数38kHzで行った。生物測定データを **Table 8**に示す。

3) アユ

産卵場である河川で孵化した琵琶湖のアユ (*Pleco-*

Table 6. Size of fish and swimbladder, weight of fish, and the conditions of walleye pollock used for the TS measurements.

Fish No.	Weight W (g)	Fork length L (cm)	Bladder length 2a (mm)	Bladder height 2b (mm)	2a/L	b/a	L/λ	Bladder angle (deg)	Date of Meas	Sampled year and method	Fish condition
WP94_1	340	336	78.2	9.7	0.23	0.12	8.5	3	12/12/94	1994 Hook and Line ^{*3}	Deflated
WP94_2 ^{*1}	1032	559	149.3	22.6	0.27	0.15	14.2	0	12/13/94	1994 Hook and Line ^{*3}	Good
WP94_3 ^{*1}	1164	611	100.9	23.3	0.17	0.23	15.5	5	12/22/94	1994 Hook and Line ^{*3}	Good
WP94_4	820	518	111.0	15.5	0.21	0.14	13.1	5	12/26/94	1994 Hook and Line ^{*3}	Deflated
WP00_1	1884	671	116 (169.1)	20.6	0.17 (0.25)	0.18 (0.12)	17.0	ND ^{*2}	3/27/00	1993.2.1 Hook and Line ^{*3}	Bubbles are observed by soft X-ray measurement
WP00_2	1797	618	132.3	16.1	0.21	0.12	15.7	ND ^{*2}	3/28/00	1991.8.7 Hook and Line ^{*3}	S.B. small Bubbles are observed by soft X-ray measurement
WP00_3	1662	605	126.5	14	0.21	0.11	15.3	ND ^{*2}	3/28/00	1991.8.7 Hook and Line ^{*3}	Shadow of spent ovary?
WP00_4	1289	526	87.9	28.8	0.17	0.33	13.3	ND ^{*2}	3/28/00	1999 Trawl ^{*4} T203	No bubbles, irregular shape of SWB
WP00_5 ^{*1}	651	440	107.7	19.7	0.24	0.18	11.2	10.2	3/28/00	1999 Trawl ^{*4} T203	Good
WP00_6	2121	677	140	20.9	0.21	0.15	17.2	ND ^{*2}	3/29/00	No data	No bubbles, irregular shape of SWB

*1Used for the regression analysis

*2No data

*3Makushin Bay, Unalaska Island, Alaska, acclimated in the tank for over 24 hours

*4Live ones are acclimated after trawl, T203 shows trawl No.203

Table 7. Size of fish and swimbladder, weight of fish, and the conditions of juvenile walleye pollock used for the TS measurements.

Fish No.	Weight W (g)	Fork length L (cm)	Bladder length 2a (mm)	Bladder height 2b (mm)	2a/L	b/a	L/λ	Bladder angle (deg)	Date of Meas	Sampled year and method	Fish condition and comments
WP98_J1	4.9	9.2	16.0	4.8	0.17	0.3	2.3	11.1	8/13/98	Hokkaido Univ. No.14	Good S.B. shape is differed after TS measurement
WP00_J1 ^{*1}	6.5	10.1	18.4	4.8	0.18	0.26	2.6	10.2	3/29/00	Hokkaido Univ. No.22	Good
WP00_J2 ^{*1}	7.3	10.3	20.7	4.5	0.20	0.22	2.6	8.0	3/29/00	Hokkaido Univ. No.3	Good
WP00_J3 ^{*1}	4.3	9.1	13.9	5.9	0.15	0.42	2.3	6.8	3/29/00	Hokkaido Univ. No.13	Good

*1Used for the regression analysis

Table 8. Size of fish and swimbladder, weight of fish, and the conditions of Pacific hake used for the TS measurements.

Fish No.	Weight W (g)	Fork length L (cm)	Bladder length 2a (mm)	Bladder height 2b (mm)	2a/L	b/a	L/λ	Bladder angle	Date of Meas	Sampled year and method	Fish condition
HK94_1	681	45.8	121	17.6	0.26	0.15	11.6	7	12/15/94	1994. Trawl	Deflated
HK94_2 ^{*1}	794	49.9	138.1	18.7	0.28	0.14	12.6	6	12/19/94	1994. Trawl	Good

*1Used for the regression analysis

glossus altivelis) の稚魚は、秋に琵琶湖に下り、冬は湖底付近で過ごし、翌年の春から秋にかけて、表層から中層で群をなし、主として動物プランクトンを食べて成長する (Shirakihara et al., 2001)。再び8月

末頃から成熟し、河川をさかのぼり産卵し、一生を終える。このため、海で成長する通常のアユと比べて、体長が小さく、特に琵琶湖産のアユはコアユと呼ばれる。

Table 9. Size of fish and swimbladder, weight of fish, and the conditions of ayu used for the TS measurements.

Fish No.	Weight W (g)	Fork length L (cm)	Bladder length 2a (mm)	Bladder height 2b (mm)	2a/L	b/a	L/λ	Bladder angle	Date of Meas	Fish condition
AY97_1 ^{*1}	8.2	10.2	27.8	6.4	0.27	0.230	4.76	6.8	8/3/97	Dead after TS measurement
AY97_2 ^{*1}	12.73	11.6	26.6	3.8	0.23	0.142	5.41		8/5/97	Dead after TS measurement
AY97_3 ^{*1}	4.8	8.3	16.7	4.8	0.20	0.286	3.87	8.5	8/7/97	Dead after TS measurement
AY98_1 ^{*1}	18.63	12.5	32.9	3.9	0.26	0.118	5.83		8/1/98	Dead during TS measurement
AY98_2 ^{*1}	11.62	10.6	20.4	5.6	0.19	0.274	4.95		8/1/98	Dead during TS measurement
AY98_3 ^{*1}	13.73	11.8	Not clear	Not clear			5.51		8/1/98	Dead during TS measurement
AY98_4 ^{*1}	16.18	12.1	27.9	5.6	0.23	0.200	5.65		8/1/98	Dead on Aug. 2
AY98_5	6.81	9.0	ND ^{*3}	ND ^{*3}	ND ^{*3}	ND ^{*3}	4.20		8/1/98	Dead before TS measurement, XCT ^{*2}
AY98_6	12.83	10.4	ND ^{*3}	ND ^{*3}	ND ^{*3}	ND ^{*3}	4.85		8/1/98	Dead before TS measurement, XCT
AY98_7	13.77	10.8	ND ^{*3}	ND ^{*3}	ND ^{*3}	ND ^{*3}	5.04		8/1/98	Dead before TS measurement, XCT
AY98_8	2.62	7.2	ND ^{*3}	ND ^{*3}	ND ^{*3}	ND ^{*3}	3.36		8/1/98	Dead before TS measurement, XCT
AY98_9	6.8	9.7	ND ^{*3}	ND ^{*3}	ND ^{*3}	ND ^{*3}	4.53		8/3/98	Dead during soft X-ray measurement after TS measurement, XCT
AY98_10 ^{*1}	10.87	10.4	ND ^{*3}	ND ^{*3}	ND ^{*3}	ND ^{*3}	4.85		8/3/98	Dead during TS measurement, XCT
AY98_11 ^{*1}	5.36	8.9	ND ^{*3}	ND ^{*3}	ND ^{*3}	ND ^{*3}	4.15		8/3/98	Dead on Aug. 7, XCT
AY98_12 ^{*1}	6.87	9.1	19.8	4.4	0.22	0.221	4.25		8/3/98	Dead on Aug. 8
AY98_13 ^{*1}	13.32	11.6	22.9	5.1	0.20	0.224	5.41		8/4/98	Dead after Aug. 5
AY98_14 ^{*1}	18.49	12.6	16.7	3.0	0.13	0.182	5.88		8/4/98	Dead after Aug. 5
AY98_15 ^{*1}	5.92	8.2	20.7	3.0	0.25	0.144	3.83		8/4/98	Dead on Aug. 5
AY98_16 ^{*1}	5.57	8.6	26.1	3.4	0.30	0.129	4.01		8/4/98	Dead during TS measurement
AY98_17 ^{*1}	6.85	9.2	22.0	4.0	0.24	0.182	4.29	8.6	8/6/98	Dead during soft X-ray measurement after TS measurement
AY98_18 ^{*1}	15.95	12.1	Not clear	Not clear	ND ^{*3}	ND ^{*3}	5.65		8/6/98	Dead during TS measurement
AY98_19 ^{*1}	16.84	11.8	21.6	4.0	0.18	0.183	5.51	14.0	8/6/98	Dead during TS measurement
AY98_20 ^{*1}	5.49	8.7	9.9	2.6	0.11	0.267	4.06	17.9	8/6/98	Dead during TS measurement
AY98_21 ^{*1}	14.61	11.9	27.5	6.9	0.23	0.250	5.55	10.3	8/6/98	Dead during soft X-ray measurement after TS measurement
AY98_22 ^{*1}	15.89	12.4	20.3	4.2	0.16	0.209	5.79		8/6/98	Alive till 8/7/98
AY98_23 ^{*1}	6.11	8.7	16.4	4.9	0.19	0.300	4.06		8/7/98	Alive till 8/8/98

*1 Used for the regression analysis

*2 X-ray Computer Tomography

*3 No data

コアユは琵琶湖における生態系において、その数が多いために上位捕食者として重要な位置にある。そこで、生態系の解明のためにはコアユの量、分布を知る必要がある。このために、1995年から1997年まで、毎年6月から8月にかけて毎月1回ずつ、琵琶湖北湖全域にわたる音響調査が行われた。得られたSV値を密度に変換するためには、TSを知る必要があるが、コアユは、その鰾が消化管とつながっている開鰾魚であり、開鰾魚のTS測定データは少ない。

1997の7月はじめと8月はじめ、1998年の7月終わってから8月はじめにかけて、水産工学研究所の水槽で生かした状態でTS測定を行った。コアユは滋賀県水産試験場から、氷を入れて、水温を低い状態に保った発泡スチロール製のクーラーボックス（縦50cm×幅30cm×深さ30cm）に、10尾前後のコアユを入れて、茨城県鹿島郡波崎町にある水産工学研究所に運んだ。コアユは水産工学研究所にある小型水槽（縦2m×横2m×深さ1m）で蓄養した。

Table 9に、TS測定を行ったコアユの体重、尾叉長、横から見た鰾の長さ（2a）、高さ（2b）、尾叉長

に対する鰾の長さの比、鰾の長さとおさの比、波数kとaの積、鰾の傾き角、TS測定日、死亡日をまとめた。測定はすべて70kHzで行った。**Fig. 14**にアユの軟X線写真を示す。

4) ヨーロッパカタクチイワシ

ヨーロッパカタクチイワシ(*Engaulis encrasicholus*)は、トルコで巻き網によって漁獲されたものを、氷蔵状態で空輸したものをを用いた。水工研の水槽で測定を行った供試魚の大きさなどを**Table 10**に示す。測定はすべて38kHzで行った。

水工研でTS測定を行ったサンプルの信頼性について検討するため、トルコの巻き網で得られた直後のヨーロッパカタクチイワシの鰾を解剖により取り出し、その長さとおさの測定を行い、標準的な体長に対する鰾長の比、鰾の高さと長さの比について求めた。結果を**Table 11**に示す。

5) クサカリツボダイ

クサカリツボダイ(*Pseudopentaceros wheeleri*)は中部太平洋の海山海域に分布し、当海域における日本のトロール漁業の主漁獲対象魚になっている（柳

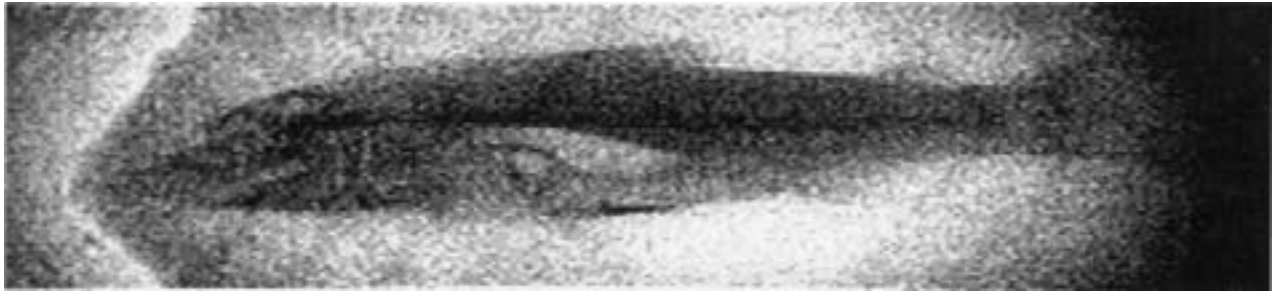


Fig. 14. Soft X-ray image of live ayu (AY97_1) in a plastic package with water.

Table 10. Size of fish and swimbladder, weight of fish, and the conditions of European anchovy for the TS measurements.

Fish No.	Weight W (g)	Fork length L (cm)	Bladder length 2a (mm)	Bladder height 2b (mm)	2a/L	b/a	L/λ
EA97_1	7.8	10.2	ND ^{*2}	ND ^{*2}	ND ^{*2}	ND ^{*2}	2.58
EA97_2 ^{*1}	9.0	10.4	38.4	2.4	0.369	0.063	2.63
EA97_3 ^{*1}	7.0	10.3	49.3	2.6	0.479	0.053	2.61
EA97_4 ^{*1}	4.1	8.8	24	1.8	0.273	0.075	2.23
EA97_5 ^{*1}	6.7	9.6	27.9	2.5	0.291	0.090	2.43
EA97_6	6.0	9.9	ND ^{*2}	ND ^{*2}	ND ^{*2}	ND ^{*2}	2.51
EA97_7	8.7	9.5	ND ^{*2}	ND ^{*2}	ND ^{*2}	ND ^{*2}	2.41
EA97_8 ^{*1}	5.8	9.7	42.6	2.9	0.439	0.068	2.46
EA97_9	4.5	8.4	23	3.1	0.274	0.135	2.13
EA97_10	8.0	10.1	ND ^{*2}	ND ^{*2}	ND ^{*2}	ND ^{*2}	2.56
EA97_11 ^{*1}	6.1	10.3	46.1	3.25	0.448	0.070	2.61
EA97_12 ^{*1}	7.0	10.7	ND ^{*2}	ND ^{*2}	ND ^{*2}	ND ^{*2}	2.71
EA97_13 ^{*1}	7.0	9.2	34.4	2.8	0.374	0.081	2.33
EA97_14 ^{*1}	5.1	8.7	26.5	1.65	0.305	0.062	2.20
EA97_15 ^{*1}	4.5	7.6	20	1.55	0.263	0.078	1.93
EA97_16 ^{*1}	4.9	8.1	21.5	1.6	0.265	0.074	2.05

*1 Used for the regression analysis

*2 No data

本, 1996)。英名を armor head というほど頭部はかなり堅く、音響的にも体の表面からの反射は無視できないと思われる。Fig. 15にクサカリツボダイの軟 X 線写真を示す。

1997年3月に水産庁調査船開洋丸により行われたクサカリツボダイのバイオテレメトリー調査（柳本, 1997）の際に、200mの深度付近のクサカリツボダイを深海魚用釣り漁具により漁獲し、水槽での馴致後、冷凍したものを解凍して測定を行った。背骨の下に鰾のある閉鰾魚である。鰾の形状は、全体的に紡錘形であるが、頭方向の先端部分が背骨を包むように盛り上がっている。Table 12にクサカリツボダイの諸元をまとめた。1997年に周波数70kHzで測定を行った。1998年には1997年に測定し再凍結したものを含めて38kHzで測定を行った。

Table 11. Fish size, swimbladder size and weight of European anchovy measured right after captured by purse seine boats in Turkey.

Fish No.	Weight W (g)	Fork length L (cm)	Bladder length 2a (mm)	Bladder height 2b (mm)	2a/L	b/a
1	4.45	7.6	21.9	1.7	0.288	0.078
2	4.457	7.8	22.4	1.8	0.287	0.080
3	4.46	7.9	21.8	1.9	0.276	0.087
4	4.512	8.4	25.9	1.7	0.308	0.066
5	4.519	8.7	25.1	1.8	0.289	0.072
6	4.522	8.8	24.9	2	0.283	0.080
7	7.03	9.2	34.7	2.6	0.377	0.075
8	6.83	9.5	34.9	2.8	0.367	0.080
9	7.4	9.6	40.9	2.7	0.426	0.066
10	6.95	9.7	41.7	2.8	0.430	0.067
11	7.8	9.9	42.8	2.9	0.432	0.068
12	7.988	10	42.6	2.7	0.426	0.063
13	7.907	10.1	46.9	2.7	0.464	0.058
14	4.62	8.7	26.2	1.9	0.301	0.073
15	6.3	9.4	35.3	2.7	0.376	0.076
16	8.25	10.3	46.9	3.2	0.455	0.068
17	7.907	10.2	45.2	3.1	0.443	0.069
18	4.5	7.6	22.1	1.8	0.291	0.081
19	4.7	8.4	26.1	1.8	0.311	0.069
20	6.9	9.9	41.7	2.7	0.421	0.065

回転楕円体模型のターゲットストレングスの測定方法

周波数38kHzを使い、回転楕円体模型の長軸方向に平行な平面（ピッチ面）内の TS パターンの測定を、傾角−50度から50度まで1度毎に、各角度5回ずつの測定を行った。送信毎に得られるエコー波形をデジタルオシロスコープ内蔵ハードディスクに収録した。測定に先立って、標準球であるタングステンカーバイド球（WC 球、直径38.1mm）による較正を行い、あらかじめ送受波システムの送受信係数を求めた。

回転楕円体模型の TS に比べて、ノイズレベルは十分低かったため、背景の残響レベルの補正はしなかった。また、周波数38kHz、水温20℃での淡水の吸収減衰係数は0.3dB/kmであり、送受波器からターゲットま

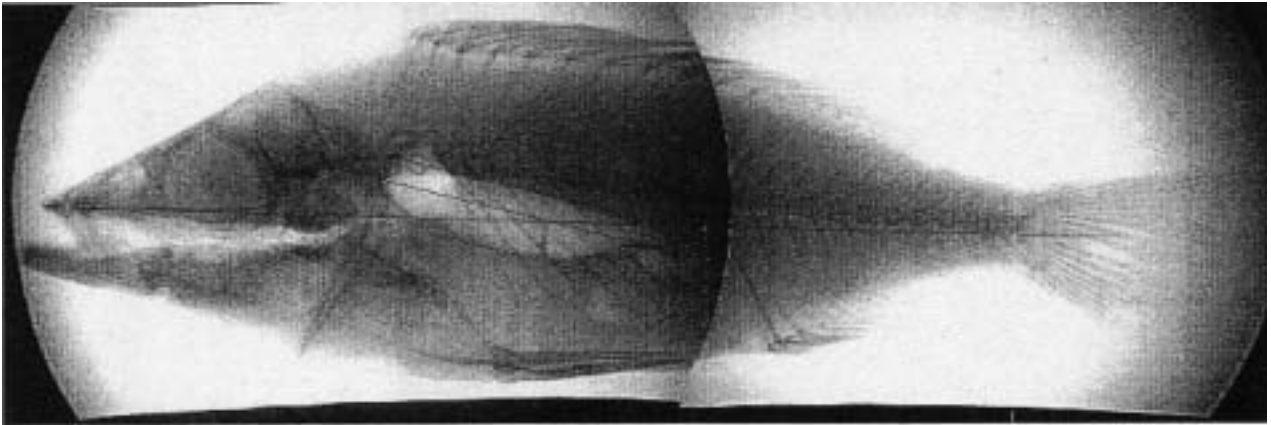


Fig. 15. Soft X-ray image of armor head (AH98_1). Centerlines of the fish and the swimbladder are drawn on the image.

Table 12. Size of fish and swimbladder, weight of fish, and the conditions of armor head used for the TS measurements.

Fish No.	Weight W (g)	Fork length L (cm)	Bladder length 2a (mm)	Bladder height 2b (mm)	2a/L	b/a	L/λ	Bladder angle	Comments	condition
AH97_1 ^{*1}	638	34.3	65.8	13.8	0.19	0.21	16.0	ND ^{*2}	70kHz	Good
AH97_2 ^{*1}	492	29.7	56.3	14.1	0.19	0.25	13.9	ND ^{*2}	70kHz	Good
AH97_3 ^{*1}	437	31.5	83.0	19.4	0.27	0.23	14.7	ND ^{*2}	70kHz	Good
AH98_1 ^{*1}	438	32.3	89.6	19.2	0.28	0.21	8.2	12.2	38kHz	Good
AH98_2	514	32.4	ND ^{*2}	ND ^{*2}	ND ^{*2}	ND ^{*2}	8.2	ND ^{*2}	Same sample as AH97_2, 38kHz	Deflated
AH98_3 ^{*1}	477 ^{*3}	29.4	56.3	14.1	0.19	0.25	7.4	11.3	Same sample as AH97_3, 38kHz	Good
AH98_4 ^{*1}	423 ^{*3}	31	8.3	19.4	0.27	0.23	7.9	11.9	38kHz	Good
AH98_5 ^{*1}	520	30.6	64.5	10.7	0.21	0.17	7.8	12.4	38kHz	Good

*1Used for the regression analysis

*1No data

*1It may happen that body fluid dropped because of recursive defrost.

での距離10m程度では、ほぼ0と見なせるので、(3.8)式で吸収減衰項は無視できる。較正により得られた送受信係数 (TR) と、測定により得られたエコーレベル (ES) を、(3.8) 式に入れて、それぞれの回転楕円体模型の TS を求めた。

供試魚のターゲットストレングスの測定方法

回転楕円体模型の測定時と同様に、あらかじめ較正を行い、頭を下げた状態をマイナスとして、-50から50度までの TS を測定した。

供試魚については、TS 測定の前後で、軟 X 線発生装置を用いて鰾の形状を観察した。TS 測定は、コアユについては、麻酔剤 (FA100) で麻酔をかけた状態で測定を行った。その他の魚種については、解凍後に測定を行った。測定時には鰾等に付着している気泡を取り除いた。TS 測定の前後で大幅に鰾の形状が異なっていた場合には、以後の解析に使用しなかった。

結 果

回転楕円体模型の TS パターン測定結果

38kHz で行った TS パターンの測定結果を **Fig. 16** に示す。図中で+は各1回の送受信で得られたエコーデータから得られた値を、白丸は5回分の平均値を、実線は回転楕円体理論モデルによる理論値を示す。なお、同図(d)については、計算機の精度上の問題から理論値の計算はできなかった。**Fig. 16**について、理論値と測定値の間の相関係数を、図中に示しているが、いずれも1に非常に近い値となった。この中で、同図(e)に示す模型 B1 の相関係数が一番低くなった。しかしながら、実験値のピークを理論値のピークに合わせて、相関係数を計算すると、その値は0.9992となることから、模型をテグスに取り付ける際に少し傾いて取り付けたためと思われる。**Fig. 16(a)**、**(b)**は同じ模型 A2 について、2回繰り返し測定を行った結果である。(a)、(b)の測定値、理論値とも、よく一致しており、繰り返し精度も十分高く、極めて正確な測定を行うことができることがわかる。

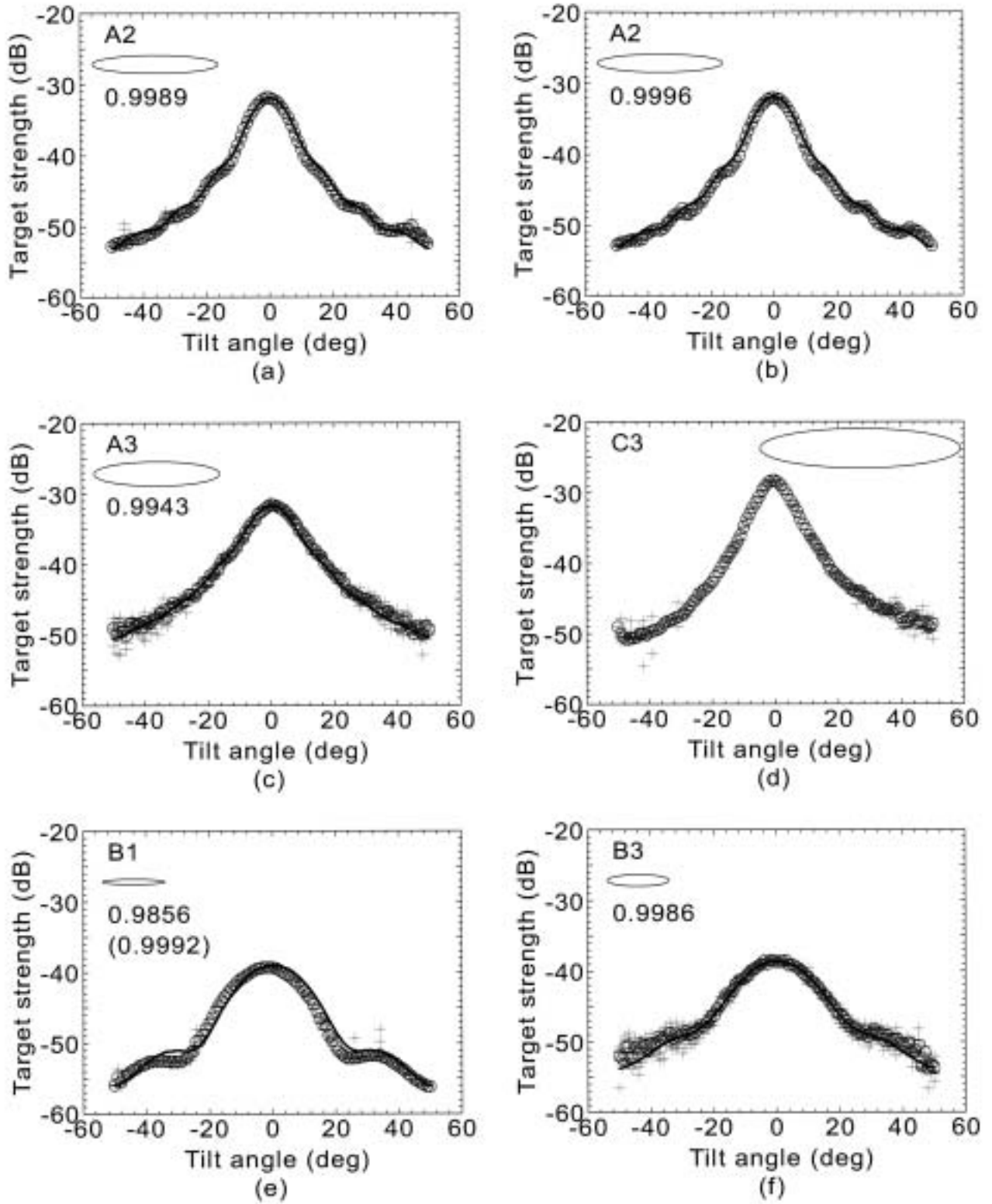


Fig. 16. Measured and theoretical TS patterns. Scattering model type, shape, and the correlation coefficients are shown in each figure. Refer to **Table 5** about the scattering model specifications. (+ five data obtained at each angle, O average of the five data at each angle excepted bubble interfered echoes, — theoretical values)

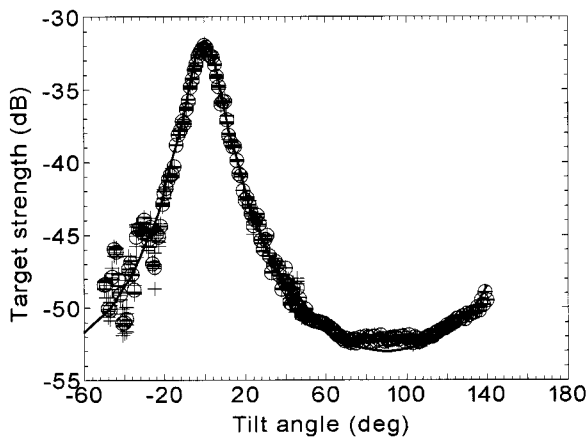


Fig. 17. Measured and theoretical TS patterns of type A3. The symbols are the same as the Fig. 16.

模型 A3, B3 の測定結果を示す(c), (f)を見ると、傾角が大きいための測定値のあばれが大きくなっている。この理由については不明であるが、水槽内の送受波器の付近で発生していた気泡の影響が考えられる。A3, B3 の測定は一連の実験で最後の時期に行っており、水槽内での気泡の発生が、ある時期から増えたので、気泡のエコーとターゲットからのエコーが干渉して測定値が変動したためと思われる。

一般的な傾向として、傾角の大きいところで、測定値と理論値の差が大きくなっている。この理由としては、回転楕円体模型を製作する時に、先端になればなるほど、正確な回転楕円体の形からずれてくるためと思われる。

Table 5 で示した回転楕円体模型タイプ A3 について、70kHz を使い、ブロードサイド方向とエンドオン方向の測定を行った結果を Fig. 17 に示す。

-50°~50° までの測定は、回転楕円体模型の長軸方向が送受波器に対して平行になるように取り付けて測定した。また40°~140°までは長軸方向が送受波器に対して直角となるように取り付けて測定した (Fig. 12

参照)。図中の+は、各傾角5回の測定全てを示し、○はその平均値を示す。また、実線が理論値である。-50°から-20°近くのデータは波打っているが、90°のエンドオン付近については、理論値と測定値は極めて良い一致を示している。このため-50°から-20°近くのデータのあばれは、何らかの外乱エコーによるものと思われる。

全体的に見て、理論と実験の一致は極めてよく、実験装置と方法の精度の高さが確認できた。

供試魚の TS パターン測定結果と規準化 TS

スケトウダラ成魚及び稚魚、ヘイク、アユ、ヨロップアカクチイワシ、クサカリツボダイについて、各傾角で5回測定したものの平均を TS パターンとしてそれぞれ、Fig. 18~23 に示す。各傾角での平均 TS 値を求める際に、5回の測定値のうち、他の値と2dB以上ずれているものは外れ値として除いた。また、鰐の形状に問題がないと判断した魚について、姿勢分布を仮定し、(2.31) 式により平均 TS を求め、平均 TS と体長の2乗についての回帰式を求めた。平均 TS を求めるのに必要となる魚の姿勢分布についての測定結果は少ないが、これまでの測定例について、Table 13 にまとめた。表中で Tilt angle は正規分布を仮定した場合の(平均、標準偏差)を示す。

Olsen (1971) により得られたマダラについての姿勢分布の測定結果(-4.4, 16.2) は、分布(-4, 15) や分布(-5, 15) の場合と大差ないので、アユを除いた魚については Foote and Traynor (1987) がスケトウダラについて推定した姿勢分布(2, 5), (2, 10) や、(-4, 15), (-5, 15) の4通りについて計算した。また、アユの姿勢測定は白木原らが行ったもので、水槽内に入れた11尾のアユの姿勢をビデオカメラで連続集録後、比較的安定していたとき姿勢を読みとったものであり、測定個体数(同一個体の重複撮影あり)186尾の平均と標準偏差である。また、白木原らは、大小

Table 13. Historical data of the measurements of tilt angle distribution.

Species	Tilt angle	Observed place	Method	Observer
Cod	(-4.4, 16.2)	Lofoten island	Camera	K.Olsen ⁷⁸⁾
walleye pollock	(2.5)	Bering sea	Deconvolution	K.G.Foote and J.J.Traynor ⁷⁹⁾
	(2, 10)			
	(-4, 15)			
Ayu	(5.1, 12.8)	Tank, 11 fish ^{*1}	Camera	Shirakihara (Personal comm., 1997)
	(1.8, 7)	Tank, 1 fish ^{*1}		
	(2, 6.3)	Tank, 1 fish ^{*1}		
Etc.	(-5, 15)			Miyanohana ⁶⁶⁾

*1 Observed number of fish.

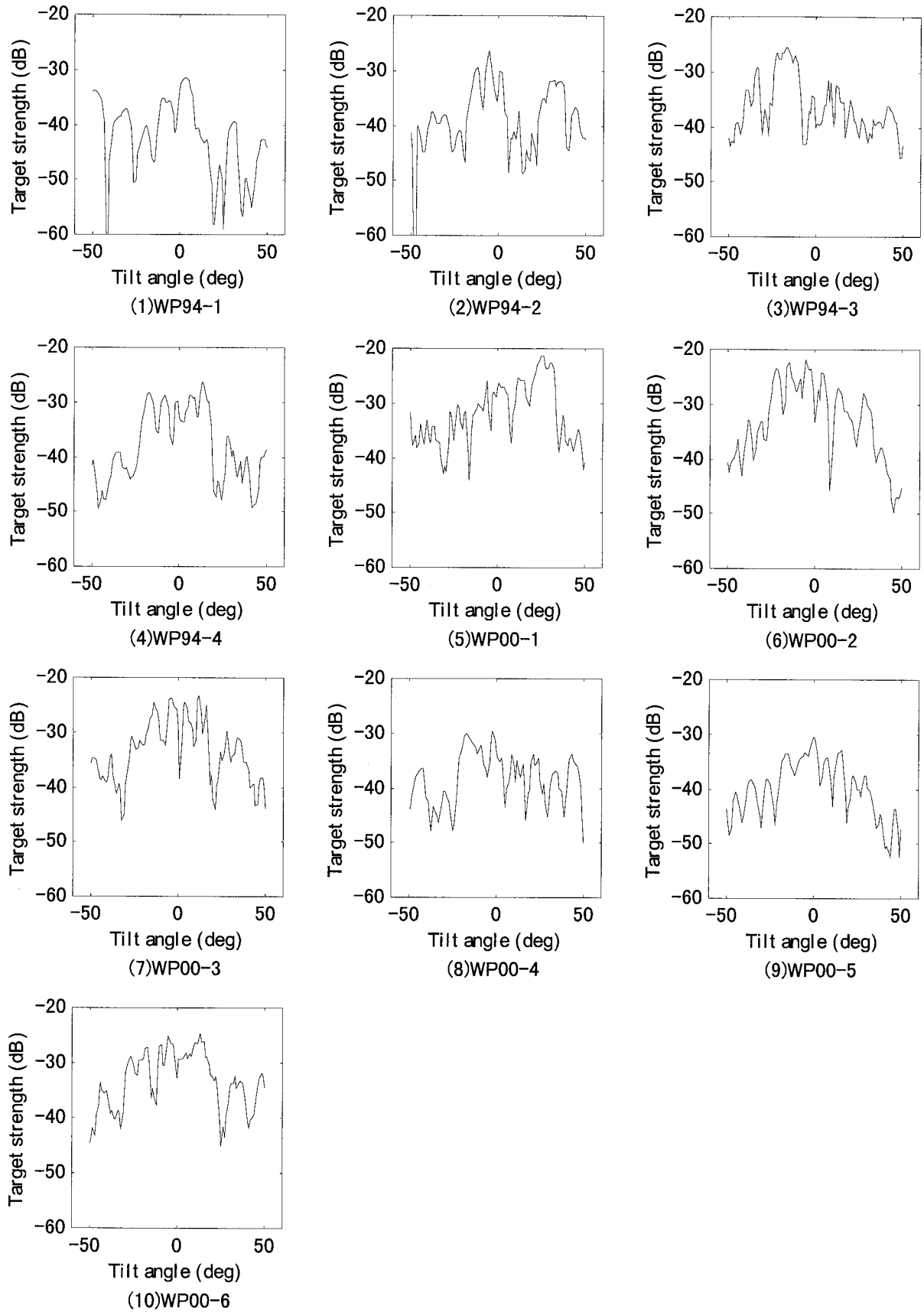


Fig. 18. Measured TS patterns of adult walleye pollock using a 38kHz transducer. The lines show the averaged TS except outliers at each angle.

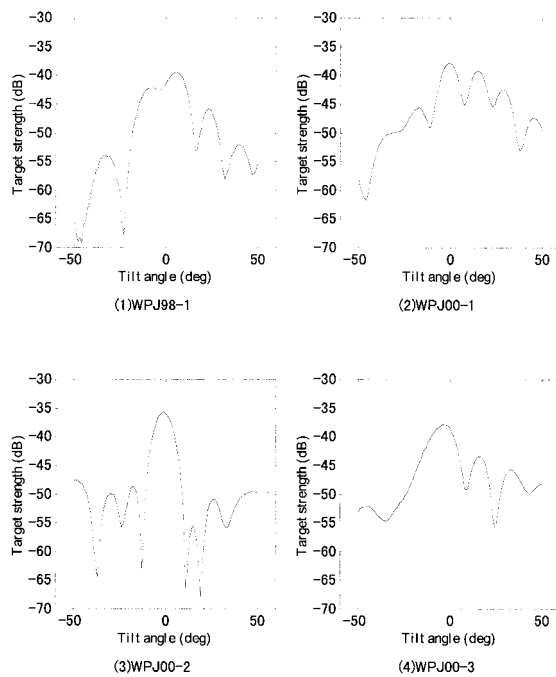


Fig. 19. Measured TS patterns of juvenile walleye pollock using a 38kHz transducer. The lines show the averaged TS except outliers at each angle.

