

イルカのソナー能力の魚群探知機への適用に関する研究

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): Sonar of dolphin; broadband sonar signal; target strength of fish; target strength spectrum 作成者: 今泉, 智人 メールアドレス: 所属:
URL	https://fra.repo.nii.ac.jp/records/2010886

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



イルカのソナー能力の魚群探知機への適用に関する研究^{*1}

今泉 智人^{*2}

Application of dolphin's sonar abilities to echo sounders

Tomohito IMAIZUMI

Abstract : Conservation and management are necessary for sustainable use of fisheries resources. For this purpose, acoustic surveys of fisheries resources using scientific echo sounders are conducted worldwide. Although these surveys are powerful methods of estimating fish stock biomass directly over wide areas, the acoustic survey method has several drawbacks. One is the lack of a definitive method for classifying fish species using echo data and another is that *in situ* target strength (TS) measurement methods can only be applied to resolvable fish at short range or in sparse fish schools. In contrast, dolphins detect, pursue, and prey on fish using their excellent sonar capability known as "echolocation." Dolphins can recognize not only the target size, but also its material and shape. As fish are the main target of dolphins, this sonar capability is applicable to the improvement of artificial sounders used in acoustic surveys and selective fishing.

The present study was performed to investigate the application of a dolphin's sonar abilities to echo sounders. In addition, this study focused on the characteristics of broadband frequency and short duration of dolphin sonar sound and measurement of target strength (TS) spectra of fish using this type of sonar. The broadband frequency characteristics of the TS spectra of fish are believed to be key factors in target discrimination and behavior observation.

First, a system for measuring TS spectra was developed and the accuracy of the TS spectra thus obtained was confirmed using a spectral ratio method based on the ratio of the amplitude spectrum of the reflected and incident waves. The TS spectra of metal spheres could be calculated accurately using a theoretical model, and their backscattering was unidirectional. The frequency characteristics of the scattering of metal spheres agreed closely with the theoretical calculations in a water tank. Therefore, the system and spectrum ratio method are capable of measuring TS spectra accurately.

Second, the TS spectra of anesthetized fish from three species, horse mackerel (*Trachurus japonicus*), sea bream (*Pagrus major*), and chub mackerel (*Scomber japonicus*), were measured in a water tank. The variation in TS spectra with respect to the tilt angle of the fish was also measured for one sea bream. The TS spectra of fish varied considerably among species, individuals, and tilt angles.

Third, the TS spectra of tethered live fish were measured at sea. As we could not confirm the relationship of the position between the transducers and the fish in the sea experiment and because measurements are affected by the directivity functions of transducers, measuring the TS spectra accurately was difficult.

2008年12月22日受理 (Received on December 22, 2008)

^{*1} 東京海洋大学審査学位論文 (掲載に際し投稿規定に沿って一部修正した)

^{*2} 水産工学研究所 〒314-0408 茨城県神栖市波崎7620-7 (National Research Institute of Fisheries Engineering, 7620-7, Hasaki, Kamisu, Ibaraki 314-0408, Japan)

To compensate for the directivity, the fish were suspended with two metal spheres, and directivity was compensated using echoes from the metal spheres. The variations in the TS spectra of the tethered swimming fish (chicken grunt, *Parapristipoma trilineatum*) were observed continuously. The TS spectra of fish with tilt angle changes are considered useful for species discrimination.

Furthermore, because of the very short pulse of the dolphin-like sonar, we could obtain well separated single echoes that would otherwise be multiple echoes for ordinary echo sounders. The sea experiments suffered from directivity problems. We attempted to develop a broadband split-beam (BSB) system to compensate for the directivities of transducers. The split-beam (SB) method can measure the position and direction of the target from the transducer using the time differences calculated from the echoes. These echoes are received by the quadrant arrays of the receiving transducer. The SB method using the broadband signal was first applied. The time difference detection methods were simulated, and we decided to use the cross-correlation method. Second, we confirmed that the measured directivity functions at four sample frequencies agreed with the theoretical directivity function calculated from the positions of the array elements. Third, to confirm the utility of the BSB system, we measured the frequency characteristics of metal spheres at sea. By applying a directivity correction to the measurements, good agreement was obtained between theory and measurement. Finally, we measured consecutive *in situ* TS spectra of fish at sea using the BSB system with high range resolution.

Next, to determine the advantages of the dolphin sonar signals, we examined the sonar signals of dolphins and artificial tone burst waves of the same duration as dolphin-like sonar signals. In the experiment performed at sea, echoes from metal spheres measured using different signals (*i.e.*, the dolphin-like sonar signals and short tone burst waves) were cross-correlated with each incident waveform as a reference or replica.

The signal-to-noise ratios (SNRs) were then compared with those of the original data. The SNRs improved by more than 10 dB for all sonar signals. The SNRs were compared after cross-correlation, and the results indicated that the dolphin-like sonar signals improved the SNR by 9 dB (at maximum) over the tone burst wave. Although broadband signals are susceptible to noise, the dolphin sonar signals have greater potential than the other types.

The findings of the present study will contribute to the development of a system and method of accurately measuring broadband TS spectra of targets with high range resolution. The variations in *in situ* fish TS spectra originating from movement and changes in tilt angle of the target may represent information that will allow species discrimination as well as estimation of size and behavior. We can measure accurate TS spectra of the target using dolphin-like sonar signals with short duration and broadband frequency characteristics. This will help resolve the problems associated with acoustic surveys and contribute to the management of fisheries resources.

Keywords : Sonar of dolphin, broadband sonar signal, target strength of fish, target strength spectrum

第1章 緒 論

1.1 研究の背景

2007年4月に日本国の海洋政策を一元的に進めるための海洋基本法が成立し、同年7月から施行された。本法律は海底資源などの海洋権益をめぐる、日本が周辺諸国との交渉で後手に回っているという現状を踏まえ、内閣総理大臣主導で海洋政策を戦略的に進めるという意図を具現化した。4面を海で囲まれた我が国は、エネルギーの85%を輸入に依存し（経済産業省、2007a）、5,982億ドルの製品を輸出しており（経済産業省、2007b）、世界第2位の経済大国である。また、576万トンの漁獲量を誇る世界第5位の漁業大国（1位中国、2位バレー、3位インドネシア、4位インド）でもある（農林水産省、2007）。つまり、その生存を海洋に依存した海洋国家であり、他国の領海や経済水域を通過しなければ何も輸出入できない。また、我が国は多数の離島を持つために、比較的広い面積の領海および経済水域を有しており、そこにおける沖合漁業の漁業資源の保護や海底・大陸棚の鉱物資源開発について、国際法上の主権的権利を有している。以上を踏まえると、継続的な食料、資源確保を行うためにも、海洋政策の確立と安定化は、早急に求められる国策であるといえる。

海の憲法と称される国連海洋法によれば、自国周辺200海里内の海洋資源に対して採掘、処理の優先権利が認められる。しかし、一方で自国の経済水域における資源の管理および保全の義務がある。生物資源については、漁獲可能量（Total Allowable Catch）を決定し、適当な保全措置および、管理措置を通じて資源の維持を行い確保する必要がある。そのために、国は農林水産省を主体として、生物学的漁獲可能量推定のための資源量調査を行っており、得られた複数の独立した情報をあわせて、資源量推定を行ってきた。

水産資源量推定法は大きく分けて、トロール調査や音響調査などの直接法と漁獲量調査などの間接法に分けられる。直接法のメリットは、直接に調査を行うことで、迅速に正確な資源量を推定できる。しかし、調査を行わなければ推定ができない、過去の推定はできないなどのデメリットも存在する。一方で、間接法では、漁業者の漁獲などの情報から推定でき、大掛かりな調査を行わなくても広範囲のデータを得られ、過去の推定もできるメリットがある。しかし、その推定結果には、統計誤差や偏りが入り易いのが事実である。

直接法の1つである音響を用いた水産資源量調査では、

- (1) 鉛直方向の分布情報が瞬時に得られる

- (2) ネットサンプリングなどのような調査点調査に比べて、連続した調査線調査が行える

- (3) 一定期間以上の調査期間があれば、広範囲の海域を迅速に調査でき、限られた調査範囲であれば数時間で繰り返し調査可能

等の、他の調査方法よりも有利な点がある（Simmonds *et al.*, 1992）。音響手法以外で分布や量を推定する直接手法としては、トロールネットなどの使用が考えられる。しかし、音響手法に比べて、

- (1) 鉛直方向を瞬時にサンプリングすることは難しく、1回の作業に労力を要し、調査中に実施できる回数が制限される
- (2) ネットに対する逃避行動や目合い選択性が生じる

等の原因から、見積もられた値には誤差が生じ、実際の分布や量を正確に推定することがむずかしい。しかし、音響調査手法もすべてを音響だけに頼って調査できるまでには到っておらず、種、体長、成熟段階、年齢などの把握は、トロールなどによる生物サンプリングが基本であり、トロールなどの漁獲調査は音響手法による量推定にも必要不可欠である。

現在 TAC 対象魚種だけでなく、多くの音響資源量調査が行われている（村瀬、木和田、2002; Ohshimo, 2004）。音響を用いた調査においても、

- (1) 音響を用いた魚種識別は実用化には至っておらず、音響手法のみを用いて魚種ごとの資源量を得てはいない
- (2) 自然状態の魚の反射強度などの基礎情報の計測において、疎な分布や、海底から十分に離れている魚にしか適用できないなど測定条件がかなり制限され、十分実用になっているとはいえない

等の問題点が存在する。これらの音響調査手法の問題を解決し、さらに信頼に足る手法に鍛え上げる必要がある。それにより、水産資源の持続的利用のための資源の管理・確保に資することが、日本の国策の急務の1つである。

一方で、海洋の生態系の最上位と考えられるハクジラの一部のイルカは、エコーロケーション（反響定位）と呼ばれる自身のソーナー能力を用いて、餌を探知、識別し、捕食までを行っている。彼らの聴覚、鳴音については、鳥やコウモリなどの陸上動物ほどではないが、研究が進んでおり、特にその生物ソーナー能力であるエコーロケーションに関しては、比較的精密な実験が行われている。イルカのエコーロケーションに用いられる音波は、数十～数百 μ s の時間的に非常に短い音波であり、その1つ1つは断続的であるため、クリックス（clicks）と呼ばれる。また、そのソーナー

音のスペクトルは、広帯域の周波数特性を有している。

現存するイルカ類は、今から170万年前には、現在のような形態になっていたという。長い年月の間に進化を繰り返し、様々な面で水中生活に適応していった。身体的な変化もさることながら、光の届かない海中で捕食し、障害物を避けるためソナー能力の技術も獲得していった(大村, 1974)。つまり、彼らのエコーロケーション能力は、雑音の多い海中で対象からの反射波(エコー)に含まれる情報を抽出するために、信号の送波方法の制御や、信号処理に重みをおいて進化してきたと考えられる。Auらによればハンドウイルカ(*Tursiops truncatus*)は、物体から反射してきたエコーを聞き分け、物体の大きさ、厚さ、材質、形状などの違いを認識できると報告している(Au, 1993)。対象識別が可能な高いソナー能力が評価され、現在では訓練されたイルカが、機雷の処理や海軍の水中作業の補助業務などを行っている(Fig. 1-1)(Space and Naval Warfare Systems Center, 1998)。また、大型のハクジラの種類であるマッコウクジラ(*Physeter macrocephalus*)もエコーロケーションを行っており(Móhl *et al.*, 2003)、光の届かない深海で大型の頭足類を探知して捕食している。頭足類は、鯨などの顕著な音響散乱体を持たないため、音波反射の割合が小さい。マッコウクジラは、それらを探知するため、比較的低周波(中心周波数10 kHz)で、非常に大きな音



Fig. 1-1. A bottlenose dolphin leaps out of the water while training. It is wearing an acoustic tracking device (ping) on its fin.

圧(236 dB re 1μ Pa (rms))を放出していることが報告されている。このようなソナー音を用いて、イルカは対象(魚)からの反射波を脳内で処理して、対象識別などの高度な処理を行い、最終的に捕食を行っていると考えられる。

イルカのソナーと、魚群探知機などのような人工のソナー装置を比較すると、多くの共通点が認められる。例えば、イルカのクリックスは、使用周波数が30~200kHzと、魚群探知機と酷似していること、送波音および受信特性に指向性を持たせていること、周波数弁別能力を持ち、受波信号の信号対雑音比を向上させていることなどが挙げられる。一方で、イルカは非常に短いパルス幅で、広帯域の周波数特性を有した信号を用いていること、音源音圧やパルス間隔を状況に応じて調節していることなど(Au and Benoit-Bird, 2003a; Akamatsu *et al.*, 1998)、人工のソナーと異なることも明らかにされている。

1.2 研究の目的

上述したイルカのソナー音とその能力の優れた点を、人工のソナーに適用することが出来れば、上記したような音響水産資源調査の問題点を緩和もしくは解決でき、音響調査技術の大幅なレベルアップに繋がると考えられる。イルカのように使用する音響パルスが時間的に短ければ、高い距離分解能が実現でき、密な群れを単体魚の集まりに分解することができ、自然状態の魚の反射強度などの基礎情報測定における限界の緩和に繋がる。また、広帯域の信号を用いることで、スペクトル情報が得られ、対象識別のための基礎情報の増加に繋がる。さらに、イルカのソナー音の特徴的な性質は、雑音に対する耐性が大きく、信号対雑音比を上げるのに役立つかもしれない。

そこで、本研究では、短パルス・広帯域のイルカのソナー音を実際に送受することによって、イルカのソナー音の優れた点を定性的かつ定量的に明確にすることを目的とする。特に、イルカが対象からのエコーの特性(送受信系+反射体の特性)でなく、対象の散乱特性(反射体のみの特性)を観測していると仮説を立て、対象の音響散乱特性の抽出に主眼を置く。具体的には、イルカのソナー音の利点の応用の第一ステップとして、広帯域という特徴に注目し、魚1尾の総合的な反射特性、すなわち反射強度の周波数特性(TSスペクトル)を計測する方法を開発する。すなわち、イルカのソナー音を人工的に送受波し、対象のみに依存する広帯域の反射特性を測定する。

著者らは探傷用の広帯域送受波器を用いる簡易システムによって、イルカ型のソナー音を人工的に送

受波し、金属球と麻酔をかけたキングヨ (*Carassius auratus*) の散乱振幅の周波数特性を測定することに成功した (今泉ら, 2006)。本研究は、この研究の発展として、本格的な広帯域送受波器を用い、より高い信号対雑音比 (以下 SN 比) で多くの魚につき TS スペクトルを求め、実海域でも自然状態の魚の TS スペクトルを計測できるようにし、イルカのソーナー音のメリットについて議論する。

以下に具体的な目的を示す。

- (1) 広帯域送受信システムを利用し、イルカのような広帯域のソーナー音を送受波し、対象の広帯域での反射特性を精確に測定する
- (2) 麻酔をかけた魚の広帯域の TS スペクトルを測定し、魚種識別のための情報量増加を試みる
- (3) 実際の海において、自然状態の魚の群れからのエコーを測定し、高い距離分解能を確認する
- (4) 懸垂した生きた魚 (準自然状態) の TS スペクトルを測定する
- (5) 自然状態の魚の TS スペクトルを測定できるようにするために、送受波器の指向性補正が可能な広帯域スプリットビーム法を確立する。そのために、広帯域エコーの時間差検出、指向性関数補正のための方法を提案する
- (6) イルカのソーナー能力の人工ソーナーへの応用方法を考察する

1.3 研究の概要

Fig. 1-2に本論文の構成を示した。

第1章は緒論であり、海洋の国際情勢を踏まえた現状と音響資源調査の技術向上の必要性を述べた。また、人工ソーナーと似て非なるイルカのソーナー音とその能力を紹介し、人工ソーナーの技術向上のための可能性を提案し、本研究を始めた背景と目的について述べた。

第2章では、後章で必要となる水産音響における基礎理論、音響水産資源調査の問題点、イルカのソーナーとその能力について述べる。

第3章では、イルカのような広帯域のソーナー音を用いて、対象の反射特性の精確な測定が可能かどうかを確認するために、散乱特性を理論計算により求めやすい金属球の散乱強度 (形状関数) を測定した。そのためには、入射波と反射波の比を用いるスペクトル比法を用いるが、その有用性をまずシミュレーションにより確認した。また、実際に材質の異なる2種類の大きさの金属球の形状関数を、イルカのソーナー音を用いてスペクトル比法で測定し、対象の反射特性を正確に測定可能であることを確認し、後章で使用する方法

を検証した。

第4章では、イルカのソーナー音を用いて、麻酔をかけた魚の TS スペクトルを測定した。魚の TS スペクトルは、魚種、個体差、姿勢により大きく異なるが、既往の結果と比較し、その傾向が同じであることを確認した。また、実際の海で自然状態の魚の TS スペクトルの測定を試みる。生きたまま懸垂した準自然状態の魚の TS スペクトルを測定した。魚の姿勢角変動による TS スペクトルの変化を観察でき、対象識別のための基礎情報増加に資する可能性を示した。

第5章では、前章までに確立したイルカのソーナー音を用いた TS スペクトル計測を、より実用に近づけるため、魚が指向性主軸以外のどこにいても測定できる広帯域スプリットビーム法を開発する。まず、広帯域送受波器を中心とする試験システムを構築する。次に、対象の方向を知るための時間差検出法と、指向性

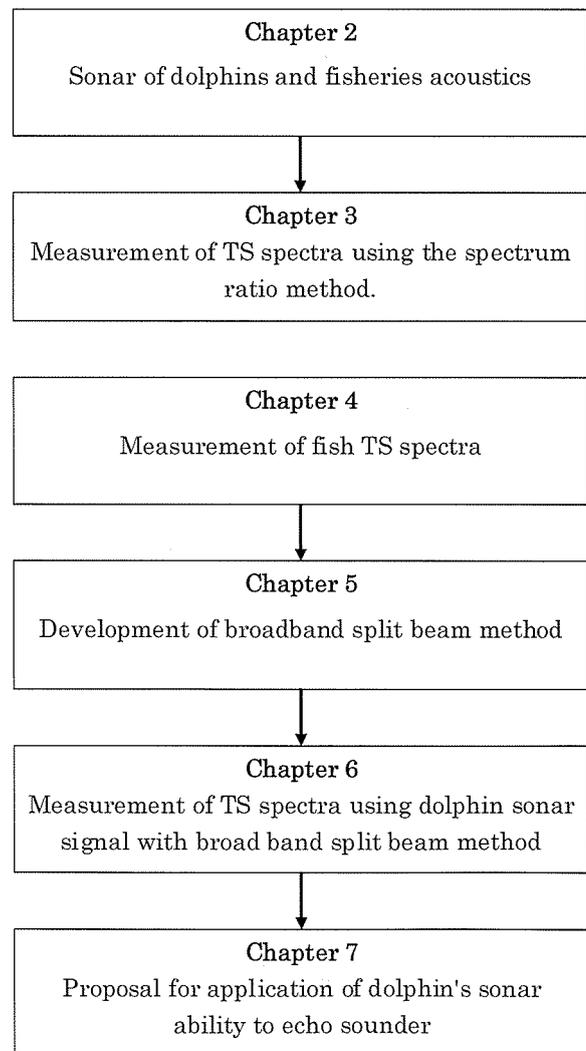


Fig. 1-2. Flow chart of this study.