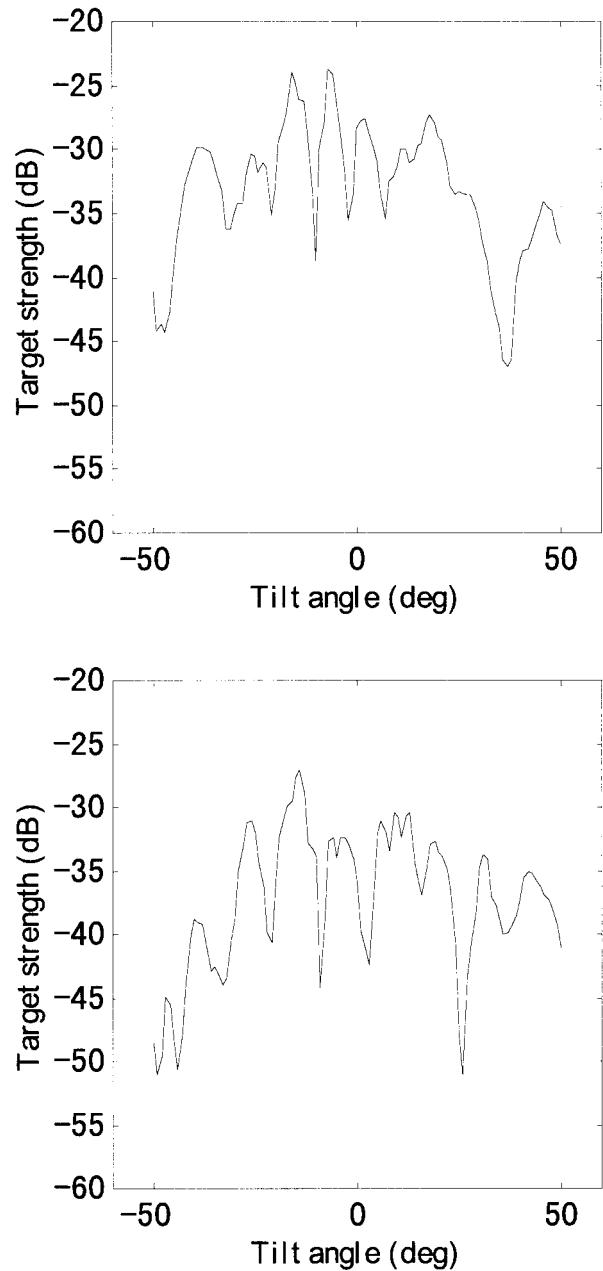
2尾のアユを同一水槽に入れて同じように姿勢の測定を行った。大きい方のアユについて78回の測定結果、小さいアユについて63回の測定結果がそれぞれ(2,6.3), (1.8,7)であった。そこで、アユについてはこれらの分布と(-5,15)に対して計算を行った。アユ、ヨーロッパカタクチイワシについて得られた回帰式を Fig. 24, Fig. 25に示す。

中空回転楕円体散乱理論によれば、体長を波長で規準化することにより、無次元周波数化できる(Furusawa,1988)。そこで、波長で規準化した体長に対する規準化平均 TS や規準化最大 TS との関係について調べた。その結果を Fig. 26に示す。同図(a)は波長で規準化した体長に対する規準化最大 TS の関係を、(b)は同じく規準化平均 TS との関係を示す。

考察

高精度 TS パターン測定システム

精密に製作した発泡スチロール製回転楕円体模型の TS パターン測定結果と中空回転楕円体理論モデルとの比較を行った結果、測定値と理論値の相関係数がほぼ1となるほどの一致を示した。これは、測定装置の精度の高さを示す。また、送受信系の較正は標準球により行われており、測定値と理論値の一致は、標準球を用いた較正方法について、その精度の高さの証明ともなる。さらに、開発した TS 測定システムにより、



(2)HK94-2

Fig. 20. Measured TS patterns of Pacific hake using a 38 kHz transducer. The lines show the averaged TS except outliers at each angle.

理論モデルの検証を行うことも可能であると考えられる。

水槽内に構築した TS パターン測定システムにより、淡水水槽で有鰈魚の高精度推定をはじめて可能にした。また、測定の自動化を極力進めた結果、サンプルの取り扱いに習熟すれば、だれでも簡単に高精度な測定ができるようになった。これにより、必要に応じ

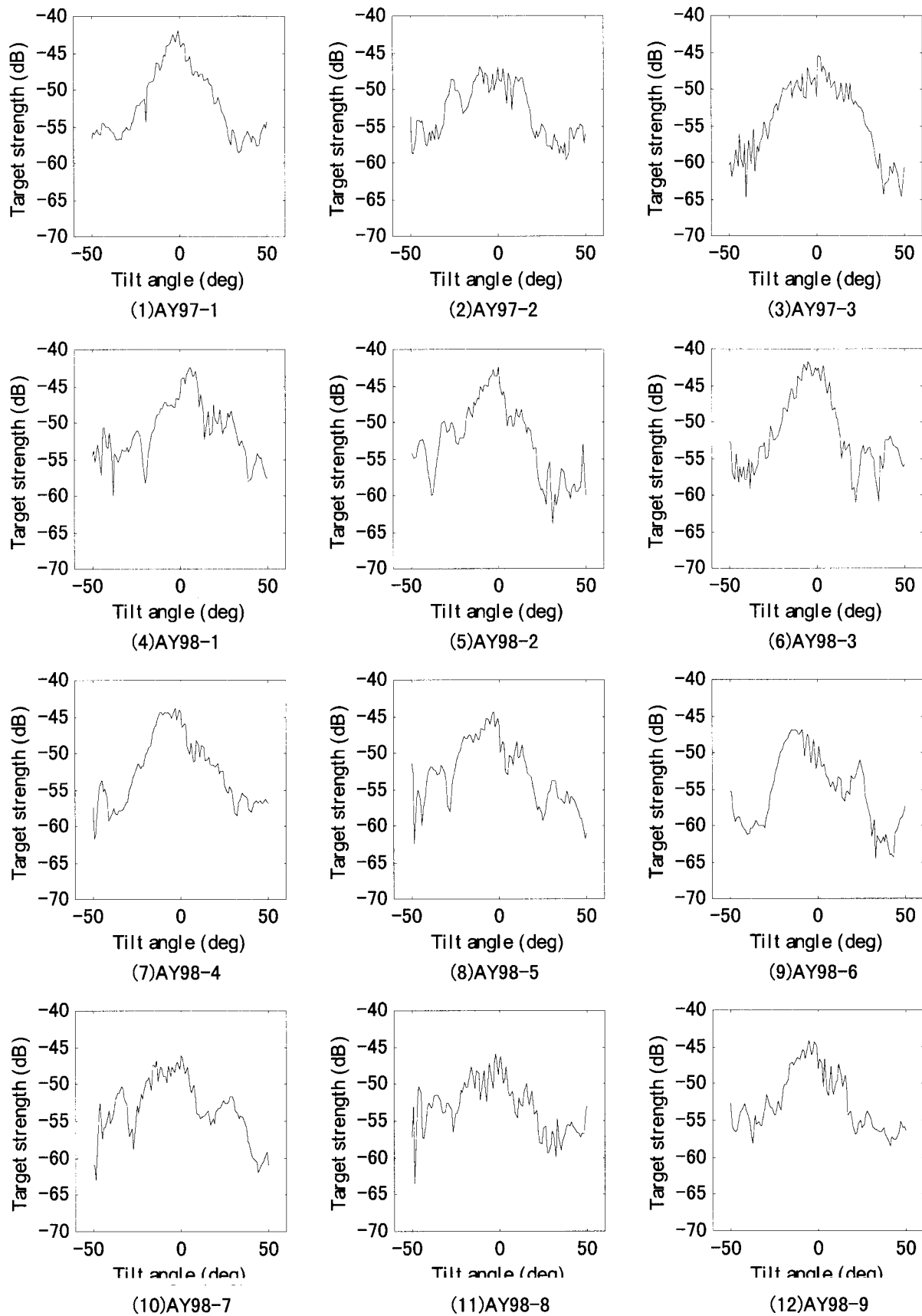


Fig. 21-1. Measured TS patterns of ayu using a 70kHz transducer. The lines show the averaged TS except outliers at each angle.

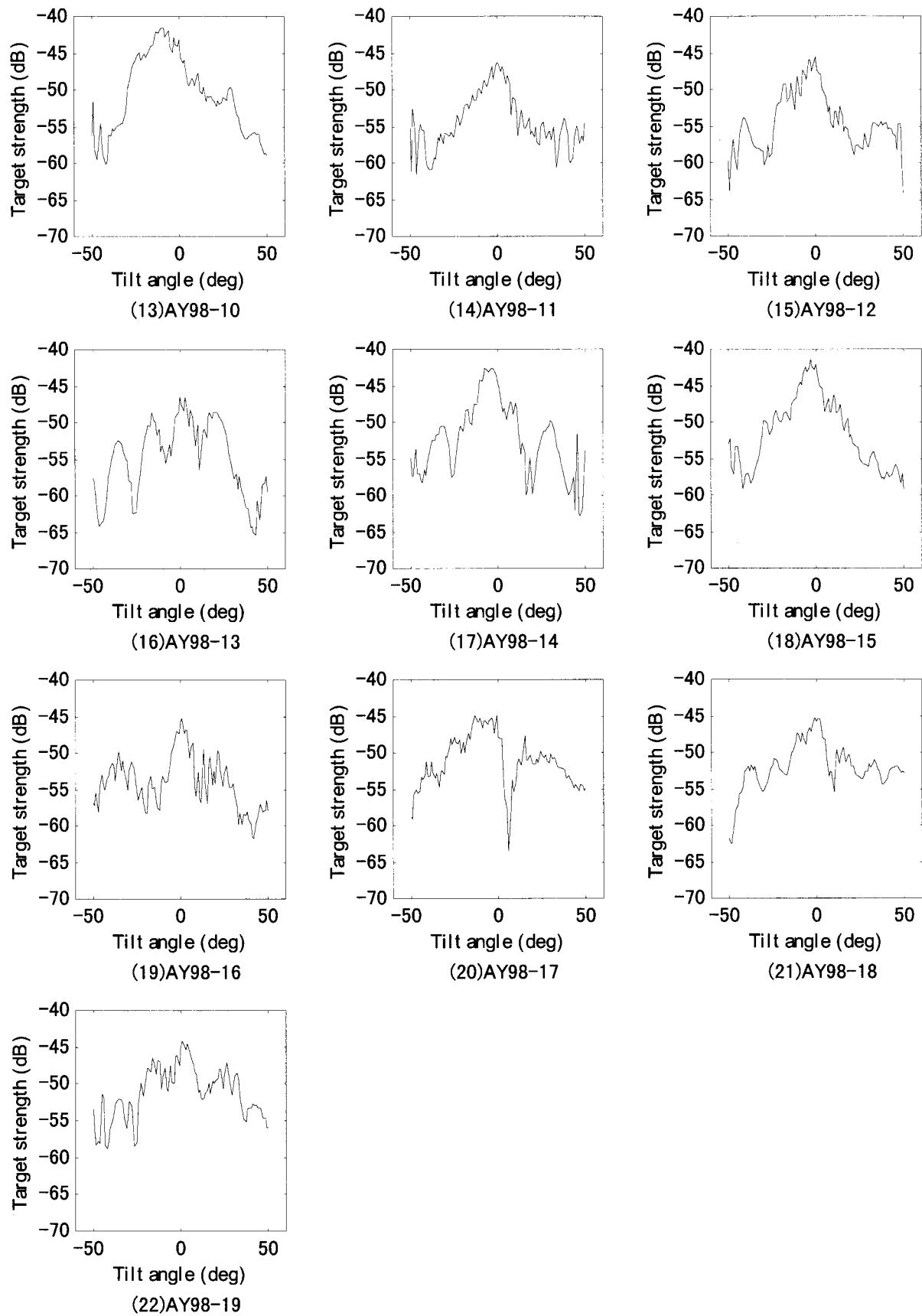


Fig. 21-2. Measured TS patterns of ayu using a 70kHz transducer. The lines show the averaged TS except outliers at each angle.

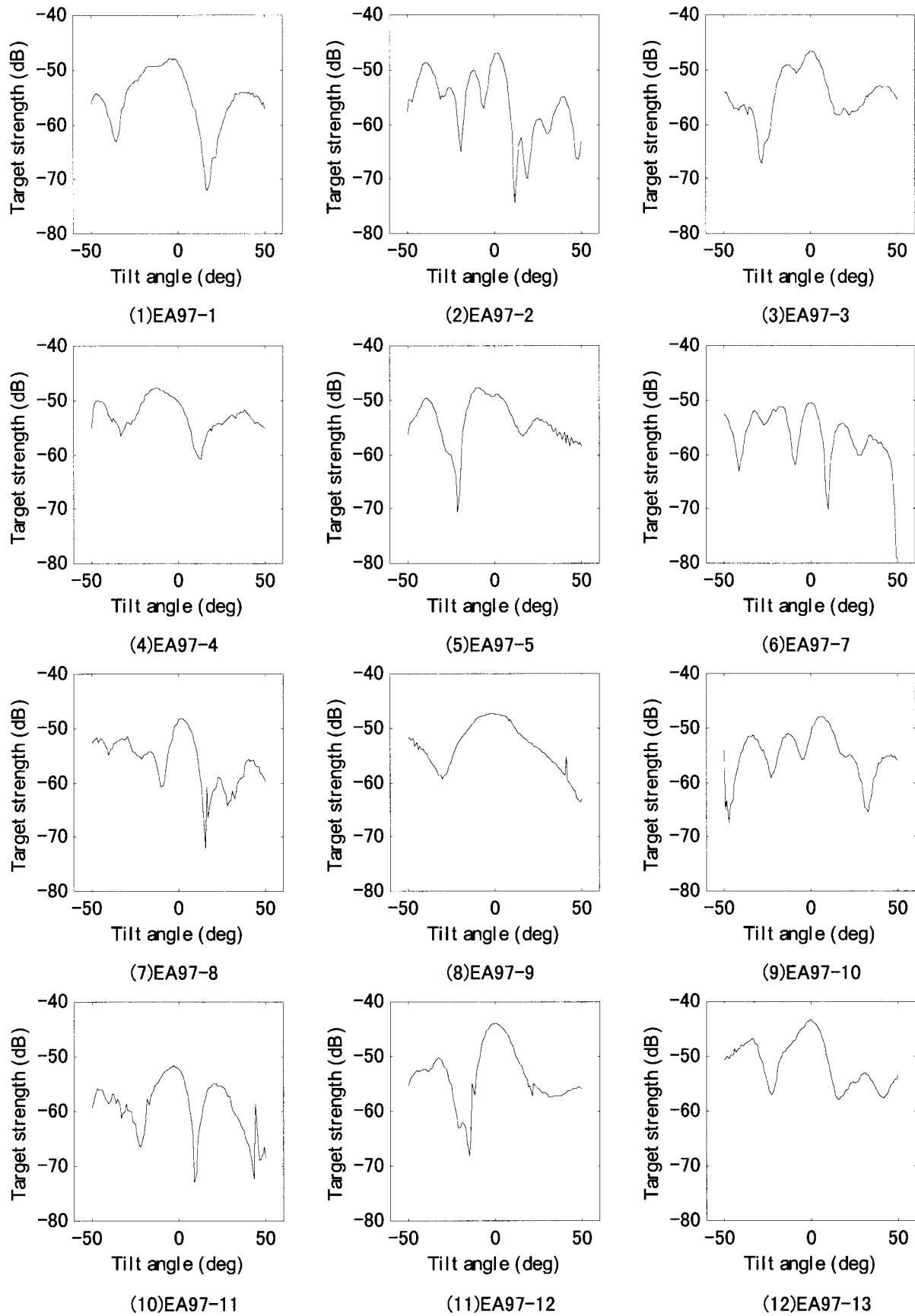


Fig. 22-1. Measured TS patterns of European anchovy using a 38kHz transducer. The lines show the averaged TS except outliers at each angle.

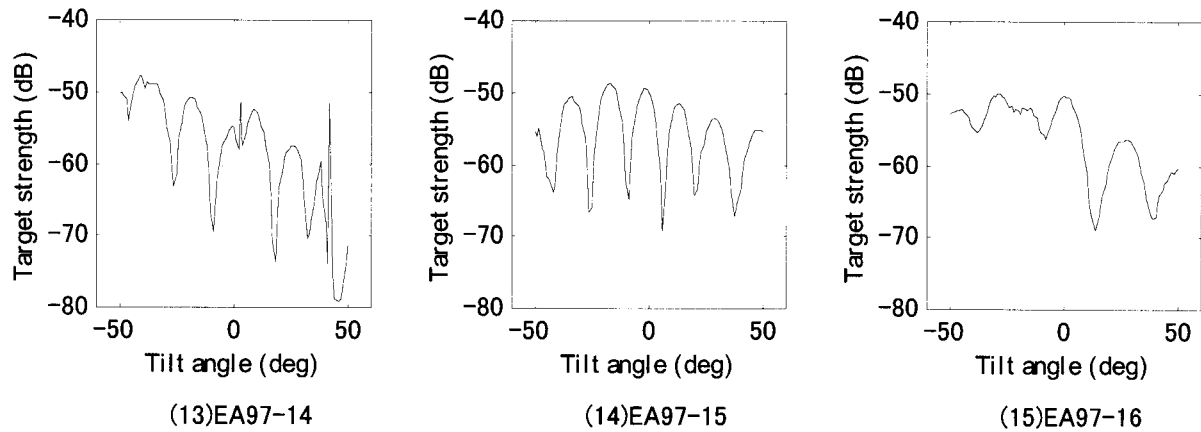


Fig. 22-2. Measured TS patterns of European anchovy using a 38kHz transducer. The lines show the averaged TS except outliers at each angle.

て、資源量推定に使用可能な TS の測定が可能になる。

鰐の状態についての形態的な面からの検討

鰐の形状は個体差が大きく、測定時の鰐形状から、正常かどうか判断することは難しい。そこで、鰐形状が正常であると判断する一つの方法として、魚体長で規準化した鰐長に対する鰐のアスペクト比（短径と長径の比）の関係を調べた。もし同一魚体長、同一魚体の魚がいて、個体間で鰐の形状は異なっているとすると、浮力を一定に保つため、鰐の体積は同一となるはずである。問題を簡単にするために、鰐形状を回転楕円体と仮定すると、その体積 V は、長径 a 、短径 b を用いて、

$$V = \frac{4}{3} \pi ab^2 \quad (3.9)$$

と表される。

ここで、体長 L のある魚の鰐の径を a_0, b_0 とし、体長 L の別の魚は a, b であるとする。また、簡単のためにアスペクト比 $b/a = y$, $2a/L = x$ とし、添え字 0 は最初の魚とする。浮力を保つために鰐体積が同じであるためには、

$$a_0 b_0^2 = ab^2 \quad (3.10)$$

が成り立つ必要がある。このため、 x, y については、(3.10) より、

$$y = x_0^{\frac{3}{2}} y_0 x^{-\frac{3}{2}} \quad (3.11)$$

となる。そこで、鰐が正常として TS 測定を行った魚について、魚体長で規準化した鰐長 x と鰐のアスペ

クト比 y の関係を調べた。その結果を Fig. 27 に示す。図中で用いたデータにより得られた回帰式は、

$$y = 0.0186x^{-1.4365} \quad (3.12)$$

となり、(3.11) の関係に比較的良好に一致する。そこで、今回の鰐を正常とした判断に大きな問題はないと考える。さらに、厳密に行うためには、同じ魚種について、水面付近で馴致させた多数の魚の鰐形状より、(3.12) 式の回帰式を求めておく必要がある。

規準化 TS についての検討

Fig. 26(a), (b) より、閉鰐魚については、波長で規準化した体長が 7 より大きい場合には、規準化最大 TS、平均 TS ともほぼ一定となる。前者は -62.1dB となり、Miyano (1990) による $-59 \sim -61\text{dB}$ より若干低い値となったが、ほぼ等しい。後者は -67.7dB であり、Foote (1987) が、スケトウダラ、マダラなどについて自然法での測定結果から得た閉鰐魚についての推奨値、 -67.5dB に非常によく一致している。鰐が正常と判定した 3 尾のスケトウダラについての規準化 TS は、姿勢分布 $(-5, 15)$ を仮定した場合で -67.7dB であり、Foote and Traynor (1988), Traynor (1996) による -66.0 に比べて 1.7dB 低い。データ数が少ないため、今後とも測定例を増やす必要がある。

閉鰐魚の規準化 TS はほぼ一定であるのに対して、開鰐魚の規準化 TS の変動は大きい。また、生かした状態で測定したアユに比べて、死んだ状態で測定したヨーロッパカタクチイワシの測定値の変動が大きい。Fig. 27 で示した体長に対する鰐長の割合がカタクチイワシの場合は 0.25 から 0.48 程度と他の魚種に比べて広い。古澤の行った中空回転楕円体理論モデルによる計算では、アスペクト比が大きくなるより、鰐長が大き

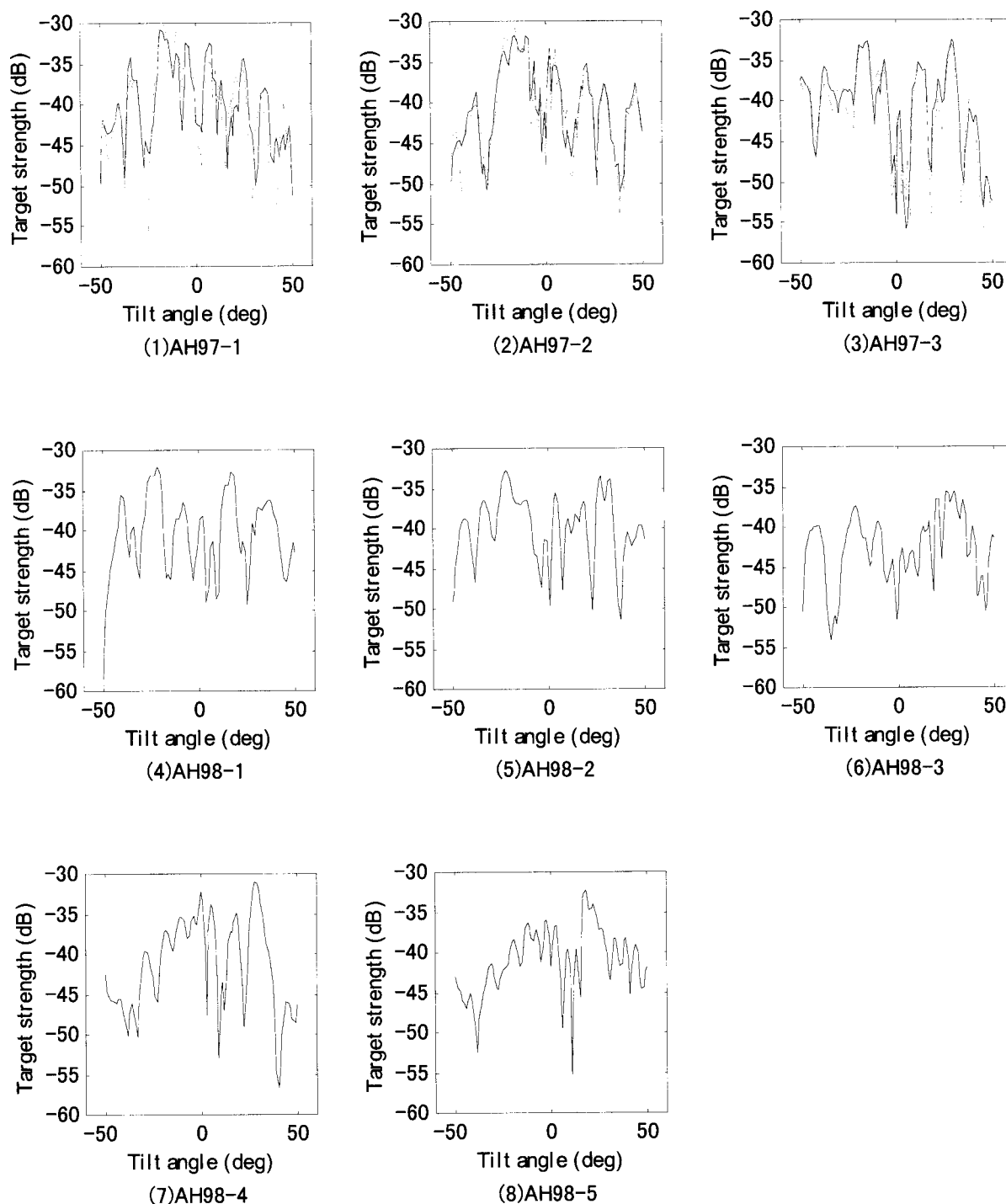


Fig. 23. Measured TS patterns of armor head. The combinations of '(2)' and '(5)', and '(3)' and '(6)' are the same sample. The frequency of 70kHz is used from (1) to (3) and 38kHz is used from (4) to (8). The lines show the averaged TS except outliers at each angle.

くなる方が TS への寄与が大きい(Furusawa, 1988)。そこで、同じ体長でも鰐長が大きく異なるカタクエイワシの TS の変動が大きいものと考えられる。これは、開鰐魚では、鰐が消化管とつながっているために、鰐の形状が変動しやすいためと考えられる。そこで、開鰐魚については、生かした状態で測定することが望ま

しいと考えられる。

アユの規準化平均 TS は、 -68.7dB となり、Foote (1987) がヘリングの測定結果より得た開鰐魚の推奨値 -71.9dB より 3dB 程度高い値となった。これは、アユが淡水魚のため、海産魚に比べると、淡水と海水の密度差分の浮力を増やすために鰐が大きくなっている

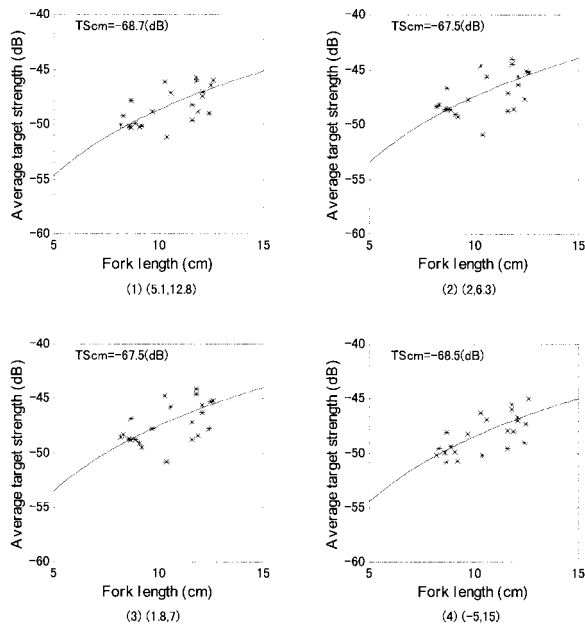


Fig. 24. Variation of target strength with fork length of ayu. The regression lines expressed as $T_s = aL^2$ are shown in the figure, where L is the fork length and $TS_{cm} = 10 \log a$. Tilt angle distribution is assumed normal distribution with different average and standard deviation: (1) average 5.1° , standard deviation 12.8° ; (2) average 2.0° , standard deviation 6.3° ; (3) average 1° , standard deviation 8.7° ; (4) average -5° , standard deviation 15° .

ためと考えられる。

ヨーロッパカタクチイワシについては、規準化平均 TS は、 -70.5dB となり -71.9dB に近い値となり、妥当な結果と考えられる。

スケトウダラ稚魚の規準化最大 TS、平均 TS はそれぞれ、 -56.9dB 、 -61.5dB とかなり高い値となった。これと同じ現象は、Iida (1998) がケージ法によるチカ、メバル、フグの稚魚の TS 測定結果でも報告している。Iida によれば、体長 (L) が波長 (λ) の 2 倍以下でこの現象が観察されとしている。今回の測定では、この比が 2 程度である。ヨーロッパカタクチイワシもこの程度の比であるが、Fig. 27 の鰾のアスペクト比からわかるように、鰾形状の特徴が大きく異なる。ヨーロッパカタクチイワシの鰾は細長く、スケトウダラ稚魚の鰾は膨らんだ形状である。

ここで、鰾の共振による影響の可能性について調べてみる。古澤 (1989) は、Love (1978) による厳密な鰾の共振モデルと Lovik and Hovem (1979) による実験式を結びつけて、TS の実用式を導出した。それによれば、鰾の共振周波数は、鰾を回転楕円体で近似した場合に、その鰾のアスペクト比 b/a と、尾叉長に対する鰾長の比である $k_L = 2a/L$ とを用いて

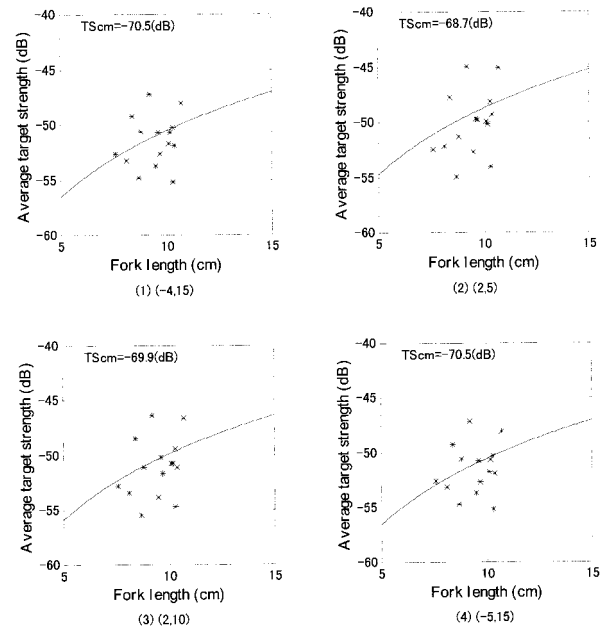


Fig. 25. Variation of target strength with fork length of European anchovy. The regression lines expressed as $T_s = aL^2$ are shown in the figure, where L is the fork length and $TS_{cm} = 10 \log a$. Tilt angle distribution is assumed normal distribution with different average and standard deviation: (1) average -4° , standard deviation 15° ; (2) average 2° , standard deviation 5° ; (3) average 2° , standard deviation 10° ; (4) average -5° , standard deviation 15° .

$$k_r = \frac{1}{2} k_L (b/a)^{2/3} \quad (3.13)$$

のように定義された k_r により、共振時の TS の推定ができるとしている。そこで、スケトウダラ稚魚の k_r を求めてみる。スケトウダラ稚魚 WPJ00_1~WPJ00_3 について (3.13) 式で計算した k_r は、それぞれ、0.0367, 0.0364, 0.0421 となる。このときの共振は、

$$L/\lambda_r = \frac{5.8}{1500k_r} \quad (3.14)$$

のときに起こる。よって、それぞれの k_r に対して、 $L/\lambda = 0.1054, 0.1062, 0.0918$ となり、ほぼ $L/\lambda = 0.1$ で共振が生じるはずである。そこで、 L/λ の測定結果における大きな値は鰾の共振によるものではあり得ないと考えられる。今回の現象は、Iida の指摘するような魚体内の気泡の影響かもしれない。今後も引き続き調査を行う必要がある。

結 言

(1) 高精度な TS パターン測定装置を開発し、精密に製作した発泡スチロール製回転楕円体模型の TS パターン測定結果と中空楕円体理論による厳密モデルとの比較を行った。測定と理論とは極めてよ

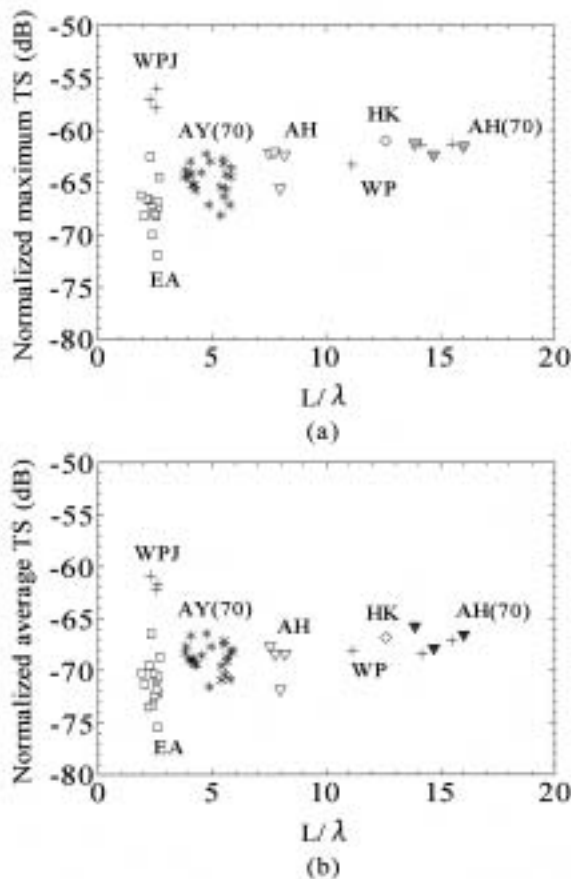


Fig. 26. Normalized target strength with fork length normalized by the wave length: (a) normalized maximum TS, (b) normalized average TS. (□ European anchovy, + walleye pollock, * ayu, ▽ armor head, ◇ Pacific hake, '(70)' measurement by 70kHz)

く一致し、装置の精度の高さが検証された。

- (2) 高精度な TS パターン測定装置を開発により、淡水中で、有鰾魚の TS パターン測定を、いつでも、簡単に測定できるようになった。
- (3) 開発した装置を用いて、閉鰾魚であるスケトウダラ、太平洋ヘイク、クサカリツボダイ、および開鰾魚であるアユ、ヨーロッパカタクチイワシの TS 測定を行った。閉鰾魚について、体長を波長で規準化した値が 7 以上の時に、規準化最大 TS、平均 TS はそれぞれ -62.1dB 、 -67.7dB となった。開鰾魚については、アユの規準化 TS は -68.7dB 、ヨーロッパカタクチイワシは -70.5dB となった。これらの値は実際の資源調査などで使用可能である。
- (4) 生かした状態で測定したアユのほうが、死んだ状態で測定したカタクチイワシより測定値の変動が小さくなった。開鰾魚については、なるべく生かした状態での測定が望ましい。
- (5) スケトウダラ稚魚の規準化最大 TS および平均 TS はそれぞれ、 -56.9dB 、 -61.5dB とかなり高い

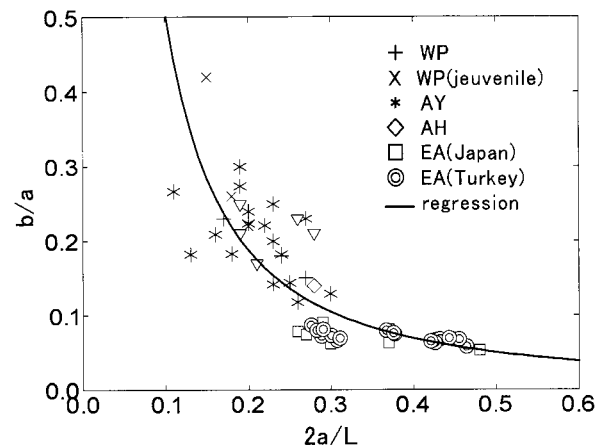


Fig. 27. Relationship between the aspect ratio of the swimbladder and normalized swimbladder length by fork length. Regression line is calculated using normal samples judged by the soft X-ray images. (L: fork length, a: major radius of the swimbladder, b: minor radius of the swimbladder, WP: walleye pollock(adult), AY: ayu, AH: armor head, EA (Japan): European anchovy measured in Japan, EA (Turkey): European anchovy measured in Turkey)

値となった。この原因については不明であり、さらなる調査が必要である。

- (6) 体長で規準化した鰾長に対する鰾のアスペクト比の間には、おおよそ、鰾のアスペクト比は体長で規準化した鰾長の $-3/2$ 乗に比例するという関係がある。そこで、鰾が自然状態に近いかどうか判断するための一つの指標として使用できる。