関数補正のための方法を理論と実験により確立した。

第6章では、前章で提案した広帯域スプリットビーム法を用いて、まず水槽で金属球の位置を測定した。次に対象までの距離を離すことが出来る海上で金属球の形状関数を測定し、広帯域スプリットビーム法としての機能を確認した。さらに、広帯域スプリットビームを用いて自然状態の魚のTSスペクトルを測定した。

第7章では、イルカのソナー音を人工ソナーに適用する場合の残る問題点の検討を行った後に、応用方法を提案する。一般に広帯域信号は高いSN比を実現することが難しい。そこで、入射波をレプリカとして相互相関処理を行い、SN比の向上を行なった。また、イルカのソナー音を用いて測定したエコーに対し、バンドパスフィルタ、整合フィルタフィルタなどのフィルタ処理によるSN比の向上の検討も行った。最後に、イルカのソナー音の優劣を総合的に考察し、魚群探知機への適用に関する提案を行った。

第8章では、本研究の総括を行った。

第2章 水産音響とイルカのソナー

2.1 緒言

本研究の最終目的は、イルカのソナー能力の水産

音響への応用であり、そのうち特に魚種識別などの高度の情報が必要な音響水産資源調査機器への応用である。また、イルカのソナーの基本は魚群探知機などの人工ソナーの基本と同じである。そこで、本章では、後章で必要となる水産音響の基本および概要とイルカのソナーの概要について記述する。

空中で通信や計測の道具として多く使われている電波は、海中では減衰が大きく使用できない。一方、空中では近距離における通信手段としてしか使えない音波は、海中では、減衰が少ないので、最も重要な情報伝達手段である。

魚群探知機やソナーなどの水中音響機器では、パルスエコー法を用いており、その原理は山彦と同じである。Fig. 2-1にパルスエコー法の基本原理を示す。船底に装備した送受波器から、短時間の波であるパルスを送波すると、これは海中を伝播していく。パルスが、海中の魚などの対象に当たると、その一部は透過するが、ほとんどの音波は反射して反射波（エコー）となり、逆方向に伝播し、送受波器で受波される。この音波伝播を定式化したのがソナー方程式である。

ソナーの基本はソナー方程式によって記述される。そこで、まずソナー方程式を見ておく。この方程式の中心的ファクターはターゲットストレングス（TS）であるので、これについてはやや詳しく述べる。

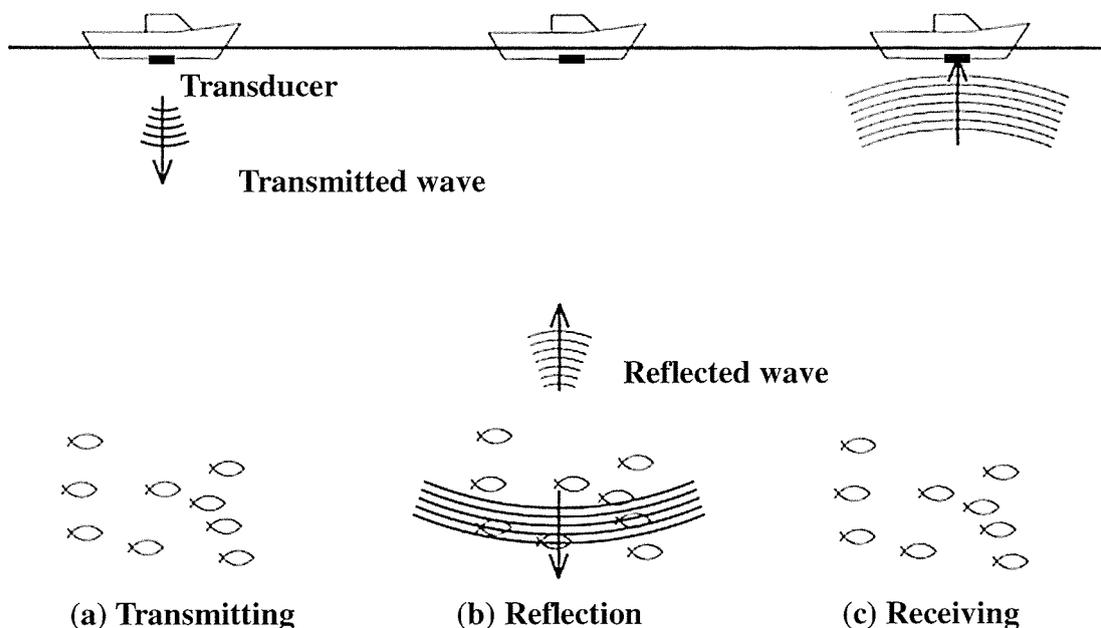


Fig. 2-1. Principle of the pulse echo method. A sound wave is transmitted by a transducer (a), only a small portion of the sound wave is reflected from a fish school (b), the reflected wave is received by the transducer.

魚の TS は水産音響では、中心的な音響パラメータであり、これまでも多くの研究がされている。TS は対象に固有の音響情報であり、TS は、資源量推定のためのスケールファクタであるとともに、TS が魚の体長の 2 乗にほぼ比例することを用いて体長も推定できるので、極めて重要である。

次に、前章で述べた音響水産資源調査の問題点を明確にし、イルカのソーナー能力によるその解決の可能性を探る。そこで、イルカのソーナーについて詳細に述べる。また、イルカのソーナー音を人工的に送受波した先行研究についても紹介し、本研究との違いを述べる。

2.2 ソーナー方程式と水産音響の基本

ターゲットストレングス (TS) は、対象に平面波が入射した時に、入射波の強さ (I_i) に対する対象から 1 m の距離での反射音波の強さ (I_r) の比として、

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

と定義される (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、

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

とデシベル値として表す。本論文では、以降、(2.2) 式左辺のように大文字が 2 文字以上の場合はデシベル量を、右辺のように同じ文字で大文字に添え字付の場合は、線形量を表す。

対象からの散乱波が球面波とみなせる距離では、対象からの散乱波の音圧 P_{scat} は、対象の散乱特性を表す遠距離音場での散乱振幅 Γ と距離に依存する項に分け、

$$P_{scat} = P_{inc} \frac{e^{-jkr}}{r} \Gamma \quad (2.3)$$

と表される (時間依存項は省略)。ここで、 P_{inc} は入射波の音圧、 r は対象から観測点までの距離、 j は虚数単位、 k は波数を表し、 f を周波数とし、 c を音速とすると、 $k = 2\pi f/c$ である。散乱振幅は散乱の大きさの音圧での指標であり、一般に対象の寸法に比べて遠距離では、距離に依存しなくなる。音の強さは、音圧の 2 乗に比例する。

次に、1 尾の魚から帰ってくる反射波の強さを Fig. 2-2 によって説明する。送受波器の真下 (指向性主軸) で 1 m の点での送波音圧を P_0 とすると、魚がいる θ の方向での音圧は、方向による大きさの違いを表す指向性係数 $D(\theta)$ 倍される。送波した音波は距離による減衰と、海水による減衰をうけ、対象 (魚) から反射する。この時、魚への入射波の T_s 倍がエコーとし

て反射する。反射波は拡散と海水による吸収による減衰をうけ、送受波器で受波される。この時送受波器で受波される魚からの反射波音圧を P_{fish} とすると、

$$P_{fish}^2 = P_0^2 \frac{e^{-2jkr}}{r^4} \frac{1}{e^{4\alpha r}} D^4(\theta) T_s \quad (2.4)$$

と表される。ここで、 α は海水の吸収係数を表す。このような式は、一連の音波伝播の過程を表しており、ソーナー方程式と呼ばれる。

自然遊泳状態にある魚の TS を測定するためには、魚の送受波器に対する位置または、方向によって、送受波器の指向性を補正する必要がある。指向性関数の補正には、装置の工夫で行う方法と、統計的な処理で行う方法がある。Fig. 2-3 に装置の工夫で行う指向性関数の補正のための 2 つの方法を示す。Fig. 2-3(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、受波する狭ビームと、送受波器全体で送波し、その一部で受波する広ビームを使用する。対象が送受波器の中心にあれば、広、狭 2 つの受波ビームに差は生じないが、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を調べておき、レベル差から指向性を知る。次に、Fig. 2-3(b) にスプリットビーム法 (以下 SB 法) の原理を示す。SB 法の原理は

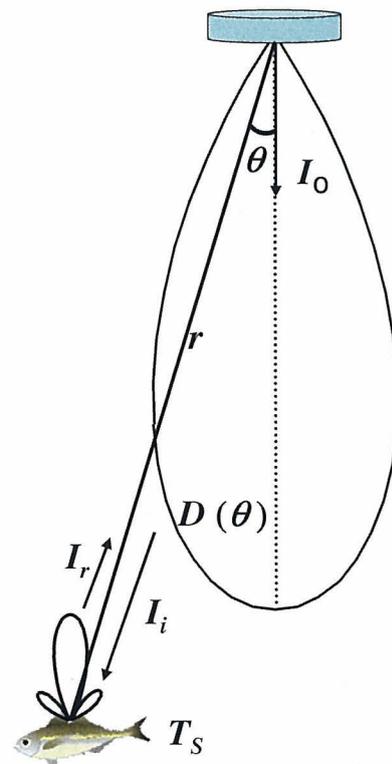


Fig. 2-2. Formation of the single fish echo.

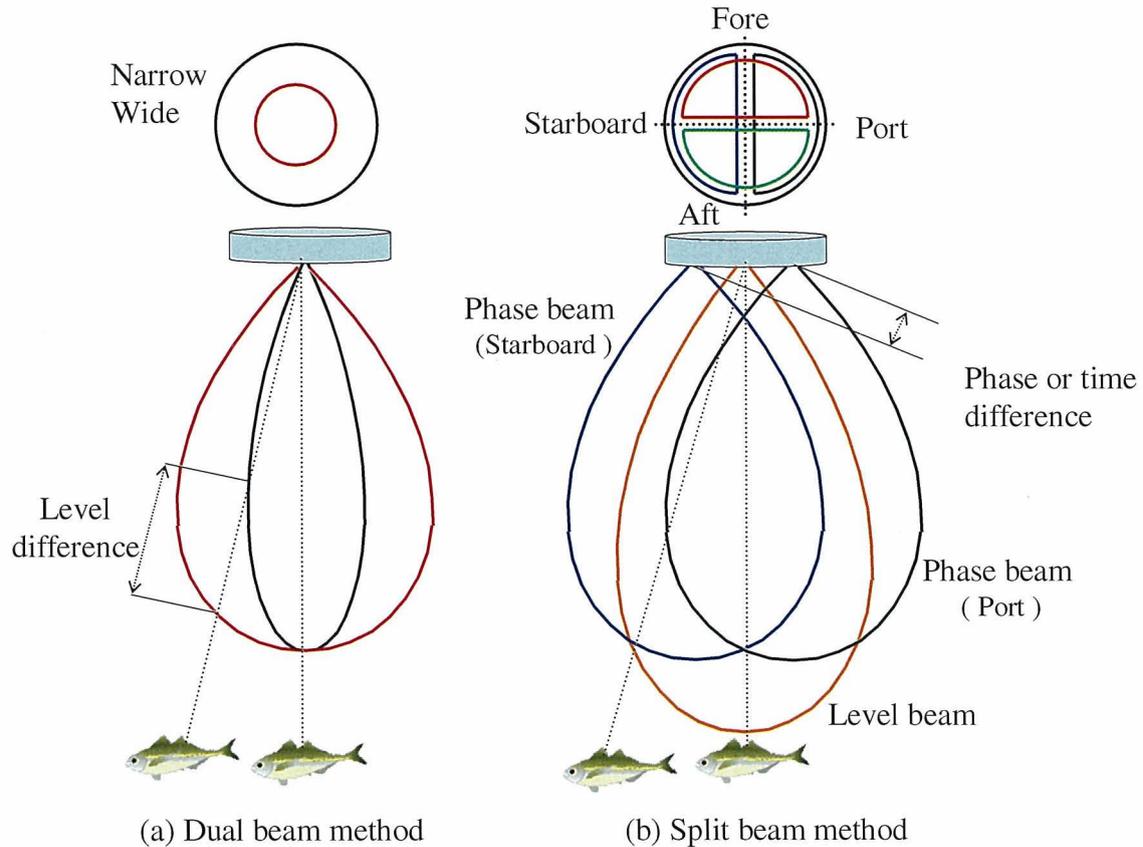


Fig. 2-3. Principles of the dual beam method (a) and the split beam method (b).

音響測位における Super Short Base Line (SSBL) 法とほぼ同一であり (Ehrenberg, 1979), 受波器を分割し, 位相測定用アレイのペアを2つ作り, それぞれの位相測定用アレイに到達するエコーの時間差により, 前後方向, 左右方向の位相差 (又は時間差) の測定を行う。デュアルビーム法では魚の方向の極角 (球座標 r , θ , ϕ の θ) しかわからないが, SB 法では方位角 ϕ もわかるので, パルスエコー法で得られる距離と組み合わせることで, 送受波器との相対位置を測定出来る。

以上の方法で指向性関数を補正し, ソナー方程式を用いて, 自然状態の魚の TS を測定できる。

2.3 音響水産資源調査とその問題点

音響を用いた水産資源量調査は, 主に計量魚群探知機を用いて行われており, 多くの研究・調査がなされている。計量魚群探知機は, 一種の人工ソナーである魚群探知機を定量化することによって生まれた。調査の例としては, ベーリング海や北海道周辺のスケトウダラ資源量調査 (高尾, 1994; 本多, 2004), 南

極オキアミの資源量調査 (Pauly *et al.*, 2000) などがある。また, ハダカイワシ類の定量的調査 (澤田ら, 2004), など, 直接の漁獲対象ではない生物に対しても, 計量魚群探知機が用いられている。対象の量を定量的に測ることのできる計量魚群探知機による音響調査手法は, 日本では1980年に古澤らによって確立し, わが国でも多くの調査で使用され, 水産資源評価に利用されている (古澤, 1990)。

計量魚群探知機による量推定の基本原理は, 群れからの音波の反射強度は, 群れを構成する生物の量に比例することに基づく (Foote, 1987)。実際の音響資源調査では, 調査海域に配置した複数の調査線上を航走して対象生物からの体積あたりの反射強度 (体積散乱強度, SV) を計測し, これを1個体あたりの反射強度で割って分布密度として量を求める。この1個体あたりの反射強度は, TS であり, 群れからの反射強度を分布密度へ換算するスケールファクタとして重要な音響指標である。つまり, 与える TS の値の誤差もしくは不適が, 分布密度に換算されて誤差をもたらす。確度の高い音響調査を行うためには, 正確な TS を使

用することが必要である (梨本, 飯田, 1994)。

魚の TS に関する研究は多く行われてきた (Nakken and Olsen, 1977; Love, 1971)。宮野 鼻らは、4つの周波数を用いて複数の魚種の TS を測定した (Miyanohana *et al.*, 1990)。魚の TS は、魚種、個体、姿勢により大きく変動することが確認された。その他、多くの研究により、主要魚種の TS については、その値と特性が明らかになり、音響資源調査に使用されている。測定対象が鰐を有した魚 (有鰐魚) の場合、その反射波の 90 % 以上は、鰐によるものである (Foote, 1987)。この魚種や体長などにより異なる鰐の形状をモデル化して、シミュレーションにより姿勢ごとの TS (TS パターン) を計算し、実測ともよく合うことを確認されている (Furusawa, 1988; Sawada *et al.*, 1999)。

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く最良の方法であるといえる。これは、自然状態で得られる TS には、そのときの魚群の体長分布、姿勢分布、生理状態、使用した周波数などが反映されているからである。同じ魚から帰ってくる連続したエコーの連なり (エコートレース) の形状などから、魚の遊泳速度や魚体長を推定し、自然状態の魚の情報量を増やす方法も実用化されつつある (Reid, 2000)。しかし、最も信頼にたる TS の得られる自然状態 TS 計測 (Ona, 1999) も、疎な分布や、海底から十分に離れている魚にしか適用できないなど測定条件がかなり制限され、十分実用になっているとはいえない。また、直接的に得られる体積散乱強度を、魚種ごとに振り分けるのに必要な魚種識別技術については、多くの研究が続けられているものの (例えば Simmonds *et al.*, 1992)、未だ不十分である。これらの音響水産資源調査方法の問題点の解決が急務である。

2.4 音響による対象識別

音響を用いた魚種識別も、いくつか行われてきた。大きく分けると、計量魚群探知機などのような狭帯域魚群探知機を用いた研究と、広帯域音を利用した広帯域音響機器を用いた研究である。Gyrin らは、周波数 38kHz の魚群探知機を使用して魚種識別を試みた (Gyrin *et al.*, 1981a, 1981b)。単体魚からの反射波から、TS、反射波の包絡線、反射波のスペクトル、反射波の位相の 4 つの情報抽出した。さらに魚群からの反射波を扱う場合、魚群密度の分布も使用し、すべての測定値に対して一連の関数として計算しモデ

ルを作成した。3 種類の魚群の形態に適用し、モデルで容易に 3 種に分類できたが、実用的な観点から見れば、この方法はまだ実験段階であると報告されている (Simmonds *et al.*, 1992)。

広帯域音を用いた魚の反射に関する研究もいくつか行われてきた。例えば、Zakharia らは、継続時間が 1 ms または 5 ms で、20 kHz-80 kHz の広帯域チャープ信号を用いて、実海域におけるマサバ、カタクチイワシ、マイワシの 3 種類について、魚種識別を試みた (Zakharia *et al.*, 1996)。彼らは対象の反射波のスペクトル形状と魚群形状とからニューラルネットワークを用いて魚種識別を行っており、70 % 程度の確率で識別に成功している。Simmonds らは、継続時間が 1 ms の 27-54 kHz の広帯域のチャープ信号を、ケージの中に入れた単一魚種の魚に送波し、TS の平均的な周波数特性を求め、標準偏差を利用して、複数の魚種の識別を行った (Simmonds *et al.*, 1996)。また、魚種識別とは異なるが、プランクトンと魚類を分離する方法も行われている。最近の研究では、Mckelvey and Wilson は、38 kHz と 120 kHz の計量魚群探知機を用いて、大西洋タラとプランクトンを 84 % の確度で分離に成功している (Mckelvey and Wilson, 2006)。この研究では、2 つの周波数によるプランクトンと魚の反射強度の違いを利用するだけでなく、モデルも使用している。これらのこれまでに報告されている研究によれば、いずれの方法も条件を限れば識別能力は優れているが、一般の場合に適用可能かどうかは、疑問が残る。

Fig. 2-4 に音響による魚種識別方法のフローチャートを示す。現在音響による魚種識別は、

- (1) 群れの形状などの群特徴
- (2) 反射の周波数特性
- (3) エコー波形の特徴
- (4) TS や遊泳スピードなど音響推定値

と題別できる。しかし、魚種推定のための絶対的な方法はなく、個別の情報抽出の方法を高度化し、情報の種類と量を多くし、それらを複合的に考慮することが、魚種識別の高度化に繋がる。多くの魚種識別のための高精度の情報を集めれば、後は、判別分析やニューラルネットワークなどの汎用の手段に頼って魚種識別の確度が上がる (古澤, 2001)。

2007 年現在、国内でも、魚体長計測機能がついた一般漁労向けの魚群探知機や、複数の音響データを利用した魚種識別計量魚群探知機の開発などが行われ、魚種識別の高度化が進んでいる (社団法人海洋水産システム協会, 2003)。しかし、わが国周辺でも魚の種類は多く、また魚種識別の万能の方法はないので、さら

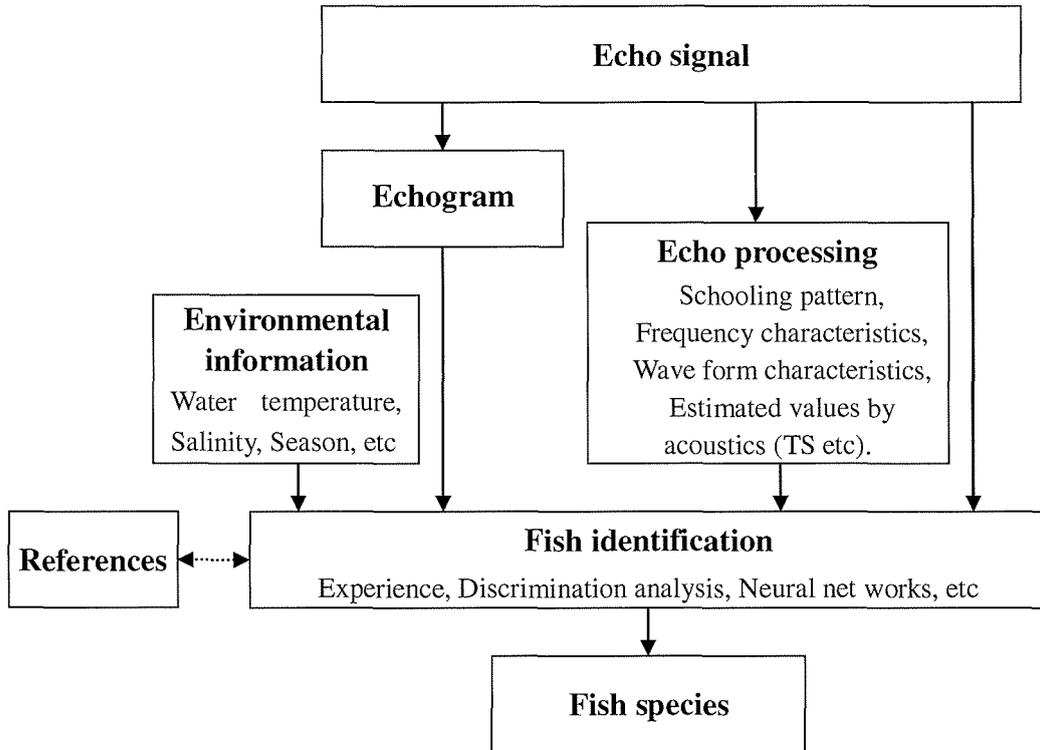


Fig. 2-4. Schematic diagram of fish species identification by using acoustic methods.