第4章 鰾形状モデルによるターゲットストレンジス関数の推定

緒言

ある海域における魚の資源量推定に必要なターゲットストレンジス (TS) は、通常、魚体長と TS の関係式を用いて、漁獲サンプルから得られた魚体長分布から求める。このために、魚体長と TS の関係は重要であり、これまでは、主として実験的な手法 (Nakken and Olsen, 1977; Miyanoana et al. 1990; Foote and Ona, 1985) により求められてきた。例えば、前章では、水槽における TS 測定システムの開発を行い、高精度な測定が可能であることを示し、5 種類の魚種についての規準化 TS を示した。しかしながら、対象とする魚の種類は多く、使用する周波数範囲も広い。このため、実験的手法のみでは限界があり、何らかの理論モデルによる TS の推定が必要である。

Foote (1985) は、鰾全体の形状からキルヒホッフ近似による理論計算により TS パターンの計算が可能

であることを示した。しかしながら、体長が波長の8倍から36倍程度の魚についてしか適用できず、さらに、鰐の形状を知るためには、熟練した技術を要する手順が必要であり、多くの魚について行うことは難しい。その手順では、まず、釣り上げた魚を水面付近で馴致した後、アルコールで急速冷凍する。次に、カルボキシメチルセルロース中で固化後、ブロック状にして1ミクロン厚に薄片する。こうして得られた薄い切片から鰐の断面形状を測定し、この断面形状より鰐の3次元形状を得る。

その後、McClatchie et al.(1996)は、鰐に樹脂を注入し、その硬化後に、樹脂を取り出し、樹脂の薄片から鰐形状を測定する方法を開発した。

いずれの方法についても、魚を馴致した後、鰐の形状を得るまでに、相当の時間を要する。また、熟練した技術も必要であり、死亡後の鰐の形状測定となるという点で問題がある。

一方で、鰐の形状が、薄い円筒片の連なりと見なせる場合には、変形円筒理論モデル(Ye and Furusawa, 1995; Ye et al. 1997)を適用できる。この場合は、鰐全体の形状を知る必要はなく、魚の背方向と側面方向からの断面像があれば良い。このため、鰐形状の測定のためには、従来の軟X線発生撮影装置でも可能である。Ye et al.(1997)による変形円筒理論モデルは、有限円筒からの散乱の計算において、厳密式であるキルヒホッフの積分定理に現れる表面の音圧場を、同じく厳密に得られる無限円筒について得られた音圧場に等しいと仮定して得られたものであり、後方散乱や前方散乱などの場合には、Stanton(1989)が導出した式に一致する。

本研究では、このYeモデルの一般性に着目し、これを魚のTS推定に適用できるようにする。この変形円筒理論モデルは、これまで魚の散乱に使用されておらず、今回の適用がはじめての試みとなる。

そこで、本章では、まず変形円筒理論モデルと鰐の形状測定に軟X線撮影装置やX線断層撮影装置などを用いることによって、比較的簡単に各種のTS特性が解明できることを示す。例えば、医療で使用されているX線断層撮影装置(高橋, 佐久間, 1990; 木村, 古賀, 1993)の性能は、1mm毎の薄片画像を、1回転あたり0.6s程度のヘリカルスキャン^{*2}で得ることができる。これは、30cmの魚であれば、180sで魚全体をスキャンできる計算となる。また、魚を生かした状態でその鰐の3次元形状を得ることも可能である。

次に、第3章で開発したTS測定システムを用いてTSパターンの測定を行ったスケトウダラ、太平洋ヘ

イク(以下、ヘイク)、アユのサンプルについて、変形円筒理論モデルによる理論値と比較を行う。すなわち、これらのサンプルについて、軟X線による背方向と側面方向からの鰐の断面像もとに、変形円筒理論モデル(以下DCM)によってTSパターンを数値計算で求め、水槽内での測定結果により検証する。また、参考のために、中空回転楕円体理論モデル(以下PSM)による計算も併せて行う。

特に、生きたサンプルを使用することのできるアユについて、測定と理論モデルの精密な比較を行う。これにより、死んだ魚で問題になる体内に入った気泡等の影響は避けることができると考えられる。また、アユはサイズが小さいために、背方向からの軟X線画像についても良好な画像が期待できる。アユについては、X線断層撮影装置による鰐の形状測定を併せて行い、軟X線像と比較を行う。

X線断層撮影装置により、多数の生きている魚の鰐形状を測定し、変形円筒理論モデルによる計算を行えば、音響水産資源調査で必要となる精確なTS特性やTS値の推定が可能になることを示す。

材料と方法 (Sawada et al. 1999)

軟X線発生撮影装置による鰐形状測定

軟X線発生撮影装置(SOFTEX PRO-TEST100)により、第3章で使用したスケトウダラ(Table 6参照)、ヘイク(Table 8参照)、アユ(Table 9参照)の背方向および横方向からみた鰐の軟X線画像を得た。DCMに必要な分割円筒の半径、長さ、中心の位置と中空回転楕円体モデルの計算に必要な、鰐の長径a、および幅と高さから短径bを得た。供試魚の各種パラメータをTable 14に示す。

パラメータのうち、「分割数」は、鰐を円筒薄片に分割するときに使用した分割数を示し、倍数は補間によるデータ像倍率を表す。例えばスケトウダラWP94_1の19×2は19本の分割線で分割した後に、内挿によりデータ数を2倍にしたことを示す。

X線断層撮影装置によるアユの鰐形状の測定

1998年7月30日に、生きたアユ9尾について、栃木県の東芝那須工場のX線断層撮影装置(Xvision)を用いて、鰐形状の3次元測定を行った。翌日、7月31日に水工研にそのアユを水工研に持ち帰り、8月1日に水工研の水槽でTSパターンの測定を行った。TS測定後、軟X線により、再び鰐の形状を確認した。Table 15に各アユのサンプルの体長、体重、コメント等を示す。TSの測定中も生存していたのは、AY98_9、

^{*2} 被撮影物体を一定速度で移動させ、X線を照射しながらX線管を連続回転させる。これにより、X線を螺旋状に体に照射するヘリカルスキャンとなる。

Table 14. Parameters of the Specimen

Species	Weight W (g)	Fork length L (cm)	Bladder length 2a (mm)	Bladder length H _b (mm)	Bladder length W _b (mm)	2b ^{*1} (mm)	b/a	ka	Bladder angle (deg)	Division
walleye pollock (<i>Theragra chalcogramma</i>)										
WP94_1 ^{*1}	340	33.6	78.2	9.7	23.2	16.5	0.21	6.2	3	19×2
WP94_2 ^{*1}	1032	55.9	149.3	22.6	34.9	28.8	0.19	11.9	0	20×2
WP94_3 ^{*1}	1164	61.1	100.9	23.3 ^{*2}	23.3	23.3	0.23	8.0	5	88
WP94_3 ^{*1}	820	51.8	111	15.5	30.3	22.9	0.21	8.8	5	19×2
Pacific hake (<i>Merluccius productus</i>)										
HK94_1	681	45.8	121	8.2	27	17.6	0.15	9.6	7	16×2
HK94_2	794	49.9	138.1	14.3	23	18.7	0.14	11.0	6	18×2
ayu (<i>Plecoglossus altivelis</i>)										
AY97_1	8.2	10.2	27.8	6.4	6.4	6.4	0.23	4.1	6.8	65
AY97_3	12.7	8.3	16.7	4	4.8	4.8	0.26	2.4	8.5	23×2

^{*1}2b = (H_b + W_b)/2, ^{*2}Since the soft X-ray image is unclear, bladder width is assumed as the same length as the bladder height.

Table 15. Fork length and weight of ayu for the CAT scan.

TS means. date	Sample	Weight (g)	Fork length (cm)	Standard length (cm)	Comments	Condition
1998/8/1	AY98_5	6.8	9.0	8.2	TS was measured after dead	
1998/8/1	AY98_6	12.8	10.4	9.5	TS was measured after dead	
1998/8/1	AY98_7	13.8	10.8	9.8	TS was measured after dead	
1998/8/1	AY98_8	2.6	7.2	6.6	TS was measured after dead	
1998/8/3	AY98_9	6.8	9.7	8.8	Alive during TS measurement, dead during soft X-ray measurement	good
1998/8/3	AY98_10	10.9	10.4	9.5	Dead before TS measurement	
1998/8/3	AY98_11	5.4	8.9	7.9	Alive during both TS measurement and soft X-ray measurement	good

AY98_11だけであった。X線の断層撮影の際にアユが暴れないようにするため、測定するアユを透明プラスチック容器の中で、液面高さ5mm程度の麻酔薬(FA100, 田辺製薬, 5000倍)中に側面を下にして横たえた。できるだけ短い時間内で測定を終えるため、魚の中心線と平行に薄片画像を得た。1断面にかかる時間は約1秒程度で、1尾あたり約60断面程度撮影した。この装置では、ターゲットを微小距離移動させながら、スキャンを行い、各断面像をテーブル送り量とともに画像記録する。そこで、この画像から鰾の輪郭を抽出し、スケールを与えて絶対値化することにより、3次元的な鰾形状を得ることができる。

以下、**Fig. 28**を用いて、画像処理の方法を示す。

1) ワークステーションにより光磁気ディスクに記録

された断面画像データは、標準的な医療用フォーマットであるDICOM形式で記録される。

2) DICOM形式の断面画像データを表示するソフトウェアDICOM. EXE(株)ラムテック)を用い、X線の吸収スケールを表すCT値^{*3}に関する2つのパラメータlevel, widthをそれぞれ90, 900という値に設定後、BMP形式の断面画像データに変換したものを(a)に示す。

3) ソフトウェアMATLAB(The MathWorks, Inc)により、(b)輪郭抽出、(c)鰾の選択、(d)鰾以外の輪郭の除去、(e)鰾の輪郭の抽出を行う。

4) 輪郭抽出後に輪郭の値を数値化し、3次元形状の数値データを得る。

5) 以上をすべての断面画像データについて行う。

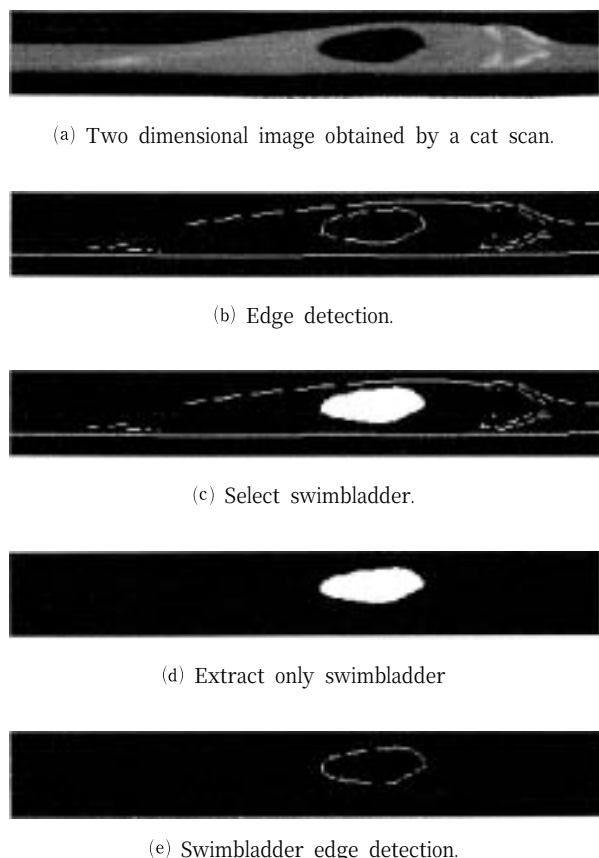


Fig. 28. Swimbladder shape extraction process from the CAT scan images (AY98_9).

- 6) 得られた鰾形状の数値データをもとに、鰾を上から見たときの断面像と横から見たときの断面像を抽出する。
- 7) これ以後は前述した軟 X 線のとおり同じ方法による。

計算方法

第3章で測定を行った、アユ、スケトウダラ、ヘイクについて、サンプル魚の鰾形状より DCM のより理論計算を行う。なお、比較のため PSM による計算も行う。また、スケトウダラ WP94_2については、検討のため魚体の密度、魚体中の音速をパラメータとして使用する液状 DCM により、鰾を除いた魚体のみの TS についても計算する。

PSM で必要なパラメータは、第2章で示したように、回転楕円体の長軸半径 a 、短軸半径 b 、水中の波数 k である。実際の計算では、Table 14に示したパラメータを計算に使用した。

液状 DCM モデルで必要な音速、密度などのパラ

Table 16. Physical parameters to calculate TS.

	Density (kg/m ³)	Sound speed (m/s)
Fresh water	1000	1482
Sea water	1025	1522
Fish body	1040	1560
Swimbladder	1.29	340

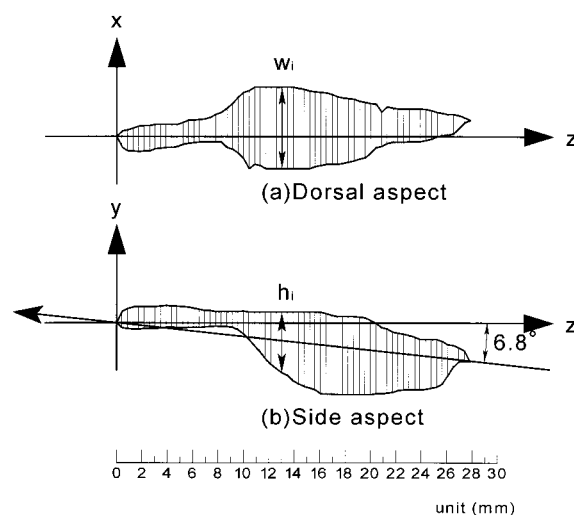


Fig. 29. Actual swimbladder shape of ayu (AY97_1). The Z-axis corresponds to the fish centerline and the short perpendicular lines to the Z-axis align the cylinders that are used to model the swimbladder.

メータは、理論計算で一般的に使用されている値 (Clay and Medwin, 1977) を使用した。淡水、海水、魚体、鰾についての、密度、音速を Table 16に示す。

座標軸は右手系の xyz 座標とし、鰾の先端（頭側）が原点にあり、鰾の背方向が y 軸の正方向、鰾は z 軸方向にのびるものとする。ここで、魚の上顎の先端から尾の終端までを魚体の中心線、鰾の先端から終端までを鰾の中心線と定義しておく。

DCM では、鰾の形状を、径が異なる円筒薄片の連なりとして扱う。各円筒の径、及び、位置をいかに扱いモデル計算するかを表中の AY97_1を例に挙げて、Fig. 29の鰾断面形状を参照しつつ説明する。

- 1) 横方向と背方向の鰾断面形状を紙面にトレースし、魚体及び鰾の中心線を入れる。
- 2) 1) で引いた魚体の中心線、あるいは鰾の中心線について、横方向及び背方向で同じ位置毎に、中心線に垂直な方向に分割線を m 本入れる。分割線は、形状の変化が大きい時には密に、小さいときには疎

*3 X 線の吸収スケールを表す CT 値は、一般的に水が0、空気を-1000として定義される。組織によって特定の値を示し、人体の場合、膀胱が CT 値20~40である。level は、画面表示するときの中心 CT 値を示し、width は level を中心として、濃淡256階調の画像として表現する範囲を示す。level, width をそれぞれ90, 900とした場合、level90を中心とした±450の CT 値、-360~540までを256階調で表現できる。

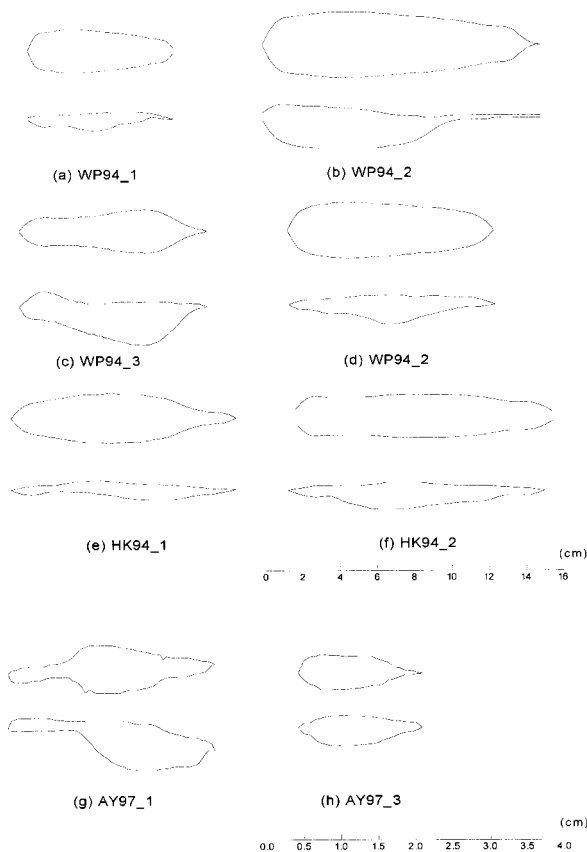


Fig. 30. Swimbladder shapes : (a) walleye pollock, (b) Pacific hake, and (c) ayu. The upper side is dorsal view and the lower side is side view. The upper scale attached to (f) is applicable to (a)–(f) and the lower scale is applicable to (g) and (h).

に行う。分割線に1～ m の番号をつけ、 i 番目の幅を w_i 、高さを h_i とする。

3) 同じ位置 i で得られた横方向と背方向の分割線の長さの平均を、 i 番目の円筒薄片端面の直径 d_i とする。すなわち $d_i = 1/2 (w_i + h_i)$ となる。同様に、 $i+1$ 番目の直径は、 $d_{i+1} = 1/2 (w_{i+1} + h_{i+1})$ となる。そこで、 d_i と d_{i+1} の平均値を、 i での円筒薄片の直径とする。

4) 各分割線の中心を微小円筒の x , y , z 軸上の位置とする。

5) このようにして得られた、各円筒薄片の半径、円筒長からDCMによりTSパターンの計算を行う。

傾角の定義は、第3章と同じように、魚体が水平状態にあるときを 0° 、頭を下げた状態をマイナス、上げた状態をプラスとした。測定は $-50^\circ \sim 50^\circ$ まで一度づつ行った。このように、魚体のTSパターン測定では、魚体の中心線が水平になる時を 0° としている。このため、鰾の中心を基準にとって計算した場合に、測定値との比較を行う場合には、魚体の中心線と鰾の中心線のなす角について補正を行う必要がある。

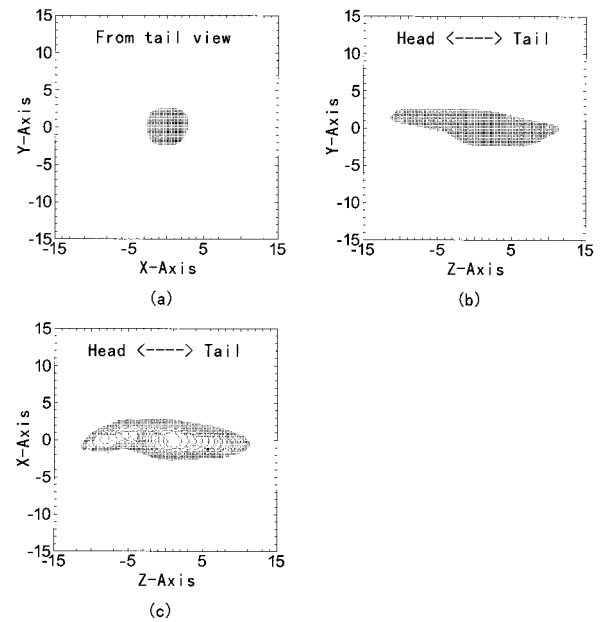


Fig. 31. Three dimensional swimbladder image of ayu (AY98_11) : (a) dissection image seen from the tail, (b) dissection image seen from the side aspect, (c) dissection image seen from the dorsal aspect.

円筒薄片の位置と大きさから、第2章の(2.26)式によりTSの計算を行った。また、第3章と同じように、規準化平均TS、規準化最大TSの計算を合わせて行った。規準化平均TSを計算する際の姿勢分布は、正規分布 $((-5, 15))$ のように(姿勢平均、標準偏差)のペアで表すを仮定し、スケトウダラ、ヘイクについては $(-5, 15)$ 、アユについては、ビデオカメラによる観察結果より得られた $(5.1, 12.8)$ を使用した。

結 果

軟 X 線や X 線断層撮影で得られた鰾形状

Fig. 30(a)–(f)に、スケトウダラとパシフィックヘイクの、また(g), (h)にアユの軟X線写真の鰾画像より、鰾形状をトレースし、数値化した結果を示す。

ここで、WP94_3については、背方向からの画像が不鮮明であったので、横から見たときの高さをその幅として使用した。これらの図から同じ魚種でも、鰾の形状に差があることがわかる。

Fig. 31に、アユAY98_11についてX線断層撮影で得られた画像から、**Fig. 28**に示すプロセスにより、再構成した鰾の形状を示す。図で(a)は尾方向からの断面を、(b)は側面、(c)は上から見たときの図を示す。

アユAY98_9について軟X線で得られた鰾の画像を**Fig. 32**に示す。同図(a)は横方向から、(b)は背方向からの撮影である。**Fig. 28(a)**と**Fig. 32(b)**を比較すると、解像度は圧倒的にX線断層撮影の方が優れている。これは照射線量がX線断層撮影の方が多いこ

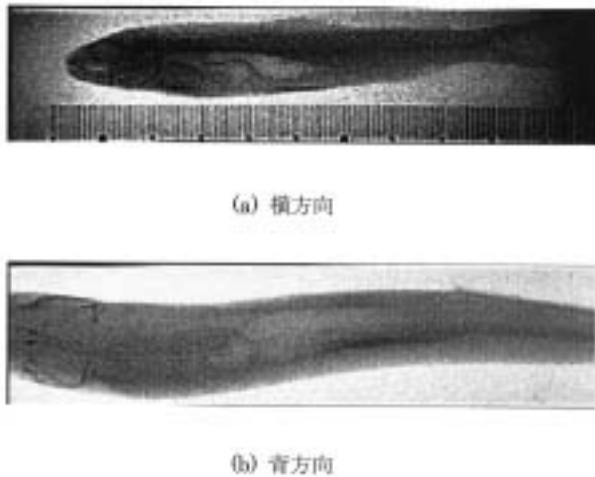


Fig. 32. Soft X-ray images of ayu (AY98_9).

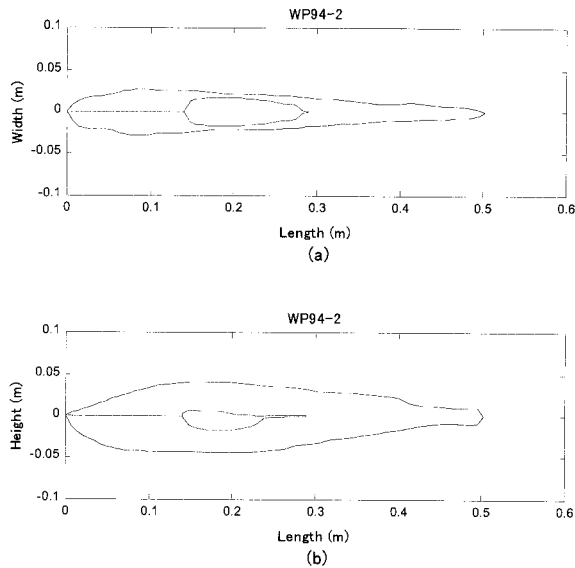


Fig. 33. Contour lines of the fish body and the swimbladder of walleye pollock (WP94_2) : (a) dorsal aspect, (b) side aspect.

とヤトモグラフィによる処理のためである。また、**Fig. 33**は軟 X 線画像から得られた WP94_2 の魚体及び鰾の両者の形状を示す。

鰾形状と分割数の違いによる TS の違い

WP94_2 について、鰾形状の分割数を変えた場合の、DCM による TS パターンをそれぞれ計算し、結果を比較検討した。分割数を基準の 20 としたもの(実線)、その 1/2 倍 (点線)、2 倍 (破線)、5 倍 (一点鎖線) としたもの、それぞれについて、そのときの鰾形状と得られた TS パターンを **Fig. 34** に示す。

図より、内挿が 2 倍以下では結果に差が見られたため、以下の計算では、読みとり個数が 30 以下については、内挿を行い、分割数を 2 倍とした。

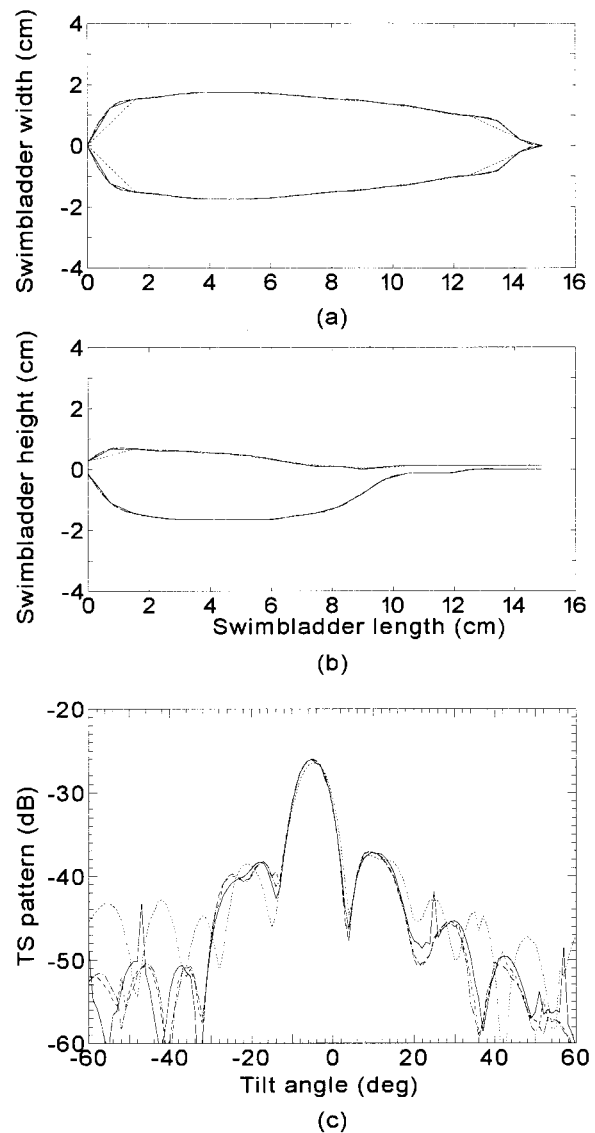


Fig. 34. The difference of the swimbladder shape and its modeled TS pattern of pollock 2 when slice number is changed by the factor of 1/2(dot), 1 (solid), 2 (dash) and 5 (dot-dash) of the original number shown in Table.

スケトウダラとヘイクの TS

測定と理論計算による TS パターンの比較結果を **Fig. 35** に示す。理論計算で得られた TS パターンのピークは、測定パターンのピークを示す傾角に合わせた。測定結果を○印、DCM による計算結果を太実線、PSM による結果を点線で表示している。**Fig. 35(b)** の WP94_2 については、海水で測定した場合の TS を細点線で、魚体のみによる反射を DCM で計算した結果を一点鎖線で示した。測定値と DCM による理論値の相関係数を図中に表示した。また、DCM と PSM の相関係数は、**Fig. 35** の(a)から(f)の順に 0.98, 0.90, 0.85, 0.96, 0.95, 0.97 と非常に高い値となった。

Fig. 36(a), (b) にそれぞれ、規準化最大 TS、規準化

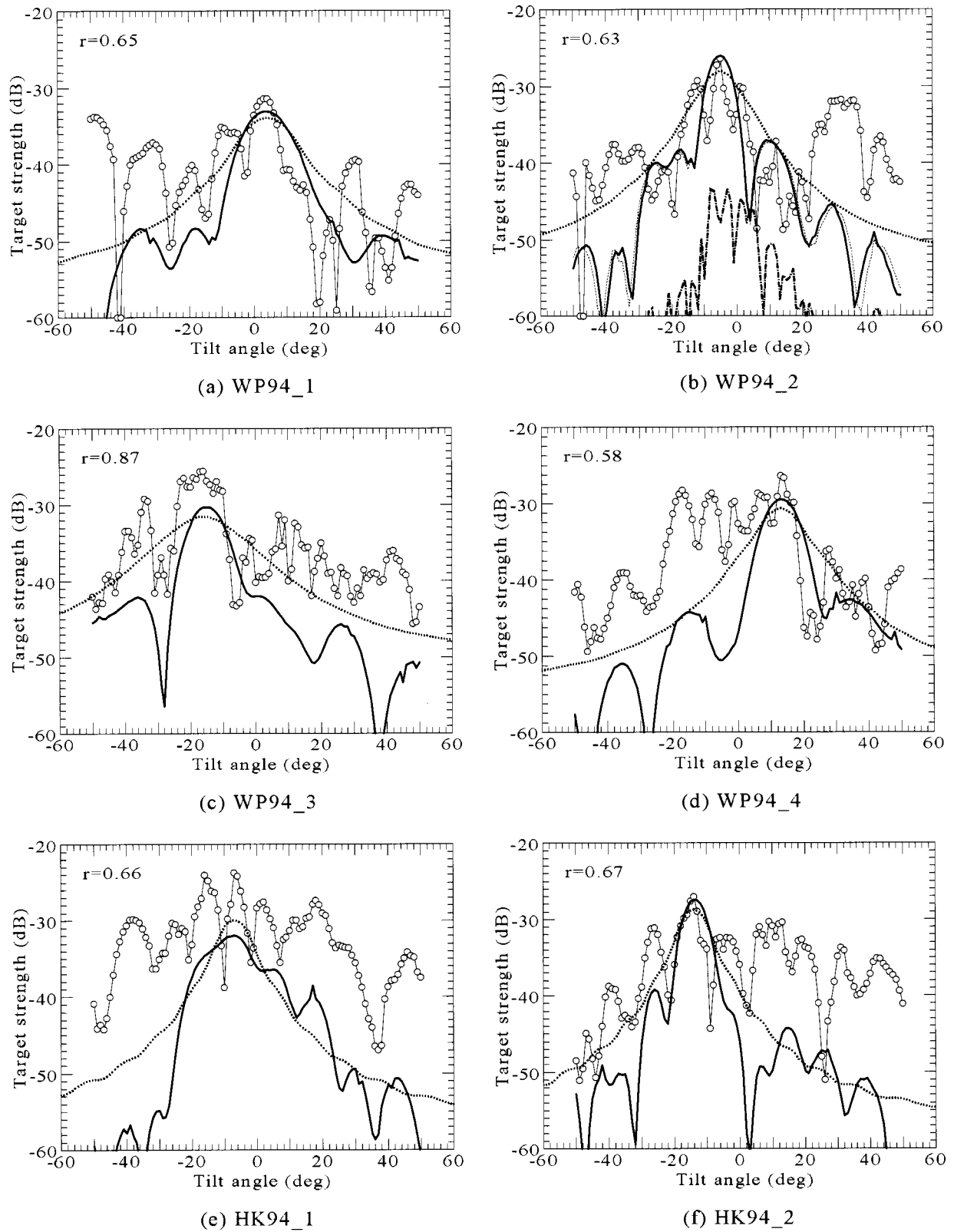


Fig. 35. Theoretical and measured TS patterns. Measurements are shown by circles and thin lines. Results from the prolate spheroid model (PSM) and the deformed cylinder model (DCM) are shown by dotted lines and bold lines, respectively. Correlation coefficients, r , between DCM and measurements are shown. The dot-dash line for WP94_2 is contribution from body.

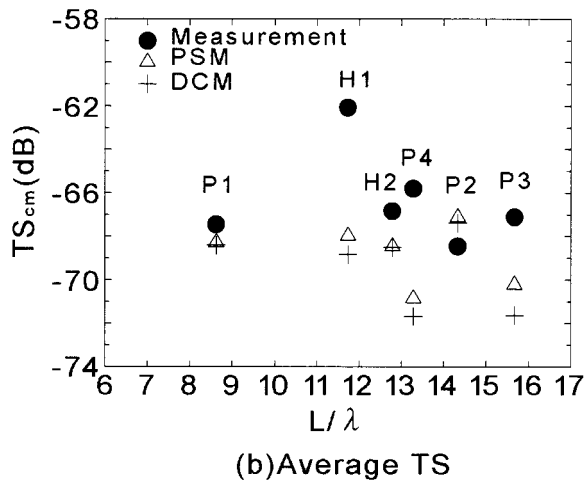
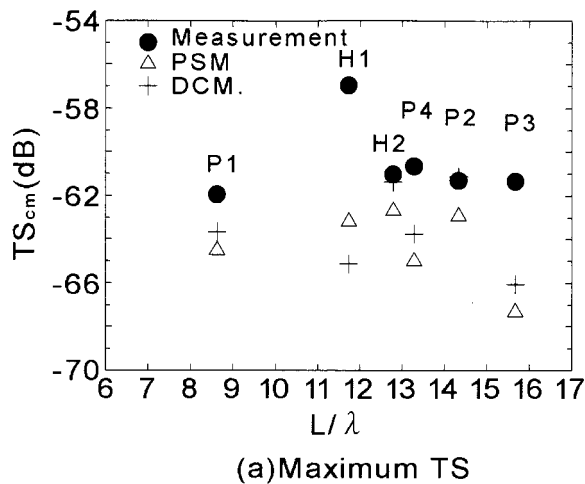


Fig. 36. (a) Maximum normalized TS and (b) average normalized TS by squared fork length in cm as a function of wavelength normalized fork length, L/λ . (●: measurement, +: DCM, △: PSM, P1: WP94_1, P2: WP94_2, P3: WP94_3, P4: WP94_4, H1: HK94_1, H2: HK94_2)

平均 TS を、TS パターンの測定値と理論値 (DCM, PSM) のそれぞれから計算し比較した結果を示す。

理論計算と測定が比較的よく一致した WP94_2 について、DCM で計算した周波数毎の TS パターンを Fig. 37 に示す。

さらに Fig. 38 に、スケトウダラ WP94_2 とヘイク HK94_2 について、規準化最大 TS と規準化平均 TS を、波長で規準化した尾叉体長に対して示す。図中の細実線及び太実線は、DCM による計算で得られた規準化最大 TS、規準化平均 TS であり、○印、●印は測定結果より得られた規準化最大 TS、規準化平均 TS である。

アユの TS

アユの TS パターンの測定結果と理論による計算結

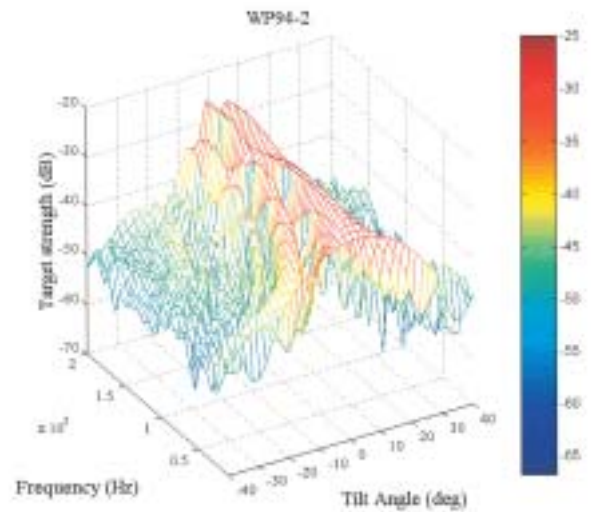


Fig. 37. Calculated TS pattern of WP94_2 over a broad frequency range.

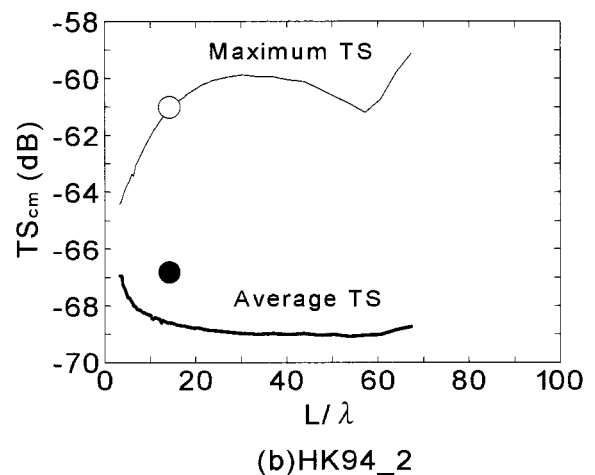
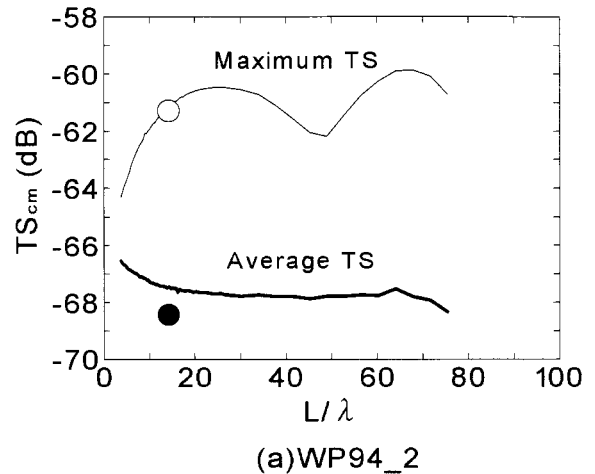


Fig. 38. Frequency characteristics of average and maximum TS normalized by squared fork length in cm for WP94_2 (upper) and HK94_2 (lower). Circles show measurements.