なる研究開発が必要である。イルカは、魚を識別した上で捕食の対象としていると考えられるので、特に魚種識別のためにイルカのソナー能力の研究が重要である。

2.5 イルカのソナー

多くのハクジラ類は、超音波を発し、その反射から己の位置や餌の方向を知るエコーロケーションと呼ばれるソナー能力を有している。エコーロケーションという言葉を使用したのは、生物ソナー研究の始祖ともいえる D. R. Griffin である。エコーロケーションは、反響定位とも呼ばれており、「生物が音を発しエコーを聞くことによって、物体の定位、判別、認知やナビゲーションを行うこと」と定義される。ハクジラ類のエコーロケーション能力は、雑音の多い海中でエコーに含まれる情報をうまく抽出するために信号の送波方法の制御や、信号処理に重みを置いて進化してきたと考えられる。ハクジラ類の歴史は長くその起源は、今から約6500年前、白亜紀の終わりまでさかのぼると言われる。ハクジラ類の祖先は、白亜紀の終わりに現在の地中海の東部からペルシア湾辺りにかけて生息していた原始的な肉食性哺乳類であるメソニック

ス類であると考えられている。この長い期間の間にエコーロケーション能力を獲得し、進化させた（大村, 1974）。

Auによりイルカのエコーロケーション能力についての多くの報告がまとめられている（Au, 1993）。ハンドウイルカ（*Tursiops truncatus*）は、直径2.5 cm のスチール球を70m はなれた地点で検知することができ、直径を3倍に変えた場合は100 m 以上離れてもスチール球の有無を検知できるとされている。また、中空になっている円筒の厚みの差を0.2 mm 程度まで検出でき、同じ大きさで異なる材質の物体を区別できることが報告されている。また、Nakahara *et al.* が、小型のイルカであるスナメリも、ハンドウイルカと同じように対象の大きさや材質の違いを、かなりの精度で識別できることを報告している（Nakahara *et al.*, 1997）。これらの研究において、イルカが材質や形そのものをエコーロケーションでわかるわけではない。対照となる物体があって、それとの区別を行わせて得られた結果である。

近年、イルカが、対象のエコーから直接物体特性を抽出していることが報告された（Harley *et al.*, 2003）。つまり、イルカはエコーロケーションに用い

るソーナー音を利用して物体の特徴を抽出していることが確実に示された。Auの実験結果にあるような高い弁別能力を人工のソーナーに利用できるようになれば、対象である魚の質、形状の違い等の情報量を増やすことが出来ると考えられる。

多くの研究により、ほとんどのイルカ類のエコーロケーションに用いられる音波（クリック）が計測され、分類された。中村らによれば、イルカ類のクリックは、大きく分けると2種類に分けられる(Nakamura and Akamatsu, 1998)。Fig. 2-5に代表的なイルカ類のクリックの波形と、その振幅スペクトルを示す。イルカ類のクリックは、大きく分けると、ハンドウイルカ型 (bottlenose dolphin type) とスナメリ型 (finless porpoise type) に分けられる。ハンドウ型の特徴は、数十 μ sの間に鋭く立ち上がり、振幅スペクトルは、広帯域の周波数特性を有している。一方で、スナメリ型は、ハンドウ型よりも多くのサイクルからなる波形で、振幅スペクトルはハンドウ型よりも帯域が狭い。なぜこのような2種類に大分できるかは、様々な説があるが (Amundin, 1991; Goodson, 1997), 解剖学的検知から考察した中村らによれば、内部構造器官によるものであり、餌、生活環境などに

より異なる進化を遂げてきたからと考察している。これらのイルカのような時間的に短い音波を用いて、広範囲を探知することが出来れば、高い距離分解能が実現でき、密な群れのエコーを単体魚のエコーの集まりに分解することができ、自然状態の魚の反射強度などの基礎情報測定における限界点の緩和に繋がる。

イルカのソーナー音を人工的に利用した研究もいくつか行われている。Bennoit-Birdらは、3種類のイルカ型のソーナー音を人工的に送受波し、210 dB程度の音圧で複数の魚種にあて、痺れるか、または、死に至るかを調べ、そのような事実はないことを報告した (Bennoit-Bird *et al.*, 2006)。また、Bennoit-Birdらは他の研究で、無人水中探査機 (Remotely Operated Vehicle; ROV) に広帯域送受波器を設置し、イルカ型のソーナー音を用いてフエダイのTSの深度依存性がないことを報告した (Bennoit-Bird *et al.*, 2003)。Capusらは、ハンドウイルカのソーナー音を解析し、ダブルチャープという特徴を見つけ、それを真似た人工音により、銅の較正球のエコーを識別した (Capus *et al.*, 2007)。Auらは、ハンドウイルカ型とスナメリ型のソーナー音を送受波して、4種類の魚の姿勢角の関数としてTSを測定し、ハンドウイルカとスナメリ

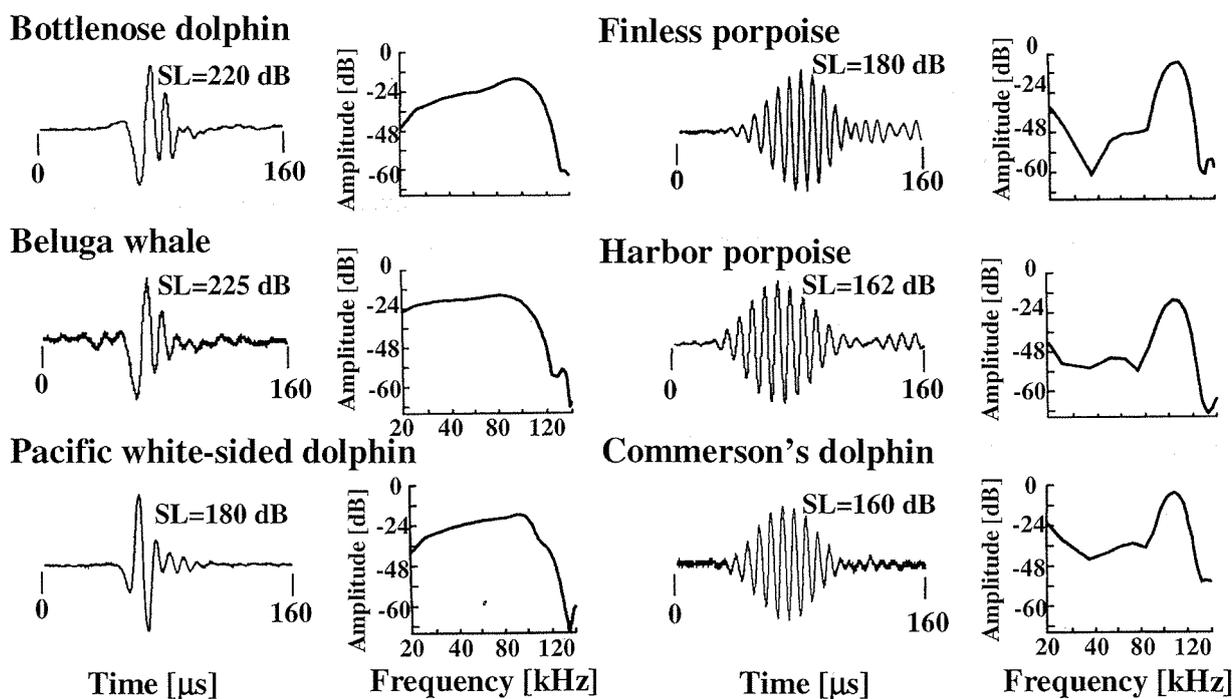


Fig. 2-5. Wave forms and amplitude spectra of dolphin's click. The left side figures are classified as the bottlenose dolphin type and the right side the porpoise type. "SL" shows click source level at 1 m.

の探知範囲を推定した (Au *et al.*, 2007)。これらの研究は、多くの部分で、イルカのソナー音のメリットを議論している。

本研究は、イルカのソナー音の利用という点では、上記の研究と共通点を持つが、主に TS スペクトルに着目し、魚種識別のための情報量増加と、自然状態の魚の TS 測定条件の緩和を目的としており、上記の研究とは目的が異なる。

2.6 結 言

本章では、本研究を進めるにあたって必要な音響による海洋生物の計量方法の理論や、問題点の確認、イルカのソナー能力などの知見を述べ、次章以降の準備とした。

まず 2.2 節で、最も重要な音響指標である TS の定義と、その既往の研究について述べた。また、音波伝播の過程を表すソナー方程式について述べ、自然状態の魚の TS の求め方を述べた。次に 2.3 節で現状の音響水産資源調査とその問題点について述べた。自然状態の魚の TS 測定条件が厳しいこと、体積散乱強度を魚種ごとに分けることがむずかしいという 2 点が、大きな問題点であることを確認し、その解決のためにイルカのソナー能力に学ぶべきことを述べた。

2.4 節で、体積散乱強度を魚種ごとの資源量に分けるために、音響を用いた対象識別について既往の研究を述べた。これらは十分には実用化には至っておらず、魚種推定のための絶対的な方法はなく、個別の情報抽出の方法を高度化し、情報の種類を多くし、情報の質を上げることが必要である。

最後に 2.5 節でイルカのソナーについて述べ、その優れた点を人工のソナーに応用できれば、上述した音響水産資源調査の問題点の解決の可能性を示した。また、先行研究として行われているイルカのソナーの人工利用についてふれ、本研究との違いを述べた。

第 3 章 スペクトル比法を用いた TS スペクトルの測定

3.1 緒 言

イルカのソナー音の特長は、第 2 章で述べたように、継続時間が短く広帯域であることである。もしそのような音波で、魚などの対象を観察すると、距離分解能が高いので、個々の魚のエコーを分離しやすく、また反射の周波数特性 (スペクトル) を観測しやすい。つまり、個々の魚のターゲットストレングス (TS) のスペクトルを求めるのにイルカのソナー音は都合が良い。本研究では、イルカのソナー音により魚の

TS スペクトルを計測できるようにすることを主な柱としている。本章ではそのための方法を確立する。すなわちスペクトル比法という広帯域の定量的観測に便利な方法を導入し、散乱特性が理論的に明確な金属球によって、方法と測定システムを検証し、次章以降の魚の TS スペクトルの計測に備える。

本研究では、イルカが送受信系 + 反射体でなく、対象の散乱特性 (反射体のみ) を観測していると仮説を立て、その考え方を人工のソナーに応用する。エコーには、反射対象の特性のみでなく、送受信系および音波伝搬上の特性が複合しており、エコーの特性のみからでは、対象の識別などをすることがむずかしい。そこで本章では、対象の散乱特性のみをエコーから抽出する方法を開発し、実際に金属球の散乱特性を計測する。

3.2 節では、スペクトル比法を用いた、対象の TS スペクトルの測定方法を述べる。3.3 節では、方法の検証のために用いる金属球の散乱の周波数特性 (形状関数) を理論計算で求める。3.4 節で、シミュレーションを用いてスペクトル比法により求めた形状関数と、理論計算で求めた形状関数を比較し、スペクトル比法の有効性を確認する。

3.5 節で、実験に用いる広帯域送受信システムを構築し、その各特性を調べる。また 3.5 節で、用いるイルカのソナー音の特徴を述べる。3.6 節では、構築した実験システムとイルカのソナー音を使って実際に金属球の形状関数を測定する。本章では最終的に、散乱振幅のスペクトルを正確に測定する方法を確立する。

3.2 散乱振幅のスペクトル測定のためのスペクトル比法

送波器からの送波パルスが、距離 r にある対象に入射波 $p_i(t)$ (t は時間) として到達し、受波器に反射波 $p_r(t)$ が戻るとする。エコー波形が定常となる長バースト波を使用する場合は、前章で述べたとおり、入射波振幅にキャリア周波数での散乱振幅を掛けたものがエコーの振幅となる。しかし、本研究では対象の散乱振幅の周波数特性を扱うので、入射波と反射波のフーリエ変換の関係

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_r(t) e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} p_i(t) e^{-j\omega t} dt \frac{e^{-j\omega r/c}}{r} e^{-2\alpha a(\omega)} \Gamma(\omega) \quad (3.1)$$

を用いる。ここで ω は角周波数 ($\omega = 2\pi f$)、 $\Gamma(\omega)$ は対象の散乱振幅の周波数特性、 $a(\omega)$ は海水の吸収係数の周波数特性である。入射波 p_i と反射波 p_r のフーリエ変換をそれぞれ P_i 、 P_r とし、(3.1) 式を散乱振幅 $\Gamma(\omega)$ について整理すると

$$\Gamma(\omega) = re^{j\omega r/c} e^{2ra(\omega)} \frac{P_r(\omega)}{P_i(\omega)} \quad (3.2)$$

となり、入射波と反射波のスペクトルの比を取ること、対象の散乱振幅の周波数特性もしくはTSスペクトルを得ることができる (Neubauer *et al.*, 1974; Dragonette *et al.*, 1974)。本研究ではこの原理を用い、これをスペクトル比法と呼ぶ。なお、TSの線形量 T_S および、デシベル量 TS と散乱振幅 Γ との関係は、

$$TS(\omega) = 10 \log T_S(\omega) = 20 \log |\Gamma(\omega)| \quad (3.3)$$

で表される。

また、対象が球の場合は、球の半径 a で規準化し、 ω の代わりに無次元周波数 ka を用いることで、

$$|f_\infty(ka)| = \frac{a}{2} \Gamma(ka) = \frac{a}{2} \Gamma(\omega a/c) \quad (3.4)$$

として表せる。ここに、 k を波数、 f_∞ は形状関数である。形状関数は、対象の材質、寸法と波長の比、形で変化する関数であり、球の場合は、戻り散乱に指向性がないため、均一の材質で作成された球は、その散乱特性を理論的、実験的に求めやすい。また、海水温度などの環境要因による特性変化が少ないため、タンゲステンカーバイドや銅などの金属球は、計量魚群探知機の較正に使用されている (宮野鼻, 1994; Foote *et al.*, 1987)。

以上、スペクトル比法による散乱振幅の周波数特性の測定の原理を述べた。実際には、(3.1) 式の入射波と反射波とも、送信系により放射されたパルスを受信系で観察するので、それらの特性を考慮に入れなければならない。もし、送受信系に共通のシステムを用いると、(3.2) 式の比をとる過程でそれらが消える。広帯域の送受信系の特性を測定するのは容易でなく、誤差が入る可能性も増す。したがって、スペクトル比法の最大の長所は、これらの特性測定もしくは較正を必要とせず、精確なTSスペクトルが得られる点である。しかし、この方法では、反射波とは別に入射波を測定する必要がある。

3.3 金属球の形状関数

本節では形状関数が比較的容易に理論計算で求められる金属球の形状関数の周波数特性の理論値と実測値を比較し、広帯域のTSスペクトル測定が可能であることを確認する。そのために本節では、金属球の散乱特性である形状関数を理論的に計算により求める。

金属球の反射特性はFaranにより導かれ (Faran, 1951), Hickling らが実験的に検討している (Hickling, 1962)。金属球の形状関数は、媒質中の音速を c 、散乱体の縦波の音速を c_1 、横波の音速を c_2 とした場合、

それぞれの音速に対する波数 k と半径 a の積 ka 、 k_1a 、 k_2a と、媒質の密度 ρ 、散乱体の密度 ρ_1 の5つのパラメータにより決まる関数である。

Foote によれば、 c_1 、 c_2 、 ρ 、 ρ_1 は一定材質と常温下において大きく変わることはない (Foote, 1983)。ゆえに5つのパラメータのうち c_1 、 c_2 、 ρ 、 ρ_1 の4つを定数とすれば、 k_1a 、 k_2a は周波数 f と球の半径 a の積 fa によって決定されるので、 $|f_\infty|$ は ka または fa の関数となる。さらに fa は、 ka と c によって決定されるので、最終的には $|f_\infty|$ は c と ka の関数 $|f_\infty(ka)|$ として表すことができる。形状関数 $|f_\infty(ka)|$ の実際の計算式を以下に示す。

$$|f_\infty(ka)| = \frac{2}{ka} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) \sin \eta_n e^{-j\eta_n} \quad (3.5)$$

(3.5) 式中の η_n は球ベッセル関数を用いることにより、次式のように表せる。

$$\tan \eta_n = - \left[\frac{J_n(ka)F_n - kaJ_n'(ka)}{n_n F_n - kan_n'(ka)} \right] \quad (3.6)$$

ここで、 J_n は、第一種 n 次の球ベッセル関数、 n_n は第二種球ベッセル関数であり、(3.6) 式中の F_n もベッセル球関数を含み、次式のように表せる。

$$F_n = \frac{\rho (k_2 a)^2 (A-B)}{\rho_1 2 (C-D)} \quad (3.7)$$

(3.7) 式において

$$A = \frac{k_1 a J_n'(k_1 a)}{k_1 a J_n'(k_1 a) - J_n(k_1 a)}$$

$$B = \frac{2(n^2 + n) J_n(k_2 a)}{(n^2 + n - 2) J_n(k_2 a) + (k_2 a)^2 J_n''(k_2 a)}$$

$$C = \frac{(k_1 a)^2 [\sigma / (1 - 2\sigma)] J_n(k_1 a) - J_n''(k_1 a)}{ka_1 J_n'(ka_1) - J_n(ka_1)}$$

$$D = \frac{2(n_2 + n) [J_n(k_2 a) - k_2 a J_n'(k_2 a)]}{(n^2 + n - 2) J_n(k_2 a) + (k_2 a)^2 J_n''(k_2 a)}$$

である。ここで σ は、散乱体のポワソン比を表し、

$k_1 = \frac{2\pi f}{c_1}$ 、 $k_2 = \frac{2\pi f}{c_2}$ である。以上が、形状関数を理論的に求める計算式である。

Table 3.1に示すパラメータで理論的に求めたタンゲステンカーバイド (以下TC)、銅、外部 (内部) からの力に対して変形しない理想的な物体である剛体の3種類の形状関数を、Fig. 3-1に示す (宮野鼻, 1994)。剛体のパラメータは、便宜的にTCの音速に10,000m/sを加え、密度を100倍とした。Fig. 3-1において、材質、使用する周波数、大きさ (球の半径) が異なれば、その反射特性が大きく異なることがわかる。例えば、TCの形状関数は、 ka が7.3、10.8のとき著しく値が変化している。これは、金属球の共振によるものである。銅球は形状関数の値の変動が、他の2種

Table 3-1. Physical parameters used to calculate the form function of metal spheres.

	Copper	Tungsten carbide	Rigid
Longitudinal wave speed c_1 [m/s]	4785	6867	16867
Shear wave speed c_2 [m/s]	2288.5	4161.2	14161.2
Density of metal ρ_1 [kg/m ³]	8947	14900	1100000
Poisson ratio σ	0.3497	0.2095	0.2095

Density of seawater $\rho=1000$ kg/m³, sound speed in seawater $c = 1500$ m/s

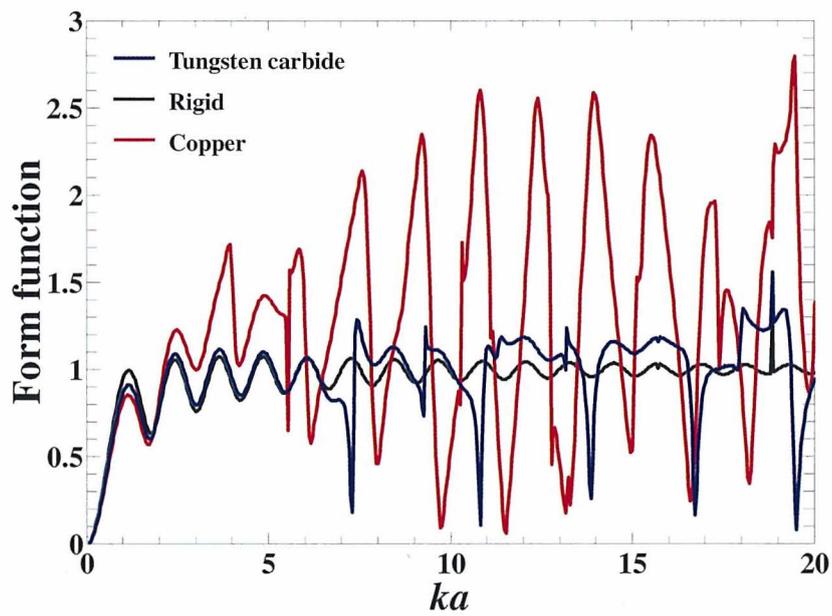


Fig. 3-1. The form functions of metal spheres. The x axis shows the product of wavelength and sphere radius, the y axis shows value of the form function.

類の球よりも大きい。また、剛体の形状関数は共振点がなく、 ka の小さいレイリー領域を除けばほぼ1を上下している。TC球の形状関数は、 ka が5以下であれば、ほぼ剛体のそれと等しい。

3.4 シミュレーションによるスペクトル比法の説明

本節では、3.3節で述べた方法で、対象の散乱振幅のスペクトルを求められるかをコンピュータ・シミュレーションによって確認する。Rudgersは、シミュレーションと実測により数種類の金属球の形状関数の比較を行っている (Rudgers, 1969)。本節では、同様の方法を用いて剛体の球に対するシミュレーションを行った。すなわち、シミュレーションにより作成された入射波と金属球からの反射波とを用いてスペクトル比法により形状関数を求め、金属球の形状関数の理論値と比較する。

Fig. 3-2にシミュレーションのフローチャートを示す。今、対象への入射波を $p_i(t)$ とし、そのフーリエ変換を $P_i(\omega)$ とする。散乱現象は (大きさ)/(波長) を変数として表すと、変数が1つ減り都合がよい。そこで、時間 t と角周波数 ω の関係を保ちながら、 ω を ka に変換する。波数 k と球の半径 a の積は、と表すことができるので、と表し、とおけば、 ω と t の倍率が変わるだけで、フーリエ変換できる。矩形短バース

ト波を $p_i(\tau)$ とすると、

$$ka = \frac{2\pi}{\lambda} a = \frac{a}{c} \omega \quad (3.8)$$

と表すことができる。ここで、 $\Pi(x)$ は、 $|x| \leq \frac{1}{2}$ のとき $\Pi(x)=1$ となり $|x| \geq \frac{1}{2}$ のとき $\Pi(x)=0$ となる矩形波であり、 m は無次元のパルス長、 p_0 は短バースト波の音圧振幅、 k_0 は短バースト波の波数である。正弦波のサイクル数を b とすると、 $m=2b\pi(k_0 a)^{-1}$ である。このフーリエ変換は、

$$P_i(ka) = \int p_i(\tau) e^{-ka\tau} d\tau \\ = \frac{p_0}{2j} \left[\frac{1 - e^{j(k_0 - k)am}}{(k_0 - k)a} + \frac{1 - e^{-j(k_0 + k)am}}{(k_0 + k)a} \right] \quad (3.9)$$

と表せ、 $(k_0 - k)a$ を X 、 $(k_0 + k)a$ を Y とおくと、(3.9) 式は次式のように表せる。

$$P_i(ka) = \frac{(1 - e^{jmX})}{X} - \frac{(1 - e^{jmY})}{Y} \quad (3.10)$$

以上により、入射矩形短バースト波の振幅スペクトルを理論的に求められる。

次に、入射波のスペクトルに形状関数の理論値をかけ、反射波のスペクトルを作成した。反射波のスペクトルを逆フーリエ変換して、反射波の波形を作成した。得られた反射波の波形をもう一度フーリエ変換し、反射波の振幅スペクトルを作成し、比をとりシミュレー

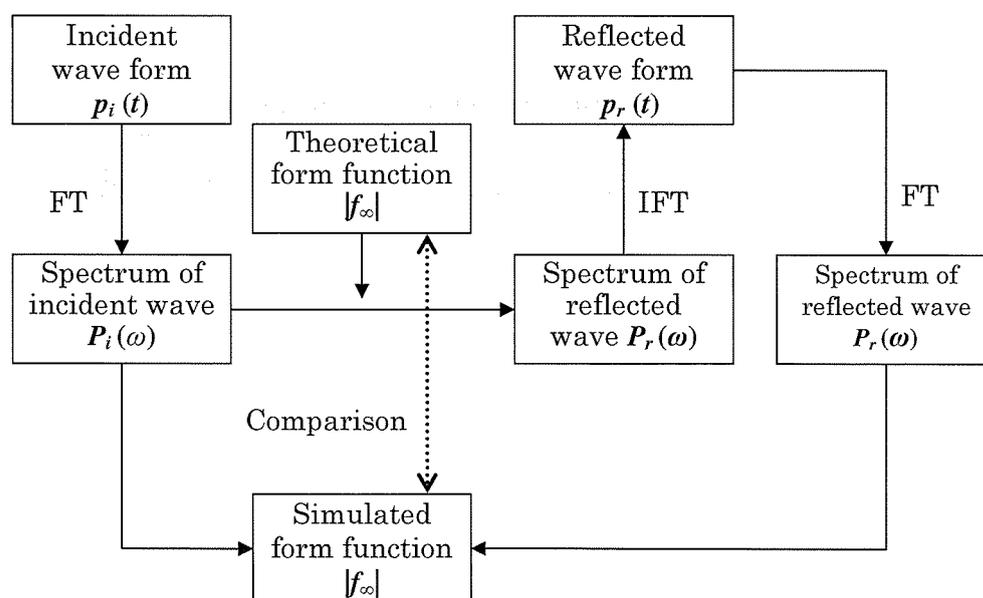


Fig. 3-2. The schematic diagram of simulation of the form function. "FT" stands for Fourier transform and "IFT" stands for inverse Fourier transform.

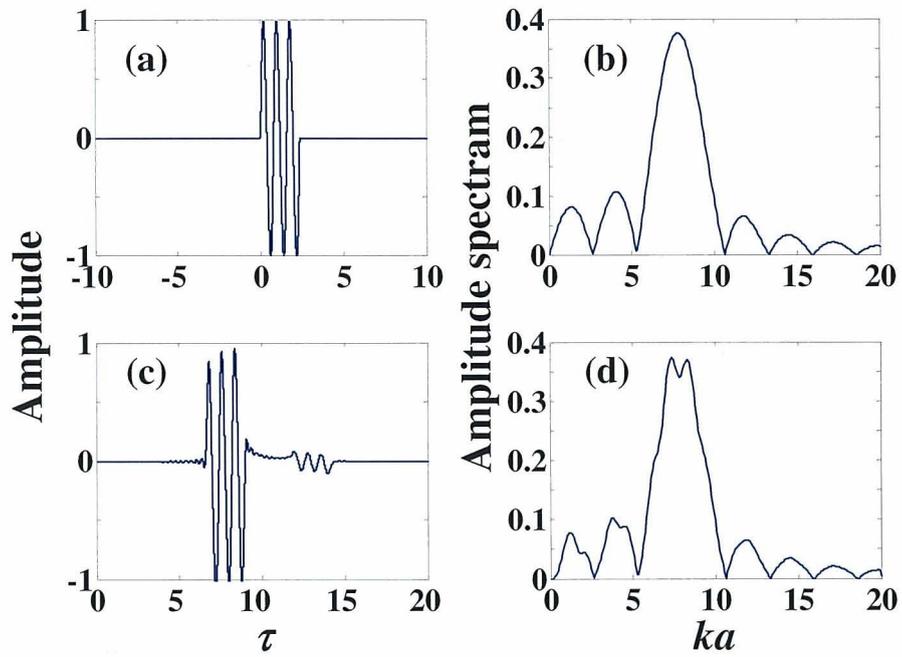


Fig. 3-3. The wave forms and amplitude spectra by simulation. The incident wave form (3 cycle tone burst wave) (a), amplitude spectrum of the incident wave (b), the reflected wave form of a rigid sphere (c), and the amplitude spectrum of the reflected wave (d).

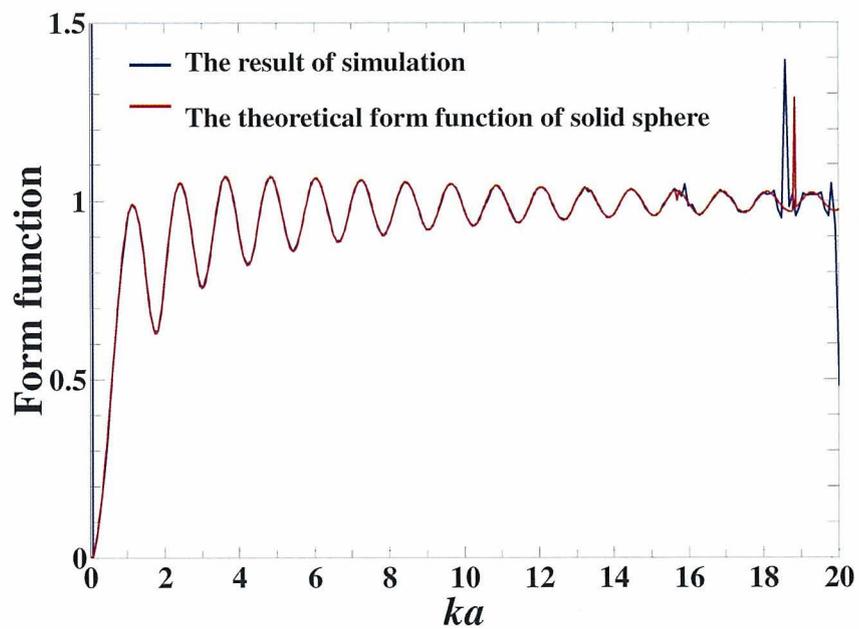


Fig. 3-4. Comparison of the theoretical form function of the rigid sphere with the simulation result of the spectrum ratio method.

シヨンによる形状関数を作成する。

中心周波数が100 kHzで、3サイクルの短バースト波を用いて、剛球からの反射波をシミュレーションにより作成した。このとき、音源と剛球の距離は1 mとした。Fig. 3-3に作成した各波形と、振幅スペクトルを示す。シミュレーションした反射波における副次的な波は、クレーピング波によるものであり、球の周囲を回ってくるので遅れが生じて (Rudgers, 1969), これらが形状関数に緩やかな凹凸の特性を与えている。次に、得られた入射波と反射波の振幅スペクトルの比を取った結果を Fig. 3-4に示す。シミュレーションにより再現した形状関数と、計算で求めた理論形状関数がよく一致している。

以上シミュレーションにより、スペクトル比法を説明した。反射波の波形はシミュレーションにより得られたものであるが、逆変換により元に戻した形状関数はシミュレーションによる結果とは言えないので、スペクトル比法そのものを検証したことはならない。しかし、スペクトル比法で用いる計算過程の検証にはなった。

3.5 広帯域送受信システム

TSスペクトルを計測するために、広帯域送・受波器を中心とする広帯域送受信システムを構築した。こ

の節では、このシステムの構成および特性と、使用したイルカのゾナー音の特徴を述べる。

Fig. 3-5に本研究のために構築した送受信システムを示す。スペクトル比法を実現するために、送波器と受波器は特性の揃ったものを別途製作した。広帯域の送波器, 受波器, プリアンプ(すべて古野電気(株)に特注)以外は、市販の装置を用いた。送波部では、任意波形発生装置 (NF回路ブロック, WF1946a) により発生した信号を、パワアンプ (Accuphase, PRO-10, 最大増幅率 40 dB) で増幅し、送波器へと出力する。受波部では、音波を受波器で受け、プリアンプで増幅し、オシロスコープ (Tektronix, TDS3000) で直接観察および測定を行い、受信信号を GPIB を介して、PC に収録した。

用いたゾナー音は、ハンドウイルカ, スナメリ, および比較の為に中心周波数が100kHzで3サイクルの短バースト波の3種類である。ハンドウイルカ, スナメリのゾナー音, 3サイクルの短バースト波それぞれの振幅スペクトル, 送波器の送波感度, 受波器の受波感度, 感度積を Fig. 3-6に示す。イルカのゾナー音は個体や条件により多少異なる特性を持っていることが知られている。また、ビーム幅10°程度の強い指向性を有しており、送波ビームの指向性主軸上でない部分では、特性が大きく異なることも報告

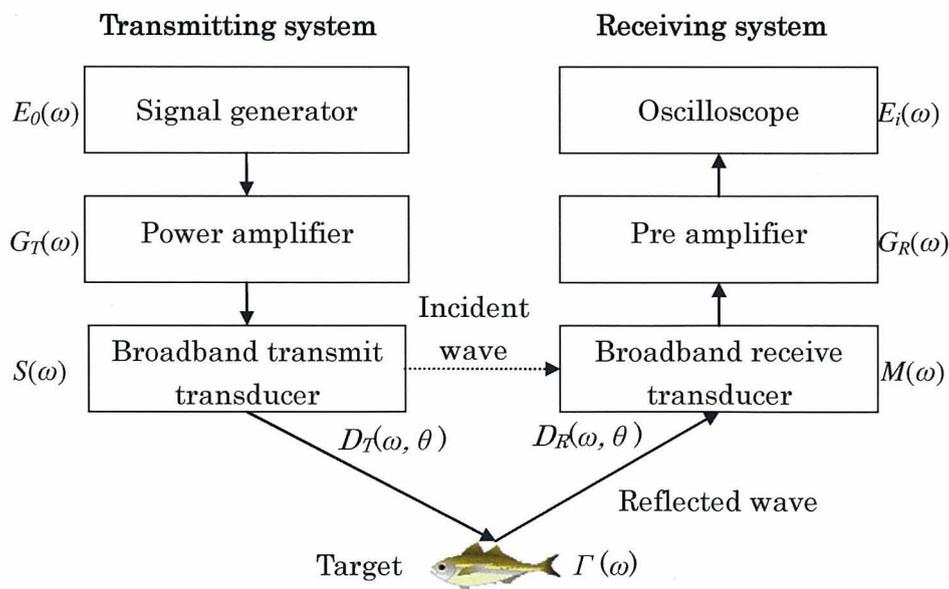


Fig. 3-5. The schematic diagram of the broadband transmitting and receiving system used in the experimental setup.

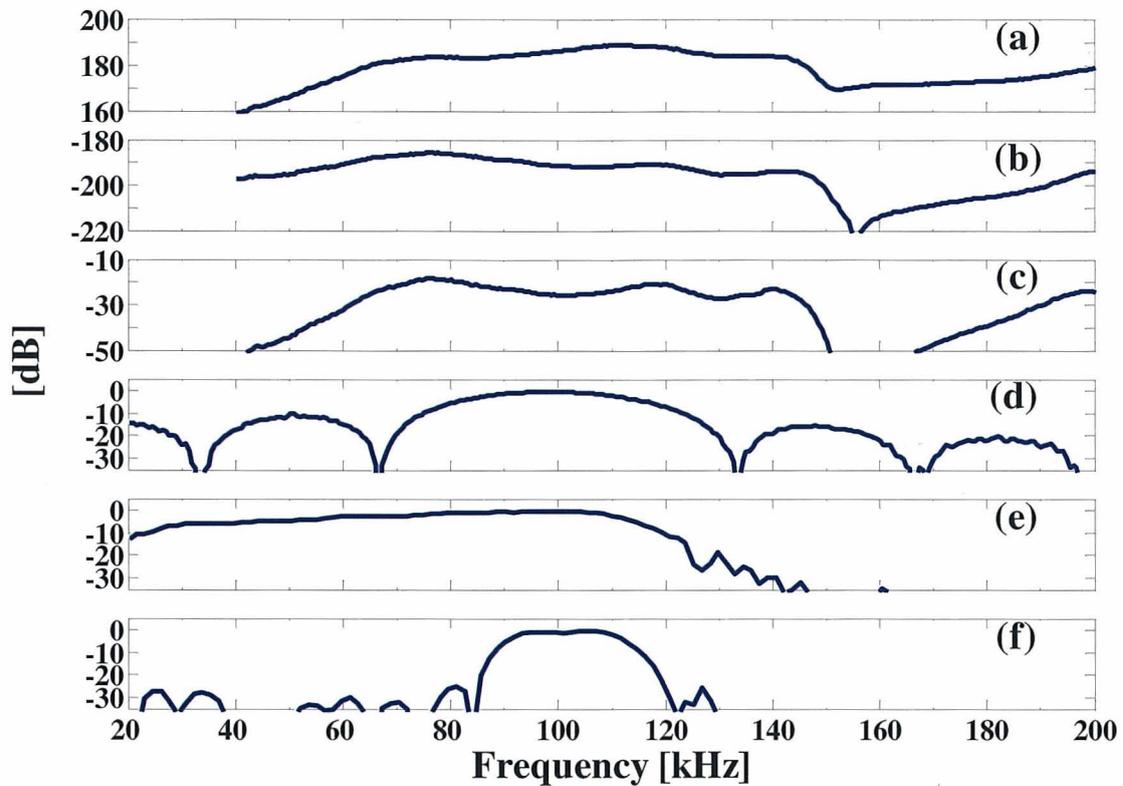


Fig. 3-6. Frequency characteristics of transmitting sensitivity (a), receiving sensitivity (b), and sensitivity product (c). Amplitude spectra of 3-cycle tone burst (d), bottlenose dolphin sound (e), and finless porpoise sound (f).

されている (Au, 1993)。本研究では、国内の水族館で注意深く測定された中村らのものを代表例として使用した (Nakamura and Akamatsu, 1998)。中村らは、9種類のイルカのソナー音を、陸上からビデオカメラで行動観察しながら、広帯域ハイドロフォンで収録し、イルカの頭部がハイドロフォンの方向を向いている時のみの音波を解析している (Nakamura and Akamatsu, 1998)。

Fig. 3-6 (e) に示すようにハンドウイルカのソナー音は100 kHz 付近にピークを持ち、バンド幅 (スペクトルが 3 dB 落ちる - 3 dB 帯域) は55 kHz から115 kHz と広い。スナメリ (Fig. 3-6 (f)) は、110 kHz 付近にピークをもち、バンド幅は92-112 kHz とハンドウイルカに比べると狭い。一方、使用するシステムの送波感度 (Fig. 3.6 (a)) は、110 kHz にピークを持ち、60 kHz 以下で大きく下がっており、65 kHz から140 kHz の平坦な部分では、5dB 程度変動がある。送波感度と受波感度を掛け合わせた感度積 (Fig. 3.6 (c)) では、65 kHz から125 kHz まで、ほぼ平坦な特

性を持っており、ハンドイルカの低周波成分を除き、イルカのような広帯域の音波を送受信可能である。

次に、送波器と受波器の指向特性を Fig. 3-7に示す。広帯域の送波器 (受波器) であるため、周波数を50 kHz から130 kHz の間で変えて測定しており、周波数により指向性関数が異なる。また、測定結果によるビーム幅 (- 3 dB) は、

	送波器	受波器
50kHz	19.2°	19.5°
70kHz	14.1°	13.9°
100kHz	9.6°	9.5°
130kHz	7.7°	7.1°

である。

Fig. 3-8に、信号発生器で発生させた基の波形と、送波器と受波器を2 m 離して対向させて収録した、3種類のソナー音の入射波を示す。どの波形も、信号発生器で発生させた基の波形 (左) と入射波の波形 (右) が異なっている。これは、送波と受波のシステムの周波数特性の影響を受けているためである。対象

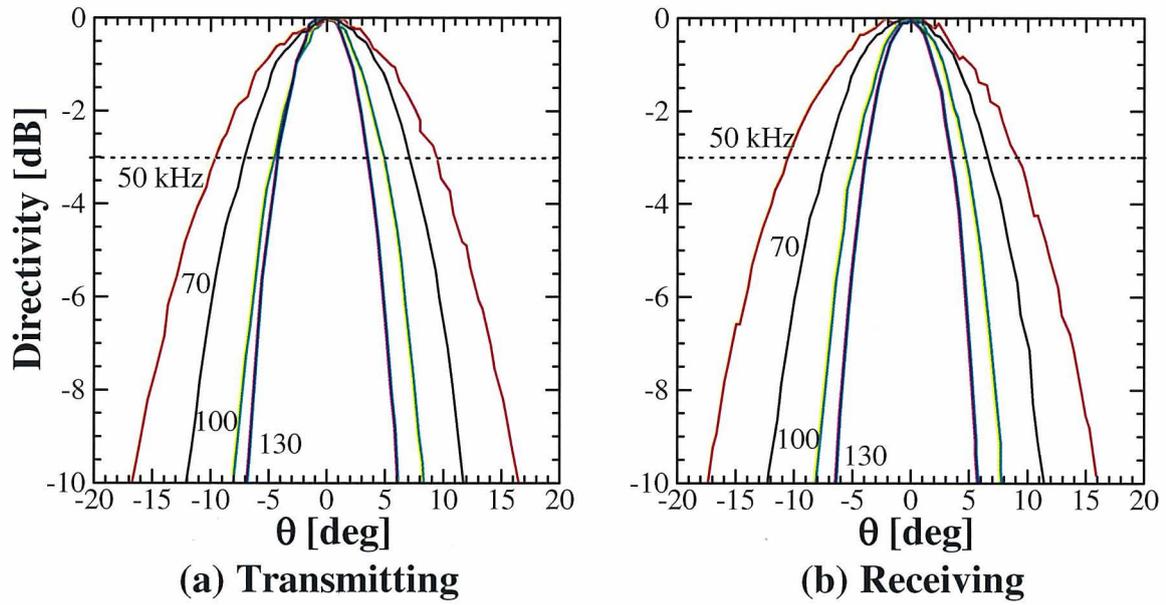


Fig. 3-7. Directivities of the transducers, the transmitting (a), the receiving (b). Dotted lines show -3dB level.

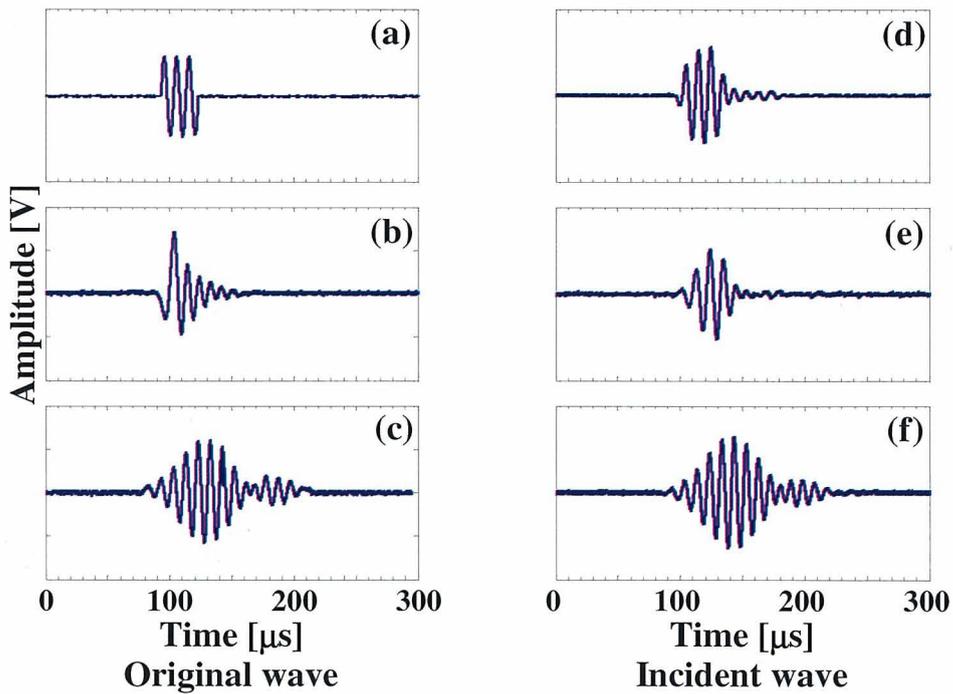


Fig. 3-8. Original waveforms of sonar sounds used: tone burst wave (a), bottlenose dolphin (b), and finless porpoise (c). Incident waveforms obtained by setting the transducers face to face: tone burst wave (d), bottlenose dolphin (e), and finless porpoise (f).