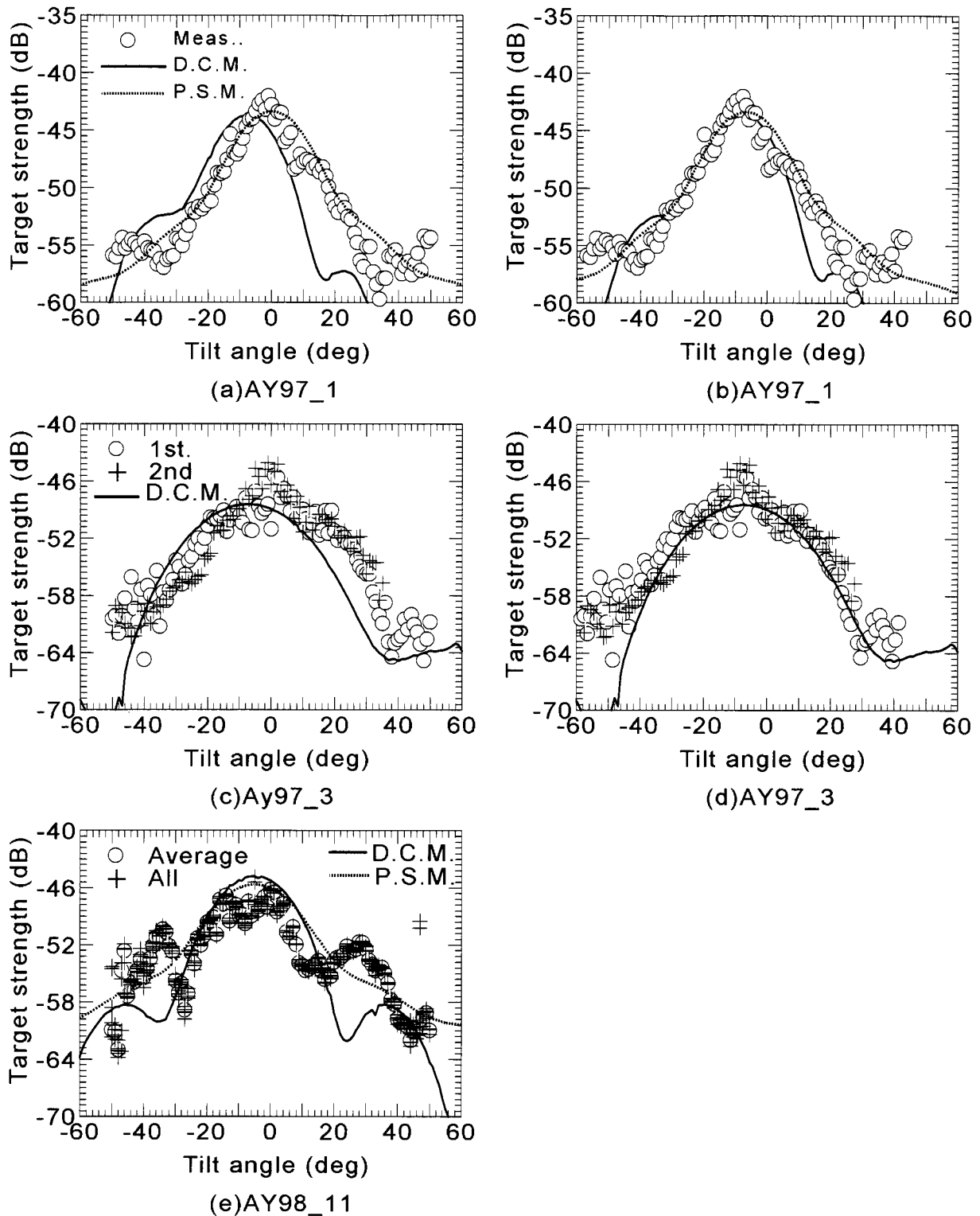


Fig. 39. Theoretical and measured TS patterns. Circles and crosses show measurements. Dotted and bold lines show the results obtained from the prolate spheroid model (PSM) and the deformed cylinder model (DCM), respectively. Offset angles are given to the measurements and PSM calculations in (b) and (d) to match the peak of them to that of DCM calculation.

果を Fig. 39 に示す。(a), (b) は AY97_1, (c), (d) は AY97_3, (e) は AY98_11 についての結果である。測定は各角度 5 回ずつ行い、他の測定値と 2 dB 以上異なる測定値を除く、各角度での測定値の平均を表示している。

AY97_1 については、魚体の中心線を基準として鰐の形状を測定した。Fig. 39(a) に示すように、DCM で計算した最大 TS は、軟 X 線写真で測定した魚体と鰐の中心線のなす角度 (-6.8°) の時に現れた。こ

Table 17. Comparisons of the normalized TS.

Species	TS _{cm} for average TS (dB)			TS _{cm} for maximum TS (dB)		
	Meas.1	Meas.2	DCM	Meas.1	Meas.2	DCM
AY97_1	-66.34	-66.17	-66.26	-62.17	-62.17	-63.84
AY97_3	-67.63	ND ^{*1}	-68.61	-63.82	ND ^{*1}	-66.86
AY98_11	-68.88	ND ^{*1}	-65.74	-65.18	ND ^{*1}	-63.78

*1No data

Nomarl distribution with average 5.1° and standard deviation 12.8° is assumed as tilt angle distribution. These parameters are obtained by the video camera observation of the behavior in tank.

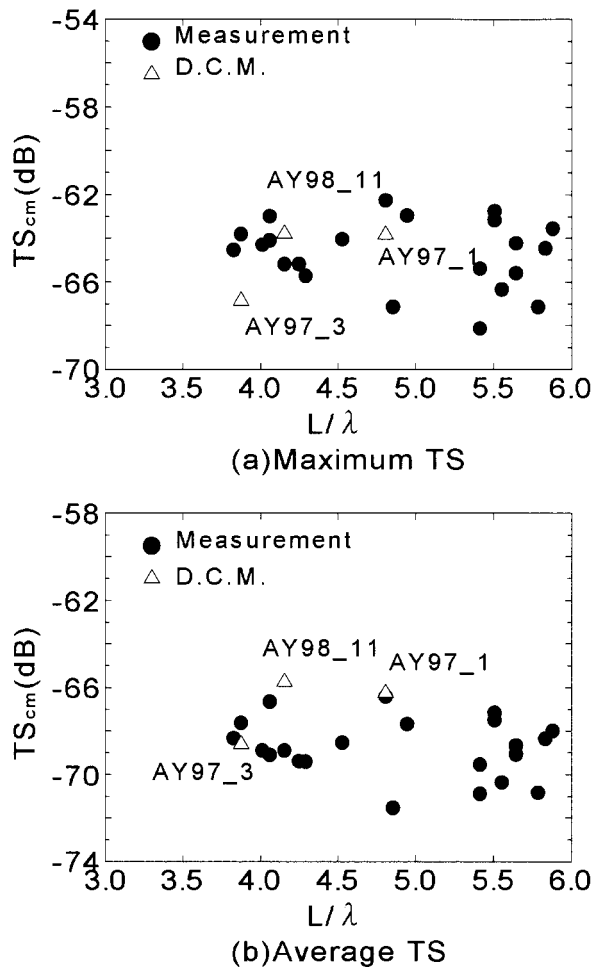


Fig. 40. (a) Maximum normalized TS and (b) average normalized TS by squared fork length in cm as a function of wavelength normalized fork length, L/λ . (●: measurement, △: DCM)

れは、鰾が水平のとき（6.8°頭を下げたとき）に相当する。そこで、測定値と PSM について、最大 TS が -6.8° （マイナスは頭を下げた状態）のときに現れるように、オフセット角を与えた (b)。

(c), (d)に示す AY97_3については、鰾の中心線を基準に幅、高さを読みとったため、DCM による計算結果に鰾の傾き -8.5° を加える必要がある。DCM での計算結果は、ピークが -4.5° で現れたため、DCM に

ついて -4° をオフセット角として加えた。測定値 1 回目と 2 回目で、ピークの出る角度が 1° 異なっていたが、両者とも、傾角 -8.5° にピークで現れるように、それぞれオフセット角を -9.5° , -7.5° 与えた。

Fig. 39(e)に示すアユ98_11では、X 線断層撮影で得られた鰾形状より DCM で計算を行った。鰾形状は、体の中心線基準であるので、測定値、理論値ともにピーク合わせをする必要がない。魚体が水平になったとき、魚を引っかけているテグスの張力がゆるんで魚が主としてロール方向に暴れたとき生じる TS 測定値の変動の影響を見るために、各角度 5 回ずつの測定値を +印で全て表示している。

図より明らかなように、 $-30 \sim -20$ 付近にある TS パターンのメインビームでは、理論値のピーク付近を除いて両者はよく一致している。理論値で得られるピーク付近で、測定値は 2～3 dB 低くなっている。 -38° 付近及び 30° 付近では、測定値より計測値が高い値を示している。

測定や DCM による理論計算で得られた TS パターンから、姿勢分布を仮定して得た規準化平均 TS の測定と理論との比較を Table 17 示す。用いた姿勢分布は、正規分布（平均、標準偏差）として、(5.1, 12.8) を使用した。

DCM 理論による計算値の妥当性を調べるため、水槽で測定したアユの規準化最大 TS、規準化平均 TS と計算値との比較を行った。その結果を、Fig. 40(a), (b)に示す。姿勢分布は正規分布 (5.1, 12.8) として比較を行った。

Fig. 41は、DCM 理論で予測した AY97_1の周波数毎の TS パターンを示す。周波数範囲は 10kHz～200kHz まで計算した。

AY97_1についての DCM 理論モデルによる TS パターンを基に、計算した規準化 TS を、測定値とともに、Fig. 42に示す。

考 察

測定と理論モデルの比較の意義

模型や死亡した魚と異なり、生きた魚の測定では、30

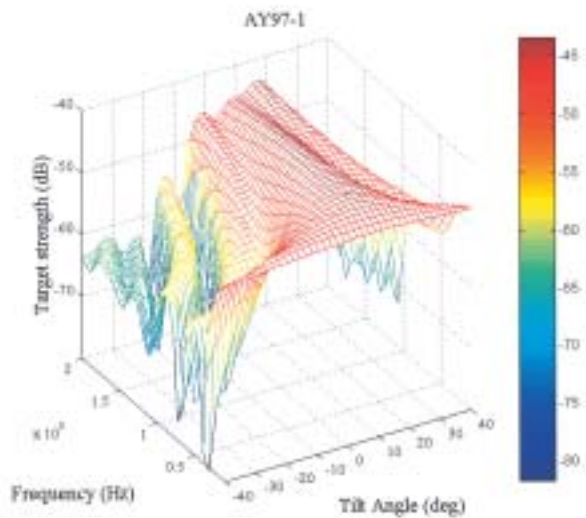


Fig. 41. Calculated TS pattern of AY97_1 over a broad frequency range.

分以上覚醒させないで麻酔しておくことができないため、測定中に暴れ、ひどいときにはテグスから外れてしまうこともある。また、冷凍魚の場合は、ゆっくりと解凍し、測定前に鰓などに気泡の付着があるかどうか調べる必要がある。このように、測定には、いろいろな制約があり、実質上、多数の測定を行うことは不可能である。そこで、適切な理論モデルが必要となる。理論モデルの中で、DCM と PSM の理論的比較が、Ye and Furusawa (1995), Ye et al.(1997) により行われている。その結果によれば、角度が $-30^{\circ} \sim +30^{\circ}$ 付近では2者の結果は非常によく一致しており、DCM ではこの角度範囲では精確な値を得ることができる。すなわち、回転楕円体という理想的形状については DCM の精度は確認されている。しかし、この DCM は未だ魚に適用されたことはなかったので、本研究では第3章で検証した高精度な測定装置による測定値と DCM による理論値を比較する事により、DCM の魚に対する実用性を検討した。また、正確な鰓形状は再現できないものの、全角度範囲に対して TS パターンを与えることのできる PSM による結果を参考とした。

以下、個別に理論と測定の比較を行い、DCM の有用性について示す。

スケトウダラとヘイク

Fig. 35において、スケトウダラ(WP94_1, WP94_2), およびヘイク(HK94_2)については、傾角が小さい場合には、理論と測定の TS パターンの一般的な傾向はよく似ているが、傾角が大きくなるにつれて、理論値と測定値の差が大きくなる。ヘイク(HK94_2)については、測定でのピーク値は -13° で現れたが、こ

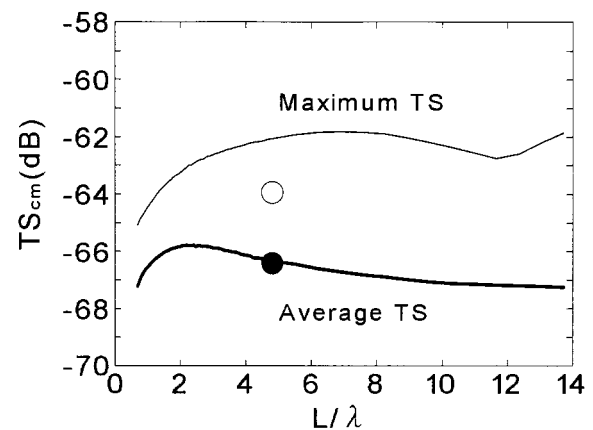


Fig. 42. Frequency characteristics of average and maximum TS normalized by squared fork length in cm for AY97_1. Circles show measurements.

れは、Table 14示した鰓と魚体の中心線のなす角度である鰓傾き角 6° と異なる。この原因として、測定時において、魚体をその中心線が水平になるように装着する際の誤差や、軟 X 線像から鰓の形状を読みとる際の誤差が考えられる。

スケトウダラ(WP94_3)については、他の場合と比べて、ピーク TS が理論と測定で余りよく一致していない。これは、軟 X 線撮影ができなかったために、鰓の幅を、鰓の高さと同じと仮定していることが適切でなかった可能性がある。スケトウダラ(WP94_4)とヘイク(HK94_1)については、測定値と理論値がかなり異なっている。

全体的に、ピーク値付近では理論と測定が大体一致しているが、周辺部で、測定値と理論値とは、あまりよく一致していない。この大きな要因の一つとして、スケトウダラやヘイクのような大きな魚体では、鰓の軟 X 線像が不鮮明となり、実際の鰓の形状を画像から読みとるのが難しいことが考えられる。今後は、大きな魚については、Fig. 28で示したような X 線断層撮影装置による撮影が必要である。

スケトウダラ(WP94_2)の計算結果から、液状DCMの魚体の寄与についての計算結果は非常にレベル的に小さく、だいたい10dB以上鰓の反射が大きいことがわかる。これは、Furusawa (1988) による回転楕円体理論モデルに基づいた理論計算や鰓のあるマサバと鰓のない大西洋サバについて測定した最大 TS が10dB程度異なるという結果と一致する (Foote, 1980)。このことは、鰓のある魚については、淡水中でも、海水中でも測定による違いはほとんどないことがわかる。

スケトウダラの規準化平均 TS については -66 dB程度であると報告 (Foote and Traynor, 1988) されている。また、規準化最大 TS については -60 dB程度との報告がある。今回の測定値は、規準化最大 TS、規準

化平均 TS の両者について、これらの報告よりも 1～2 dB 低い値となった。理論値は、背方向からの軟 X 線画像がないスケトウダラ (WP94_3) を除き、1～3 dB 低い値となった。これは、自然状態にある鰐の形状に比べて、今回使用した冷凍魚の鰐の形状がしぼんでいた可能性が高い。

ヘイクについての自然状態 TS 測定結果報告はスケトウダラに比べて少ない。その中で Williamson and Traynor (1984), Traynor (1996) の報告では、規準化平均 TS として -68 dB を、Kieser et al.^{*4}, Hamano et al. (1996) の報告ではそれぞれ、-66 dB, -65.7 dB としている。今回測定したヘイク 1, 2 の規準化平均 TS は -62.1 dB, -66.8 dB であり、ヘイク 2 については、Kieser et al. の報告値に近い。ヘイク 1 については、かなり大きな値となっている。

Fig. 37 より、周波数が高くなるにつれて、メインビームが鋭くなり、パターンも複雑になることがわかる。このような傾向は、PSM を用いた Furusawa (1988) の報告と一致している。150 kHz 以上ではメインロブが割れ双峰特性となっている。理論モデルの最大の利点はこのような広帯域の特性が比較的簡単に推定できる点にある。

Fig. 38 に示した理論と測定によるパターンが比較的良好に一致している例から得られた規準化 TS を見ると、規準化最大 TS は、スケトウダラ、ヘイクとも、測定と理論による値とがよく一致し、規準化平均 TS は、2 dB 以内の差であった。スケトウダラの場合は、 L/λ がおよそ 10 以上 40 以下では、規準化最大 TS は -62～-60.5 dB 程度、規準化平均 TS は -67.5～-68 dB とほぼ一定であった。ヘイクの場合は、規準化最大 TS が -62～-60 dB、規準化平均 TS が -68.5 dB 程度でほぼ一定であり、平均及び最大 TS は体長の 2 乗にほぼ比例するという事実を支持している。

また、第 3 章で測定した閉鰐魚の規準化 TS 値は、 L/λ が 7 以上で、規準化最大 TS が -62.1 dB、規準化平均 TS が -67.7 dB と、理論で計算したスケトウダラ、ヘイクの規準化 TS 値に近い値となっている。

アユ

測定値と回転楕円体理論値にオフセットを与えた Fig. 39(b) を見ると、測定値と理論値とは、傾角が -25° から +5° 付近までよく一致しており、最大 TS もほぼ一致している。また、DCM により、鰐形状から、最大 TS の現れる角度について、正確に推定できることがわかる。

また、理論モデルと測定の比較のうち、PSM とアユ測定値との比較では、傾角が -30° 付近から +18° 付近まで良い一致を見せている。DCM と測定値との比較では、傾角がマイナスの時には、両者はよく一致しているが、プラスとなったときに差が少し大きくなる。総合的には両方の理論モデルとも測定値に近い値を示している。

Fig. 39(d) で AY97_3 の 1 回目、2 回目の測定値を見ると、-30° から -20° あたりでは、1 回目の測定値が大きく、ピーク付近では 2 回目が大きいく。これは、魚を生かした状態での測定のために、テグスの張力が少ない水平付近でアユが動き易くなり、ロール方向に身をくねらせたりしたためと思われる。DCM の推定値は、ピーク付近を除いて、測定値によく一致していることがわかる。

Table 17 で測定値と理論値の比較してみると、AY97_1 の規準化平均 TS については、よく一致している。規準化最大 TS については、測定値が 1.7 dB 程度大きい。AY97_3 は、規準化平均 TS については、1 dB 測定値が大きく、規準化最大 TS は 3 dB 測定値が大きい。AY98_11 は、規準化平均 TS については、2.1 dB 理論値が大きく、規準化最大 TS は 1.6 dB 理論値が大きい。この理論と測定との違いの原因は、TS パターンの比較のところで述べたように、魚のローリングに伴う最大 TS 付近での測定値の変動が考えられる。

Fig. 40 より、理論により求めた規準化最大 TS、規準化平均 TS の両者とも、ほぼ、測定値の範囲にあり、大きな問題はないことがわかる。また、Fig. 41 の TS パターンの周波数特性として、周波数の低い領域では姿勢によりターゲットストレングスは大きく変化しないが、周波数が高くなるにつれて姿勢による変動が大きくなることがわかる。

第 3 章で、Fig. 26 に示したアユの規準化 TS 測定結果からわかるように、規準化 TS 値を、他の閉鰐魚と比較した場合、同じ開鰐魚のヨーロッパカタクチイワシと同様にその変動が大きい。これは、閉鰐魚と比べて、消化管と鰐のつながった開鰐魚のため、鰐の形状が変動しやすいためと考えられる。

Fig. 42 に示したように規準化平均 TS は、 L/λ が 2 以上では、-66 dB から -68 dB 程度であり、なだらかに下がりながらもほぼ平坦な特性を持つ。これは、スケトウダラと同じように、平均 TS は体長の 2 乗に比例するということを支持している。規準化最大 TS は、 L/λ が 6 付近まで規準化最大 TS が大きくなり、 L/λ が 9 ぐらいまでは下がる傾向がある。 L/λ が 2 から

^{*4}Kieser R. et al.: The analysis of target strength measurements, Straight of Georgia, February-March, 1996. Internal report. 20p and Appendix.

9までの規準化最大 TS の値は $-63 \sim -62$ dB とほぼ一定値であり、最大 TS についても体長の 2 乗にほぼ比例することを示す。

結 言

- (1) 鰐の形状を軟 X 線や X 線断層撮影装置などを用いて測定し、変形円筒理論モデルを使用すれば、複雑な形状をした鰐を円筒の薄片の連なりとして近似でき、その魚の TS の計算が可能であることを、測定と比較することにより示した。
- (2) 測定には、いろいろな制約があり、実質上、多数の測定を行うことは不可能である。このためには、適切な理論モデルによる各種の TS 特性の予測が必要になる。
- (3) X 線断層撮影装置を用いれば、極めて短時間のうちに、サンプル魚を生かした状態で魚体と鰐の 3 次元形状の測定が可能となり、DCM モデルのパラメータが得られる。
- (4) X 線断層撮影画像を解析する際には、鰐だけが抽出できるように、CT 値のパラメータである level, width を適切に設定する必要がある。人体については、多数のデータの蓄積があり、必要なものだけを選択的に表示することが可能である。今後、CT 値について、より詳しく検討し、鰐だけを取り出すことができるような CT 値のパラメータ設定にする必要がある。
- (5) 理論モデルのうち、DCM の場合は、対象魚の鰐の形状が径の異なる円筒の連なりと見なせる必要があり、変形円筒理論モデルでは、さらに、ブロードサイド付近の散乱に限るという制約がある。しかしながら、軟 X 線による背方向及び、横方向からの鰐形状のみを測定すれば理論計算可能であり、さらにキルヒホッフ近似の適用できない低周波でも使用可能である。
- (6) 理論計算を行うことにより、Fig. 37, Fig. 38, Fig. 41, Fig. 42 などのように TS パターンや規準化 TS の周波数特性を一望できるなど、理論のメリットは極めて大きい。

第 5 章 自然状態でのターゲットストレングス推定方法の高精度化

緒 言

資源量算出の際にスケールファクターとなるターゲットストレングス (TS) は、魚の体長、姿勢、生理状態等により変動するので、それらをパラメータとする複雑な関数と考えられる。一般的にこれらのパラメータの推定は困難なことが多く、自然状態のターゲ

ットストレングスを推定することは、これらのパラメータを含んだ状態で平均 TS の推定ができるために優れた方法である。しかしながら、第 2 章でも述べたように、魚の密度が高い場合や魚の深度が深い場合には、現状の音響システムによる単体エコー検出方法では正確に単体エコーのみを抽出できない。このため、推定した TS には偏りが生じることがシミュレーション計算 (Traynor and Williamson, 1983) や測定 (Sawada et al., 1993) で観察されている。この問題は、世界的にも問題となっており、何らかの対策が必要である。

この現象は、エコーが重なると、単体エコー抽出の過程で群体エコーの中のピークを誤って単体エコーとして検出するためや、ビームの外からの多くのエコーの寄与が、見かけ上、雑音レベルの上昇の効果を持ち、小さなエコーは群体エコーのなかに埋もれて検出不能となるためと考えられている。

本章では、この現象の起こる機構をより明確にするとともに、自然状態 TS 推定結果の信頼性を示す指標を導入し、高精度の TS 推定が行えるようにする。

はじめに、正確な TS 測定を行うための指標について検討する。一つは、残響体積内の尾数 (N_v) であり、もう一つは群体エコー密度の割合 (M) である。実際の密度の異なる魚群から得られた平均 TS と N_v 及び M との関係を示し、これらの指標が有効であることを示す。次に、実際に使用されている単体エコー検出方法について、コンピュータシミュレーションを行い、同じサイズからなる魚群でも、群体の割合が増えるに従い、測定でみられるように平均 TS が高くなることを示し、その機構を検討する。

(2.28) 式で示したように、平均 TS が魚体長の 2 乗に比例することを利用して、漁獲で得られた魚体長分布と、周波数、魚種で決まる比例係数 (規準化 TS) を用いて、音響調査でスケールファクターとして使用する平均 TS を得ている。したがって、自然状態推定法で得られた平均 TS と漁獲により得られた体長分布とから逆に、この規準化 TS の推定が可能である。この際に、本章で述べる推定精度の指標を用いることにより、高精度の規準化 TS を推定することができる。

自然状態 TS 測定精度の指標

残響体積内尾数

体積散乱においては、Fig. 43 に示すようにビームを理想化した場合、残響体積内にある魚の尾数が 2 以上であれば、必ず群体となる。そこで、実際に TS 測定を行うある魚群についての残響体積内尾数 (N_v) を信頼に足る TS 測定の可能な指標とすることができる。

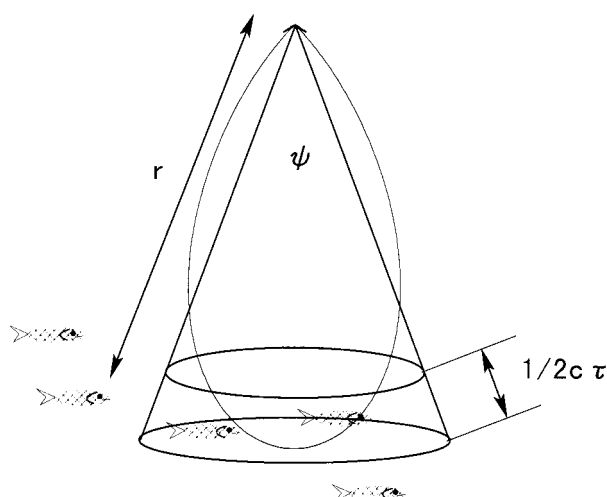


Fig. 43. Definition of the fish number in the reverberation volume, N_v .

N_v は,

$$N_v = \frac{1}{2} c \tau \psi^2 n_{EI} \quad (5.1)$$

と表される。ここで、 n_{EI} はエコーインテグレータで求めた魚の分布密度、 c は音速、 τ は等価パルス幅、 ψ は等価指向角、 r は平均深度である。

このときに必要な密度 n_{EI} は,

$$n_{EI} = \frac{S_v}{T_s} \quad (5.2)$$

により、エコーインテグレータで計測した平均 SV (S_v) と、平均 TS (T_s) より求める。この時に必要な平均 TS は、(2.28) 式により求める。密度 n_{EI} を求める際に平均 TS が必要であり、TS 推定のために TS が必要となり自己撞着のように見える。ところが、この値は別に得られた標準化 TS より求められることや、 N_v 自体は指標であるために厳密な値である必要はないことから、問題とならない。

群体エコーの割合

群体エコーの割合も TS 推定の信頼性の指標として用いることができる。そこで、エコーインテグレータで測定した魚の分布密度を n_{EI} 、単体エコー検出の結果得られる密度、すなわちエコー計数による密度 n_{EC} とすると、

$$M = \frac{n_{EI} - n_{EC}}{n_{EI}} \quad (5.3)$$

は群体エコーの割合を示す。ここで、 n_{EC} は、単体エコー処理装置で得られた単体エコー数 E_{NO} とカット

オフ角 Ω 内のサンプル体積 V_s 、 P_{NO} はピング数により、

$$n_{EC} = \frac{E_{NO}}{V_s P_{NO}} \quad (5.4)$$

と表すことができる。さらに、 V_s はサンプリング体積の上限と下限深度 r_1 と r_2 により、

$$V_s = \frac{1}{3} (r_2^3 - r_1^3) \Omega \quad (5.5)$$

と表される。

実海域試験 (Sawada et al., 1993)

方 法

1991年8月15、16日にベーリング海の東側の大陸棚で、スケトウダラ魚群に対して行った日米調査船の船間校正時に得られたエコーデータを用いた (澤田ら, 1993)。船間校正とは、調査船間で同じ魚群についてエコー積分を行い、その測定値の比較をすることにより、計量魚探機だけでなく、調査船自身も含めた総合的な校正方法である (古澤ら, 1995)。

この時には、水深約120m程度の大陸棚で、曳航式の計量魚探機を装備した日米のチャーター漁船 (日本: 翔洋丸, 50m, 米国: コンティニューイティ, 41m) が一辺約11マイル程度の範囲を、比較的低速 (4~6 kt) で、同じと思われるスケトウダラ魚群に対してエコーデータの収集を行った。

日本側の計量魚探機システムは、デュアルビーム法による TS 推定が可能な KJ1000 (Furusawa et al., 1993) (株カイジョー, 株日本無線) であり、米国側は、スプリットビーム法により TS 推定が可能な EK 500 (シムラッド) である。いずれのシステムも曳航式の送受信システムとなっている。

試験に先立つ1991年8月14日13:19~14:03に、米国のチャーター漁船によりトロールが行われた。ネットのフットロープの平均的な深さは97m、網高さは16mであり、このときの水深は119mであった。このため、エコーグラムでは判別できない底魚は漁獲していないと考えられる。また、トロールにより、255尾のスケトウダラと3尾のイカが漁獲された。イカの TS はスケトウダラに比べて低いため、エコーグラムに現れているもののほとんどはスケトウダラであると考えられる。このときのスケトウダラの平均尾叉長は18.3cm、標準偏差は3.7cmであった。

ほぼ一昼夜半の連続試験の中で、魚群は昼間にパッチ状の魚群を作り、夜間には分散した魚群を作った。このため、ほぼ同じ魚群から分布状態の異なるエコーデータを得たと考えられる。

Table 18. Results of TS analysis and condition indexes (N_v and M) for Japanese data.

NO	TIME	DAY/ NIGHT	PING	ECHO	ECHO/ PING	AVG.TS (dB)	TS _{cm} (dB)	N_v	M (%)
1	8:27–8:36	N	878	466	0.53	–35.0	–60.3	1.91E–01	95.1
2	8:36–8:41	N	486	239	0.49	–37.9	–63.2	3.40E–02	71.9
3	8:47–8:54	N	725	291	0.40	–33.3	–58.7	3.60E–01	98.2
4	8:56–9:05	N	878	306	0.35	–32.3	–57.6	2.28E–01	97.6
5	9:31–9:43	N	1215	821	0.68	–37.7	–63.0	4.82E–02	73.1
6	9:49–10:07	N	1658	613	0.37	–31.9	–57.2	4.91E–01	98.8
7	12:39–12:47	N	772	418	0.54	–38.2	–63.5	2.75E–02	62.9
8	12:56–13:07	N	1076	723	0.67	–36.2	–61.5	8.43E–02	85.3
9	13:16–13:27	N	1072	471	0.44	–38.3	–63.6	1.99E–02	55.3
10	16:00–16:21	D?	2001	214	0.11	–34.3	–59.6	2.26E–01	99.1
11	18:38–18:51	D	1250	69	0.06	–34.9	–60.2	5.67E–02	98.0
12	21:38–22:01	D	2155	67	0.03	–40.3	–65.6	1.69E–03	64.6
13	1:42–1:54	D	1250	80	0.06	–30.2	–55.5	1.69E–01	99.3
14	9:11–9:22	N	1076	363	0.34	–38.2	–63.5	1.45E–02	53.8
15	9:25–9:34	N	876	466	0.53	–36.0	–61.3	9.55E–02	89.8
16	9:47–9:58	N	978	401	0.41	–32.7	–58.0	4.88E–01	98.6
17	11:41–11:52	N	1158	240	0.21	–38.9	–64.3	5.79E–03	30.1

そこで、エコーグラムから明らかに魚の分布状態が異なるエコーデータを選び、指標 (N_v , M), 及び平均 TS の計算を行い、両者の関係を調べた。**Table 18** に TS 解析を行ったデータについてまとめた。**Fig. 44** に昼間と夜間に得られた代表的なエコーグラムを示す。**Fig. 44** のエコーグラム(a), (b), (c)とも、エコーグラムの上部の白線間 (65m~115m) が下部に拡大表示されている。右端の数字は深度であり、エコーグラムの左下側の大きな数字は水深を示している。また、**Fig. 45** にデータ解析の流れを示す。

データ解析で使用するデータは生物データと音響データがある。生物データでは、トロールによる体長組成を、音響データでは、エコー積分データ、単体エコー処理データを使用する。

トロールにより、体長組成を求め、得られた平均体長 L と体長の標準偏差 σ_L を用いると、平均 TS は、

$$TS = 10 \log (L^2 + \sigma_L^2) + TS_{cm} \quad (5.6)$$

と表すことができる (Sawada et al., 1993)。そこで、 TS_{cm}

について、スケトウダラで標準的に使用される –66.0dB を用いて平均 $TS = -40.6$ dB を求めた。

解析深度はトロールの曳網深度に合わせ、曳航体基準で 72–88m とした。この時、曳航体は深度 9 m 付近にあったので、水面基準では 81–97m である。この解析深度についてエコーインテグレータで得られた平均 SV と (5.6) 式で推定した平均 TS とから (5.2) 式により魚群の密度の推定を行った。さらに、得られた魚群密度 n_{EI} を (5.1) 式に代入し、 N_v を得た。また、(5.4) 式により求めた n_{EC} と魚群密度 n_{EI} を用い、(5.3) 式により M を得た。米国船で得られたエコーデータについても N_v と平均 TS の関係を調べた。

さらに、局所的に濃い魚群がある場合に、解析層の取り方によっては、 N_v が過小となる場合もありうる。そこで、 N_v については 72–88m の解析層をさらに 4 分割し、4 m 毎の層とした場合についても検討した。

自然状態で得られたエコーデータから平均 TS を求める際、カットオフ角を大きくしすぎると、TS の大きい魚のみがビーム周辺でも単体エコーとされ、得られる平均 TS は過大評価となる。そこで、得られたエ

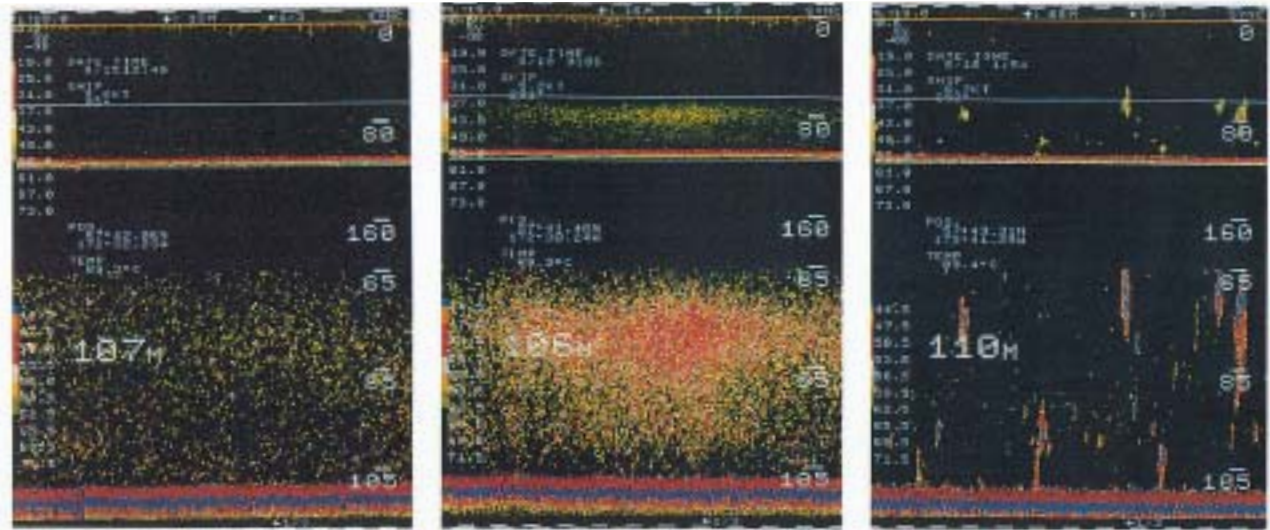


Fig. 44. Typical echograms observed in day and night : (a) scattered echoes in night time (No.7 in Table 18), (b) dense echoes in night time (No.4 in Table 18), (c) patch like echoes in day time (No.13 in Table 18).