の反射特性のみを測定するためには、このようなシステムの周波数特性をキャンセルする必要がある。

3.6 金属球の形状関数の測定

本節では、実際に金属球からの反射波と入射波を測定し、形状関数を求め、理論値と比較し、方法と実験システムを確かめ、次章からの魚のTSスペクトルの測定に備える。

Fig. 3-9に実験の概要図と用いた金属球の写真を示す。実験は、縦4×横5×深さ3mの淡水の水槽で行った。入射波 (Fig. 3-8 (d), (e), (f)) は、送波器と受波器を対向させ、深さが1.4 m になるように設置して測定した。反射波は、送波器と受波器を極力接近させビーム軸がほぼ同じ方向になるように設置して測定した。金属球は、海水などの外的要因による散乱変化が少なく、計量魚群探知機の較正に用いられる直径が38.1 mm のTC球と、32.1 mm の銅球の2種類を用いた。

Fig. 3-5において、任意波形発生装置が発生する信号のフーリエ変換を $E_0(\omega)$ 、パワアンプ利得の周波数特性を $G_T(\omega)$ 、送波器の送波感度の周波数特性を $S(\omega)$ 、受波器の受波感度を $M(\omega)$ 、プリアンプ利得を $G_R(\omega)$ 、対象までの距離を r とすると、オシロスコープで観察される対象からの反射波のフーリエ変換 $E_r(\omega)$ は、

$$E_r(\omega) = E_0(\omega) G_T(\omega) S(\omega) D_T(\omega, \theta) \frac{e^{-2(jkr + r\alpha(\omega))}}{r^2} \Gamma(\omega) D_R(\omega, \theta) M(\omega) G_R(\omega) \quad (3.11)$$

となる。ここで、 $D_T(\omega, \theta)$ 、 $D_R(\omega, \theta)$ は、それぞれ送波器と対象までの相対的角度 θ と、角周波数 ω の関数としての送波器と受波器の指向性関数を表し、 α は、海水の吸収係数である。次に送波器と受波器を対向させ、器間距離が r_i になるように設置する。この時オシロスコープで観察される入射波のフーリエ変換は、

$$E_i(\omega) = E_0(\omega) G_T(\omega) S(\omega) D_T(\omega, 0) \frac{e^{-(jk_i r_i + r_i \alpha_i(\omega))}}{r_i} D_R(\omega, 0) M(\omega) G_R(\omega) \quad (3.12)$$

と表せる。ここで k_i は入射波測定時に使用する音波の波数、 α_i は入射波測定時の海水の吸収係数を表す。(3.11)、(3.12)式の比を取ると $E_0(\omega)$ 、 $G_T(\omega)$ 、 $S(\omega)$ 、 $M(\omega)$ 、 $G_R(\omega)$ が消去され、

$$\frac{E_r(\omega)}{E_i(\omega)} = \frac{D_T(\omega, \theta) \frac{e^{-2(jkr + r\alpha(\omega))}}{r^2} \Gamma(\omega) D_R(\omega, \theta)}{D_T(\omega, 0) \frac{e^{-(jk_i r_i + r_i \alpha_i(\omega))}}{r_i} D_R(\omega, 0)} \quad (3.13)$$

となる。水槽実験においては、送波器と受波器の正面に対象を設置できるので、送波、受波の指向性関数は1とみなせる。また、測定は淡水水槽で行ったため吸収係数の項は1となる。したがって、この式を散乱振幅 $\Gamma(\omega)$ について整理すると、

$$\Gamma(\omega) = \frac{E_r(\omega)}{E_i(\omega)} \frac{r^2}{r_i} e^{j(2kr - k_i r_i)} \quad (3.14)$$

となり、送受波システムの機器特性に依存しない対象の散乱振幅を測定できる。これが送受分離システムの

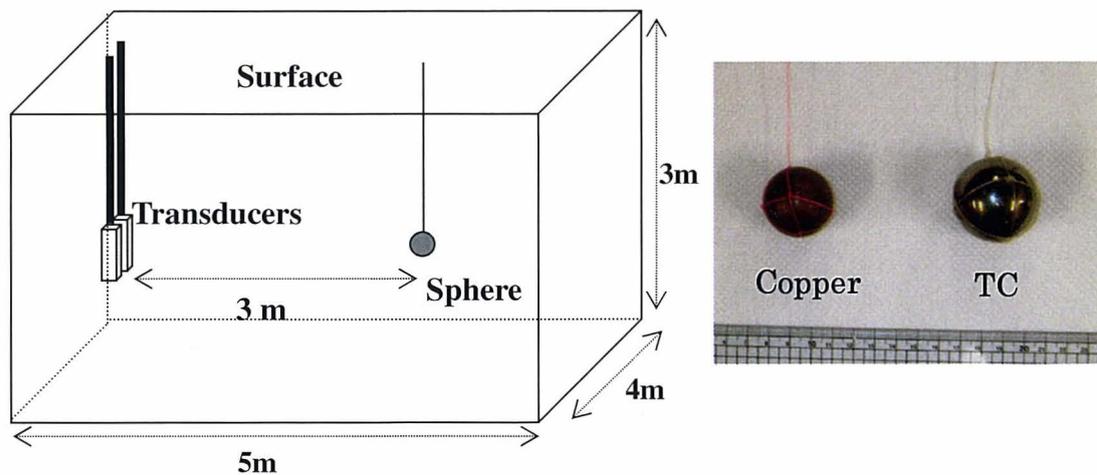
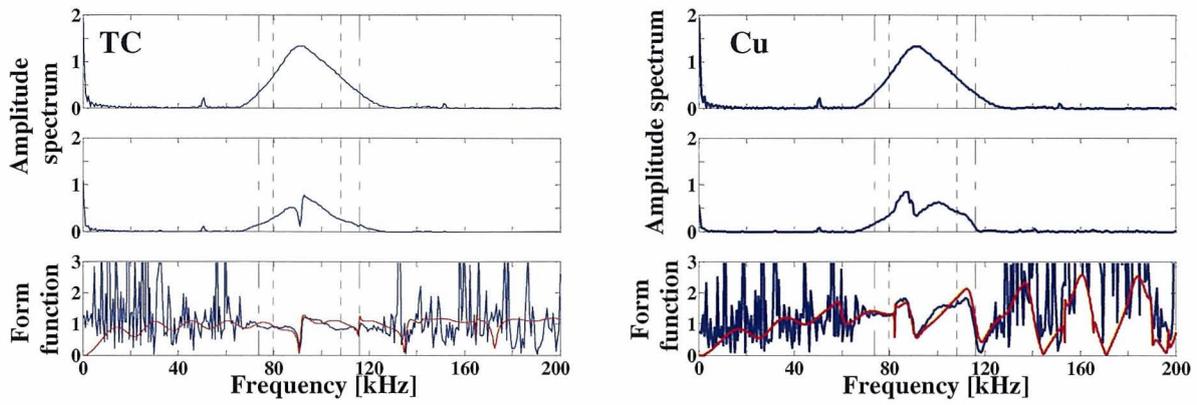
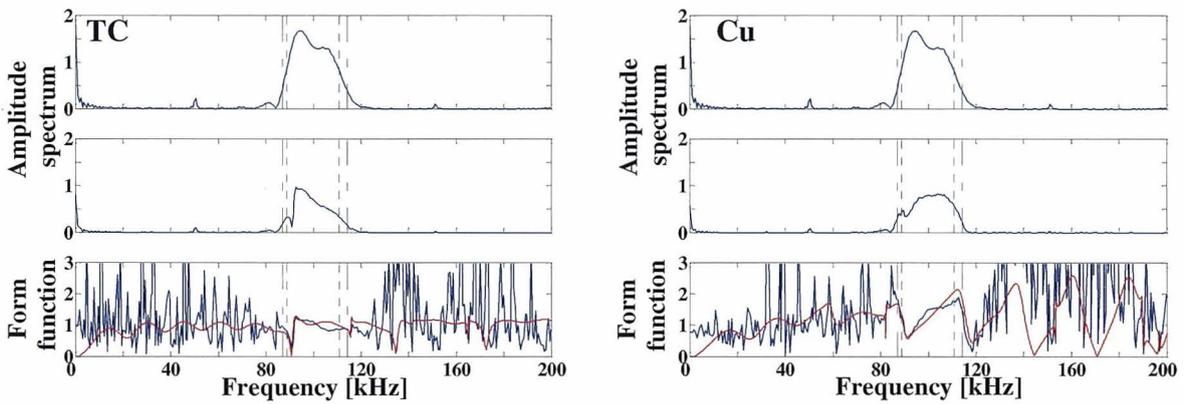


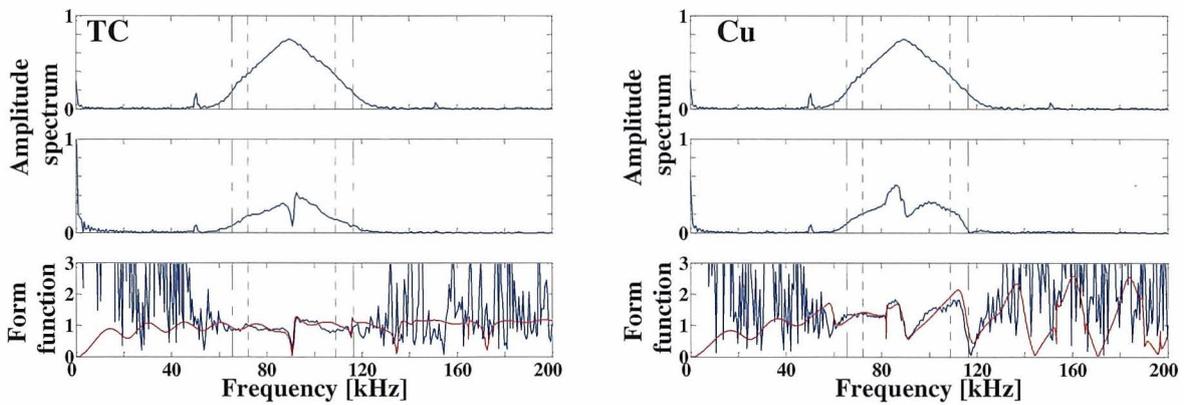
Fig. 3-9. Schematic diagram of measurement of reflected wave from spheres. Sphere used are from copper ($\phi=32.1\text{mm}$), and tungsten carbide ($\phi=38.1\text{mm}$).



(a) Tone burst wave



(b) Finless porpoise sound



(c) Bottlenose dolphin sound

Fig. 3-10. The form functions of tungsten carbide (left) and copper (right) spheres measured by tone burst wave (a), finless porpoise sound (b), and bottlenose dolphin sound (c). Amplitude spectrum of incident wave (upper), reflected wave (middle), and measured (lower, blue line) and theoretical (lower, red line) form functions. Dotted lines and dotted-dashed lines show -3dB and -6dB bandwidths of incident waves, respectively.

大きなメリットである。また、(3.4)式で示したとおり、散乱振幅 $\Gamma(\omega)$ を球の半径で規準化することで、形状関数を算出できる。

金属球の形状関数の理論値算出において、水中の音速は、反射波測定時の水温を測定し、Mackenzieの式を用いて音速を算出した(Foote, 1983)。反射波と入射波を、サンプリング周波数5 MHzで、100ピング測定した。

Fig. 3-10にハンドウイルカ、スナメリ、3サイクル短バースト波を用いて測定した、銅球、TC球の形状関数の理論値と実測値を示す。すべてのソナー音と2種の金属球で、入射波のスペクトルの-3 dB、-6 dB帯域内で、形状関数の理論値と実測値が良く一致している。一方、-6 dB帯域の外では、信号対雑音比(SN比)が低いため、理論値と実測値が一致しなくなる。

ソナー音ごとに理論との一致を評価するために、理論値と測定値のRMS誤差を調べる。測定した規準化散乱振幅と理論散乱振幅の絶対値を $|f_m(ka)|$ 、 $|f_t(ka)|$ とすると、測定値のRMS誤差 Δ は

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\beta - \alpha} \int_{\alpha}^{\beta} \{|f_m(ka)| - |f_t(ka)|\}^2 d(ka)} \quad (3.15)$$

で測ることができる(今泉ら, 2006)。ここで α と β

はそれぞれ各ソナー音の-3 dB帯域の下限と上限の ka を表す。Fig. 3-11に、3種類のソナー音に対して、TC球と銅球のRMS誤差 Δ の100ピングについての平均値と標準偏差を示す。図中にはソナー音の帯域幅も示した。誤差は、ソナー音や金属球種類に関係なくほぼ0.1であり、形状関数の幾何領域での平均的な値1.0に比べると小さく、高精度の測定ができています。

3.7 結 言

本章では、イルカのような広帯域音を用いるTSスペクトルの計測方法の理論と実際について述べ、散乱特性の明確な金属球によりその信頼性を確かめた。

3.2節では、対象の広帯域散乱特性の計測法としてスペクトル比法を提案した。次に、戻り反射に指向性がない金属球の散乱特性(形状関数)を求める理論計算の方法について3.3節で述べ、3.4節でスペクトル比法をコンピュータ・シミュレーションにより説明した。3.5節で用いた広帯域送受信システムの特徴と、使用したソナー音の特徴を述べた。3.6節では、実際にイルカのソナー音を用いて2種類の金属球の形状関数を測定し、理論値と比較したところ、よい一致を見た。

以上により、スペクトル比法と構築したシステムを

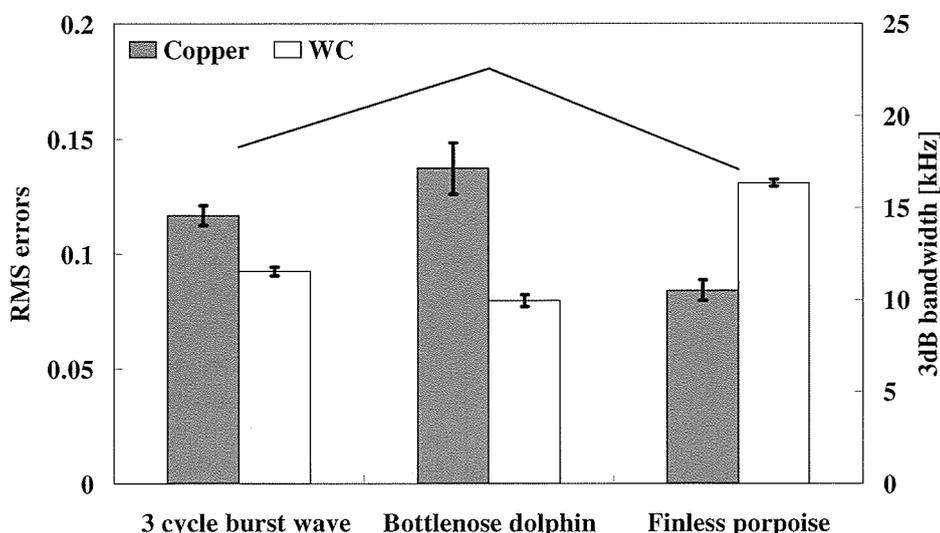


Fig. 3-11. RMS errors (average and standard deviation for 100 pings) of form functions for copper and tungsten carbide spheres using three types of sonar sound. The bold line shows -3 dB bandwidth of the incident wave.

用いて、対象の散乱特性である散乱振幅もしくは TS のスペクトルを精確に測定可能である。

第4章 魚の TS スペクトルの測定

4.1 緒言

前章では、イルカのソーナー音を送受できる広帯域送受信システムを構築して、対象の散乱振幅のスペクトルを精確に測定できることを、散乱特性が理論で明確にできる金属球を用いて確認した。そこで、本章では、この検証された方法とシステムを用いて、魚の散乱特性、すなわち反射強度の周波数特性 (TS スペクトル) を測定する。対象に関する情報の1つである魚の TS は、魚種、大きさ (魚体長)、姿勢角、成熟度、深度などにより変化することが知られている (Mukai and Foote, 1997; Mukai and Iida, 1996; Foote, 1980; Miyahohana *et al.*, 1990)。したがって、本研究では、魚の広帯域の TS、すなわち TS スペクトルを通じて、これらの情報をより精確に推定すること、特に魚種識別のための基礎情報を増やすことを目指す。

魚やプランクトンの TS スペクトルに関する研究も、いくつか行われている。Stanton らは、広帯域音波を用いてプランクトンの TS スペクトルを測定している (Stanton *et al.*, 1998)。また、Reeder らによって単一魚種については TS スペクトルの測定が行われているが、複数の魚種は測定されていない。彼らは、ニシン科の実験魚 (*Alosa pseudoharengus*) を CT スキャンと軟 X 線により 3 次元の形状を計測し、広帯域の音響データと比較している (Reeder *et al.*, 2004)。また、音響データと 2 種類の TS モデルと比較を行っており、連続的な広帯域の周波数特性を有した音響データは、モデルを利用した TS の推定に大きく寄与すると考察している。

本章では、まず 4.2 節で麻酔をかけ懸垂した複数の魚種の魚の TS スペクトルを、広帯域のイルカの音波を用いて水槽において測定し、イルカのソーナー音の有効性を確かめるとともに、魚の TS スペクトルの特性を検討する。次に 4.3 節で、海上において懸垂した生きた魚を、4.4 節でほぼ自然状態に近い状態の魚の TS スペクトルを計測する。さらに、4.5 節で自然状態の魚を、通常の魚群探知機と同時に探知し、イルカのソーナー音の高分解能性を確かめるとともに、次の段階としての自然状態 TS スペクトル計測へとつなげる。

4.2 水槽における魚の TS スペクトルの測定

魚の TS は、2.3 節で述べたように、魚種、大きさ、

姿勢、個体により大きく変動するのが知られている。そこで本節では、魚の姿勢を制御でき、測定対象の魚の大きさや、魚種が明確にわかる水槽において、広帯域のイルカのソーナー音を用いて TS スペクトルを測定する。麻酔をかけた魚をテグスで懸垂し、3種の魚の背方向 TS スペクトルを測定する。

また、魚の姿勢角を変化させて背方向 TS スペクトルを測定する。最後に TS スペクトル変動に影響を与える要因の検討を行った。

4.2.1 方法

日本近海で一般的な有鰾魚であるマアジ (*Trachurus japonicus*) 10尾、マダイ (*Pagrus major*) 5尾、マサバ (*Scomber japonicus*) 5尾の3魚種の TS スペクトルを測定した。各魚の体長 (尾叉長) と体幅を Table 4-1 に示す。各魚種内では、ほぼ同じ体長の個体を使用した。最大の尾叉長は、マダイの 305 mm であり、第3章で使用した TC 球の直径の10倍程度である。大きい魚でも魚体全体が送波ビームの中に入るように、送受波器から魚体の懸垂具までの距離を決めた。

Fig. 4-1 に、魚の TS スペクトル測定実験の方法と実験に使用した魚の写真を示す。淡水の水槽 (5 × 4 × 3 m) で、麻酔をかけた魚をテグスでビーム軸付近に懸垂した。用いた麻酔は、魚類・甲殻類用の麻酔 (田村製薬, FA100) を 5,000 倍に希釈して使用した。魚を懸垂する際、音響資源調査で一番重要な魚の背方向 TS を測定するために、魚が横向きになるよう懸垂し、送波、受波のビームの開きを考慮して、魚までの距離を 3 m 以上離して、測定を行った。用いたソーナー音は、前章とおなじハンドウイルカ、スナメリ、短パースト波の3種類である。各ソーナー音で 100 ピング (全体で 50 s) の反射波を測定し、振幅スペクトルを求め、前章で示した (3.3) 式と (3.14) 式を用いて TS スペクトルを算出した。測定の直前に、TC 球を用いてビーム軸位置を探り、そこに魚体があるように位置調整した。淡水水槽なので、吸収係数 α は無視でき、測定対象を正面に設置できるので、送波と受波の指向性関数 $D_T(\omega, \phi)$ 、 $D_R(\omega, \phi)$ は、1 とみなせる。受信信号はサンプリング周波数 5 MHz でデジタル信号とした。

麻酔をかけた1尾のマダイの姿勢角を変え、音波の入射角の違いによる TS スペクトルの変化を測定した。Fig. 4-2 に姿勢角の定義を示す。魚体の体軸に対して音波が垂直に入射する場合を 0° とし、頭が下がっている状態をマイナス、頭が上がっている状態をプラスとして、 10° おきに $\pm 180^\circ$ の TS スペクトルを 100

Table 4-1. The fork length and body breadth of fish used in the experiment. The averages value and standard deviations, were calculated for each species.

Species name	Sample no.	Fork length [mm]	Body breadth [mm]	Avg. fork length [mm] (SD)	Avg. body breadth [mm] (SD)
Horse mackerel	1	220	31	207.6 (3.0)	28.8 (0.4)
	2	203	28		
	3	197	27		
	4	208	30		
	5	225	30		
	6	196	27		
	7	207	28		
	8	204	29		
	9	201	29		
	10	215	29		
Sea bream	1	300	46	296.2 (4.7)	45.4 (0.9)
	2	305	48		
	3	285	43		
	4	285	44		
	5	306	46		
Chub mackerel	1	252	41	256.0 (5.1)	41.4 (1.2)
	2	254	43		
	3	250	38		
	4	276	45		
	5	248	40		

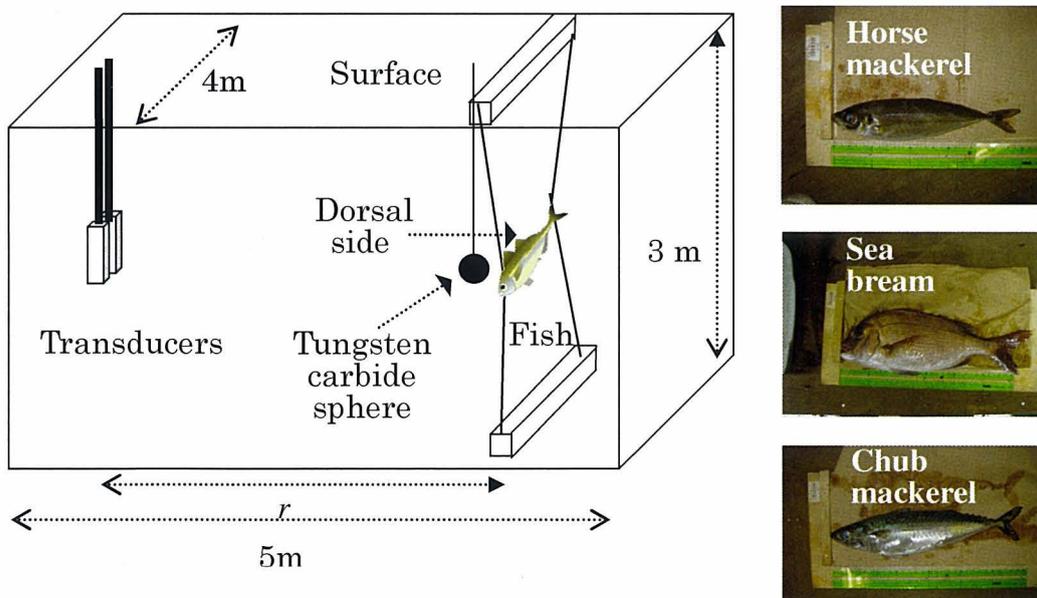


Fig. 4-1. Measurement system of fish TS spectra in tank (left side). Three 3 species of fish are used in the experiment; horse mackerel, sea bream, and chub mackerel (right side).

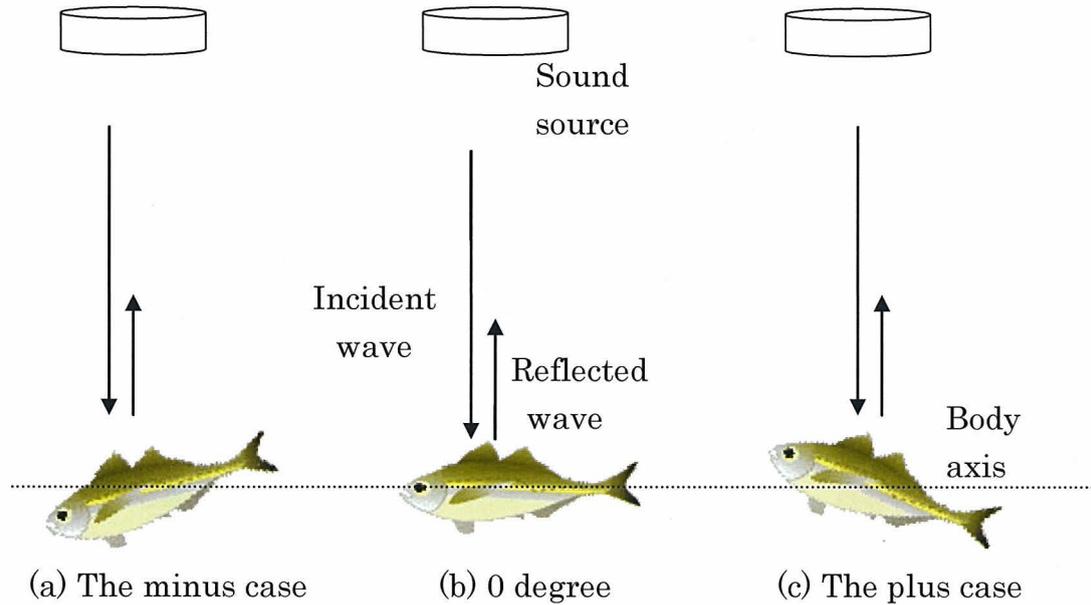


Fig. 4-2. The definition of fish orientation. The sound wave is perpendicular to the body axis of the fish (b), with minus degrees for the fish tail-on (a), and plus degrees for the fish head-on (c).

ピング測定した。

4.2.2 結果と検討

Fig. 4-3に、代表として一番広帯域の特性を有したハンドウイルカのソーナー音を用いて測定した100ピング分の3魚種のTSスペクトルを示す。他のソーナー音を用いても、各ソーナー音の入射波の-6 dB帯域内では、TSスペクトルは、ほぼ同じ値を示した。100ピング(50s)の間に麻酔が効いていたほぼすべての魚では、TSスペクトルの変動はほとんど無かった。しかし、2尾(アジH-5, マダイC-5)が途中で麻酔から覚め、激しく動き出したため、TSスペクトルが変動した。そこで、麻酔から覚める前を平均したTSスペクトルをFig. 4-4に示す。結果の平均TSスペクトルは、体長がほぼ等しいにもかかわらず、同じ魚種内でもかなり個体差があり、魚種毎の特徴はつかめない。

これらの変動が一般的なものであるかを、過去のデータと比較して検討する。Fig. 4-5に、周波数70 kHzと100 kHzでのTS値を体長で規準化した、規準化TS(TS_{cm})を示す。規準化TSは、魚のTSが体長の2乗に比例するとした簡易モデルの係数であり、魚体のcm単位での尾又長を L とすると、

$$TS_{cm} = TS - 20\log L \quad (4.1)$$

と表される(Miyanohana *et al.*,1990; Furusawa,

1988)。図のように今回の結果は、一般的な有鰐魚の背方向平均TSの規準化TSの値-66.0dB付近の値(Miyanohana *et al.*,1990; Maclellan and Simmonds, 1992)となり、妥当な結果である。1尾のマサバの規準化TSが70 kHzで約-83 dBと小さいが、これは、元のマサバのデータ(Fig. 4-4 C-4)でわかるように、75 kHzで丁度TSの値が落ち込んでいるためである。

次に、尾又長が285 mmのマダイについて、音波の入射角を変えて測定した100ピング分の結果をFig. 4-6に示す。姿勢角を変えるとTSスペクトルも大きく変動する。過去のデータと比較を行いやすいように、自然状態の魚の一般的な姿勢角と思われる $\pm 30^\circ$ で、魚が動いていない100ピング分を平均したTSスペクトルをFig. 4-7に示す。宮野鼻らは50, 70, 100, 200 kHzの4周波を用いて、複数の魚種について姿勢角によるTSの変動を測定した(Miyanohana *et al.*, 1990)。その結果のうち、本実験とほぼ同じ大きさのマダイについての100 kHzのTSの値を比較したところ、Fig. 4-8のように今回測定した結果と傾向が大体合った。宮野鼻らの実験においても、個体ごとに姿勢角によるTS値の大きな変動が確認されている。

ここで、姿勢角や魚種などの違いにより、TSスペクトルに特徴が現れるかを調べるために、TSスペクトルの変動要因を検討する。本実験で得られたTSスペクトルの変動要因は、魚種、魚体長、姿勢角、個体差があげられる。魚体長は魚種内でほぼ同じ体長を用

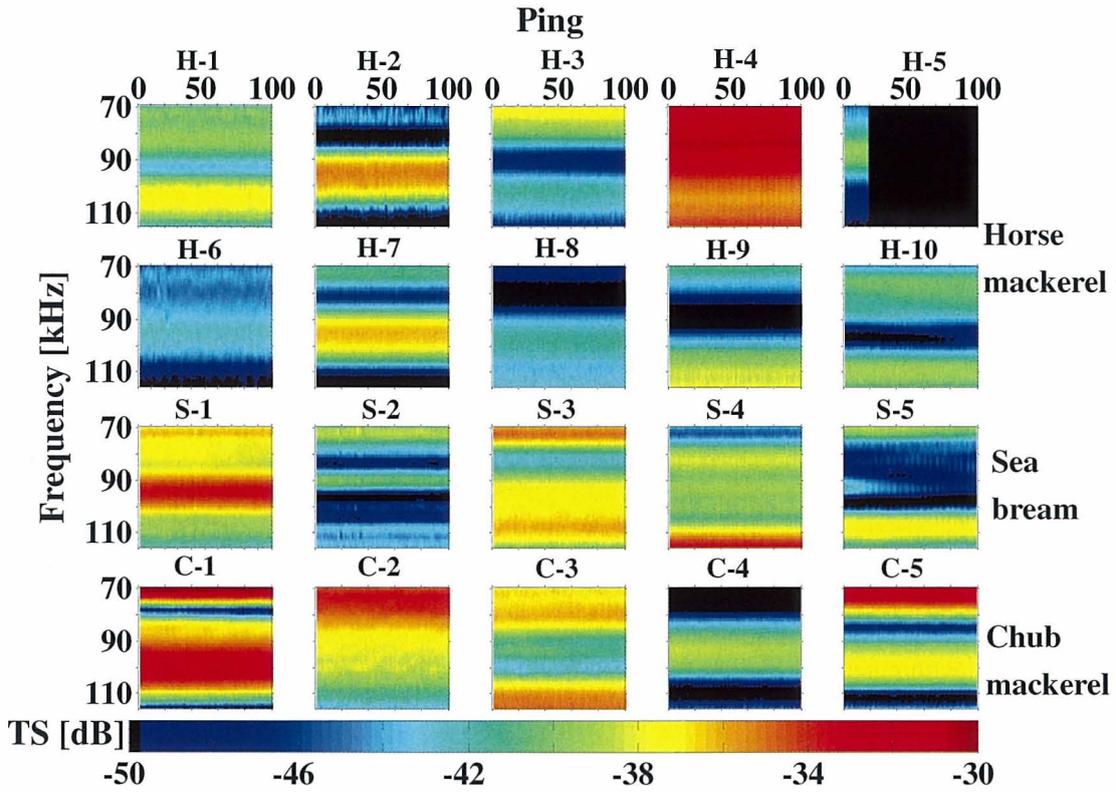


Fig. 4-3. Measured TS spectra in 100 pings (50 s) of horse mackerel (H-1 to H-10), sea bream (S-1 to S-5), and chub mackerel (C-1 to C-5). The x axis shows ping number, the y axis shows frequency, and the color shows TS value.

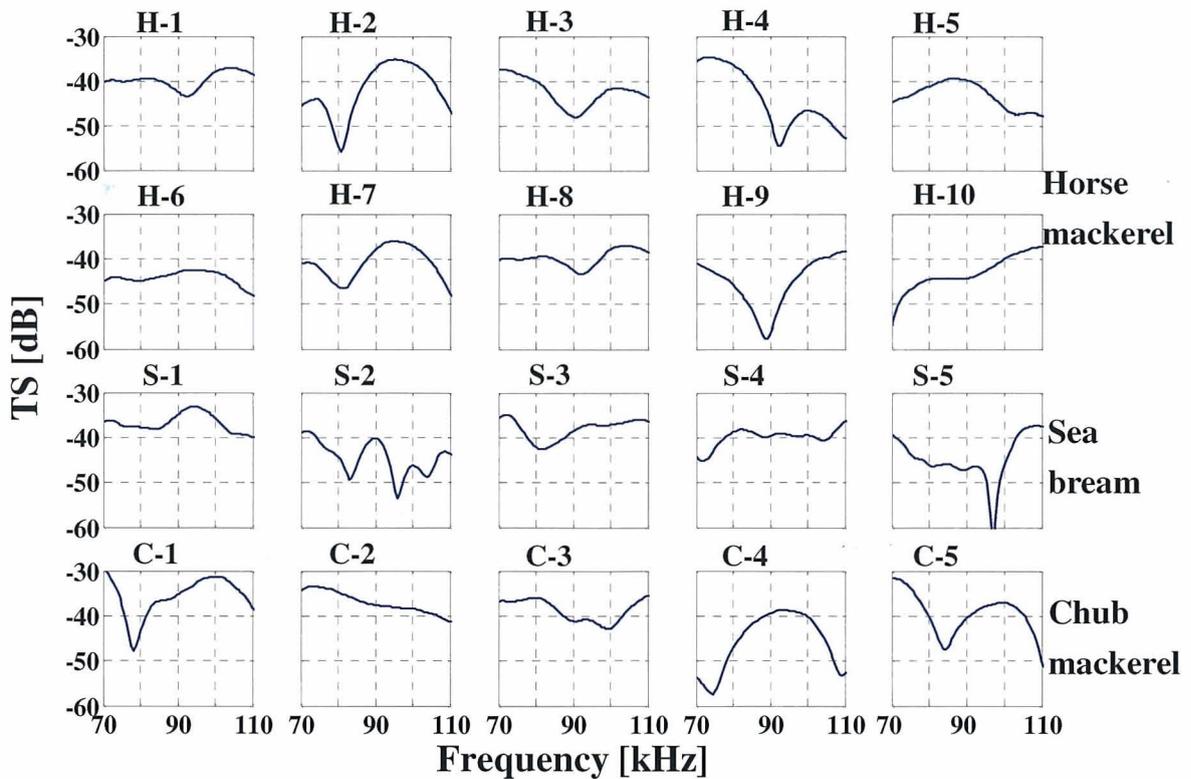


Fig. 4-4. Measured TS spectra of horse mackerel (H-1 to H-10), sea bream (S-1 to S-5), and chub mackerel (C-1 to C-5). The x axis shows frequency, the y axis shows TS value.

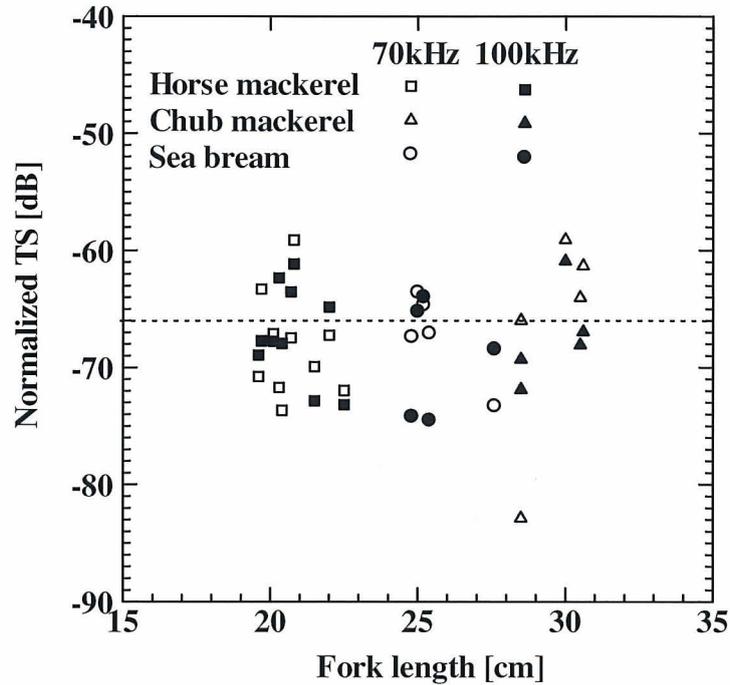


Fig. 4-5. Normalized TS at 70 kHz and 100 kHz for three species of fish. Dotted line at -66 dB shows standard value of normalized average TS.

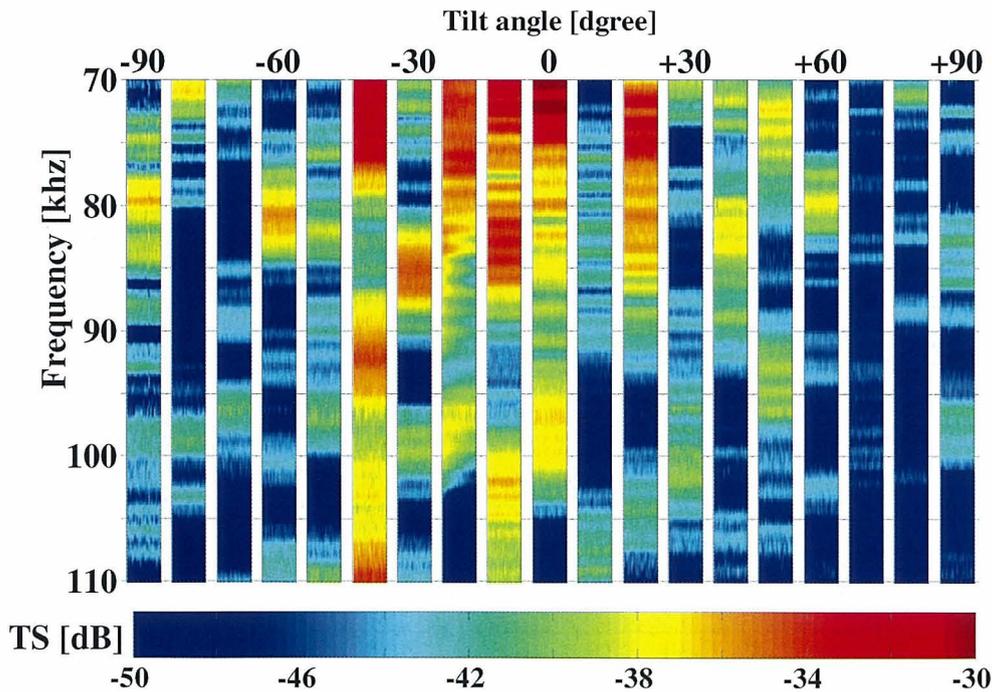


Fig. 4-6. Variation of TS spectra in 100 pings of a sea bream by changing tilt angle from +90 deg (right) to -90 deg (left). The x axis shows the tilt angle of the fish (sea bream), the y axis shows frequency, and the color shows TS value.

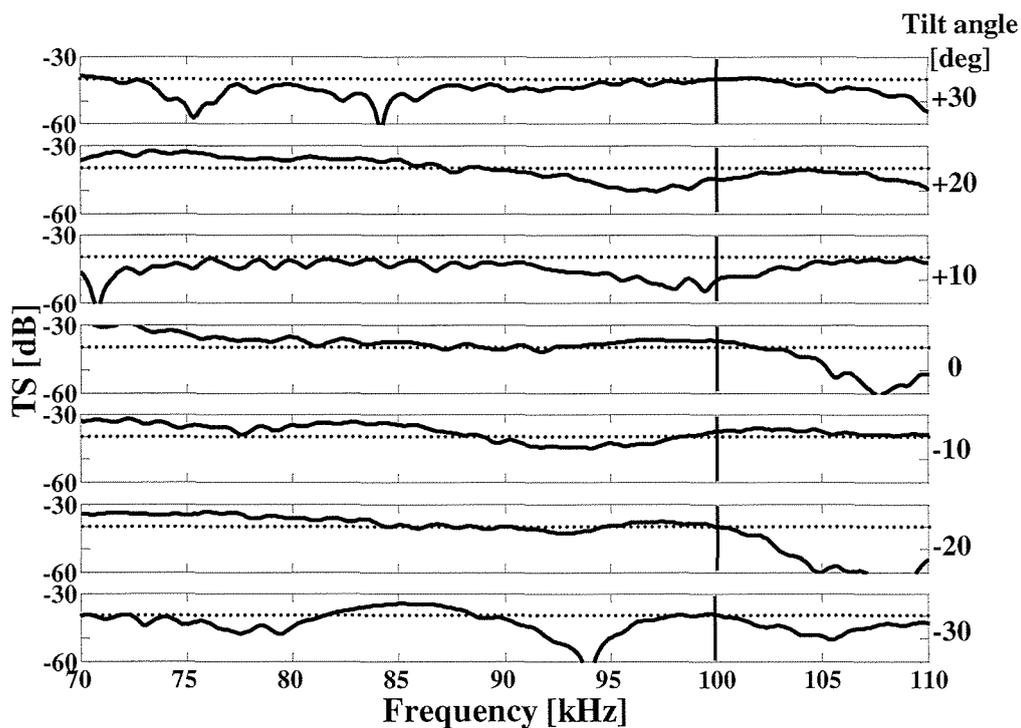


Fig. 4-7. Variation in TS spectra of a sea bream by changing the tilt angle from $+30^\circ$ (top) to -30° (bottom). For comparison purpose, -40 dB grid lines are shown. The TS values at 100 kHz shown by solid lines are used for Fig. 4-8.