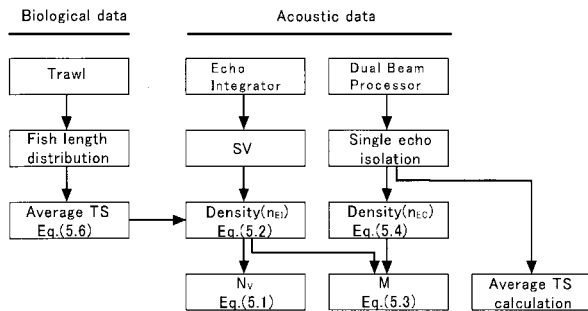


Fig. 45. Calculation flow of N_v and M .

コーデータの解析の際に、ビーム内のエコー数とカットオフ角の関係を調べ、エコー数がカットオフ角に比例することを確かめた。また、実験的に、適切なカットオフ角について確かめ、その範囲内にあるエコーデータについて平均 TS を求めた。

結果及び考察

Fig. 46に、Table 18におけるNo.15で得られたエコーデータについてのカットオフ角とエコー数の関係を示す。

立体角で0.01 (sr) 付近 (約3.4°) まで、カットオフ角とエコー数は、ほぼ比例しており、サンプルが TS の大きなエコーのみに偏っていないことを示す。今回使用したビーム幅は6.4°であり、ビーム幅の1/2 (半減半角) の時にカットオフ角設定によるエラーが最小となつた Traynor and Williamson (1983) の研究結果と一致した。そこで、カットオフ角は半減半角3.2°に設定した。

N_v と自然状態で得られた平均TSの関係を図47に示す。同図(a)は解析層を72–88mの1層とした場合の解析結果であり、(b)は72–88mの解析層をさらに4分

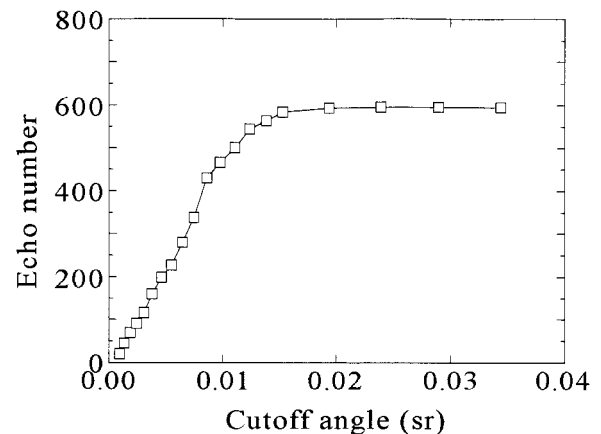


Fig. 46. Relationship between cutoff angle and echo number.

割し4 mずつの層について解析を行ったものである。(c)は日本と米国のデータを比較したものである。

同図(a)より、一般的には、 N_v が大きくなるにつれて、推定した平均 TS の値が、トロールによる魚体長推定結果より得られた平均 TS である−40dB付近から次第に大きくなっていくことがわかる。さらに、2つのデータ ($N_v=0.06$, $N_v=0.17$) が他のデータと比べて推定平均 TS が大きく異なっている。このデータは Table 18 の No.11, 13に対応し、いずれも昼間に得られたパッチ状魚群から得られたものである。これらのデータは、細かい4 m解析層で計算した同図(b)の二重□ (No.11に対応)、□印中に◇のついた (No.13に対応) に対応する。

パッチ状態の場合、密度の濃いところや薄いところの変化が激しいため、パッチの中を細かい層に分けて解析すると、 N_v や平均 TS が大きく異なる場合があることがわかる。これは、パッチ状の場合解析範囲の

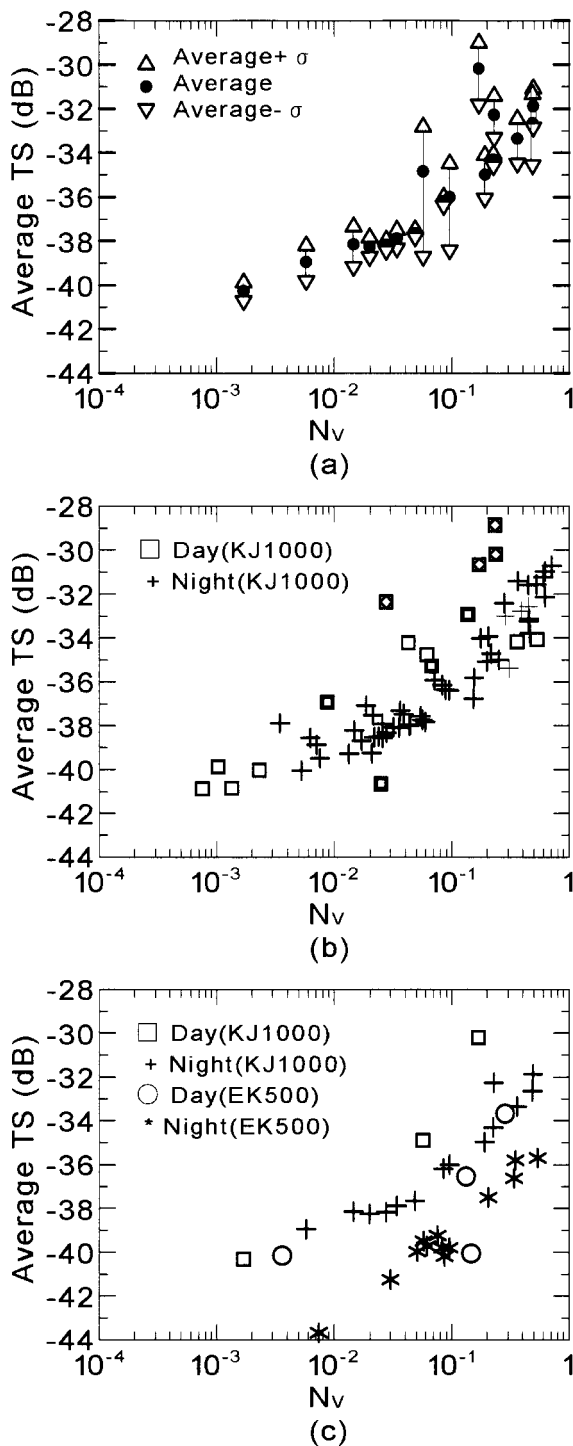


Fig. 47. Relationship between N_v and average TS calculated at each layer: (a) KJ1000 (72m–88m), (b) KJ1000 (Layers are divided into 4m thick layers), (c) Comparison of KJ1000 (72m–88m) and EK500 (50m–100m).

選び方で N_v が大きく変動することを意味する。同図(b)より、夜間に得られた推定平均 TS と比較して、同じ N_v の場合でも昼間に得られたエコーデータの推定平均 TS が高い傾向がある。この原因としては、昼間と夜で姿勢分布が異なる、あるいは、場所の違いで体

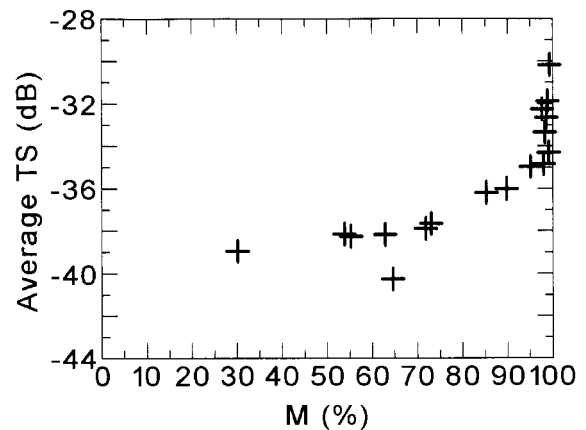


Fig. 48. Relationship between M and average TS (72m–88m).

長分布が異なる、という可能性がある。また、同図(c)に示すように、デュアルビーム法、スプリットビーム法を問わず、 N_v が高くなると、推定平均 TS が高くなることがわかる。

KJ1000で得られた M と自然状態で得られた平均 TS の関係を Fig. 48に示す。 M が70%付近を超えたところで推定平均 TS が高くなることがわかる。

今回の実験的な検討結果より、以下のことがわかった。

- (1) N_v , M が高くなると推定平均 TS は大きくなる傾向がある。
- (2) パッチ状態では、解析範囲の選び方で N_v が大きく変動する。
- (3) スケトウダラの TS 測定を精度良く行うためには、 M は70%以下、 N_v は0.04以下である必要がある。

単体エコーの検出方法

自然状態での TS 推定では、たくさんのエコーの中から、一尾の魚から返ってきたエコーを識別し、そのエコーレベルに対して、パルスエコー法で測定した距離で距離減衰を、デュアルビーム法やスプリットビーム法などでビームの指向性を補正し、(2.7) 式により TS を計算することができる。この単体エコーの識別方法は、計量魚探機によって異なるために、その内容を知ることが必要である。

Fig. 49に計量魚探機KFCシリーズ(株カイジョー)の単体エコー検出のフローを示す。向かって図の左から右に信号が処理される。左上から、WTVG40は第2章で説明した広ビームの $40 \log$ の TVG 信号、NTVG 40は狭ビームの $40 \log$ の TVG 信号を表す。また F, A, P, S はそれぞれ前後左右の位相信号を示し、カッコ付きの記号は、パラメータであることを示す。太

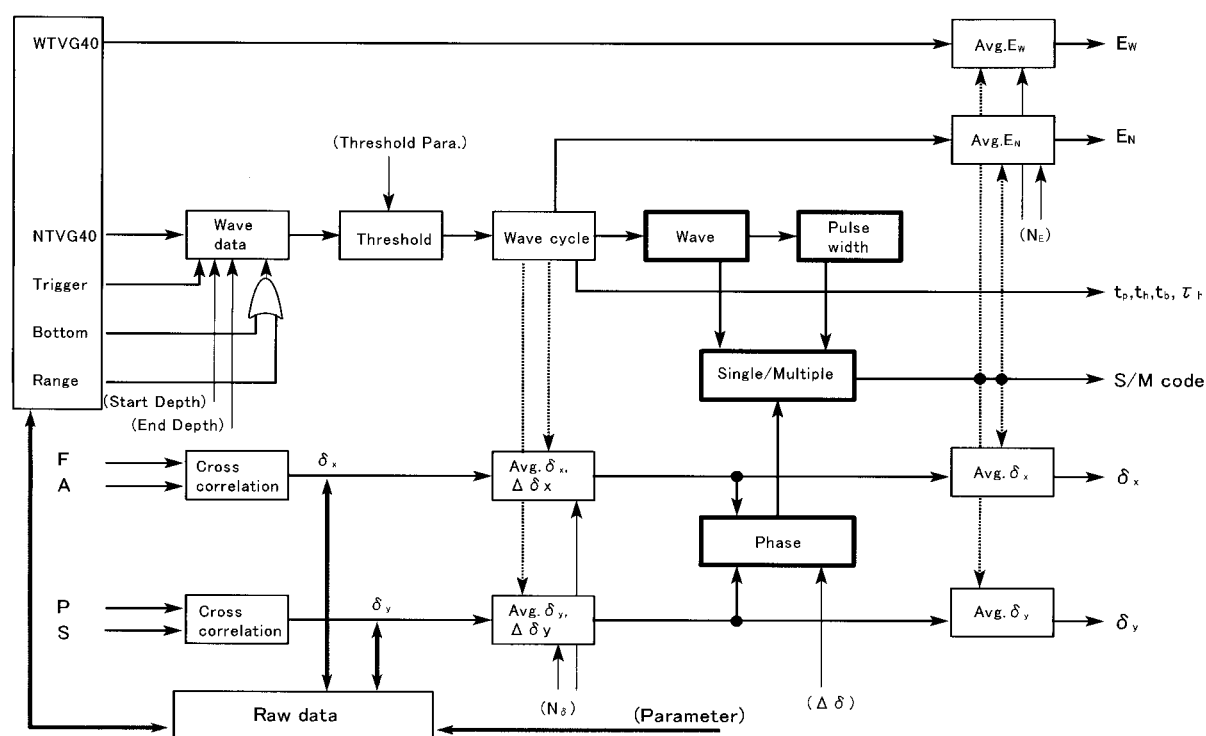


Fig. 49. Flows of echo data and single echo detection.

枠で示したものは、単体エコーを判別するための条件を示している。この中で Wave は波形判定, Pulse width はパルス幅判定, Single/Multiple は単体エコーか群体エコーかの判定, Phase は位相判定をそれぞれ示す。

単体エコー処理は、レベルビームに関しては狭ビームの信号について行われる。狭ビーム信号の有効レンジ内の信号について、スレッショルド処理後、レベルが極小—極大—極小からなるウェーブサイクルを検出し、波形がパルス状かどうかの波形判定を行い、続いてパルス幅判定を行う。レベルビームとは別に位相ビームについても前後信号(F, A), 及び左右信号(P, S) から、四分サンプル相互相関法により、それぞれ電気角 δ_x , δ_y を検出する。レベル信号のウェーブサイクル内で見つけた極大値に相当する電気角データのサンプル点から浅い方向に向かって得た N_0 個の電気角のサンプル内で、 δ_x および δ_y の最大値—最小値をそれぞれ $\Delta\delta_x$, $\Delta\delta_y$ とし、基準値以内かどうかを調べる。その結果を S/M コードで表す。

その他に単体エコー処理結果として、広ビームや狭ビームのそれぞれのエコーレベル E_W , E_N などや、狭ビームについて送信からエコーのピークレベルまでの時間 t_p , エコーのピークの $1/2$ レベルまでの時間 t_h , エコーのベースレベルまでの時間 t_b , などやピークの $1/2$ レベルでのパルス幅 τ_h などが得られる。

以下に、より詳しく説明する。

上記の単体エコー処理のコンピュータシミュレーションにより得られた信号を用いて、信号処理の流れを示す。ここでは、送受信係数60dB、パルス幅0.6ms、周波数38kHzの計量魚探機により、深度134m、TS-40dBの魚から得られた信号をシミュレートしている。

Fig. 50において、適切な感度で得られたキャリア付きのエコー信号(a)について、その波形のエンベロープだけを絶対値回路により取り出す。このときに、取り出したエンベロープ波形を同図(b)に示す（シミュレーションでは、ソフトウェアでエンベロープ抽出を行っている）。

このエンベロープ波形を10kHz サンプリング（水中で7.5cm相当）でAD変換し、ソフトウェア上でTVG補正を行う。パラメータで与えるスレッシュホールドレベル（同図(c)の点線）より低いデータは0レベルとする（スレッシュホールド処理）。

4サンプル毎のサンプリングデータを1サイクルとして、 n サイクル目のレベル (L_n) と、次の $n+1$ サイクル目のレベル (L_{n+1}) を比較する。 L_{n+1} が L_n の1.1倍以上であれば、Up (図中で U と略す)、0.9倍以下であれば Down (D)、0.9倍から1.1倍の範囲にあれば、Flat (F) というようにレベル変化を示す符号を n サイクル目につける (同図(d))。この符号が D→U→D の間に、1つの極大値と2つの極小値があること

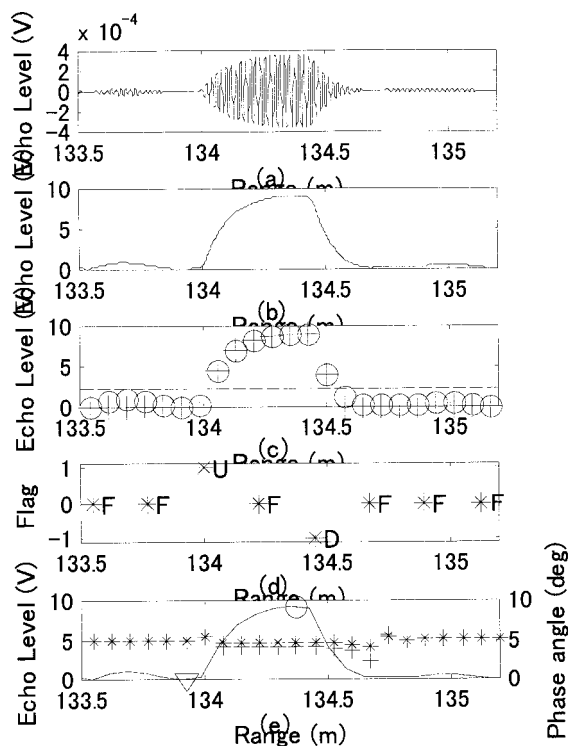


Fig. 50. Simulated echo and the process of single echo detection.

になる（同図(e)中でそれぞれ、白三角、白丸が、実際に得られた極小値、極大値を示す）。そこで、D—U—D の間にある7.5cm毎のデータから1つの極大値と2つの極小値を検出する。また、極小値—極大値—極小値の組み合わせをウェーブサイクルと名付ける。このウェーブサイクルが単体エコーの候補となる。

これらの候補について以下に述べるようなA～Fまでの判定を行い、判定結果にコードをつける。コードの形式は、8ビットで表される。8ビットを00FEDCBAのように割り当て、A判定のみ満たした場合は、00000001となり、16進数で01、またA、D、E、Fの判定全てを満たした場合は、00111001となり、この場合のコードは39と表される。

このようにして得られたウェーブサイクルについてレベル判定を行う。レベル判定では、二つの極小値と極大値の0.1～0.4倍のパラメータで与えるベースレベル、および、これら極小値と極大値の1/2レベルとの間で、レベル比較を行い、その状況により以下のようなA、B、Cの3通りに分ける。この時に、A、Bと判定されたものについては次のパルス幅判定に進む。

条件「2つの極小値がいずれもベースレベル以下」

→ (A 判定) コード 0x01 (00000001)

条件「少なくとも片方の極小値がベースレベルより上で1/2レベルより下」

→ (B 判定) コード 0x02 (00000010)

条件「少なくともどちらか一方が1/2レベルより大」

→ (C 判定) コード 0x04 (00000100)

レベル判定でA、Bとされたウェーブサイクルについて、1/2レベルでのパルス幅やベースレベルでのパルス幅についてパラメータで与える基準値と比較を行い以下の2通りに分ける。

条件「A、Bについて1/2レベルでのパルス幅が最小パルス幅(PWMIN1/2)以上、最大パルス幅(PWMAX1/2)以下」

→ (D 判定) 0x08 (00001000)

条件「Aについてベースレベルでのパルス幅が最小パルス幅(PWMINn)以上、最大パルス幅(PWMAXn)以下」

→ (E 判定) 0x10 (00010000)

判定A、B、Cについてピークレベルからエコーの前縁に戻る方向の(パラメータで決める) N_8 個のサンプル点における電気位相角の中で、最大位相—最小位相が(パラメータで決める)規準値($\delta_{\max}$)以下であれば位相判定を満たすものとする。

条件「レベルのピークから前縁方向に戻った位相データのうち N_8 個のサンプル数について位相の最大値—最小値が $\delta_{\max}$ より小さい。」

→ (F 判定) 0x20 (00100000)

これらの判定結果はそれぞれのコードとともにファイルに収録される。Table 19に単体検出結果の16進コード表を示す。

ユーザーは単体エコー検出の際にレベル判定、パルス幅判定、位相判定について使用するかどうかを選択できる。

エコーのコンピュータシミュレーション

目的

以上のように、残響体積内尾数 N_v と群体エコー割合 M はTSの自然状態推定の有効な指標となりうる。そこで、これらの指標のより一般的な値を求めるため、また、群体エコーが増えるに従って推定TSが高くなる過程を明らかにするために、コンピュータシミュレーションを行った。

N_v が高いところで、平均TSが大きくなる理由として、群体エコーが増えるためとしてきたが、他にも原因が考えられる。その1つは、トロールで得られた体長より、実際にはより大きな魚を測定していた可能性である。そこで、シミュレーションにより、実海域試験時のトロールで得られたスケトウダラの体長分布から考えられるTS分布とほぼ同じTS分布をもった魚群でも、群体エコーの割合が増えると、平均TSが高くなることを示す。

Table 19. Table of codes for the detected single echo.

code (Ox)	39	29	21	19	09	01	2 A	22	0 A	02	24	04
Level	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C
τh^{*1}	D	D		D	D		D		D			
τb^{*2}	E			E								
Phase	F	F	F				F	F			F	

*1Pulse width criteria at 1/2 level

*2Pulse width criteria at base level

エコー波形のシミュレーション方法

魚は送受波器から十分遠方にあると仮定すると、返ってくる魚のエコー信号は、計量魚探機の特長、魚の TS、送受波器と魚との間の距離を用いて表すことができる。そこで、ある深度範囲に分布する魚群を仮定し、その魚群から返ってくるエコーをコンピュータによりシミュレートすることにより、 N_v と平均 TS との関係を調べることができる。

計量魚探機で得られるエコー信号の波形関数は、共振系の方角パルス応答でそのピークを 1 とした場合の波形

$$w(t) = \frac{1 - \exp(-\beta t)}{1 - \exp(-\beta \tau_0)} [U(t) - U(t - \tau_0)] + \exp[-\beta(t - \tau_0)] U(t - \tau_0) \quad (5.7)$$

で近似できる (古澤ら, 1986)。ここで、 t は送信時からの時間 (s)、 β は受信系の帯域幅 (Hz)、 τ_0 はパルス幅、 $U(t)$ は単位ステップ関数をそれぞれ表す。

計量魚探機 (KFC500, ㈱カイジョー, 38kHz) の送受信係数、指向特性、パルス幅を与え、正規乱数として与えた魚の TS、一様乱数として与えた魚の球座標表現での位置 (r, θ, ϕ) から受信エコーレベルを計算した。

KFC500では、エコーレベル信号としてエンベロープ信号を10kHzでサンプリングしている。また、位相信号については38kHzの周波数を10kHzに周波数変換後、40kHzでサンプリングを行っている。その後、4分サンプリング相互相関法 (Hsieh, 1986) により、電気位相角検出を行っている。

シミュレーションでは、38kHzを直接4分サンプリングするため、最低152kHzのサンプリング周波数でエコー信号を作製する必要がある。ここでは十分な精度を保つために、その5倍である760kHzのサンプリング周波数でデータを与えた。また、エンベロープのサンプル周波数については、実際のシステムで使用されている10kHzを仮定した。

位相計算は、レベルエコーの前縁部に相当する部分の位相検出用波形を用い、10kHz サンプリング周期で3個分の位相データの平均を平均位相とした。

実際の信号は雑音を含むため、雑音の影響下でのシミュレーションを行う必要がある。そこで、KFC シリーズの計量魚探機の受信系をシミュレートするため、ガウス分布雑音がバンド幅3000Hz のパワーフィルター通過後の雑音出力を上記のエコー受信信号に加えた。

ビーム内に魚を一尾だけおく場合、同じ TS でもビーム内の位置で指向性のために、SNR は異なる。また、複数尾の場合には、信号自体が複数となるので、平均的に考える必要がある。そこで、SNR は以下のように二通りに分けた。ビーム内に一尾の場合は、

$$SNR = \frac{E^2}{E_N^2} \quad (5.8)$$

とする。ただし、 E^2 は単体エコーのピークレベルの2乗を、 E_N^2 ノイズレベルの2乗の平均を示す。ビーム内に複数尾の場合は、

$$SNR = \frac{\overline{E^2}}{\overline{E_N^2}} \quad (5.9)$$

とする。ここに、 $\overline{E^2}$ はエコーレベルの2乗の平均である。

誤差の定義は、与えた魚の平均 TS (T_{ss})、推定した平均 TS (T_{se})、その分散 (σ_E) を用いて、

$$B = \frac{T_{se}}{T_{ss}} - 1 \quad (5.10)$$

$$E = \frac{\sqrt{(T_{se} - T_{ss})^2 + \sigma_E}}{T_{ss}} \quad (5.11)$$

で定義した。ここで B はバイアスを、 E は誤差を示す。

ある深度範囲で一様に分布する魚群を仮定する。もし、ビーム角内や深度層内で魚の球座標表示の (r, θ, ϕ) を一様乱数で与えると、ビームの中心付近に魚の分布

が偏ることになる。また、これまでの研究結果から、TS 計算のために指向性補正を行う最大のビームの半角を表す、TS ビームスレッシュホールド角 (θ_{thr}) が大きいと推定 TS のバイアスも大きくなることがわかっている。そこで、ビームのスレッシュホールド角となるカットオフ角は、指向性が -3 dB となる 4.2 度とした。なお、指向性が -3 dB となるときの全角がビーム幅 (θ_{BW}) である。角 θ は、以下のような方法で与えた。ビーム幅内で、ある角度 θ に魚がいる確率は、

$$f(\theta) = \frac{2\pi r \sin \theta}{\int_0^{\theta_{thr}} 2\pi r \sin \theta d\theta} \quad (5.12)$$

である。よって、累積分布関数 $F(\theta)$ は、

$$\begin{aligned} F(\theta) &= \int_0^{\theta} f(s) ds \\ &= \frac{1 - \cos \theta}{1 - \cos \theta_{thr}} \end{aligned} \quad (5.13)$$

となる。 $0 \leq \theta \leq \theta_{thr} < \pi/2$ で累積分布関数は、単調増加関数であり、その逆関数を下式のように求めることができる。

$$F^{-1}(\theta) = \cos^{-1} [1 - (1 - \cos \theta_{thr})y] \quad (5.14)$$

ここで、 $y = F(\theta)$ である。よって、 y を 0 から 1 までの範囲で一様乱数として与えることにより、均一に分布する場合の θ の分布を与えることが可能となる (矢島ら, 1993)。

深度についても同様にして与えることができ、

$$\begin{aligned} f(r) &= \frac{\phi r^2}{\int_{r_1}^{r_2} \phi r^2 dr} \\ &= \frac{3r^2}{r_2^3 - r_1^3} \end{aligned} \quad (5.15)$$

となる。ここで、 r は送受波器からの距離で r_1 は上限、 r_2 は下限を表す。 ϕ はビームの立体角である。よって、深度についての累積分布関数 $F(r)$ は、

$$\begin{aligned} F(r) &= \int_0^r f(s) ds \\ &= \frac{r^3 - r_1^3}{r_2^3 - r_1^3} \end{aligned} \quad (5.16)$$

となり、逆関数は、

$$F^{-1}(r) = [(r_2^3 - r_1^3)y + r_1^3]^{\frac{1}{3}} \quad (5.17)$$

と表される。

方位角 ϕ は $0 \sim 360$ 度の範囲で一様乱数を与えた。

以上のようにして、1440 尾分の魚の位置を与えた。魚の位置、TS についての情報は、データとして保存し、単体エコー検出パラメータ、SNR を変えた場合にも同じ初期値を使えるようにした。

シミュレーション結果を、実際の魚群から得られた N_v と TS の関係と比較するためには、測定とシミュレーションで得られる平均 TS や TS の変動幅をなるべくそろえる方が良い。そこで、以下のような方法で TS を与えた。

トロールで得られた平均体長 l (cm) とその標準偏差 σ_L (cm) で表される正規分布 $N(l, \sigma_L)$ で与える乱数 l_R を用い、

$$TS = 20 \log l_R + TS_{cm} \quad (5.18)$$

により TS 分布を計算した。ただし、規準化 TS (TS_{cm}) はスケトウダラについて標準的な値 (Foote and Traynor, 1988) とされている -66.0 dB とする。

このとき、同じ体長の魚でも姿勢により TS は大きく変化するため、実際の TS 分布は 10 dB 以上の変動がある。そこで、(5.18) 式の l_R に与える標準偏差を実際得られた 3.7 cm より大きくして、 8.1 cm として与えた。これにより平均 TS は、トロール結果から得られる -40.6 dB がシミュレーションでは -39.4 dB と若干高くなるが、TS の変動分は大きくなる。

スプリットビーム法では、第 2 章で説明したように、前後あるいは左右といった位相ビーム対の間の電気位相差から、魚の位置を検出したり、指向性の補正を行ったりしている。このために、雑音により、位相信号の安定度がどのように変動するか調べる必要がある。そこで、信号対雑音比と位相安定度の関係を調べるために、あらかじめ送受波器から見て特定の位置に魚をおき、信号対雑音比を約 3 dB から 33 dB まで変化させたときに、位相信号がどのように変動するか調べた。魚の位置は、深度 131 m、中心から 6° で、方位角は 30° とした。魚の TS は、ほぼ TS 分布の平均値である -40 dB とした。魚の設定位置と信号対雑音比を変化させたときの位相の変動は、波形内の電気角から次のように計算した。レベル波形のピーク位置から 3 波長分戻ったサンプル点からピーク方向に 2 波長分の電気角の平均値をピング毎の電気角とし、この 100 ピング分の平均値と標準偏差により電気角の変動を調べた。また、得られた電気角から (2.19)、(2.20) 式より中心角、方位角を計算しその変動についても調べた。

次に、群体エコーと平均 TS の関係を調べた。これまで述べてきた方法により、深度が 130 m から 135 m の範囲で一様に分布する魚群を作り、各ピング毎に魚の

数を1尾から10尾まで変えて(6から10は2尾おき), 送受信係数と与えられた魚までの距離により計量魚探機で受信するレベルを,

$$E_R = PMG_R r^{-2} 10^{\frac{-\alpha r}{10}} D^2(\theta, \phi) \sqrt{T_s} \quad (5.19)$$

によって計算し, オーバーラップするエコーも起こるようにした。ここで $D(\theta, \phi)$ は送受波器の指向性を示す。

まず各ピング毎に1尾だけ出現させる。魚の総数が1440尾なので, 1440ピング分について単体エコー処理を行うことになる。次に1ピングあたりに2尾出現させ, 720ピング分の単体エコー処理を行う。これを, 1ピングあたりに3尾, 4尾, 5尾, 6尾, 8尾, 10尾としてシミュレーションを行うと, 1セットのシミュレーションの総ピング数は3852ピングとなる。

1ピングあたり複数尾いる場合は, 群体エコーが起こりうることになる。これらの条件により, (5.1) 式を用いて N_v の計算が可能である。 N_v を計算するときに必要な密度は, サンプルング体積 V を

$$V = \frac{1}{3} (r_2^3 - r_1^3) \times 2\pi [1 - \cos \theta_{thr}] \quad (5.20)$$

としたときの1ピングあたりの尾数として計算した。与えられた条件下での N_v の範囲は0.1~1の範囲となる。

計量魚探機のパラメータは, 水工研所有の計量魚探機(KFC500)に極力合わせた。そこで, パルス幅は0.6ms, 帯域幅3kHz, 送受信係数60dB, ビーム幅8.4度, 等価指向角 -19.1 dBとした。エコー波形に白色雑音を与え, 現実の状況なるべく再現できるようにした。信号対雑音比(SNR)は, 約14dB, 約21.4dB, 31.6dBの3通りで計算した。また, 単体エコー検出を行うときに与えるベースレベルについて, SNRが14dBの場合は0.2, 他の場合は0.1, 0.2の2通りで計算した。これにより計5通りのシミュレーションを行った。

このようにして与えられたエコーについて, 単体エコー検出アルゴリズムを適用した。このときの単体エコー検出パラメータを **Table 20**に示す。

結果と考察

魚の位置($\theta = 6^\circ$; $\phi = 30^\circ$)を決め, SNRを11.6dB, 24.0dBとした時のレベル信号, 位相信号, 検出した位相の例を **Fig. 51**, **Fig. 52**に示す。

SNRがいずれの場合についても, レベルビームの指向性が位相ビームのものより鋭いため, レベルビームの信号が位相ビームの信号より小さくなっている。また同図の(b), (c)に示した位相信号を見ると, SNRが

Table 20. Parameters for the single echo detection.

Parameter	Symbol [Unit]	Values
Pulse width @1/2 level	τ_b [ms]	$0.6 \leq \tau_b \leq 0.8$ (ms)
Pulse width @1/2 base level	τ_b [ms]	$\tau_b \leq 1.2$ (ms)
Phase average number	N_s	3
Maximum phase variation	$\Delta \delta$ [deg]	10
Single/Multi judge	S/M	39

高いと検出位相の変化が小さいことがわかる(**Fig. 51**と**Fig. 52**で右側のY軸のスケールが異なるので注意)。

Fig. 53は, 魚の位置($\theta = 6$ 度, $\phi = 30$ 度)を仮定し, SNRが変化した場合の検出位相の変化(a), (b)とそれらより計算した位置角の変化を100ピング分示す。SNRが20dB以上で, 検出した電気角の標準偏差は, ほぼ5deg以下となる。このときの θ についての角度推定誤差は, ± 1 度程度である。また, SNRが14dB以下の場合は, 過小推定となる。一方, ϕ についての誤差は, 系統的な誤差はなく, ランダム誤差だけである。

SNRが低い場合には, 位相検出結果で得られる位置情報についての誤差も大きくなるので注意が必要である。そこで, 自然状態でのTS測定時には, ノイズレベルを測定しておく必要がある。また, 低いSNRでは, 位相の測定誤差を生じ, これが指向性補正の誤差となるために, 正確なTSを期待できない。

Fig. 54は, 130–135mの深度における1ピングあたりに同時に出現する魚の数を変えて, 単体エコーの検出を行い, TSを推定した結果を示す。

同図(a)は横軸に1ピングに同時に出現した魚の数, 縦軸は単体エコーの検出数を示す。図中のシンボルで(20, 0.1)は, 信号対雑音比が20dB, ベースレベルが0.1であることを示す。同図(b)は横軸に1ピングに同時に出現した魚の数と(5.11)式で示されたErrorとの関係を示す。同図(c)は N_v と平均TSの関係を示す。

同図(a), (b)から, 群体エコーの確率が高くなるにつれて, 単体エコーの検出数が減り, 推定TS値の誤差が大きくなることがわかる。また, 同じSNRでも, ベースレベルの低い設定の方が, 検出数が減る傾向がある。SNRがほぼ20dB付近ではベースレベルの違いによる単体エコーの検出数が大きい。ベースレベルの設定0.1, 0.2は, それぞれピークの -20 dB, -14 dBに相当する。そこで, SNR, ベースレベルの設定が(20.7, 0.1)の場合には, ベースレベルでのパルス幅比較の際に, ノイズのために群体とされる割合が増えるためである。

この現象は, (14.8, 0.2)の場合に, (20.7, 0.1)と同じ傾向を示すことからわかる。また, (21.7, 0.2)の設定では, SNR30dBのときと同じような傾向が見られた。

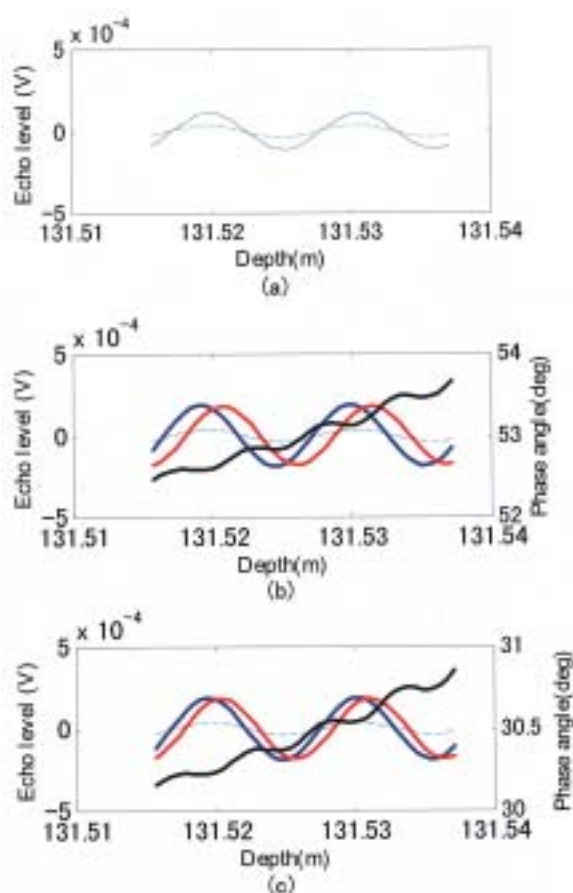


Fig. 51. Level, phase, noise signals (SNR=11.6dB) : (a) signal of level beam (solid line) and noise (dashed line), (b) signal of fore beam (blue line), aft beam (red line), and noise (dashed line) and detected phase (black line), (c) signal of starboard beam (blue line), port beam (red line), and noise (dashed line) and detected phase (black line).