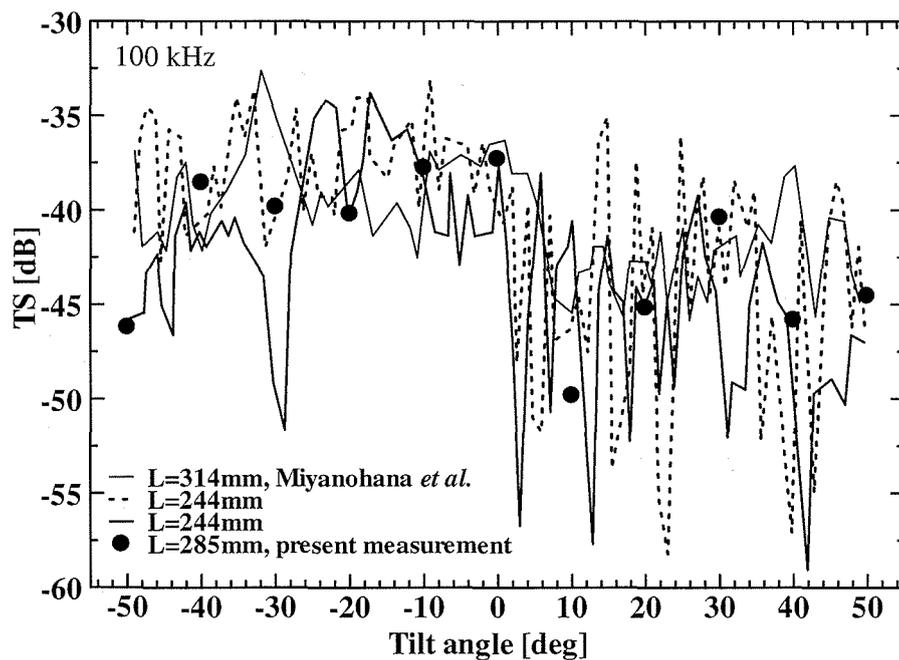


Fig. 4-8. Comparison of the dependence of TS on the tilt angle for sea bream of similar size at 100 kHz. Lines are from Miyanozana *et al* (1990), and the black circles denote the measured TS from this study.

いているので考慮せずに、姿勢角による変動と魚種毎の個体間変動を考える。今、TS スペクトルのデシベル値における標準偏差 SD を

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{TS_i(\omega) - \overline{TS(\omega)}\}^2}, \quad (4.2)$$

と定義する。ここで、 $TS_i(\omega)$ は、魚種の影響を考える場合、各実験魚の TS スペクトルを、姿勢変動による影響を考える場合は、ある姿勢時の TS スペクトルを表す。また、 $\overline{TS(\omega)}$ は、同一魚種の TS スペクトルの平均、または、姿勢角変動に対する TS スペクトルの平均である。 n は、魚種の影響を考える場合、各実験魚種の個体数（マアジ10、マダイ5、マサバ5個体）である。姿勢角変動の影響を考える場合、自然状態の魚の姿勢角に近い -30° から $+30^\circ$ までの 10° ごとの値を用いたので、 n は7である。Fig. 4-9に TS スペクトルの標準偏差を示す。マダイの TS スペクトルにおいて、97 kHz 付近に大きなピークがあるが、これは元のマダイ (Fig. 4-4 S-5) の97 kHz 付近の TS の値が著しく低いためである。マダイの姿勢角による変動の標準偏差において、71.0, 75.5, 84.5, 108.0kHz でピークが見られるが、これらも元の TS の値が著しく変動しているためである (Fig. 4-7)。逆に、姿勢角変動において、89 kHz の標準偏差の値が

低くなっており、これは元の TS の値が約 -40 dB だからである。これらの点を考慮に入れると、TS スペクトルの標準偏差の平均的な値は、4 dB 程度であり、姿勢角や魚種による著しい TS スペクトルの違いは見当たらない。つまり、姿勢変化によっても、魚種によっても TS スペクトルが大きく変動し、著しい違いが見られないことから、TS スペクトルの変動のみで、種の特定には至らないことを示唆している。

魚の TS スペクトルは、魚種、魚体長、姿勢角、個体差などのパラメータを含んだ関数である。特に自然状態では、魚の遊泳時の姿勢角変化が、連続の TS スペクトルの変動として得られると考えられる。また、本実験で得られた TS 値は既往の研究とほぼ一致しており、精確である。時間的に短く、広帯域の音波を用いて、自然状態の魚の TS スペクトルを測定できれば、密な群れから得られる群体エコーを単体エコーの集まりとして分解でき、自然状態の魚の TS 測定限界の緩和に繋がる。また TS スペクトルにより、魚体長推定、姿勢角推定の情報も同時に得られるため、魚種識別の基礎情報の増加に繋がると結論付けられる。

本節において、イルカの広帯域のソーナー音を用いて3魚種の TS スペクトルを実験的に測定した。ソーナー音を変えても、各ソーナー音の入射波の -6 dB 帯域内では、TS スペクトルは、同じ値を示した。ま

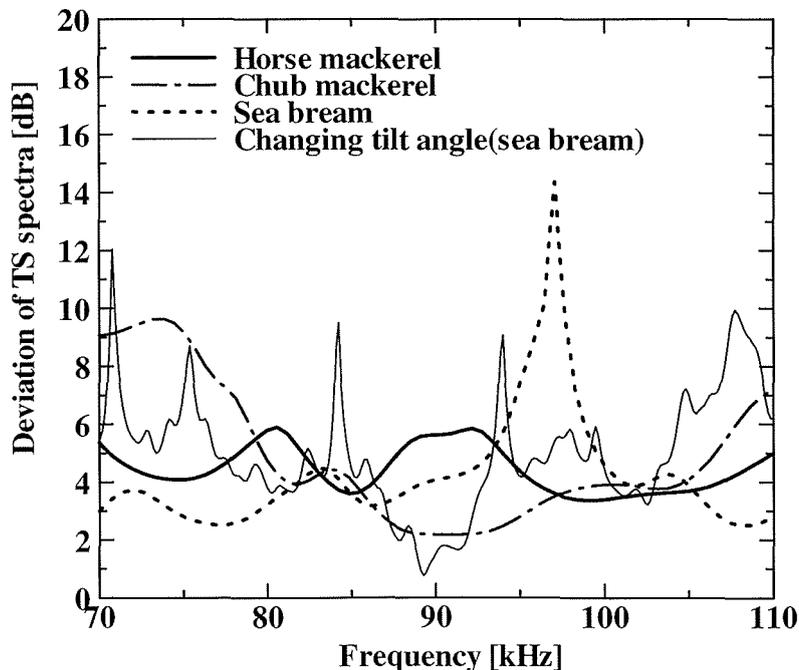


Fig. 4-9. Variation in TS spectra measured by the standard deviation for different individuals and tilt angles. The standard deviation for the tilt angle is calculated in 10° steps from $+30^\circ$ to -30° .

た、魚の TS スペクトルは、魚種、大きさ、姿勢角により大きく変動するが、測定結果は既往の研究とほぼ一致、または同じ傾向を示した。魚種、姿勢角による TS スペクトルの変動は、ほぼ同じ程度であることから、TS スペクトルのみでの魚種識別は難しいことが示された。しかしながら、魚の動きによる TS スペクトルの変動が得られ、連続的に TS スペクトルを得ることができれば、魚の姿勢変動による TS スペクトルの変動を得られることが示唆された。そこで次に、海上において魚の TS スペクトルを測定する。

4.3 海上における懸垂した魚のエコーstreng スの測定

前節で実際の魚の TS スペクトルを水槽で精確に測定した。自然状態の魚の TS スペクトルを連続的に得られれば、姿勢変動などの動きによる TS スペクトル変化を得られると考えられた。そこで、本節では、自然状態の魚の TS スペクトルを測定することを最終目的とし、その基礎段階として、麻酔をかけ懸垂した魚に対して海上で音波の送受波実験を行う。

前節までは淡水の水槽で実験を行ったが、本章では海洋で実験を行う。海洋は複雑な構造をしており、様々な種類の塩が溶解しており、波があり、流れがある。また、水温、深度、塩分濃度によって水中音速が異なり、音波伝播の課程においては、音波の吸収がおきる。海洋での音波の伝播損失は、拡散減衰と、吸収減衰によって支配されている。拡散減衰は、音源から音波が伝

播するにしたがい、幾何学的にそのエネルギーが減衰することを意味している。これに対して、吸収減衰は海水中に含まれる硫酸マグネシウム分子によるイオン緩和現象などが原因であるといわれ、エネルギーは距離に比例して減衰する。このため、伝播距離が長くなると、この吸収減衰による影響が無視できなくなる。

吸収減衰についての研究は、実験室、実海域において現在までに様々行われ、これらの検討結果から、200 kHz 以上の周波数では、温度による吸収減衰が支配的であり、10~200 kHz では、海水中の硫酸マグネシウムによる影響が加わることが判っている。本研究で用いるイルカの音波は200 kHz 未満で広帯域の音波である。そこで、海水の吸収減衰を考慮する必要がある。吸収減衰の算出方法は、一般に Schulkin and Marsh, Thorp, および Francois and Garrison の式がある。これらの値は互いに一致しない。許らは、海中における鉛直方向の音波の減衰を精確に調べ、鉛直方向では Francois and Garrison の式を用いて、全深度で平均化した吸収係数の利用を薦めている(許ら, 1990)。Fig. 4-10に Francois and Garrison の式を用いて算出した吸収係数を示す。Francois and Garrison の式は、周波数、深度(圧力)、水温、塩分濃度、イオン濃度の関数として表せる。これを用いて本研究では、広帯域の吸収係数を補正し、魚の TS スペクトル測定を試みる。

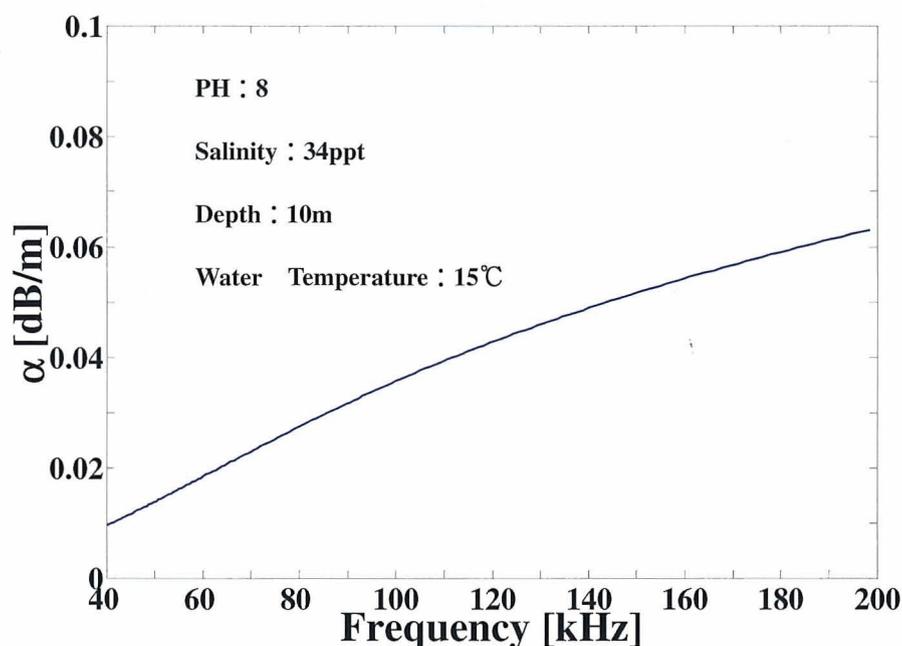


Fig. 4-10. Absorption of sea water calculated by Francois and Garrison equation.

4.3.1 方 法

本節では、麻酔をかけて懸垂した魚からの反射波を海上で測定した。実験は、東京海洋大学の実習艇「ひよどり」を用いて、千葉県館山湾沖で、2005年8月に行った。錨泊した船の舷側に送波器と受波器を設置した。Fig. 4-11に懸垂具を示す。塩化ビニルパイプとテグス、TC球、錘を組み合わせ、懸垂具を作成し、中央に魚体が来るように魚を懸垂した。また、魚の背方向TSを測定するために、背鰭に浮きをつけ魚の姿勢を制御した。魚は尾叉長が14.6 cmの麻酔をかけたマアジ (*Trachurus japonicus*) を使用し、ハンドウイルカ、スナメリ、短バースト波の3種類のソナー音を用いて測定を行った。用いたシステムは、第3章で用いたものと同じであり、サンプリング周波数を1 MHzで収録した。

水槽実験では、送受波器の正面に測定対象である金属球や、魚を設置でき、(3.13) 式の指向性関数は1とみなせたが、海上実験では対象がビーム内のどこにいないかわからない。本実験で用いた受波器はシングルビームのものなので、指向性関数を補正することは、何らかの方法を用いないと出来ない。そこで本節では、懸垂具に吊るしたTC球の形状関数を測定し、対象の

散乱特性を精確に得られているかを確認した上で、指向性関数を補正していない生のTSスペクトル((3.13) 式の $D_T(\omega, \theta) \Gamma_s(\omega) D_R(\omega, \theta)$ であり、エコーストレングススペクトルと呼ぶ) を計測した。

4.3.2 結果と検討

Fig. 4-12にハンドウイルカのソナー音を用いて得られたエコーグラムを示す。ハンドウイルカのソナー音の継続時間は、約30 μ sと時間的に非常に短いので、浮き、パイプ、TC球、魚体のすべてのエコーを分離できているのが確認できる。また、深度方向に上下しており、船の揺れの影響を受けている。送受波器と魚体の相対的位置が正確にわからないので、このエコーグラムの中でTC球の反射波信号の電圧が最大値をとる時が、送受波ビームの主軸付近に懸垂具全体があると仮定し、TC球と同時に測定された魚からの1ピング分の反射波を解析した。得られたTC球と魚からのエコーを切り出し、海水の吸収係数による補正を行った。補正を行った反射波と、前章で測定した入射波を用いてTC球の形状関数と、魚のエコーストレングススペクトルを求めた。本実験では、TC球までの距離が水槽実験の時よりも離れているため、良い

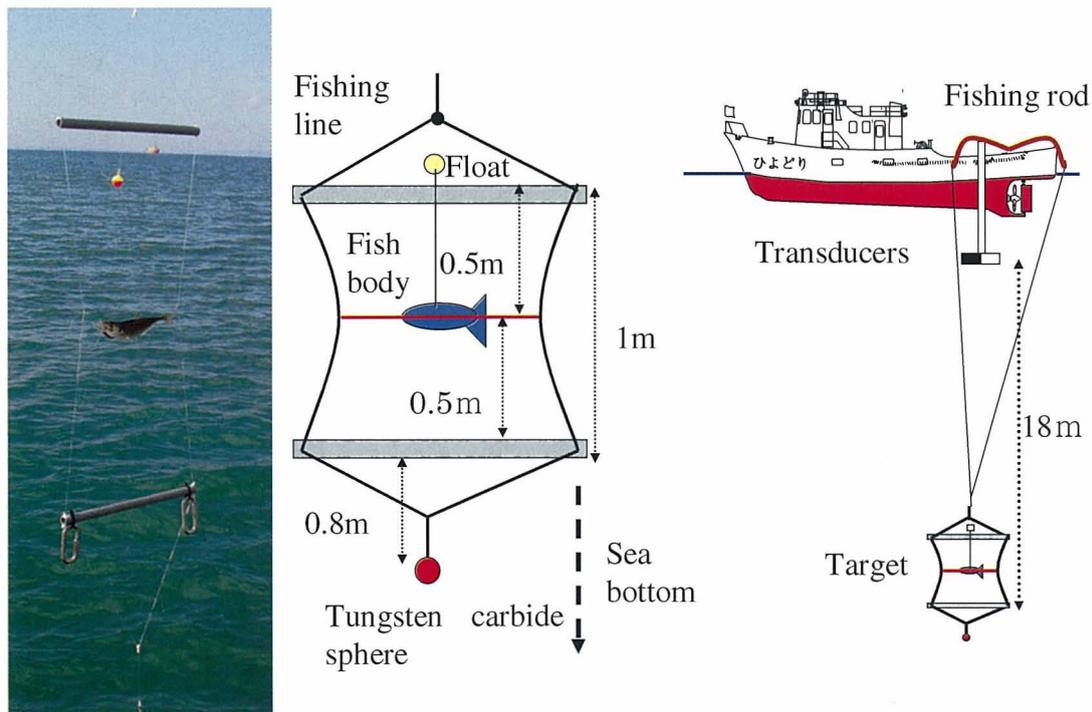


Fig. 4-11. Schematic diagrams of measurement set up of tethered fish at sea.

SN比を得られなかった。しかし、TC球の反射波信号の電圧が最大値の時に得られた形状関数は、理論値と一致し、対象の精確な散乱特性が得られるのを確認した。

Fig. 4-13に3種類のソーナー音を用いて測定したエコーストレンジスペクトルを、(4.1)式を用い

てマアジの体長で基準化した規準化TSを示す。比較を行いやすいように、一般的な有鰭魚の姿勢平均基準化TSの値 -66 dBを点線で示した。短バースト波を用いて測定した時の結果は、 100 kHzの規準化TSの値が、一般的な有鰭魚の規準化TSの最大値である約 -60 dBであり、妥当な値を得た。しかし、短バース

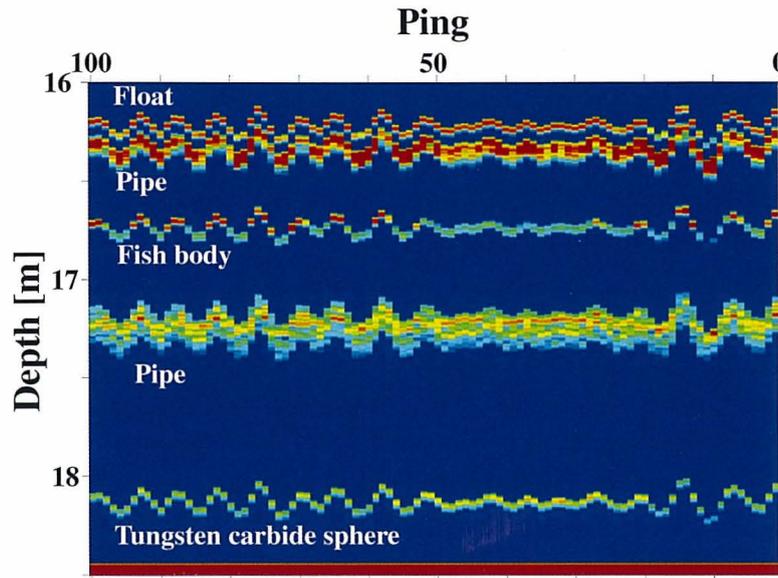


Fig. 4-12. The echogram of the targets using bottlenose dolphin sonar signal. The x axis shows ping number (50 s), y axis shows depth, and color shows intensity of the target.

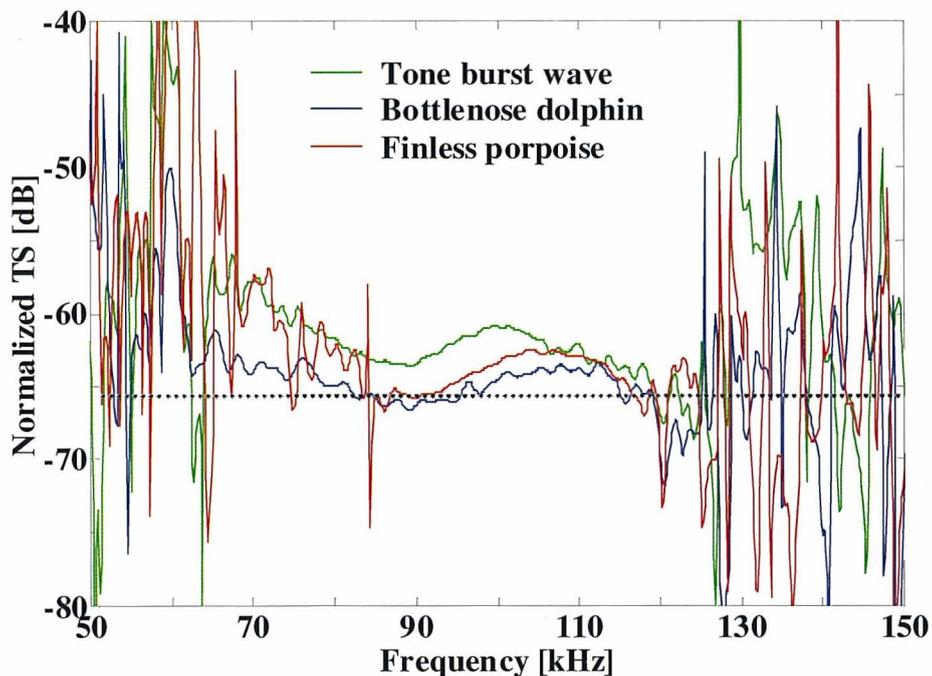


Fig. 4-13. Normalized TS of the suspended horse mackerel (fork length =14.6cm) using 3 sonar signals at sea. The dotted line shows -66 dB.