同図(c)より, SNR が30dBを超える場合でも, 群体エコーの割合が増えるにつれて, 得られる平均 TS は大きくなる傾向があることがわかる。SNR30dBの場合の N_v に対する平均 TS の関係は, EK500の測定結果の傾向と割合良く一致している。

Fig. 55は1 ピングあたりのエコー数が1 から10までのケースをすべて加えた場合について TS 推定を行い, 与えた TS ヒストグラムと比較を行ったものである。これは, 実際の TS 測定時に起こる, 魚群密度が変化する状況下での TS 推定をシミュレートしている。

SNR が30dBの場合には, ベースレベルによらず, もとの分布をよく再現していることがわかる。また, SNR が20dB近辺の場合にはベースレベルを0.2とすることにより, ほぼ, もとの分布を再現できることがわかる。

群体エコーが起こる状況では, 群体エコーを単体エ

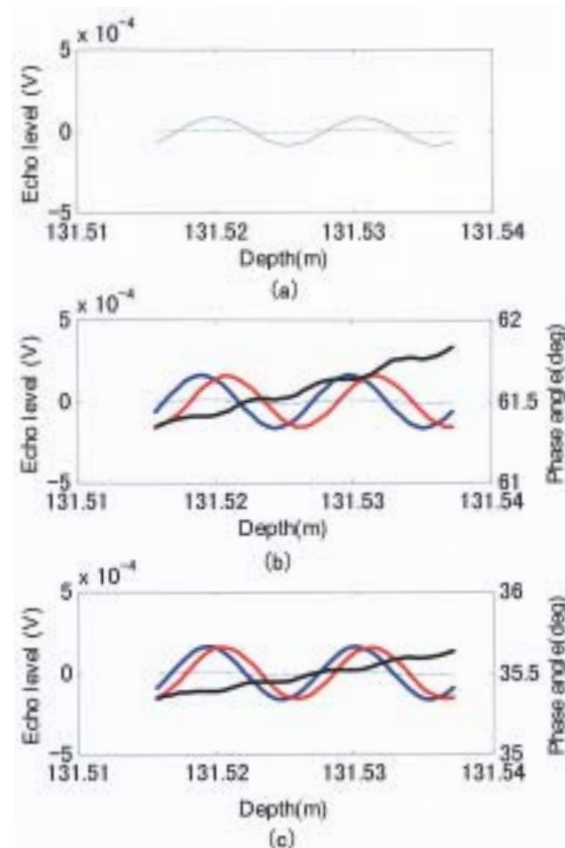


Fig. 52. Level, phase, noise signals (SNR=24.0dB) : (a) signal of level beam (solid line) and noise (dashed line), (b) signal of fore beam (blue line), aft beam (red line), and noise (dashed line) and detected phase (black line), (c) signal of starboard beam (blue line), port beam (red line), and noise (dashed line) and detected phase (black line).

コーとしてしまう状況が避けられず, 精確な TS 推定ができない。シミュレーションでは推定精度の指標である N_v で0.1前後がその判断の目安となる。魚群の反応は, 分散したものや, 塊状のものがあ, これらが混ざった場合も少なくない。そこで, このような状況では, 実用の N_v はもう少し低い値となる。

ビームを鋭くし, パルス幅を短くすれば群体エコーを減らすことが可能であるが, ビーム幅をあまり狭くすると, 魚体に均一にビームが当たらないことからくる誤差, 揺れによる誤差により, 音響調査の主役であるエコー積分に好ましくない影響を与える。パルス幅を短くするためには, 受信帯域を広げる必要があり, これは SNR を下げることに繋がる。

現在の所, 一番良いと思われる方法は, Traynor (1996) が行ったように送受波器を魚群に近づける方法であろう。このためには, 曳航体方式を用いケーブルでつり下げの方法や, 自律型航走体に計量魚探システムを装着して, 魚群からのデータを取得する方法が考えられる。

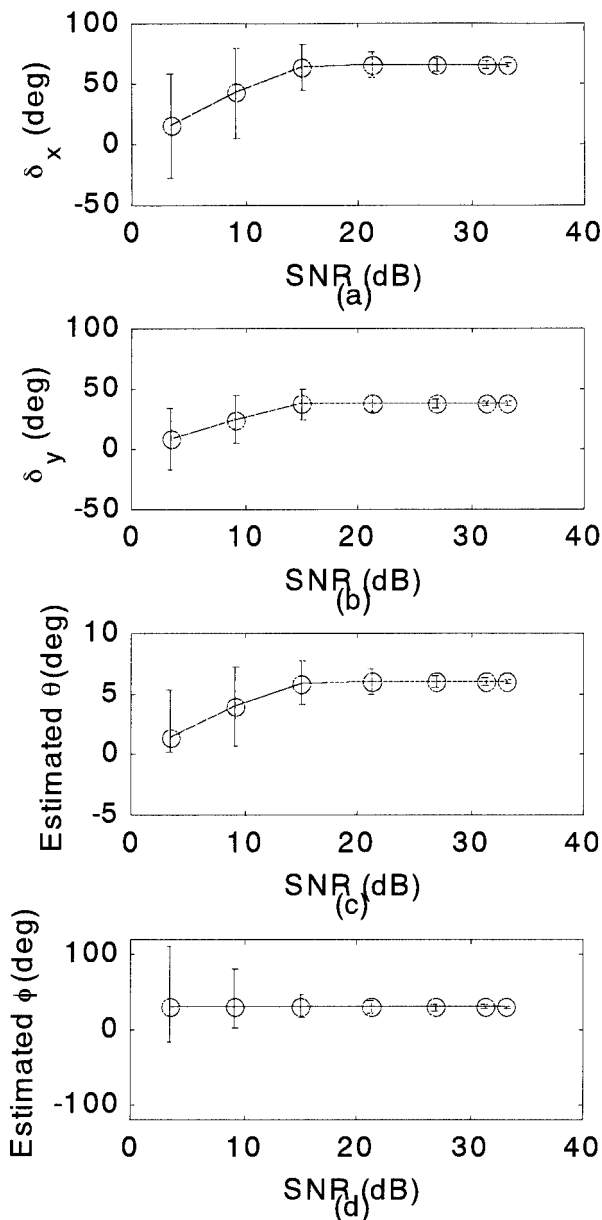


Fig. 53. Effect of noise to the detection of phase : (a) detected phase difference in the fore-aft direction at each SNR, (b) detected phase difference in the starboard-port direction at each SNR, (c) estimated angle of θ at each SNR ; (d) estimated angle of ϕ at each SNR.

結 言

- (1) 自然状態で正確に TS を行うための指標となる残響体積内尾数 (N_v) と群体エコーの割合 (M) を提案した。
- (2) スケトウダラの TS 測定結果で、指標の有効性の検証を行い、 N_v や M が大きくなるような状況では、得られる平均 TS が高くなることがわかった。
- (3) シミュレーションにより、同じ信号対雑音比でも群体エコーが増える時に、得られる平均 TS が高く

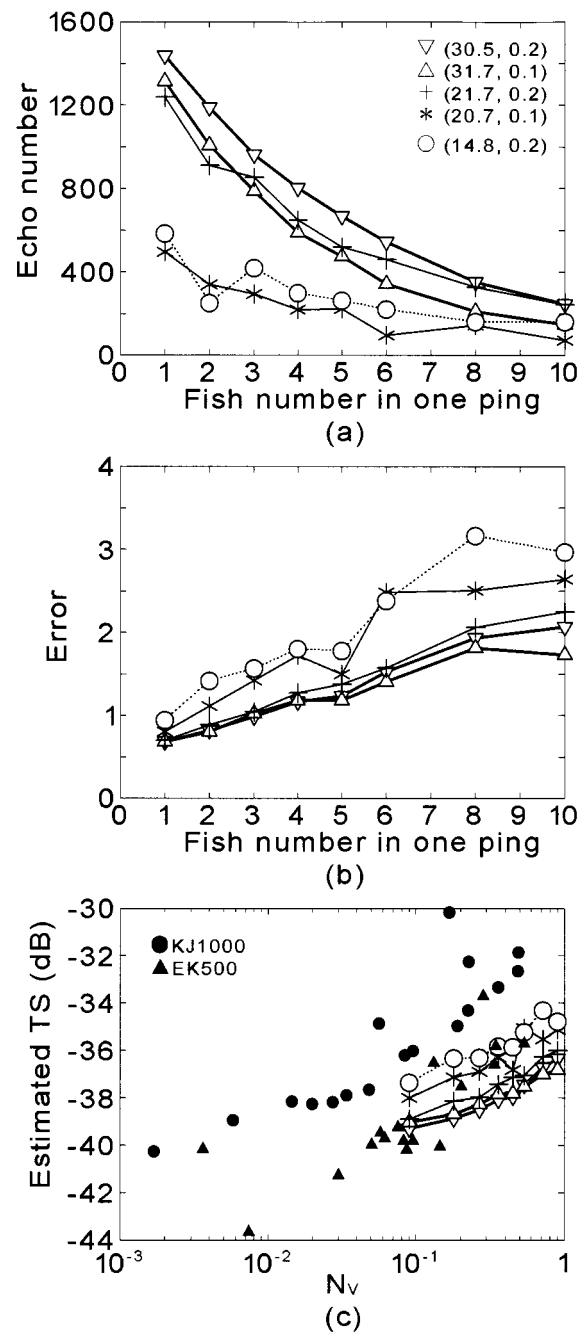


Fig. 54. TS estimation error in the case of multiple echoes : (a) detected single echoes and fish number in one ping, (b) TS estimation error and fish number in one ping, (c) estimated average TS and N_v .

なることを示すとともに、測定で得られた状況を再現し、自然状態で正確な TS の推定を行うためには、 N_v が 0.1 以下である必要があることを示した。

- (4) 信号対雑音比が低いと、群体エコーが起こらない状況でも正確な TS の測定はできないため、TS 測定の際には、SNR に留意して測定を行う必要がある。また、単体エコー抽出パラメータとして、ベースレベルは重要であり、SNR が 20dB 以上ある場合

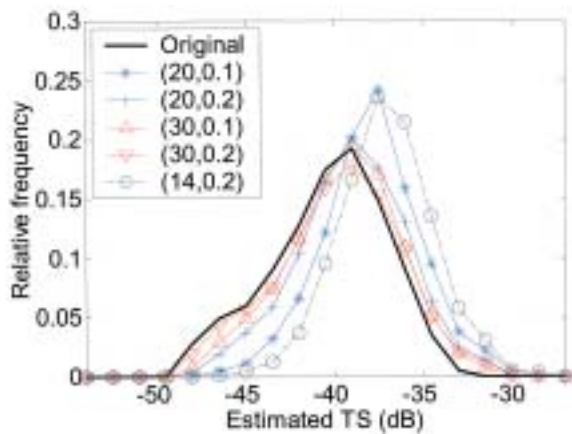


Fig. 55. Comparison of relative TS distribution between original one and the simulation results. The combination of SNR and base level is shown as (SNR, base level) in the figure.

は0.2程度が望ましい。

第6章 エコートレース解析法の高度化

緒 言

第3章からも明らかなように、魚のTSは、遊泳時の傾角により大きく変動する。また、調査船に対する魚の逃避効果は、資源量推定値に負のバイアスを与えることになる。また、巻き網船や延縄船のソナー士はソナーに映る魚群の行動を見ながらマグロかマグロのエサであるサバ類やイワシ類を見分けており、魚種を見分ける際には魚の行動が一つの手がかりとなっている。そこで、自然状態の魚の傾角、遊泳姿勢情報を得ることや、遊泳方向、遊泳速度などの魚の行動を知ることが極めて重要である。

その方法の一つとして、水中カメラによる行動などの観察がある。しかしながら、水中カメラによる観察では、以下のような問題点がある。

- 1) カメラの固定が難しいため、傾角の推定に誤差を与える。
- 2) 自然光の届かないところでは照明が必要となるが、照明は魚の行動に影響を与え、自然状態での観察とは言えなくなる。
- 3) 一般に、光の減衰は音響に比べて大きく、近距離でしか観察できない。

そこで、音響による自然状態での魚の姿勢分布や行動などの観察が必要となる。

魚探機のエコーグラム上で、まばらな魚群の場合に、「へ」の字型をしたエコーを見ることがある。これは一尾の魚から返ってくる連続したエコーの連なりであり、これを単体エコーのエコートレースという。エコートレースの形状は、船と魚がお互いに直線運動をする

とすれば、それらの相対運動ベクトルに対して一意的に決まる。第2章でも示したように、エコートレースの形状と反射強度を同時に解析することにより、個々の魚について、その遊泳速度やターゲットストレングス(TS)の魚の傾角に対する関数であるTSパターン、魚体長などの高度の計測を行うことができる(Furusawa and Miyanohana, 1988)。

しかしながら、既往の研究は、準デュアルビーム法(Furusawa and Miyanohana, 1990)やデュアルビーム法(宮野鼻ら, 1993)などの結果に対して、試験的に得られたものであり、エコートレース解析の有効性を示すにとどまっている。そこで、本研究では、エコートレース解析法に、自船からみた魚の3次元位置も知ることができるスプリットビーム法を組み合わせることにより、強力で実用的な方法を開発する。すなわち、一尾からエコートレースの自動識別処理(エコートラッキング)が行えるようにし、自動識別した多くのエコートレースについて自動でエコートレース解析を行い、魚の遊泳速度や絶対的な移動方向(澤田ら, 1995)、TSパターン、魚体長を測定する。

本章では、コンピュータシミュレーション実験により、今回開発したエコートラッキングアルゴリズムや、スプリットビーム法と組み合わせたエコートレース解析の有効性を示す。次に、水槽実験で遊泳速度が計測できることを示す。

エコートラッキング

エコートレース解析を行うためには、まずエコートレースを識別する必要がある。現在、トラッキングを行うソフトウェアも存在するが、これは、エコートレース解析を行うためのものではない。また、エコートレース解析を行うためのエコートレースの識別は、エコーグラムを見ながら、人により主観的に行われてきた。そこで、大量のエコーデータに対して自動的にトラッキングを行い、エコートレース解析が可能なトラッキングアルゴリズムの開発を行った。トラッキング結果については、後で述べるコンピュータシミュレーション試験や実海域での試験で有効性を確認した。

トラッキングの原理をFig. 56に示す。図のように、魚の位置ベクトルを $\vec{x}$ で表し、添え字 i をつけて、 $\vec{x}_i$ は、 i ピンングでの魚の位置ベクトルを表すものとする。 i ピンングで得られる n_i 個の単体エコーと $i+1$ ピンングで得られる n_{i+1} 個の単体エコーについて、 i ピンングの j 番目($1 \leq j \leq n_i$)の単体エコーと $i+1$ ピンングでの k 番目($1 \leq k \leq n_{i+1}$)の単体エコーの距離を計算する。最大 $n_i \cdot n_{i+1}$ 個の組み合わせの中で、あらかじめ設定した予測最大半径 R_0 以下でかつ最短のものを同じ魚から帰ってきたエコーの候補とし、この2点から決ま

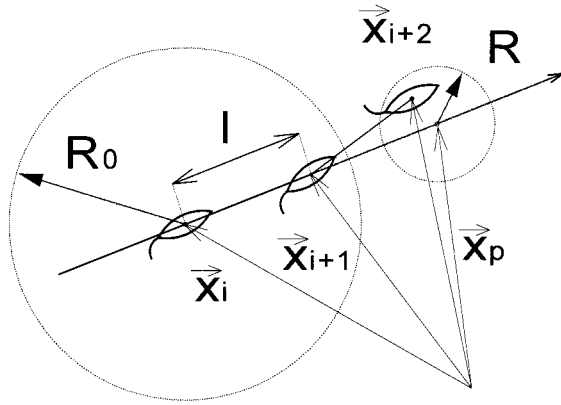


Fig. 56. Principles of the echo tracking method. The radius R_0 is the first predicted radius to search the position in the next ping and that is calculated from maximum swimming speed of fish and ping interval. The distance l is that of fish movement from the i_{th} ping position to $i+1_{th}$ ping position. The vector $\vec{x}_p$ shows predicted position in the $i+2_{th}$ position. The radius R shows the maximum radius in which there should be an echo from the same fish.

る直線上で $i+2$ ピングでの推定位置 $\vec{x}_p$ を求める。

$i+2$ ピングで得られたエコーのうち、予測最大半径 R 内で推定位置にもっとも近いものを同じ魚から得られたエコーとして、魚に番号をつける。もし i ピングの魚に番号があれば、その番号をつけ、なければ、既存の番号+1とする。もしも、 $i+2$ ピング目で、予測半径内にエコーがなければ、 i , $i+1$ ピングで候補とされたエコーは捨てる。予測半径 R は、 i ピングと $i+1$ ピングの間の移動距離 l とパラメータ α の積 αl とし、 l が大きければ、予測半径も大きくなる。このような処理を繰り返すことによりトラッキングを行っていく。また、最初の予測最大半径 R_0 は、パラメータとしてあらかじめ与える魚の最大遊泳速度と送信周期の積で与える。初期設定では、最大遊泳速度を 3 m/s , α は 0.5 としているが、対象魚によって変更する。

コンピュータによるシミュレーション試験 方法

開発したトラッキングアルゴリズムとエコートレース解析法の検証を行うために、コンピュータシミュレーションを行った。シミュレーションでは、船は静止しているものとし、異なる TS パターンを持った10尾の魚を、ランダムな方向に遊泳させ、そのエコートラッキングとエコートレース解析を行い、与えた遊泳速度と TS パターンの再現ができるかどうか調べた。

各魚の TS パターンについては、簡単のため、線音源のパターンを仮定し、指向性関数 $DF(\theta)$ を以下の

式で与えた (古澤, 1986)。

$$DF(\theta) = 20 \log \left(\left| \frac{\sin \left(\frac{kL \sin \theta}{2} \right)}{\frac{kL \sin \theta}{2}} \right| \right) \quad (6.1)$$

ここで、 L は与えた魚の体長であり、 10 cm から 30 cm までのランダムな値とした。また k は (2.4) 式により決まる波数であり、実際のシミュレーションでは (2.4) 式で $f = 38 \text{ kHz}$, $c = 1500 \text{ m/s}$ とした。

魚の TS は (6.1) 式と最大 TS (TS_{MAX}),

$$TS(\theta) = DF(\theta) + TS_{MAX} \quad (6.2)$$

で与えた。式中の TS_{MAX} は、(2.32) 式で規準化 TS を -60 dB として計算した。

各魚は遊泳速度 $1 \sim 3 \text{ m/s}$ で等速直線運動するものとした。与えた遊泳速度は実際に対象とする魚の体長の10倍程度であるので、実際の魚の最大速度程度の値である。スレッシュドレベルは、(2.7) 式で与えられるエコーレベルで -40 dB とし、この値以下のは検出できないものとした。エコーレベル -40 dB というのは、現実的にはやや高めのスレッシュドレベルと思われるが、信号対雑音比が低いときのケースを考えることにした。シミュレーションで使用したパラメータを **Table 21** に示す。

結果

Fig. 57 に、魚の3次元表示の軌跡を示す。同じ時間 61 s 内の移動を示しているため、長い軌跡は、与

Table 21. Parameters used for the simulation.

Ship	Speed (m/s)	0
Fish	Number of fish	10
	Length (cm)	10~30
	Speed (m/s)	1~3
	Swimming direction ^{*1}	
	θ (deg)	70~110
	ϕ (deg)	0~360
	Initial Position ($t=0 \text{ s}$, $x=0$)	
Transducer	y (m)	-4~4
	z (m)	50~100
	Frequency (kHz)	38
	Diameter (mm)	355
	Pulse repetition period (s)	1
System	TR factor (dB)	60
	Echo threshold level (dB)	-40

^{*1}The angle θ and ϕ is measured from the z axis and x axis, respectively in the x - y - z Cartesian coordinate system as is shown in **Fig.2.6**

えた遊泳速度が速いということを意味している。

同図で黒丸の連りの部分は、後でエコーレース解析例として示す部分である。

このような3次元的な移動を、通常観察される2次元でのエコーグラムとして表したのが、**Fig. 58**である。同図(a)は、(2.7) 式で表されるエコーレベルに対してスレッシュホールドを設定しない場合であり、(b)はスレッシュホールドレベル -40dB を設定した場合である。現実のシステムでは、ある一定以上のエコーレベルを持ったエコーしか検知できないため、(b)のようなエコーグラムについて、エコーレース解析の有効性を考える必要がある。そこで、同図(b)のエコーを用いて、エコートラッキングを行い、エコーレースの抽出を行った。

エコーレース解析結果より得られた最大 TS が、その魚の TS パターン内での最大 TS に一致する場合は、最大 TS と尾叉体長の関係より、その個別の魚の魚体長の推定を行うことが可能である。これまでは、平均 TS から平均体長の推定にとどまっていた。大量の解析を自動で行う場合、同じ魚から、とぎれとぎれのエコーレースが得られるような場合には、それぞれのエコーレースを別の魚と判定するため、体長推定に誤差を生じる。

さらに、そのエコーレースに対してエコーレース解析を行った。その結果の一例を **Fig. 59**に示す。同図(a)は、図中に点線で示した設定遊泳速度 1.09m/s の場合に、エコーレースから推定した遊泳速度を示す。図中の異なるシンボルは、それぞれ同じ魚の異なるエコーレース部分から得られた推定結果であることを示している。この場合、4つのエコーレース部分から推定した結果である。(b)は、(2.25) 式により推定した魚の傾角とそのときの TS の関係 (TS パターン) を示す。図中の記号は(a)と同じである。また、実線は、あらかじめ与えた魚の TS パターンを示す。

明らかに、設定遊泳速度と推定遊泳速度、設定 TS パターンと推定 TS パターンは一致し、エコーレース解析により、遊泳速度、TS パターンの推定が可能であることを示している。また、解析結果より得られた最大 TS が、その魚の TS パターン内での最大 TS に一致するとは限らず、これもまた誤差の要因となる。これらのことを避けるためには、エコーレースあたりのエコー個数が多いものを選ぶようにする必要がある。この場合、エコーレベルが大きい方が受信しやすいため、最大 TS に近い値が得られる可能性が高くなる。

標準球を用いた水槽実験

方 法

Fig. 60に示すように、水槽内において、標準球を

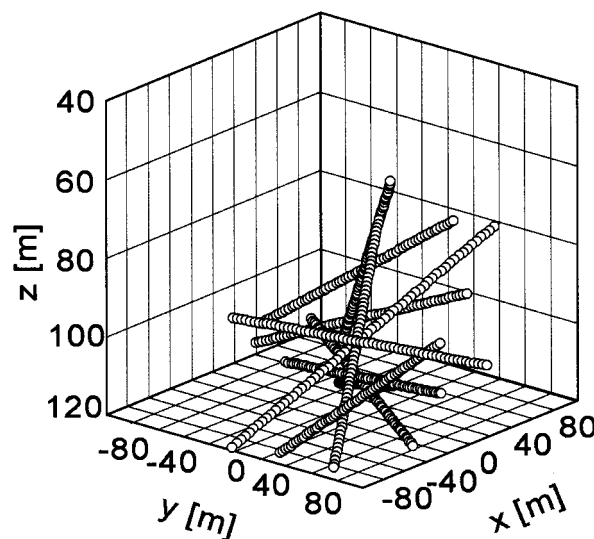


Fig. 57. Simulated echoes.

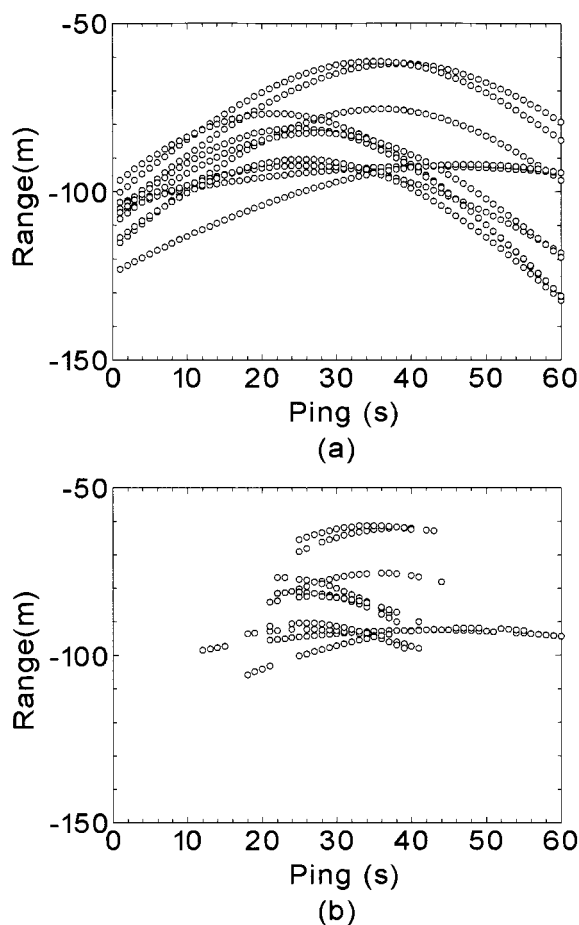


Fig. 58. Simulated echograms : (a) without echo level threshold and (b) with echo level threshold.

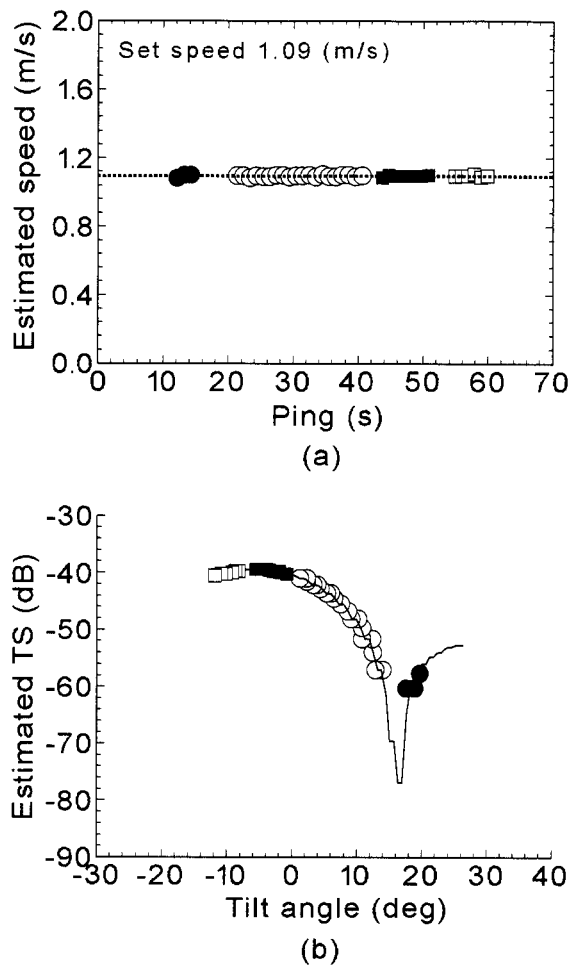


Fig. 59. Results of echo trace analysis : (a) estimated speed, (b) estimated TS pattern.

一定速度で上下方向に動かし、その移動速度を音響により検出できるかどうか確かめるために水槽実験を行った。

このために、反射強度が既知であるタングステンカーバイド製の標準球（φ38.1mm，周波数70kHzでのTS=-41.3dB）を電動リールに取り付けた。この電動リール部はACサーボモーター機構を用いているために、マニュアルまたはコンピュータ制御により精確に移動速度および移動量をコントロールできる（澤田ら，1996）。

この標準球を水槽内で上下に一定速度（0.10m/s）で動かし、ビームが水平方向になるよう送受波器を横向きに設置した小型計量魚群探知機（送信周波数70kHz，スプリットビーム方式，ビーム幅8.4度）を用いて、送信周期を0.267sとしてエコー信号の収録を行った。

Fig. 60に示す送受波器から見た標準球のビーム内での推定角度 θ を、(2.25)式より推定した。このとき、各ピング間での変位ベクトルの平均した移動方向

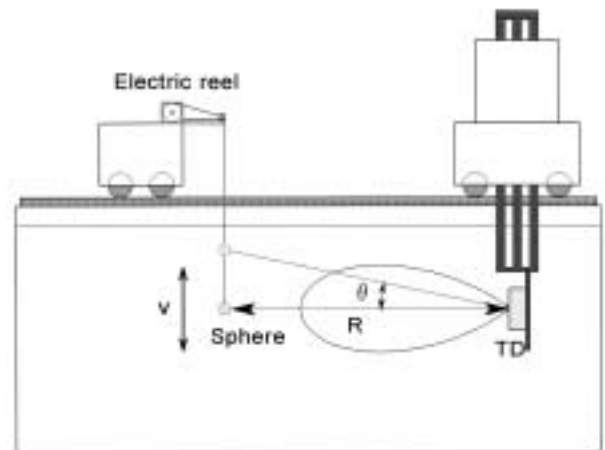


Fig. 60. Experimental set up for the estimation of sphere position and sphere speed.

を示すベクトルを $\vec{V}_T$ とし、送受波器から見た標準球の推定位置を表すベクトルの逆方向を $\vec{S}_T$ として計算した。

結果

標準球が下から上に向かって移動しているときに、スプリットビーム法により推定した位置及び移動速度をFig. 61に示す。

Fig. 61で前（Fore）方向は水面に向かう方向，後（Aft）は水底に向かう方向を示す。実際はまっすぐに移動しているはずであるが、推定した標準球の位置角が0°と5°のときに推定したDepthは約2cm程度異なり、5°の 때가0°のときより推定したDepthが浅くなっている。このために若干、弧を描いている。これは、標準球までの距離が約570cmと短いため、移動速度10cm/sで1ピングの間の上下方向への標準球の移動量は、約2.7cmと小さい。従って送受波器から標準球までの距離の変化が小さいために、7.5cmサンプルの

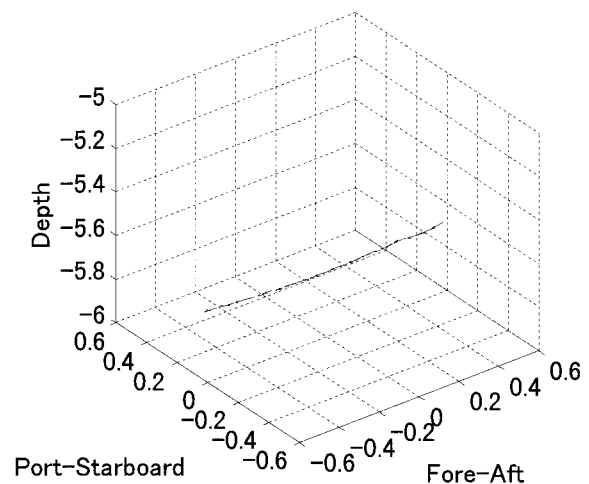


Fig. 61. Estimated sphere position (in m).

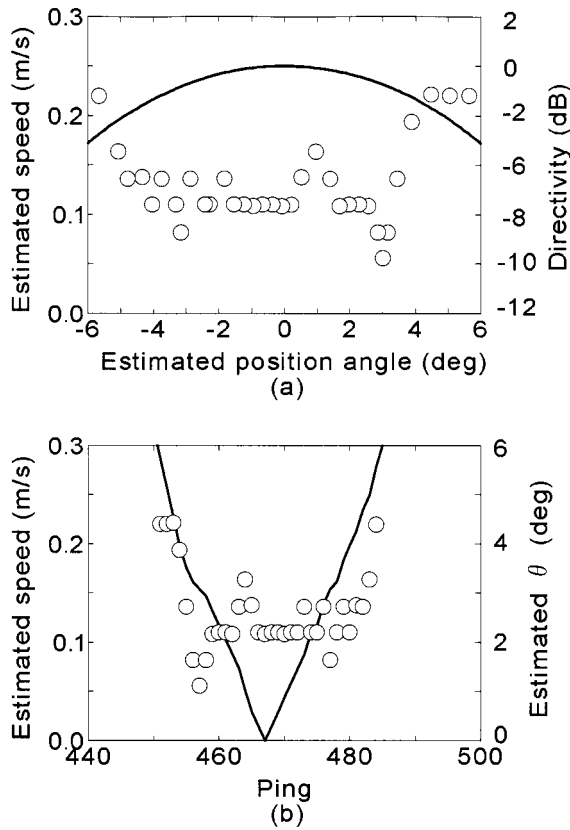


Fig. 62. Results of echo trace analysis. (a) Estimated position and speed. Directivity of the beam is superimposed and shown in the solid line. (b) Estimated speed in time series with estimated angle (θ). Estimated speed and angle are shown in circles and the solid line, respectively.

測定では距離の変化がないことになる。したがって、サンプリング誤差のために実際より短く推定された距離と位相ビームにより測定した角度データをもとに位置を計算すると、実際の軌道とは異なる軌道となる。

次に、エコートレース解析法による推定結果を Fig. 62 に示す。

Fig. 62(a)の横軸はビーム内での推定した角度を表す。また、Fig. 62(b)は標準球について、ピング毎の推定移動速度と、測定したビーム内での角度 θ を示す。

推定したビーム内の角度の絶対値が 5° 以内での推定平均速度は 12.0cm/s 、標準偏差は 3.2cm/s となり、 4° 以内ではそれぞれ 11.6cm/s 、 2.7cm/s 、 3° 以内ではそれぞれ 11.6cm/s 、 1.2cm/s となった。これは、ビーム周辺では、位相ビームの指向性により、信号対雑音比が悪くなる (6° で往復 -12dB) たためと考えられる。

推定平均速度に関する誤差は、推定したビーム内の角度が 4° 以内のもので $+16\%$ と若干大きなものとなった。標準球の移動速度は、ピング間に移動した距離を送信周期で除すことにより得ている。ピング間での

移動距離は、送受波器から標準球までの音の往復時間に音速を与えて距離に変換し、位相差から角度を計算し、xyz 座標に変換している。そこで、音速の値により、距離が変わることになり、ひいては、標準球の推定移動速度も変わることになる。今回の実験では、水温を測定していないために、音速に関しては 1500m/s を使用しているが、仮に音速を 1450m/s としても、 $+3.3\%$ の系統誤差分しかないため、この誤差の原因は誤った音速の使用によるものではない。

そこで、位相推定のサンプリング誤差に起因する推定速度誤差について検討する。標準球位置の xyz 座標への変換は、送受波器から標準球までの測定距離と (2.19), (2.20) 式によって得た (r, θ, ϕ) を用いて行っている。(2.19) 式で δ_x あるいは δ_y の最小値がサンプリング誤差を決定する。KFC の場合、 δ_x, δ_y の最小値は 1° である。そこで、ビーム中心上で距離 R 離れたターゲットについての角度のサンプリング誤差 $\Delta\theta$ は、

$$\Delta\theta = \sin^{-1}\left(\frac{1}{kd}\right) \quad (6.3)$$

となり、上下方向の位置のサンプリング誤差 ϵ_p は、

$$\epsilon_p = R \tan \Delta\theta \quad (6.4)$$

となる。(6.3), (6.4) 式の k, d, R に実際の値を入れて計算すると、 $\Delta\theta = 0.08^\circ$ 、 $\epsilon_p = 0.79\text{cm}$ となる。なお、中心から 6° の位置での上下方向の誤差は最大で 0.80cm と、中心とほとんど変わらない。 1 ピングあたりの上下方向への移動量 2.7cm に対して、最大誤差 0.8cm であり、位相に関するサンプリング誤差は推定位置に関して最大 $\pm 30\%$ の誤差要因となる。

位置推定誤差のところで検討を行ったように、上下方向の誤差を送信周期で割った値が推定速度の誤差分となる。これは、送信周期を T_p として、

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_p}{T_p} \quad (6.5)$$

となり、その値は 3cm/s である。そこで、ピング毎の推定速度には $\pm 30\%$ 以内のランダム誤差が入ることになる。

Fig. 62(b) に示した標準球の位置を示す角度 θ は、等速直線運動をしているためほぼ V 字型となるはずであるが、ビームで中心から 5° 以内の 453 ピングから送受波器のビーム中心に相当する 467 ピングまで蛇行している。これは、水槽内での実験という制約から、壁や水面からの反射の影響により、不要エコーが干渉したためと考えられる。

第5章で行った信号対雑音比と位相信号の関係からもわかるように、各ピングでの位相はばらついても平均的に考えれば大きな誤差にはならない。そこで、エコートレース解析で求める速度推定は、ピング毎の速度ではなく、エコートレース内で平均的な速度を求めるべきであろう。(6.5) 式から、測角精度が一定の場合には、精確な速度推定を行うためには、送信周期を早く、ターゲットまでの距離は短くする必要がある。

自然状態でのエコートレース解析例 小型計量魚探機の必要性

従来の音響調査は、主として船底装備の計量魚群探知機により行われてきた。これは、曳航体を用いた場合、1) 浅いところでは曳航ケーブルをのぼすことができず、船速や方向を急に变更できないなどの操船上の問題、2) 曳航ケーブルをのぼすことにより生じるノイズ、3) 曳航体の投入、揚収に関わる問題、などによる。しかしながら、音響ビームは遠くなればなるほど広がるために、群体エコーが増え、個体魚からのターゲットストレングスの測定が難しくなる。従って、個体魚のエコートレースも得にくくなり、エコートレース解析による魚の行動推定も難しくなる。また、エコートレース解析を行う場合、送受波器のベースとなる部分の揺れにより大きな誤差を生じるため、揺れの少ないベースが必要である。そこで、我々は、漁獲によらないで魚体長、魚種の確認を行うことを目的として、自律型航走体 (AUV) などに搭載可能な小型計量魚群探知機 (周波数70kHz, スプリットビーム方式, ビーム幅8.4度) と高感度ステレオビデオカメラシステム (ハーピコンカメラ) を用いたシステムの開発を行った。これは、対象魚に近づいて、ステレオビデオカメラで“見て”, 音響により帰ってくるエコーを“聞く”ことにより、魚種、魚体長、行動の推定を行うものである。そこで、この装置の海上試験を行い、得られたエコートレースの解析を行った。

方法

センサーシステムを搭載したテストベンチ (Fig. 63) について、深度140mまでの海上試験を1999年7月30日～8月3日に相模湾において水産庁漁業調査船照洋丸 (2494トン) で行った。

計量魚群探知機の較正を行うために、音響、光学システムを搭載したテストベンチの送受波器直下約7mのところに、標準球 (タングステンカーバイド球, 直径38.1mm, TS=-41.6dB) を3方からのテグスでつり下げた状態で、深度を10mから140mまで段階的に変え、各深度で12分ずつエコーデータを収録した。テストベンチ回収後にデータを取り出し、得られた標準



Fig. 63. Experimental setup of the test bench. The quantitative echo sounding system with split-beam transducer of 70kHz, and stereo video camera system are equipped in it. The black belt rounded test bench is weight for balance and the sensor unit for depth, temperature, roll and pitch angles is attached to the cable.

球のエコーデータより各深度における送受信係数 (TR) を求めた。較正結果に基づき、TR 値を設定後、曳航体深度140mで得られた魚のエコーデータより、7ピング以上連続しているもののみを使用し、エコートレース解析を行った。

結果

較正結果を Fig. 64 に示す。10mから140mまでの感度変化は約2 dB程度と小さく、各深度での較正值は深度40mでの値を除いて安定している。将来 AUV に搭載するときに、AUV の設定深度に応じて較正值を使い分けることにより、正確な音響データを得ることができる。

Fig. 65 に試験前に船底装備の計量魚探機により得られたエコーグラムとテストベンチで得られたエコー

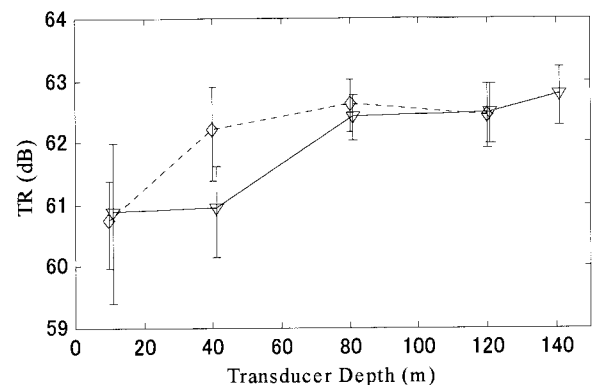


Fig. 64. Calibration results. The symbol, ▽ denotes the results when the test bench is lowered and ◇ denotes that when the test bench is raised. Standard deviations are shown as error bars.

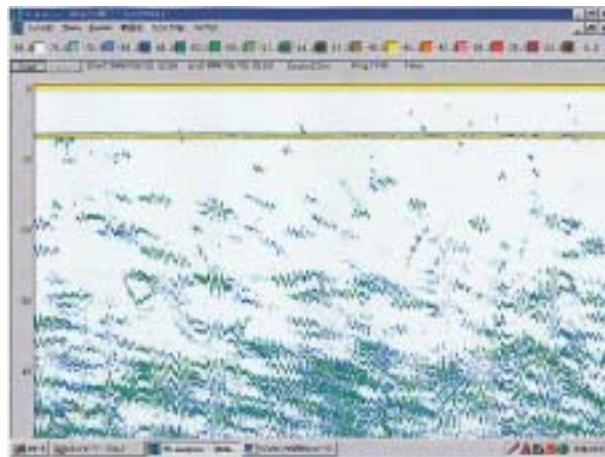
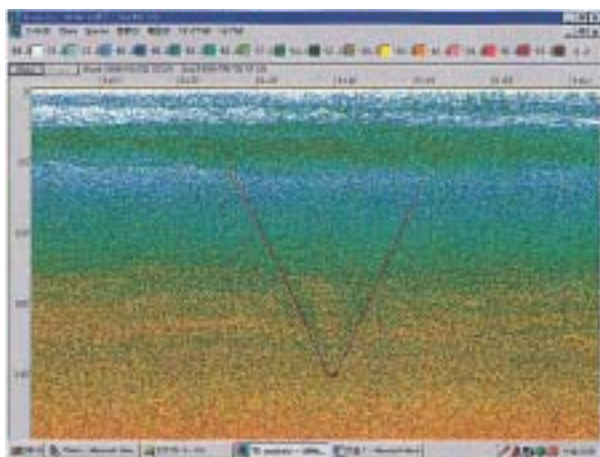


Fig. 65. Resolution differences by the distance between the transducer to the fish school : (a) hull mounted transducer (KFC1000S, 300m range) ; (b) test bench mounted transducer (depth of the test bench is 140m, 50m range).

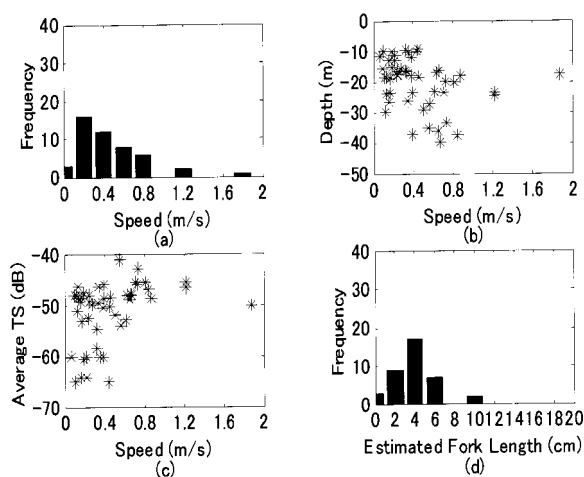


Fig. 66. Results of the echo trace analysis for the successive echoes continuing over seven pings : (a) histogram of the estimated fish speed, (b) estimated fish speed and depth, (c) estimated fish speed and average TS, (d) histogram of the estimated fork length of fish.

グラム示す。魚群に近づいて測定を行うことにより、船上からでは得られない高分解能な音響データ及びステレオビデオ画像を収集することができることは大きな利点である。

エコーレース解析の結果得られた遊泳速度、体長分布を **Fig. 66**に示す。同図より、対象魚が有鰭魚であれば、平均尾叉体長が3.8cm程度、平均遊泳速度0.45 m/s の魚であることが示された。漁獲サンプリングができなかったため、魚種、魚体長等が不明であるため、この推定値に対して検証はできなかった。推定遊泳速度が体長の12倍というのは、最大遊泳速度（だいたい体長の10倍）より若干高い値である。

揺れの影響の検討

今回の実験では、**Fig. 65(b)**に見られるようにテストベンチの揺れのためにエコーレースが波打っている。このような、テストベンチの揺れの影響により測定結果にどの程度の誤差が生じるか、検討を行った。

Fig. 65(b)のエコーグラムから対象とするエコーレースを拡大したものを **Fig. 67**に示す。このエコーレースから、エコーの揺れの中心は約17m、揺れの周期は約8秒、振幅は0.85mであることがわかった。これは、照洋丸の船尾から曳航ケーブルによりテストベンチを吊したために、船のピッチングの影響が、テストベンチの上下動となって現れたためと考えられる。

一般的に、船のピッチング、ローリングでの揺れ周期は、船長を L として、

$$T_p = 0.45 \sim 0.91L^{1/2} \quad (6.6)$$

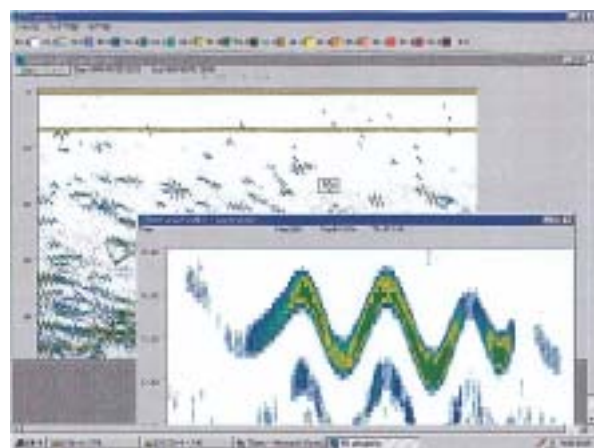


Fig. 67. Example of the echo trace obtained from the unstable base.

$$T_R = 1.5 \sim 3T_p \quad (6.7)$$

と表される (大串, 1981)。照洋丸の長さ87.6mを (6.6) 式に代入すると、ピッチング周期 T_p は4.2~8.5秒となり、テストベンチの揺れ周期の8秒はピッチングによる揺れ周期と考えられる。さらに、振幅0.85mは照洋丸のピッチ角で1.1度に相当する。試験当時は、テストベンチを140mまで沈めるためにアンカーを打たないで漂泊していたため、この程度の揺れは充分にありうる。

上下動をしているベースから観測する場合、送波時と受波時のベース位置により、ターゲットの位置が変動するように見える。そこで、送波時、受波時の量に添え字 t, r をつけて区別することによって、単体エコーの受信電圧は、

$$E_R^2 = (P_0 M G_R)^2 \frac{1}{r_r^2 r_t^2} \exp[-2\beta(r_t + r_r)] \times D^2(\theta_t, \phi_t) D^2(\theta_r, \phi_r) T_S \quad (6.8)$$

となる。そこで、本来の T_S は、 $K = P_0 M G_R$ として、

$$T_S = \frac{E_R^2}{K^2 r_r^2 r_t^2} \exp[2\beta(r_t + r_r)] \frac{1}{D^2(\theta_t, \phi_t) D^2(\theta_r, \phi_r)} \quad (6.9)$$

となるはずであるが、拡散減衰、吸収減衰の補正は、受波時に得られた距離で補正を行うために、得られる T'_S は、

$$T'_S = \frac{E_R^2}{K^2 r_r^4} \exp(4\beta r_r) \frac{1}{D^4(\theta_r, \phi_r)} \quad (6.10)$$

となる (Furusawa and Sawada, 1991)。そこで、誤差を ε_s とすると、

$$\varepsilon_s = \frac{T'_S - T_S}{T_S} = \left(\frac{r_r}{r_t}\right)^2 \exp[2\beta(r_r - r_t)] \frac{D^2(\theta_t, \phi_t)}{D^2(\theta_r, \phi_r)} - 1 \quad (6.11)$$

と表される。

x 軸と平行に、10度頭を下げた状態で、速度0.1m/sで移動する魚を、揺れるベース上で捉えた場合のエコートレース解析に与える誤差について計算した。揺れの中心(16.5m)、揺れの周期(5.6秒)、振幅(0.85m)を入れ、x 軸の正方向に、 $t=0$ でyz 平面(0,0.5,16.5)を通過するエコーを計算機上でシミュレートした。また、TS パターンは、(6.1) 式で $L=5\text{cm}$ として与えた。このエコーについて、エコートレース解析を行い、ベースが揺れない場合と比較した。

Fig. 68は、揺れないベース上で観察した場合、及

び上下動がある場合のエコートレース解析結果である。揺れがある場合でも TS に関しては、 $\pm 0.31\%$ 程度の誤差しかなかった。しかしながら、傾角については、オフセット的な誤差を生じることがわかった。これは、上下動により、魚の平均的な遊泳方向が変化するためと思われる。しかしながら、測定 TS の誤差は小さいため、体長推定の大きな誤差とはならない。さらに、揺れない場合の推定速度は、10.0m/s であり、上下動がある場合は9.85cm/s となった。このことから、ベースの上下動は、推定速度の大きな誤差要因ではないことがわかった。

結 言

スプリットビーム法とエコートレース解析法を結合することによって、魚体長、行動の推定を行うことができることを示した。以下にその主要な成果を示す。

- (1) エコートレースの自動識別処理を行い、大量なデータについてのエコートレースの抽出を行った。

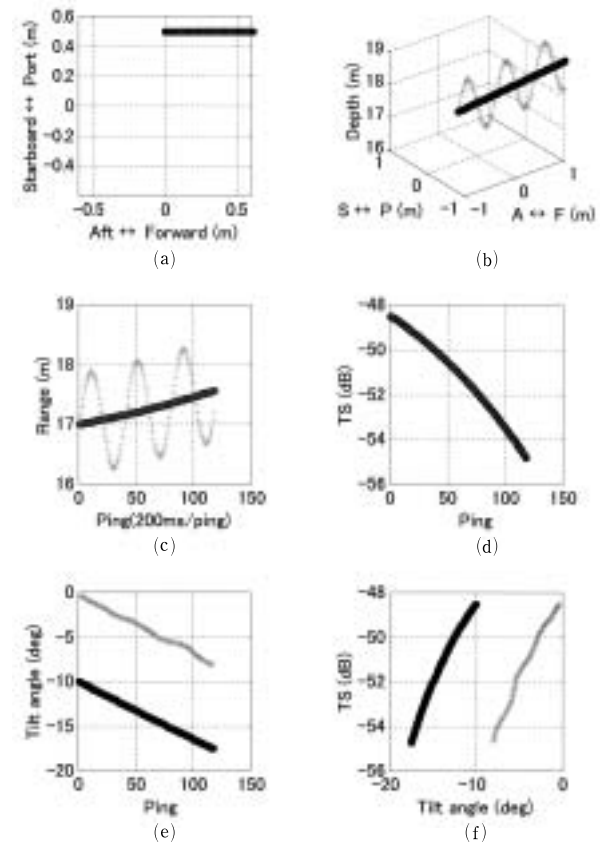


Fig. 68. Results of the echo trace analysis for the simulated echoes observed from the base with motion and without motion. Circles and crosses denote without motion and with motion, respectively. (a) Estimated target position from the top view. (b) Estimated target position in the three-dimensional view. (c) Echogram. (d) Estimated TS in time series. (e) Estimated tilt angle in time series. (f) Estimated TS pattern.

このアルゴリズムは、ステレオビデオカメラなどで、3次元データのあるターゲットのトラッキングを行う際にも応用可能である。

- (2) スプリットビーム法と組み合わせることにより、魚の船に対する行動を推定できることをシミュレーションと水槽実験により示した。
- (3) 実海域で得られたエコーについて、エコートレース解析により得られた魚の TS パターンより、魚体長の推定が可能であることを示した。
- (4) エコートレース解析を行うためには、魚群に近づく必要がある。また、エコートレース解析は、ベースなどの揺れの影響による誤差を生じる。このため、極力揺れないベースで測定するか、ベースの揺れのデータを収録し、その影響を計算により除去する必要がある。

第7章 音響手法による資源量、サイズ、行動等の高精度推定

緒 言

第2章でターゲットストレングス（以下 TS）推定手法の比較を行い、自然法による TS 推定結果は、適切な条件では、調査対象魚の姿勢分布、生理状態、体長分布を反映できるので、信頼性の高い TS 推定結果を与えることを示した。第5章では、自然状態での TS 推定を行う際の精度の指標を提案し、測定とシミュレーションにより、指標の有効性を検証した。これにより、自然状態での TS 測定で得られた TS データについての信頼性が高まり、このデータを使用して得た規準化 TS の信頼性も高くなる。さらに、第6章では、エコートレース解析法を用いて、自然状態にある魚の体長推定と行動推定が可能であることを示した。

本章では、第5章、第6章の研究成果を取り入れて、ユーザーフレンドリな TS 解析総合ソフトウェアの開発を行い、実際に応用する。このソフトウェアによればユーザーは、画面上のエコーグラムを見ながら、魚群を選択し、TS 解析を行うことができる。選択した魚群についての TS 解析結果は、第5章で検証を行った残響体積内尾数（ N_v ）や群体エコーの割合（ M ）といった誤差の指標と共に算出される。さらに、TS パターン内の最大 TS から個々の魚の体長、スプリットビーム法による位置の推定結果から遊泳速度などの行動推定を行うことができる。

実際に、北海道道東沖のスケトウダラ調査で得られたエコーデータや、相模湾のアジ、サバ類のエコーデータを用いて、自然状態 TS 推定、エコートレース解析を行い、ソフトウェアの検証を行った。

本ソフトウェアにより、従来は個別の手計算で行われていた解析が飛躍的に簡単になり、誤差指標付きのために TS 解析の精度も向上する。

ソフトウェアの概要

開発したソフトウェアのフローを Fig. 69に示す。

開発にあたり、以下の項目を満たすようにした。

- 1) 単体エコー検出のパラメータ（第5章 Fig. 49参照）をオンラインでの計測時と同じように選択可能とし、画面上にオンラインで得られるものと同じ精度のエコーグラムを表示し、エコーグラムをみながら、解析を行う魚群を選択できるようにする。
- 2) 選択範囲の魚群について、平均 TS、平均 SV、推定精度の指標の計算を自動的に行い、TS マトリックスとして表示する。この結果は、テキストデータとしてファイルにも収録できる。
- 3) 選択した範囲で、自動的にエコートレース解析を行うことができる。

このための開発環境として、一般的に使用されているOSと言語を採用した。開発環境をTable 22に示す。

Fig. 69に示すように、はじめにパラメータを選択し、次に生データを選択する。生データは画面上で40log_rTVGのエコーグラムとして画面に表示される。解析時には、画面上のエコーグラムを見ながら、選択した領域に対して、TS の解析（図中で Single echo

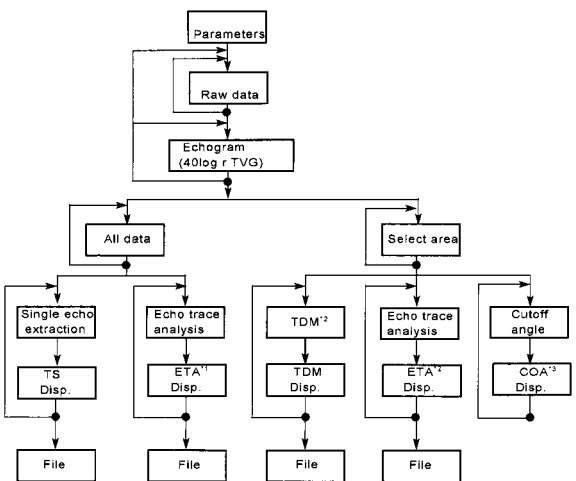


Fig. 69. Flows of the TS analysis software. *1: Echo trace analysis, *2: TS distribution matrix, *3: cutoff angle

Table 22. Data type, OS, language, and computer type targeted to develop software.

Data	KFC type (KAJIO)
OS	Windows NT4.0 (Microsoft)
Language	Visual C, Visual Basic (Microsoft)
PC	DOS/V

isolation) やエコートレース解析 (Echo trace analysis) を行うことができる。また、カットオフ角とエコー数の関係の表示が可能である。これにより、第5章で説明したように、自然状態 TS 推定のための適切なカットオフ角を選ぶことができる。さらに、それぞれの解析結果をテキストファイルとして出力できる。

次に、再生時のエコーデータの流れを、Fig. 49で示した KFC 計量魚探機の単体エコー信号処理フローを用いて説明する。第5章で説明したように、オンライン処理は図の左側から右側に行われる。図の左側からデジタル化されたオンラインデータは、40logrTVG 処理後の広ビーム (WTVG40) と狭ビーム (NTVG40) によるレベルビームデータ、トリガー信号、海底検出信号、レンジ情報、位相信号 (F, A, P, S) である。位相信号から四分サンプル相互相関法により位相情報を電気角 δ として得ることができる。この電気角とレベルビームデータ、トリガー信号、海底検出信号、レンジ情報、パラメータは、大容量記録媒体に収録される。

一方、再生時のデータの流れは、図中の太線で示した方向となる。このときのレベルデータは、オンライン時と全く同じデータである。また、位相データについては、四分サンプル相互相関処理後のデータ (図中で、 δ_x , δ_y) となるが、オンラインで使用する位相データと同一のものである。単体エコー処理では、レベルデータ、位相データを使用し、パラメータで与えられる判定の基準に基づいて単体エコーの検出と TS 計算が行われる。同じデータを用いて繰り返し処理を行っても、デジタル化されたデータを使用しているために信号の劣化がなく、PC 上で、異なったパラメータを使用して正確に再処理することが可能である。

検証と応用

スケトウダラ・オキアミ調査

調査は、特定水産資源評価技術開発調査の「計量魚探を用いた底魚類現存量推定手法の確立」として、北

海道区水産研究所主催のもと東北区水産研究所漁業調査船の若鷹丸 (1234トン) を用いて行われた (中央水産研究所, 1997)。調査海域は、北海道道東太平洋岸の陸棚および陸棚斜面上に18本の定線を設定し、定線上を計量魚探機で音響データの収集とトロールによる生物サンプリングが行われた。Table 23に、調査名、調査日程、調査船、使用機器の概要を示す。

今回解析したデータは、この調査で得られたものの一部である。北海道道東沖の10マイルの間に水深が30m弱から約140mまで深くなる大陸棚で、1996年6月26日07:30頃から30分くらいの間にかけて、深度30–40m付近に点々と続く Fig. 70のような反応があった。この反応についてのエコー収録後、1マイル離れているが、同じ深度のあり同じ魚種と思われる魚群をトロールにより漁獲し、生物組成、体長組成を得た。トロール結果と得られた TS データから、 N_v の計算を行い、規準化 TS の推定を行った。解析を行った部分は Fig. 70の上部左側に示した四角の部分である。この選択範囲の拡大図を、下部に示し、選択した範囲の TS 解析を行う。

解析結果

Fig. 71に示した TS マトリックスにおいて、縦軸は深度、横軸は TS を示す。深度は29.0mから約2.2m づつ10層、TS は−70dB〜−25dBまで3 dBステップで表示している。表中の数字は魚の密度を表し、例えば29.0~31.2m, −40〜−37dBでは195となっているが、これは、この深度範囲、TS 範囲にある単体と判断されたエコーに対するエコー計数法による魚の密度が、 195×10^{-6} 尾/m³であることを示す。

図中でエコーグラムの下にある表の右側の‘ENO’は、各深度で検出された単体エコー数、‘ADS’は各深度での密度、‘NV’、‘M’は第5章で説明した自然状態 TS 推定の指標である。全体の平均 TS、推定した規準化 TS、平均 SV、 N_v 、M を表の下側に示している。この結果は、ファイルにも出力され、後で詳し

Table 23. Objectives, research vessel, period, area, and acoustic equipment.

Item	Contents
Survey	1996 walleye pollock and krill survey
Research vessel	Wakataka maru (692ton., Tohoku National Fisheries Regional Institute)
Survey period	June 24~July 3, 1996
Survey area	Offshore of the east coast of Hokkaido
Echo sounder	KFC2000 (KAIJO) Split-beam/Dual-beam Frequency 38, 70, 120, 200kHz Pulse width 0.6ms, 1.2ms, 2.4ms (1.2ms is used during survey time.)

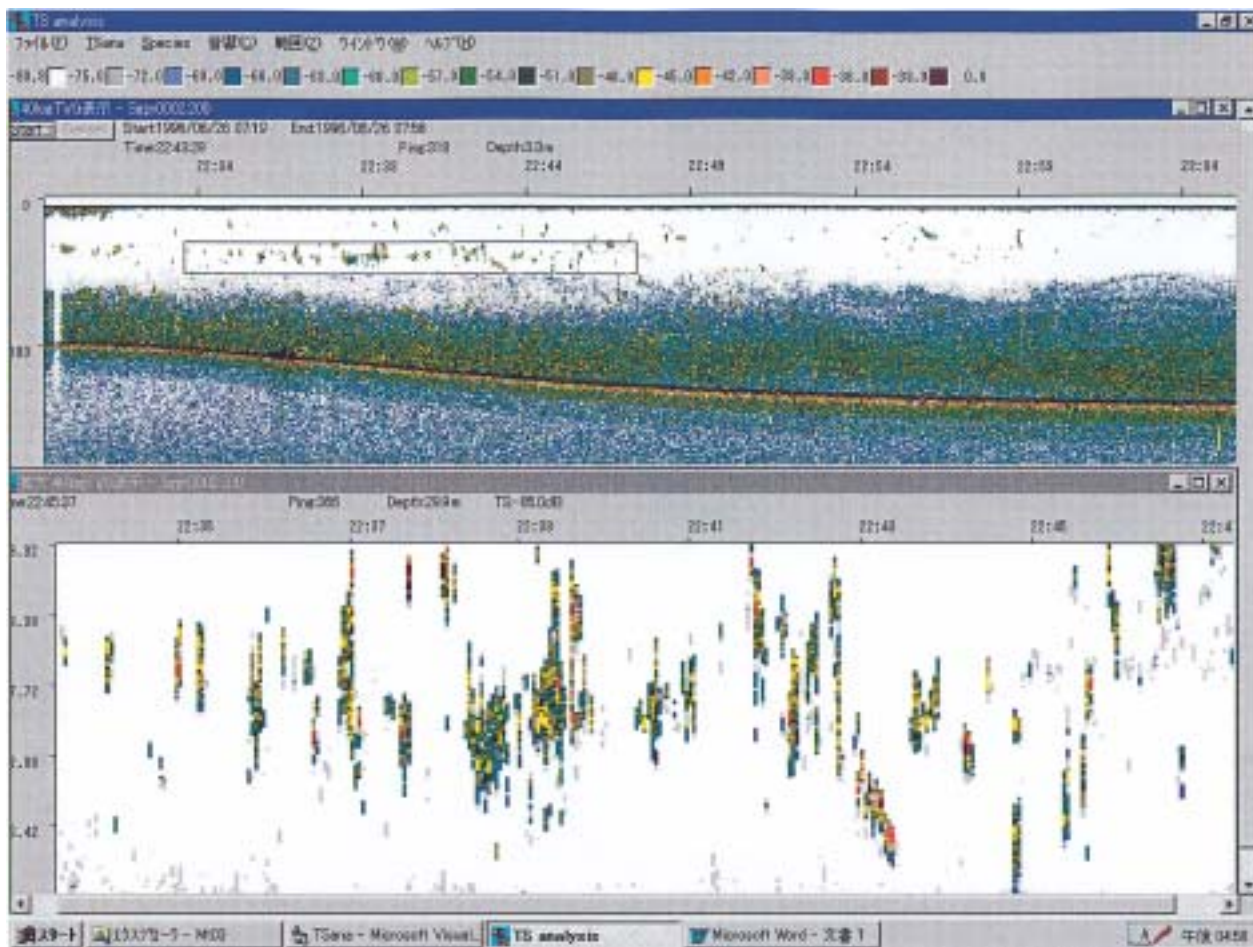


Fig. 70. Echograms (500m range) obtained in the shelf region of the east coast of Hokkaido. The square region in the upper echogram is magnified in the lower region.

い値を確認することができる。

トロール結果は、スケトウダラ1才魚が97%、3%は2才魚であった。平均尾叉長は19.4cm、標準偏差は5.3cmであった。(5.6)式により、規準化TS -66.0 dBを仮定した場合の平均TS -39.9 dBである。

TS解析で得られたテキストファイル出力によれば、TS解析結果は、29.0~50.6mの深度範囲、310ピングのうち単体エコー数107個で、平均TS -47.4 dB、平均SV -67.4 dB、 $N_v=0.026$ 、 $M=69\%$ 、推定規準化平均TS -73.5 dBとなった。TS分布マトリックスを見ると、主として -61 dB以下と -61 dB以上のグループに分けることができる。19cmクラスのスケトウダラの主要なTSは -60 dB以上であることが、懸垂法で得られている。また、トロール結果から得られた魚の胃内容物からオキアミが得られていることから、 -60 dB以下はオキアミによる可能性が高い。そこで、 -60 dB以上のTSに限り解析を行うと、エコー数19、平均TSは -40.2 dBとなり、これから得られる規準化TSは -66.2 dBとなる。エコー数が19個とかなり少ないため、信頼性は高くないが、推定規準化TS -66.2 dB

は、スケトウダラについて使用されている値 -66.0 によく一致している。 N_v も0.1より小さく、 M も70%以下であることから、得られるTSの精度についての問題はないと考えられる。

エコートレース解析

第6章で説明したエコートレース解析法による魚体長推定方法について、実際に得られた魚の魚体長とエコートレース解析による魚体長推定結果との比較を行うことにより、検証を行った。また、遊泳速度の推定も合わせて行った。

調査は、水産庁漁業調査船照洋丸により、6月30日より7月3日まで、相模湾の江ノ島沖、水深30m程度の平坦な海底が続く場所で行った。Table 24に調査名、調査日程、調査船、使用機器の概要を示す。

実験方法としては、水深30m前後の平坦な海域で、前後のアンカーを使用して錨泊し、センサーシステムを搭載したテストベンチ (Fig. 63を参照) を水面下3m~20mの間で適宜深度を変えて吊り下げた。テストベンチ下に標準球 (WC球、38.1mm、周波数70kHz

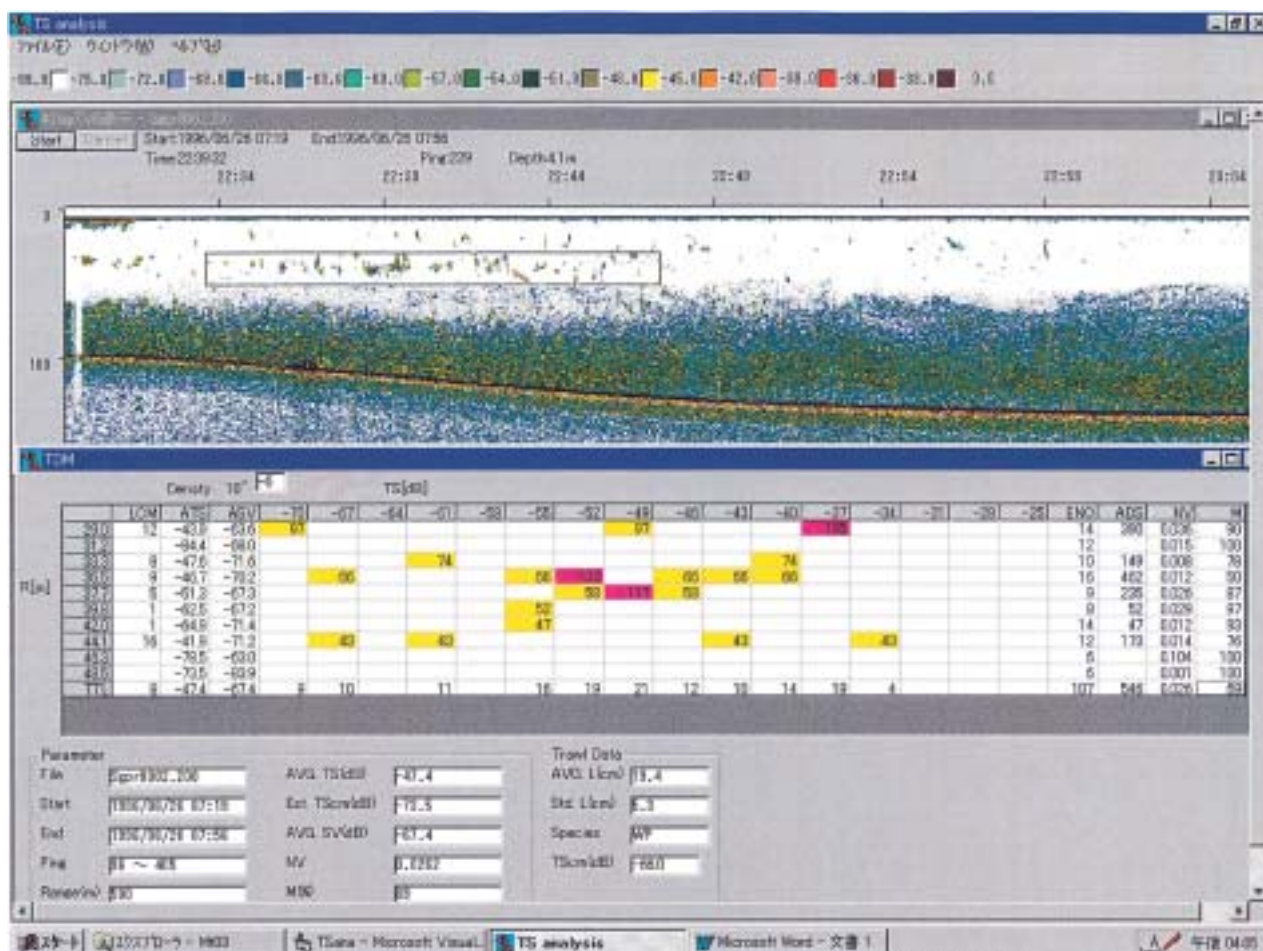


Fig. 71. The display of the TS matrix. Target strength in the square region of the echogram is analyzed and displayed in the lower region.

Table 24. Objectives, research vessel, period, area, and acoustic equipment.

Item	Contents
Survey	2000 Shoyo maru AUV sensor test
Research vessel	Shoyo maru
Period	June 30~July 3, 2000
Survey area	Offshore Enoshima, Kanagawa
Echo sounder system	KFC2000 (KAIJO) Split-beam/Dual-beam Frequency, 38, 70,kHz Pulse width 0.6ms, 1.2ms, 2.4ms (0.6ms is used during survey time.)

での $TS = -41.6\text{dB}$ を送受波器下約 7 m に吊り下げ、送受信係数の較正を行った。その後、標準球を外し、水面下 3 m ~ 20 m まで変化させ、魚のエコーを収録した。エコー収録中に、サビキ釣りにより魚種の確認を行った。得られたエコーについてエコートレース解析を行い、魚体長、遊泳速度の推定を行った。

結果と考察

Fig. 72 に、6/30 ~ 7/2 までの漁獲結果の体長組成を示す。サビキ釣りにより底から数 m の範囲で 20 cm ~ 40 cm のマアジ、マサバ、ゴマサバを主として、20 cm から 30 cm 前半のワカシ（ブリの若齢魚）、10 cm 程度のウルメイワシ、30 cm 弱のサバフグ等が得られた。

Fig. 73 に 2000 年 6 月 30 日 17:44 ~ 17:59 に相模湾で得られた、自然状態にある魚のエコーグラムを示す。

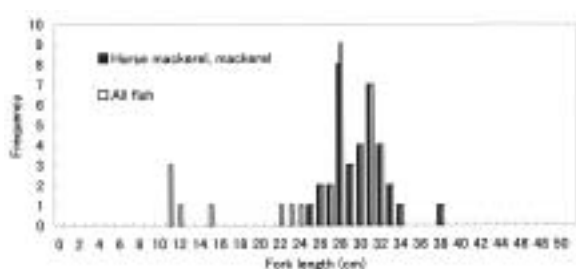


Fig. 72. Fork length distribution obtained by hook and line fishing from 30 June to 2 July.

同図はエコーレースの例を示している。図中では、エコーレベルの強さを3 dBステップで色別に表示し、そのスケールを画面上に表示している。エコーレベルが強いほど、赤く表示される。左の図の四角で囲んだ部分の拡大を右に表示している。

さらに、拡大図の左側にあるエコー (14.3m付近) についてその拡大図と単体エコー処理、エコートラッキング、エコーレーン解析を行った結果を Fig. 74 に示す。上左側がエコーの拡大図、上右側がエコートラッキングを行った結果である。これらのエコーレーンには番号が自動的に付けられている。下側の3つの図は解析結果を表しており、左から、ピング毎の送受波器から魚までの距離、遊泳ベクトルの3次元表示、傾角とTSの特性を示している。

Fig. 75は、テキストファイルで得られたデータを用いて、魚番号100の傾角とTSの関係を示した。図より、最大TSは -24.5dB であり、(2.32)式より推定した尾叉体長は 59.6cm となる。また、推定した遊泳速度は 0.49m/s であった。恐らく針の大きさの関係と思われるが、このような大きな魚は釣りでは得られなかった。ただし、ワカシが漁獲されていることから、

その成魚であるハマチなどの可能性が考えられる。

Fig. 73(a)に示す10mから海底直上17mまでのエコーのうち、5ピング以上続くトレースについて、エコーレーン解析を行った結果を Fig. 76に示す。

Fig. 76(a)より、推定した遊泳速度は最大でも 1.2m/s 程度となり、実際に漁獲した魚の一番大きな体長の4倍程度となり妥当な値である。また、(b)より、送受波器から魚までの距離により推定速度の分布に大きな変化が無いことがわかる。(c)より、平均速度が小さい場合にはトレース内の平均TSも小さくなることを示す。これは、TSが魚体長のほぼ2乗に比例することや魚体長が大きくなるほど遊泳能力が高くなることを考えると妥当な結果である。(d)より、推定した魚体長は5cm以下の魚、10cmクラス、30cm~40cm、60cmの魚に分けられる。5cm以下については不明であるが、音響データと共に収録したステレオカメラの結果から、クラゲ類と考えられる。10cmクラスはウルメイワシ、30cm~40cmはマアジ、および、ゴマサバを中心としたサバ類と考えられる。60cm付近の魚は漁獲されなかったために不明であるが、ハマチ等の大型魚の可能性もある。

結 言

- (1) 自然状態にある魚のTS解析のためのソフトウェア開発を行い、エコーレーン解析、標準化TS推定を行った。
- (2) 実際の調査データの解析を行い、 N_v 及び M の指標付きのTS推定を行うことが可能となった。
- (3) 個々のエコーについてエコーレーン解析を行うことにより、魚の遊泳速度、魚体長推定を行うことができることを示した。
- (4) 魚体長推定結果と漁獲により、個々のエコーにつ

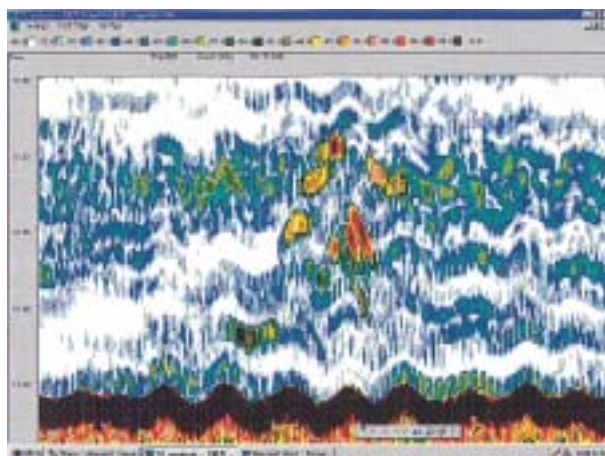
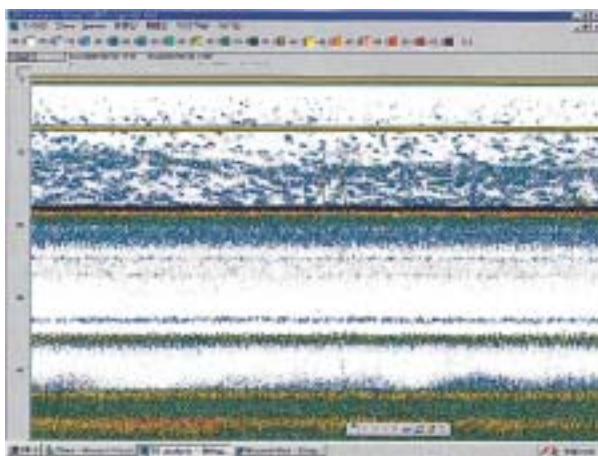


Fig. 73. (a) Echogram (17:44–17:59, June 30, 2000), (b) is a magnified echogram of the square region of (a).

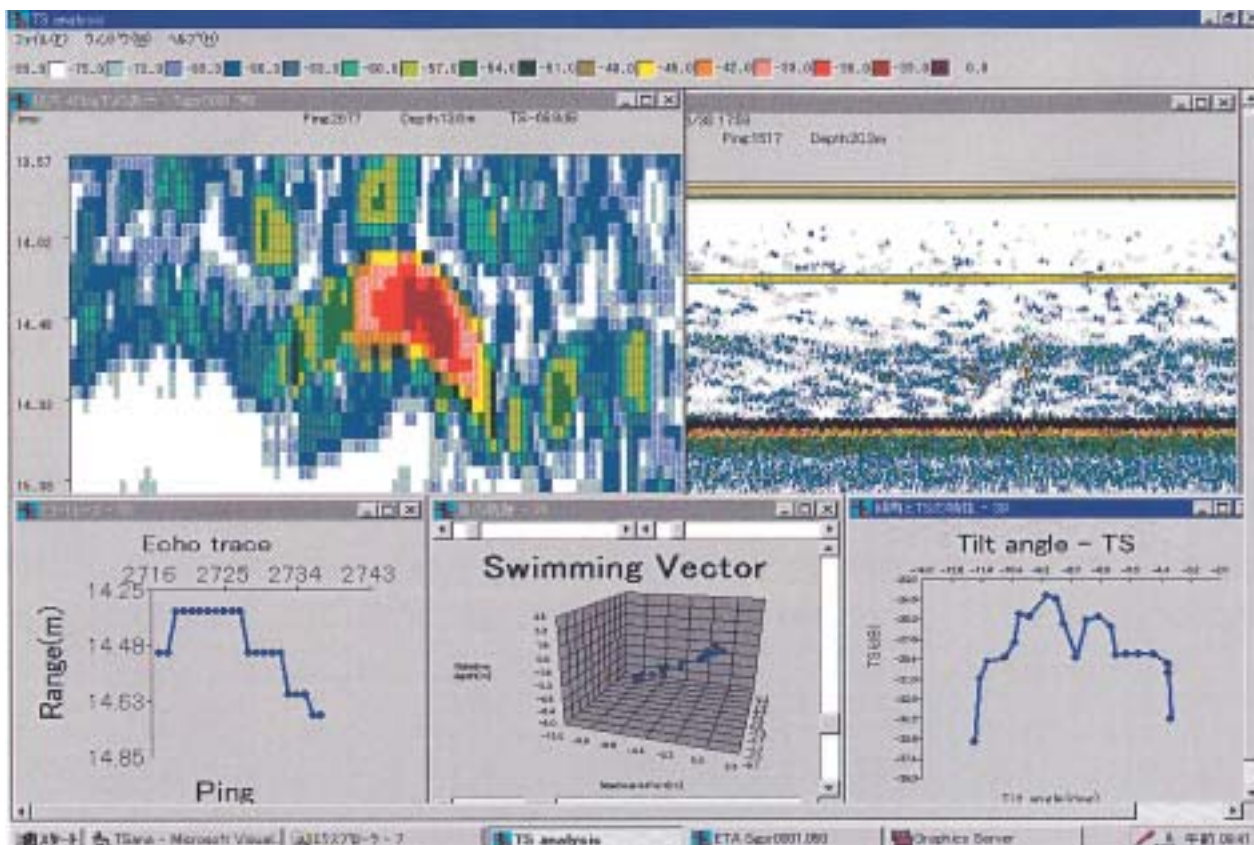


Fig. 74. Display example of the echo trace analysis.

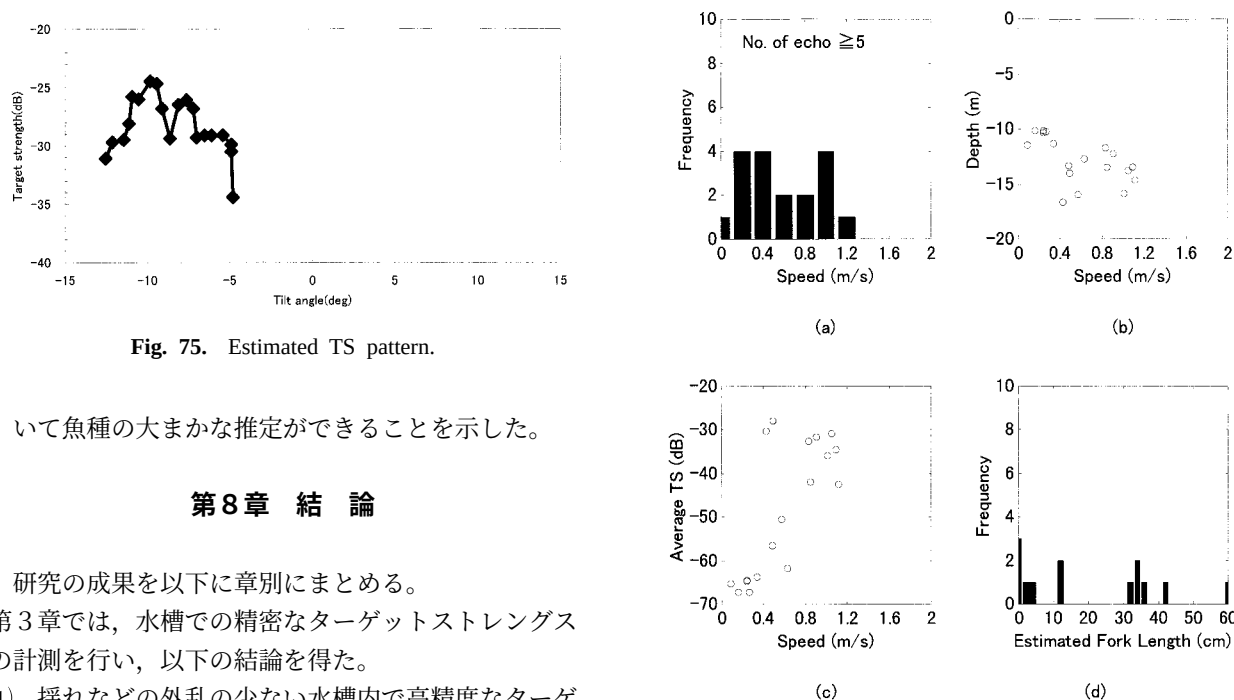


Fig. 75. Estimated TS pattern.

いて魚種の大まかな推定ができることを示した。

第8章 結 論

研究の成果を以下に章別にまとめる。

第3章では、水槽での精密なターゲットストレングスの計測を行い、以下の結論を得た。

- (1) 揺れなどの外乱の少ない水槽内で高精度なターゲットストレングス (TS) パターンの測定を行うための装置を開発した。
- (2) 水中では空気と同じ散乱特性を持つ発泡スチロール製の精密な回転楕円体模型を製作し、その TS パターンを測定した。この測定結果は、厳密解を与え

Fig. 76. Estimated swimming speed and fork length distribution in the range of 10m–17m and during 17:44–17:59, June 30, 2000: (a) estimated swimming speed, (b) estimated speed and depth, (c) estimated speed and averaged TS in echo trace, (d) estimated fork length.

る中空回転楕円体理論モデルと極めてよく一致した。これにより開発した装置の精度が高いことを確かめた。

- (3) この装置により、実際の音響調査で必要となる何種類かの有鰐魚の TS パターンを測定した。これらの TS パターンの測定結果から、波長で規準化した体長が7倍以上では、閉鰐魚の規準化平均 TS は -67.7dB 、規準化最大 TS は -62.1dB となった。
- (4) 開鰐魚については、生きた状態で測定を行ったアユの TS は 70kHz で -68.7dB 、ヨーロッパカタクチイワシは 38kHz で -70.5dB となった。開鰐魚は閉鰐魚に比べて測定値のばらつきが大きかった。これは、鰐が消化管につながっているため、水圧がかかった状態で鰐の形状が変化するためと考えられた。

第4章では、鰐形状モデルによるターゲットストレングス関数の推定を行い、以下のような結論を得た。

- (5) 変形円筒理論モデルを魚の散乱の計算にはじめて導入し、鰐の断面が比較的円に近い魚については、変形円筒理論モデルの有効性が明らかになり、鰐形状を測定するだけで理論により広帯域の TS パターンなど、各種の TS 特性の推定の可能性を示した。
- (6) X 線断層撮影による鰐形状の測定は、従来行われてきた方法に比べて、短時間のうちに自然状態に近い魚の形状の測定が可能である。この方法により対象としたい魚の鰐形状を測定し、理論計算により広い周波数と多くの姿勢分布について簡単に規準化 TS を求めることが可能であることを示した。

第5章では、自然状態でのターゲットストレングス推定法の高精度化を行い、以下のような結論を得た。

- (7) 自然状態における TS 測定においては群体エコーや雑音の影響で推定 TS に誤差が生じる。そこで、自然状態 TS 解析で精度良く測定を行うための残響体積内尾数 (N_v) 及び群体エコー率 (M) の2つの精度の指標を提案し、実験とシミュレーションでその有効性を確かめた。
- (8) シミュレーションによれば、同じ TS 分布の魚群でも、群体エコーが起こりやすい状況では、平均 TS が大きくなることを示した。
- (9) 精度良く TS 推定を行うためには、信号対雑音比が 20dB 以上、 N_v が 0.1 以下であることが必要であることを示した。

第6章では、エコートレース解析法の高度化を行い、以下のような結論を得た。

- (10) スプリットビーム法による単体エコーデータを解析する強力なエコートレース解析法を開発した。これによれば、平均 TS や平均体長の他に TS パターン、魚の遊泳速度、個々の魚の魚体長を得ることが

できる。さらに、この方法の精度を水槽実験及びコンピュータシミュレーションで検討した。実海域試験で得られたエコートレースから、体長分布、遊泳速度分布を得た。

- (11) エコートレース解析では、送受波器ベースの揺れにより誤差が生じると考えられるため、揺れの影響についてコンピュータシミュレーションによる検討を行った。エコートレースデータが揺れ周期より長い場合、遊泳速度推定に与える誤差は小さく、TS 自体の誤差も少ないため、最大 TS から計算される体長推定誤差は小さいが、魚の傾角推定にはバイアス誤差が生じることがわかった。
- 第7章では、音響手法による資源量、サイズ、行動等の高精度推定を行い、以下のような結論を得た。
- (12) 指標計算機能付き自然状態 TS 解析、スプリットビーム法データにエコートレース解析を行うことのできる TS 解析ソフトウェアを製作し、調査データにより検証を行い、実用性を確かめた。

以上の TS 推定方法の精度と処理の高度化により、TS 推定精度が高まり、音響水産資源調査による資源量推定の際の誤差が軽減する。

謝 辞

本論文で述べた研究は、1988年から2000年にわたって、水産庁水産工学研究所で行われました。

ここで、東京水産大学海洋生産学科 古澤昌彦教授に終始御指導御鞭撻を賜り本研究ができましたことを厚く御礼を申し上げます。

本研究の成果の多くは、古澤教授、水産工学研究所の宮野鼻洋一博士、石井 憲氏、高尾芳三氏、奥村都誉司氏との共同研究によるものであり、その御指導とご協力に深く感謝致します。

第3、4章におけるアユの TS 測定では、琵琶湖研究所の西野麻知子博士、三重大学の白木原国雄教授、吉田政彦氏に、琵琶湖のアユについての知見を頂くと共に、生きたアユの輸送から測定まで手伝っていただきました。ここに記して深く感謝致します。

TS 測定を行った太平洋ヘイクは、水産大学校の濱野 明教授の御厚意により頂くことができました。また、スケトウダラ稚魚は、北海道大学の飯田浩二教授、向井 徹助教授の御厚意により頂くことができました。ここに記して、深く感謝致します。ヨーロッパカタクチイワシの測定は、H. T. Kinacigil 助教授との共同研究の成果によるものです。ここに記して、深く感謝致します。

第4章は、カナダのナナイモの太平洋生物学研究所

の Kieser 博士, McFarlane 氏, カナダのビクトリアの海洋科学研究所(当時)の Zhen Ye 博士との共同研究の成果によるものです。ここに記して深く感謝致します。

1988年に始まった日米共同ベーリング海スケトウダラ音響調査は、2000年現在でも続いており、この調査からたくさんのことを学ばせていただきました。特に第5章の一部はアラスカ漁業科学センターの N. J. Williamson 氏との共同研究であり、また、同研究所の故 J. J. Traynor 博士より貴重なコメントをいただきました。ここに深く感謝致します。この調査における日本側の生物研究者である遠洋水産研究所(当時)の佐々木喬, 手島和之, 水戸啓一, 吉村拓, 西村 明, 柳本 卓の各氏には資源調査の日程を調整していただき、研究的なテーマを調査に持ち込むことに関する便宜を図っていただきました。また、柳本 卓氏には、第3章で測定した、クサカリツボダイ、スケトウダラのサンプルを頂きました。ここに深く感謝致します。

(株)カイジョーの大久保 輝(現協和商工(株)), 山谷恭三, 倉都健治, 佐藤貴徳, 根本喜久郎(現(株)リオン)の各氏, (株)日本無線の河口真一郎氏(当時)には、ハード的なサポートをしていただきました。ここに名前を記して感謝致します。また、第7章のスケトウダラ・オキアミ調査のデータを快く提供頂きました北海道水産研究所の本田聡氏に感謝致します。

水産庁調査船開洋丸, 照洋丸, 水産工学研究所調査船たか丸, 北転船翔洋丸の乗組員のみなさんには、調査に対して多くのご協力を頂き、深く感謝致します。

その他にも多くの方々の御協力を仰ぎました。心より感謝致します。

文 献

- Anderson V. C., 1950 : Sound scattering from a fluid sphere. *J. Acoust. Soc. Am.*, **22**, 426–431.
- Chu D., Foote K. G., and Stanton T. K., 1993 : Further analysis of target strength measurements of Antarctic krill at 38kHz and 120kHz : Comparison with deformed cylinder model and inference of orientation distribution. *J. Acoust. Soc. Am.* **93**, 2985–2988.
- 中央水産研究所, 1997 : 平成8年度我が国周辺漁業資源調査 特定水産資源評価技術開発調査報告書. 水産庁.
- Clay C. S. and Medwin H., 1977 : *Acoustical Oceanography*. Wiley & Sons, New York, pp.153–155.
- Clay C. S., 1983 : Deconvolution of the fish scattering PDF from the echo PDF for a single transducer. *J. Acoust. Soc. Am.*, **73**, 1989–1994.
- Clay C. S. and Horne J. K., 1994 : Acoustic models of fish : the Atlantic cod (*Gadus morhua*). *J. Acoust. Soc. Am.*, **96**, 1661–1668.
- Craig R. E. and Forbes S. T., 1969 : Design of a sonar for fish counting. *FiskDir, Ser. HavUnders.*, **15**, 210–219.
- Ehrenberg, J. E., 1974 : Two applications for a dual-beam transducer in hydro-acoustic fish assessment systems. Conference 21–23 August 1974, Halifax, Nova Scotia, Canada. *Proc. Conf. Engineering in the Ocean Environment*, 152–5, IEEE, New York.
- Ehrenberg J. E., 1979 : A comparative analysis of *in situ* method for directly measuring the acoustic target strength of individual fish. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **OE-4**, 141–152.
- Ehrenberg J. E., Carlson T. J., Traynor J. J. and Williamson N. J., 1981 : Indirect measurement of the mean acoustic backscattering cross section of fish. *J. Acoust. Soc. Am.*, **69**, 955–962.
- Foote K. G., 1980a : Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish : A comparison of gadoid and mackerel target strengths. *J. Acoust. Soc. Am.*, **67**, 2084–2089.
- Foote K. G., 1980b : Averaging of fish target strength functions. *J. Acoust. Soc. Am.* **67**, 504–515.
- Foote K. G., 1982 : Optimizing copper spheres for precision calibration of hydroacoustic equipment. *J. Acoust. Soc. Am.*, **71**, 742–747.
- Foote, K. G., 1983a : Linearity of fisheries acoustics, with addition theorems. *J. Acoust. Soc. Am.*, **73**, 1932–1940.
- Foote K. G., 1983b : Maintaining precision calibrations with optimal copper spheres. *J. Acoust. Soc. Am.*, **73**, 1054–1063.
- Foote K. G. and MacLennan D. N., 1984 : Comparison of copper and tungsten carbide spheres. *J. Acoust. Soc. Am.*, **75**, 612–616.
- Foote K. G., 1985 : Rather high frequency sound scattering by swimbladdered fish. *J. Acoust. Soc. Am.*, **78**, 688–700.
- Foote K. G. and Ona E., 1985 : Swimbladder cross sections and acoustic target strength of 13 pollock and 2 saithe, *Fiskeridir. Skr. Ser. Havunders.*, **18**, 1–57.
- Foote, K. G., 1987 : Fish target strength for use in echo integrator surveys. *J. Acoust. Soc. Am.* **82**, 981–987.
- Foote, K. G. and Traynor J. J., 1987 : Comparison of wall-eye pollock target strength estimates determined from *in situ* measurements and calculation based on swimbladder form. *J. Acoust. Soc. Am.*, **83**, 981–987.
- Foote K. G., Knudsen H. P., Vestnes G., MacLennan D. N., and Simmonds E. J., 1987 : Calibration of acoustic instruments for fish density estimation : a practical guide. *Int. Coun. Explor. Sea Coop. Res. Rep.*, no. **144**, 1–69.
- Foote K. G., 1990 : Spheres for calibrating an 11-frequency acoustic measurement system. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer*, **46**, 284–286.

- Francois R. E. and Garrison R. G., 1982 : sound absorption based on ocean measurements. Part II : Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Am.*, **72**, 1879–1890.
- 古澤昌彦, 1985 : 魚群探知機の TVG についての検討. 水工研技報 (漁船工学), **6**, 33–49.
- 古澤昌彦, 1986 : 単体魚のエコートレース解析. 日本音響学会講論集, 867–868.
- 古澤昌彦, 石井 憲, 間庭愛信, 1986 : 超音波エコー法による魚の分布密度推定方法の理論的検討. 日本音響学会誌, **42**(1), 2–8.
- Furusawa M., 1988 : Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength. *J. acoust. Soc. Jpn.* (E9), 13–24.
- Furusawa M. and Miyanoana Y., 1988 : Application of echo-trace analysis to estimation of behaviour and target strength of fish. *J. Acoust. Soc. Jpn.* (E9), 169–180.
- 古澤昌彦, 1989 : 気泡と音波 (IX) —鰾と魚による超音波散乱—. 海洋音響学会誌, 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. 水工研研究報告, **11**, 173–249.
- Furusawa M. and Miyanoana Y., 1990 : Behaviour and target strength observation through echo trace of individual fish. *Rapp. P. —v. Reun. cons. int. Explor. Mer.*, **189**, 283–294.
- Furusawa, M. and Sawada K., 1991 : Effect of transducer motion error on quantifying single fish echoes, *Nippon Suisan Gakkaishi*, **57**, 857–864.
- 古澤昌彦, 1992 : 「音響」調査船開洋丸. しおさい (水産庁 水産工学研究所広報), **8**, 26–38.
- Furusawa M., Takao Y., Sawada K., Okubo K., Yamatani K., 1993 : Versatile echo sounding system using dual beam. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **59**, 967–980.
- 古澤昌彦, 宮野鼻洋一, 澤田浩一, 高尾芳三, 1995 : 計量魚群探知機の較正方法. 水産工学研究所技報 (漁船工学), **15**, 9–37.
- Goldsberry, T. G., Grace O. D., 1967 : Acoustic scattering by a soft cylinder. 74th meet. Acoust. Soc. Am., **42**, 1172.
- Hamano A., Sasakura T., O. D. Kieser R., Cooke K., Kubota K., and Clay A., 1996 : Target strength measurements of Pacific hake (*Merluccius productus*) in Canadian waters using quasi-deal and conventional beam transducers. *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 273–280.
- Haralabous J. and Georgakarakos S., 1996 : Artificial neural networks as a tool for species identification of fish schools. *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 173–180.
- Hashimoto T., 1953 : Characteristics of ultrasonic waves transmitted vertically in the water. *Rep. fish. Boat Lab.*, **1**, 1–104.
- Holliday D. V., Pieper R. E. and Kleppel G. S., 1989 : Determination of zooplankton size and distribution with multifrequency acoustic technology. *J. Cons. int. Explor. Mer.* **46**, 52–61.
- Hsieh E. H., 1986 : A split-beam target strength processor, Master degree thesis, Washington Univ., Seattle, 65pp.
- Iida K., Mukai T., and Hwang D., 1998 : Acoustic backscattering characteristic of swimbladder juvenile fish derived from cage experiments. *Fish. Sci.*, **64**, 929–934.
- 石井 憲, 古澤昌彦, 宮野鼻洋一, 1985 : 魚体ターゲットストレングス測定のための魚体懸垂回転機構. 水工研技報 (漁船工学) **6**, 51–70.
- Johanneson K. A. and Mitson R. B., 1983 : Fisheries acoustics. A practical manual for aquatic biomass estimation, *FAO Fish. Tech. Pap.*, **240**, 1–249.
- Johnson R. K., 1977 : Sound scattering from a fluid sphere revisited. *J. Acoust. Soc. Am.*, **61**, 375–377 and erratum *ibid* **63**, 626(E).
- Johnson R. K., 1978 : Erratum : “Sound scattering from a fluid sphere revisited” [*J. Acoust. Soc. Am.*, **61**, 375–377 (1977)]. *J. Acoust. Soc. Am.*, **63**, 626.
- 木村和衛, 古賀佑彦 監修, 1993 : ヘリカルスキャンの基礎と臨床 連続回転型 CT の応用, 第 1 版, 医療科学社, pp2–13.
- Love R. H., 1971 : Dorsal-aspect target strength of an individual fish. *J. Acoust. Soc. Am.*, **49**, 816–823.
- Love, R. H., 1978 : Resonant acoustic scattering by swimbladder-bearing fish. *J. Acoust. Soc. Am.*, **64**, 571–580.
- Lovik, A. and Hovem J. M., 1979 : An experimental investigation of swimbladder resonance in fishes. **66**, 850–854.
- McClatchie S., Alsop J., Ye Z., and Coombs R. F., 1996 : Consequence of swimbladder model choice and fish orientation to target strength of three New Zealand fish species. *ICES J. Mar. Sci.* **53**, 847–862.
- Medwin, H., 1975 : Speed of sound in water : A simple equation for realistic parameters. *J. Acoust. Soc. Am.* **58**, 1318–1319.
- Medwin H. and Clay, C. S., 1998 : Fundamentals of acoustical oceanography, academic press, San Diego, 712pp.
- Mitson R. B., 1995 : Underwater noise of research vessels : review and recommendations. *Int. Coun. Explor. Sea Coop. Res. Rep.*, no. **209**, 1–61.
- Midttun L., 1984 : Fish and other organisms as acoustic targets. *Rapp. P. —v. Reun. Cons. int. Explor. Mer.*, **184**, 25–33.
- 宮野鼻洋一, 石井憲, 古澤昌彦, 1984 : 魚体の背方向ターゲットストレングスの測定と解析. 海洋音響研究会誌, **13**, 169–175.
- 宮野鼻洋一, 石井 憲, 古澤昌彦, 1986 : 魚体のターゲットストレングスの平均方法の検討. 水産工学研究所研究報告, **7**, 87–96.
- 宮野鼻洋一, 石井 憲, 古澤昌彦, 1990 : 日本産 8 魚種の 4 周波における背方向ターゲットストレングス関数. 水産工学研究所技報, **12**, 65–154.
- Miyanoana Y., Ishii K., and Furusawa M., 1990 : Measurements and analyses of dorsal-aspect target strength of six species of fish at four frequencies. *Rapp. P. —v.*

- Reun. cons. int. Explor. Mer., **189**, 317–324.
- 宮野鼻洋一, 澤田浩一, 高尾芳三, 古澤昌彦, 1993: デュアルビーム法によって自然遊泳魚から得られたエコートレースの解析. 日水誌, **59**, 943–950.
- 宮野鼻洋一, 1994: 魚のターゲットストレングスの特性に関する研究, 水産工学研究所研究報告. **15**, 83–144.
- Mukai T. and Iida K., 1996: Depth dependence of target strength of live kokanee salmon in accordance with Boyle's law. *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 245–248.
- Nainggolan C., E. Hamada, and K. Saito, 1993: A new method for fish abundance estimation using split-beam echo sounder. *J. Tokyo Univ. Fish.*, **80**, 83–92.
- Nakken O. and Olsen K., 1977: Target strength measurements of fish. *Rapp. P. -v. Reun. Cons. int. Explor. Mer.*, **170**, 52–69.
- 大串雅信, 1981: 理論船舶工学 (船舶工学理論), 下巻, 第版, 海文堂, 東京, p45.
- Olsen, K., 1971: Orientation measurements of cod in Lofoten obtained from underwater photographs and their relation to target strength, *Coun. Meet. Int. Coun. Explor. Sea* 1971/B: 17, Copenhagen, Denmark.
- Ona E., 1990: Physiological factors causing natural variations in acoustic target strength of fish. *J. Mar. Biol. Ass.*, **70**, 107–127.
- Oshimo S. and Hamatsu T., 1996: Vertical distribution and acoustic estimation of biomass of walleye pollock *Theragra chalcogramma*, and anchovy *Engraulis japonicus* in the Pacific coast of eastern Hokkaido. *Bull. Hokkaido Natl. Fish. Res. Inst.*, **60**, 225–237.
- Oshimo S., 1996: Acoustic estimation and school character of anchovy *Engraulis japonicus* in the east China sea and the yellow sea. *Fish. Sci.*, **62**, 344–349.
- Ohshimo S., Mitani T., and Honda S., 1998: Acoustic surveys of spawning Japanese sardine, *Sardinops melanostictus*, in the waters off western and southern Kyushu, Japan. *Fish. Sci.*, **64**, 665–672.
- Reynisson P., 1993: *In situ* target strength measurements of Icelandic summer spawning herring, 1985–1992. *ICES CM* 1993/B: 40, 15pp.
- 実吉純一, 菊池喜充, 熊本乙彦, 1968: 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, 東京, 1425.
- 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. 東京水産大学学位論文, 東京水産大学, 東京, 106pp.
- Sawada K., Furusawa M., 1993: Precision calibration of echo sounder by integration of standard sphere echoes. *J. Acoust. Soc. Jpn.*, **14**, 243–249.
- Sawada K., Furusawa M., and Williamson N. J., 1993: Conditions for the precise measurement of fish target strength *in situ*. *Mar. Acoust. Soc. Jpn.*, **20**, 15–21.
- 澤田浩一, 高尾芳三, 古澤昌彦, 宮野鼻洋一, 水戸啓一, 保正竜哉, 1993: 1991年夏期のベーリング海スケトウダラの音響資源調査報告. 1992年, 1993年北洋底魚資源調査研究報告集, 遠洋水産研究所, 87–112.
- 澤田浩一, 長谷川勝男, 宮野鼻洋一, 古澤昌彦, 倉都健治, 1995: 信学技報 **US95-28**, 1–7.
- 澤田浩一, 宮野鼻洋一, 高尾芳三, 西村 明, 保正竜哉, 1995: 1994年夏期のベーリング海スケトウダラの音響資源調査報告. 1995年北洋底魚資源調査研究報告集, 遠洋水産研究所, 清水, 42–65.
- 澤田浩一, 高尾芳三, 宮野鼻洋一, 古澤昌彦, 1996: 水中音響機器校正のための標準球位置制御装置. 水産工学研究所技報, 18, 221–232.
- 澤田浩一, 高尾芳三, 宮野鼻洋一, 古澤昌彦, 水戸啓一, 保正竜哉, 1997: 1993年冬季のベーリング海スケトウダラの音響資源調査報告 (船間校正結果), 1997年北洋底魚資源調査研究報告集, 遠洋水産研究所, 清水, 21–46.
- Sawada K., Ye Z., Kieser R., McFarlane G. A., Miyanoana Y., Furusawa M., 1999: Target strength measurements and modeling of walleye pollock and Pacific hake. *Fish. Sci.*, **65**, 193–205.
- Shibata K., 1970: Study on details of ultrasonic reflection from individual fish. *Bull. Fac. Fish. Nagasaki Univ.*, **29**, 1–82.
- Shirakihara, K., Yoshida M., Nishino M., Takao Y., and Sawada K., 2001: Acoustic evaluation of the vertical distribution of dwarf ayu *Plecoglossus altivelis* in Lake Biwa. *Fish. Sci.*, **67**, 430–435.
- Simmonds E. J., Armstrong F., and Copland P. J., 1996: Species identification using wideband backscatter with neural network and discriminant analysis. *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 189–195.
- Stanton T. K., 1988a: Sound scattering by cylinders of finite length. I. Fluid cylinders. *J. Acoust. Soc. Am.*, **83**, 55–63.
- Stanton T. K., 1988b: Sound scattering by cylinders of finite length. II. Elastic cylinders. *J. Acoust. Soc. Am.*, **83**, 64–67.
- Stanton T. K., 1989: Sound scattering by cylinders of finite length. III. Deformed cylinders. *J. Acoust. Soc. Am.*, **86**, 691–705.
- 水産庁, 1999: 図説 漁業白書 (平成10年度版). 農林統計協会, 東京, pp.1–284.
- 高橋信次, 佐久間貞行 編著, 1990: 3訂新版 図解コンピュータ断層法 基礎原理から診断図譜まで, 3訂新版, 秀潤社, 東京, pp.12–47.
- Takao Y, Furusawa M., Williamson N. J., Sawada K., Miyanoana Y., Yoshimura T., Sasaki T., and Hoshou T., 1991: Report of acoustic survey on pelagic pollock stocks in the Alutian Basin conducted in summer of 1988 (revised), Reports on the research and stock assessments of ground fish in the north pacific in 1991. *Nat. Res. Inst. far seas Fish.*, Shimizu, 25–62.
- 高尾芳三, 澤田浩一, 古澤昌彦, 宮野鼻洋一, 西村 明, 保正竜哉, 1994: 1990年夏期のベーリング海における音響資源調査によるスケトウダラ現存量の推定. 1994年北洋底魚資源調査研究報告集, 遠洋水産研究所, 清

- 水, 27—48.
- Takao, Y. and Furusawa M., 1995 : Noise measurement by echo integrator. *Fish. Sci.*, **61**, 637—640.
- Takao Y. and Furusawa M., 1996 : Dual-beam echo integration method for precise acoustic surveys. *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 351—358.
- Takeshita K., Ogawa N., Mitani T., Hamada R., Inai E., and Kubota K., 1988 : Acoustic survey of spawning sardine, *Sardinops melanosticta* in the coastal waters of west Kyushu. *Seikai Reg. Fish. Res. Lab.*, **66**, 101—117.
- 矢島美寛, 廣津千尋, 藤野和健, 竹村彰通, 竹内 啓, 縄田和満, 松原 望, 伏見正則, 1993 : 自然科学の統計学, 第2版, 東京大学出版会, p321—322.
- Traynor, J. J., and Williamson N. J., 1983 : Target strength measurements of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) and a simulation study of the dual beam method. *FAO Fish. Rep.* No.300, 112—124.
- Traynor, J. J., 1996 : Target strength measurements of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) and Pacific Whiting (*merlucius productus*). *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 253—258.
- Williamson N. J. and Traynor J. J., 1984 : *In situ* target strength estimation of Pacific Whiting, *Merluccius productus*, using a dual beam transducer. *J. Cons. Int. Explor. Mer.* **41**, 253—292.
- 柳本 卓, 1996 : 中部北太平洋海山海域における日本トロール漁業の概要, 1996年北洋底魚資源調査研究報告集, 1—22.
- 柳本 卓, 1997 : 1997年3月開洋丸によるクサカリツボダイのバイオテレメトリー調査結果, 北洋資源調査研究報告集, 244—259.
- Ye Z. and Furusawa M., 1995 : Modeling of target strength of swimbladder fish at high frequencies. *J. Acoust. Soc. Jpn.* **16**, 371—379.
- Ye Z., E. Hoskinson, Dewey R. K., Ding L., and Farmer D.M., 1997 : A method for acoustic scattering by slender bodies I. Theory and verification. *J. Acoust. Soc. Am.*, **102**, 1964—1976.
- 材料マニュアル作成ワーキンググループ, 1992 : 発泡スチロール土工法技術資料 (材料マニュアル), 発泡スチロール土工法開発機構.