ト波を用いた時と、ハンドウイルカ、スナメリのソーナー音を用いて測定した規準化 TS を比較すると、100 kHz の時に約 5.0 dB 異なっている。同一個体の魚を測定しているにもかかわらず、3 種類のソーナー音で得られた規準化 TS の値が異なるが、同じ懸垂具に吊るした TC 球の形状関数は、理論値とよくあっていることから、ハンドウイルカ、スナメリのソーナー音を用いて測定した時に、懸垂具が流れの影響を受け、魚の姿勢が変化し、エコストレンジスペクトルに影響したと考えられる。

以上、本節では海水の吸収係数を補正し、麻酔をかけ懸垂具に吊るした魚のエコストレンジスペクトルを測定した。この時、懸垂具の一部である TC 球の形状関数を測定し、対象の散乱特性を正確に得られているのを確認した。しかし、エコストレンジスペクトルは、指向性関数の影響を含んでおり、指向性関数補正を行わなければ、流れのある海で、自然状態つまりは姿勢変化や動きを伴った魚の正確な TS スペクトル測定は困難である。そこで、次節で TC 球を利用して指向性関数の補正を試みる。

4.4 準自然状態の魚の TS スペクトルの測定

自然状態の魚の TS スペクトルを連続で正確に測定するためには、指向性関数を補正する必要がある。そこで本節では、TC 球を利用して、指向性関数補正を試み、魚の TS スペクトルを測定する。第 3 章で述べたとおり、金属球は、複雑な鰓の構造を持った魚と違い、反射に指向性がなく、その散乱特性が理論的に求められる。本節では、このメリットを利用、つまり TC 球の理論散乱特性を用いて指向性関数を補正し、魚の TS スペクトルを連続で測定する。

4.4.1 方法

実験は、4.3 節と同様に、実習艇「ひよどり」を錨泊させ、船の舷側に送波器と受波器を設置し、千葉県館山湾沖で、2006 年 8 月に行った。Fig. 4-14 に懸垂具を示す。本実験では、より自然状態の魚に近い TS スペクトルを得るために、生きたままの魚を懸垂した。魚の上下に直径 38.1 mm の TC 球を 2 個懸垂した。TC 球が吊るしてあるテグスを鉛直テグスとし、2 つの TC 球の中間に枝状、もしくは手網状に魚を吊るすためのテグスを結んだ。魚は生きたままとし、すばやく懸垂し、ほぼ背方向から音波が当たるようにした。送受総合のビーム幅と、それを用いたビームの開きの直径（ビーム直径）は、上の球までの距離が 17.3 m の場合、ビーム直径は、50 kHz で 4.8 m、130 kHz で 1.9 m となり、懸垂具が送受波器の真下に下りてい

れば、対象の球と魚は、ビームの中心付近にある。また、釣り糸から魚体中心までは約 40 cm であるので、TC 球と魚の方向は、ほぼ同じとみなせる。実験に用いた魚は、マアジ 1 尾とイサキ (*Parapristipoma trilineatum*) 2 尾である。実験魚の尾叉長を Table 4-2 に示す。この実験で得られた魚の TS は、ほぼ自然状態に近いので、準自然状態と呼ぶ。

懸垂した魚は送受波のビームの中を泳ぐため、魚の指向性関数を上下に吊るした TC 球のどちらかを用いて補正する。今、魚体中心までの距離を r_f 、魚の散乱振幅を $\Gamma_f(\omega, \theta_f)$ とする。ここで θ_f は魚の姿勢角を表す。これらをそれぞれ (3.11) 式に代入し、得られる反射波のフーリエ変換を $E_{rf}(\omega, \theta_f)$ とする。同様に TC 球までの距離を r_s 、散乱振幅を $\Gamma_s(\omega)$ 、TC 球からの反射波のフーリエ変換を $E_{rs}(\omega, \theta)$ とする。これらの 2 つの反射波のフーリエ変換の比 R_{fs} をとると、球と、魚の方向がほぼ同じとみなせれば、指向性関数をキャンセル出来る。具体的には、

$$\begin{aligned} R_{fs} &= \frac{E_{rf}(\omega, \theta_f)}{E_{rs}(\omega, \theta)} = \frac{\Gamma_f(\omega, \theta_f) r_f^{-2} \exp[-2r_f \alpha(\omega) + j\omega r_f / c]}{\Gamma_s(\omega) r_s^{-2} \exp[-2r_s \alpha(\omega) + j\omega r_s / c]} \\ &\equiv \frac{\Gamma(\omega, \theta_f)}{\Gamma_s(\omega)} \exp[j\omega / c (r_f - r_s)] \end{aligned} \quad (4.3)$$

と表せる。この式の分母に TC 球の計算で求めた理論値を適用することで、指向性関数をキャンセルし、魚の TS スペクトルを求められる。また、(4.3) 式において、魚と球はほぼ同じ深さにあるとみなせるので、海水の吸収係数もキャンセルできる。魚の細かい動きを測定するために、ソーナー音の送波間隔を 0.2 s とし、サンプリング周波数を 5 MHz で 500 ピング (10 s) の測定を行った。

4.4.2 結果と検討

Fig. 4-15 にハンドウイルカのソーナー音を用いて準自然状態のイサキからの反射波を測定したエコーグラムを示す。TC 球からのエコーは、上下で同じ動きをしており、4.3 節と同じように船の揺れによる影響がある。一方でイサキからのエコーは深度方向に上下に激しく 40 cm 程度を動いており、枝縄の長さとも一致している。得られたイサキのエコーと上の TC 球のエコーを利用して、準自然状態の魚の TS スペクトルを求めた。上下の TC 球からのエコーレベルは同じであり、それらを用いて求めたそれぞれの TC 球の形状関数は理論値と一致した。

Fig. 4-16 にハンドウイルカのソーナー音を用いて求めたイサキの TS スペクトルを示す。92 kHz 付近に連続的に TS の値が著しく低くなっている部分があ

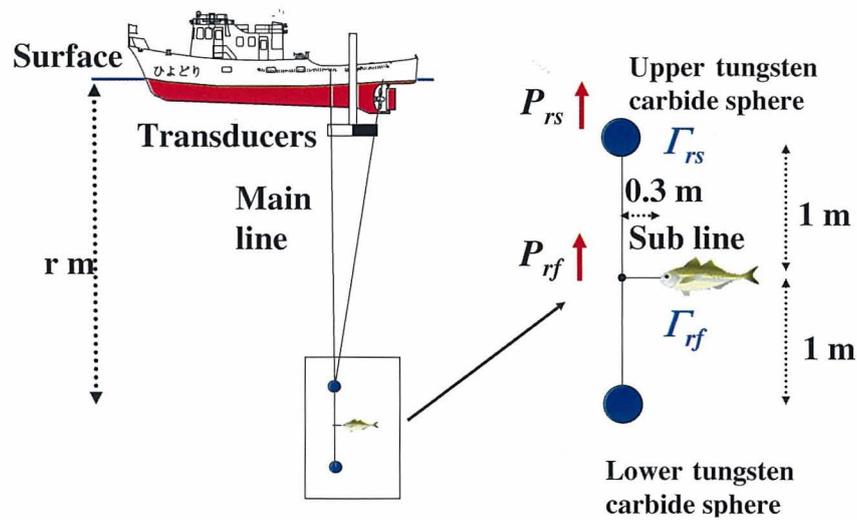


Fig. 4-14. Setup for TS spectra measurement of tethered swimming fish at sea. " P_{rs} " and " P_{rf} " show the amplitude spectra of sphere and fish, " Γ_{rs} " and " Γ_{rf} " show scattering amplitude of sphere and fish, respectively.

Table 4.2. Maximum, average, and normalized TS for three species of fish at 70 and 100 kHz.

Sample		Horse mackerel	Chicken grunt	Chicken grunt
Fork length [cm]		17.5	14.5	15.2
70 kHz	Max. TS [dB]	-35.4	-34.3	-30.9
	Avg. TS [dB]	-50.9	-45.9	-52.8
	TS _{cm} [dB]	-75.8	-69.2	-76.4
100 kHz	Max. TS [dB]	-36.4	-35.2	-35.5
	Avg. TS [dB]	-52.3	-46.9	-52.1
	TS _{cm} [dB]	-77.2	-70.2	-75.7

るが、これは補正に用いた TC 球が約92 kHz で共振特性を持つためである。また、TS スペクトルは、時間（ピング）と共に大きく変動している。この原因を考察するために、Fig. 4-15、4-16の180ピングから205ピング（約5 s）の部分を拡大した図を Fig. 4-17に示す。まずエコーグラムでは、ほとんどエコーレベルは代わらず、4秒間に水深方向に20 cm 程度動いている。このエコーグラムでの水深方向は、送受波器との相対距離を表しており、単純に水深方向のみに移動しているわけではない。次に TS スペクトルでは、この4秒間に最大で10 dB 程度変動している。エコーレベルはほぼ同じであるにもかかわらず、そのエコーの成分である TS スペクトルは変動している。他の部分でも同じ現象が確認できた。つまりこれは魚の動きによる TS スペクトルの変動であると結び付けられる。魚が動くことで姿勢角が変化し、TS スペクトルに変動が現れている。

得られた3尾の魚の TS スペクトルで、70 kHz と100 kHz 時の500ピング分の最大 TS、平均 TS、規準化 TS を Table 4-2にまとめる。規準化 TS は、平均 TS の値と尾又長を用いて求めた。得られた規準化 TS は、一般的な姿勢平均の規準化 TS 値 -66.0 dB よりも小さい結果となったが、これらは魚を懸垂したことで、魚が激しく暴れ、もとの TS の値が低かったためと考えられる。また、測定された TS 値の最大を

用いて規準化 TS を求めた場合は、一般的な有鰾魚の最大規準化 TS の値、-60 dB に近くなり、妥当な値を得られた。

このような姿勢変動を伴った自然状態の TS スペクトルを連続的に得ることができれば、魚の遊泳時の情報増加に繋がる。貞安らは、シミュレーションによりスケトウダラの遊泳による魚体の屈折運動が TS に与える影響を示している（貞安ら、2005）。この研究の中で、魚の屈折運動による TS 変動よりも遊泳姿勢角による TS の変動が大きいことが示されている。

姿勢角変動を含んだ自然状態の魚の TS スペクトルの変動パターンを分類できれば、TS スペクトルと、エコーグラムから魚種識別のための基礎情報になりうる。しかしながら、今回用いた方法では、TC 球の共振周波数付近における TS 値が精確には求められない。金属球は、反射に指向性を有さないため、球と対象の方向が同じとみなせれば、指向性関数の補正に使用できる。しかし、用いる音波の周波数、球の径により、指向性関数を補正不可能な点があるのも事実である。また、常に金属球を吊るし魚からの反射波測定を行うのは、実用的でない。精確に連続の周波数での TS スペクトルを求める上では、指向性関数補正が1つの課題である。

以上本節で、TC 球の散乱特性を利用して指向性関数を補正して、活きた魚の TS スペクトルを測定した。

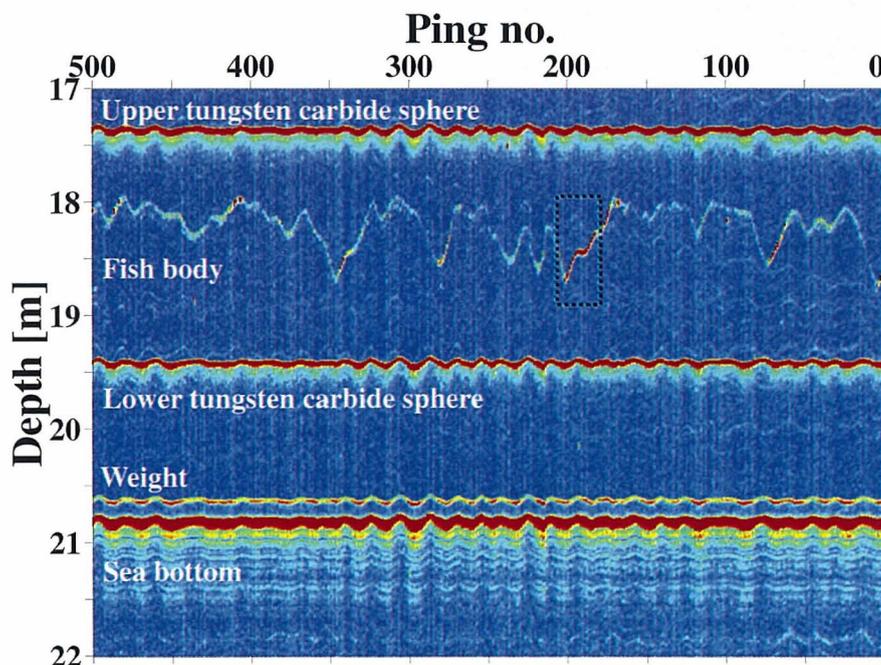


Fig. 4-15. The echogram showing two TC spheres and grunt fish.

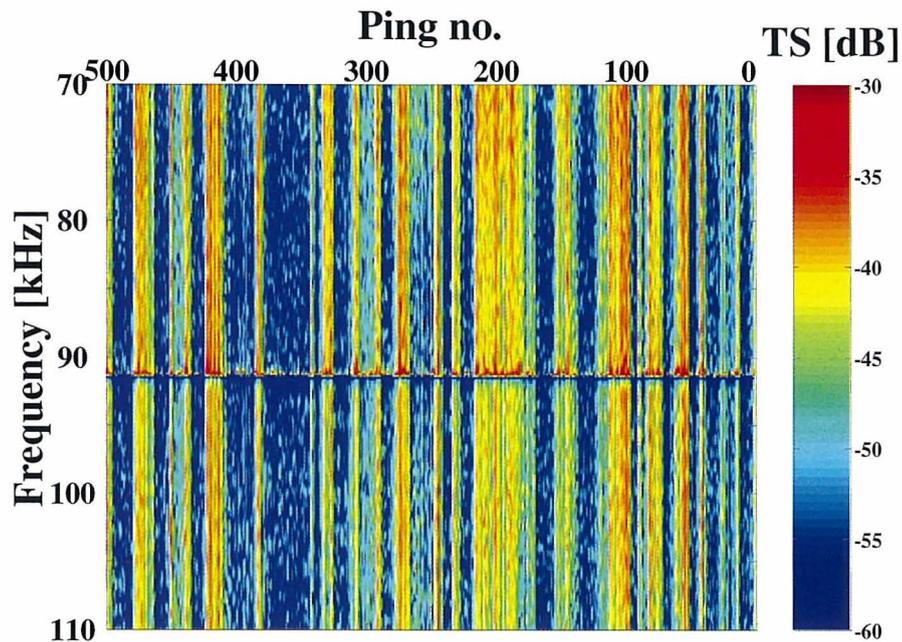


Fig. 4-16. The TS spectrum of chicken grunt are compensated by TC sphere. The x axis shows ping (100 s), the y axis shows frequency, and color shows TS value.

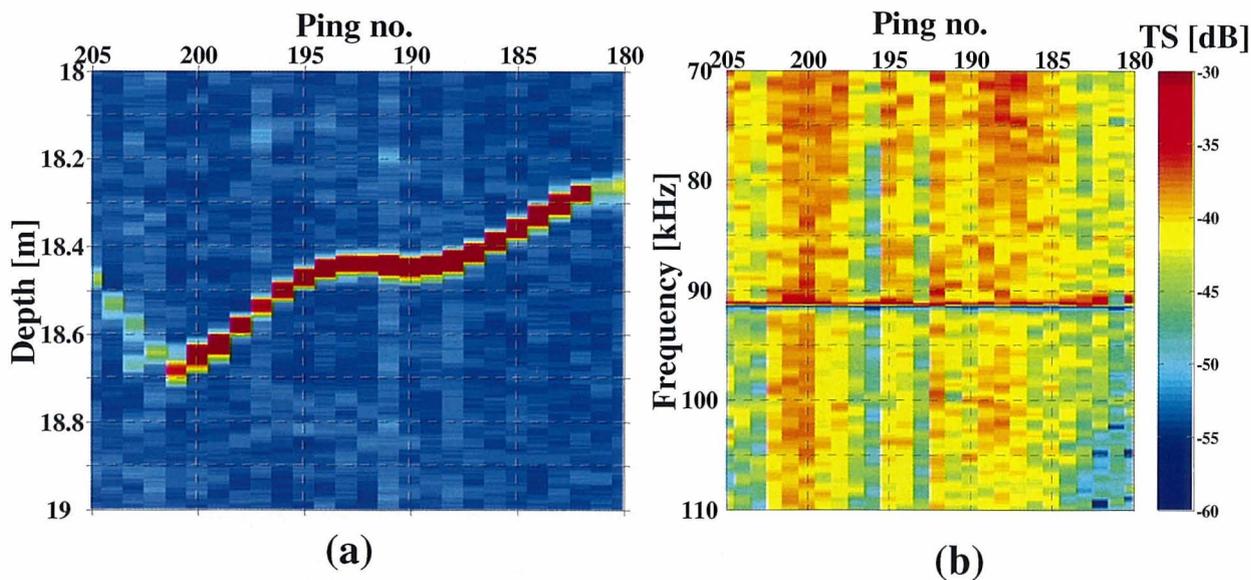


Fig. 4-17. The TS spectrum of chicken grunt compensated by the scattering amplitude of TC sphere in 180 ping to 205 ping (at dotted line Fig. 4-15). The echogram is (a), TS spectrum is (b).

しかし、TC球での補正は限界があるために、他の方法を用いて指向性関数を補正する必要がある。

4.5 自然状態の魚のエコーストレングスの測定

イルカのソーナー音の継続時間は、一般的な魚群探知機の1/10以下である。このような音波を魚群探知器に適用できれば、距離分解能の向上に繋がり、自然状態TS測定の限界点緩和に繋がると考えられる。そこで、実際に適用できるかを確かめるために、自然状態の魚の群れからの反射波を測定し、イルカのソーナー音が有す高い距離分解能を確認する。本節では、イルカのソーナー音を用いて、自然状態の魚からのエコーストレングススペクトルを測定した。実験は、4.3、4.4節と同様に、東京海洋大学の実習艇「ひよどり」を用いて、千葉県館山湾沖で、2005年8月に行った。船の舷側に送波器と受波器を設置し、船を1-2 ktで走らせ、魚群を探した。また、船に装備されている魚群探知機（FURUNO FCV-582, 200 kHz パルス幅 1 ms）と、本システムを同時動かし、自然状態の魚のエコーを取得し、比較を行った。本実験では、ハンドウイルカよりもSN比のよいスナメリのソーナー音を使用し、0.5 sおきに音波を送波した。

Fig. 4-18に自然状態の魚のエコーグラムを示す。スナメリの音波は、継続時間が $150\mu\text{s}$ とハンドウイルカのものよりは長いが、一般的な魚群探知機よりも短いため、高い距離分解能を得られている。この4つの魚（対象）は、魚体間距離が40 cm程度のやや密集した群れである。得られたエコー1つ1つに対して、エコーストレングススペクトルを計測した。具体的に

は、指向性関数と、魚の散乱振幅の積をデシベルで表し、

$$RTS = 20\log(D_T(\omega, \theta)G_s(\omega, \theta)D_R(\omega, \theta)) \quad (4.4)$$

とした。Fig. 4-19に測定したエコーストレングススペクトルを示す。指向性関数の影響を含んでしまっているため、定量的なものではないが、この得られたエコーストレングスの中には、4.3節で述べたように、対象の姿勢角の情報、深度の情報、遊泳速度の情報、周波数情報、大きさ（TS）の情報など、対象識別のための多くの基礎情報が入っている。つまり、エコーストレングスから、指向性関数の影響を除くことができ、精確なTSスペクトルを高い距離分解能を有したまま連続で得られれば、対象識別のための基礎情報増加に繋がる。

Fig. 4-20に本システムと同時に測定された通常の魚群探知機のエコーグラムを示す。通常の魚群探知機を用いたエコーグラムでは、海底と魚のエコーが分離できていない。それに対して、本システムを用いた場合は、海底と魚の分離が出来ている。パルス幅を短くすることで、高い距離分解能が実現できている。Fig. 4-20 (b)において深度方向に伸びているエコーは、通常の魚群探知機の音波の干渉によるものである。広帯域の受波器は、このように他の音波の周波数帯の干渉、混信を起こしてしまう。対象の信号のみを取得するために、フィルタをかけるなどの対策が必要である。

以上、本節において、イルカのソーナー音を用いて、自然状態の魚の群れのエコーストレングススペクトルを高い距離分解能を有しながら測定した。また、通常

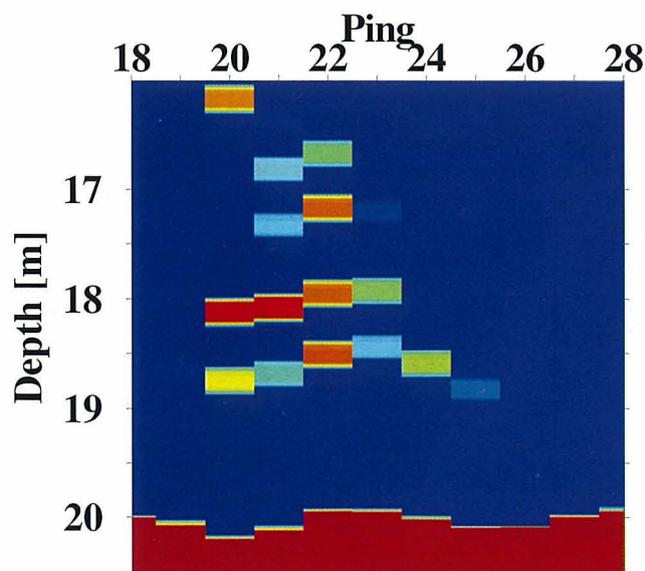


Fig. 4-18. The echogram showing *in situ* fish (in 10 s).

の魚群探知機との比較も行った。イルカのソーナー音を魚群探知機に適用すれば、高い距離分解能を得られ、自然状態 TS 測定の限界点緩和に繋がる。また、広帯域のエコーストレングススペクトル、TS スペクトルを測定し、魚の動きによる TS スペクトル変化を確認できた。

4.6 結 言

本章では、魚の TS スペクトルの取得を試みた。第 4.2 節では、淡水水槽で麻酔をかけた魚の精確な TS スペクトルを測定した。また、1 尾のマダイの姿勢角を変化させて TS スペクトルを測定した。TS スペクトルは、魚種、姿勢、個体差により大きく変化する。

次に 4.3 節で海上実験を行う際に必要な、海水の

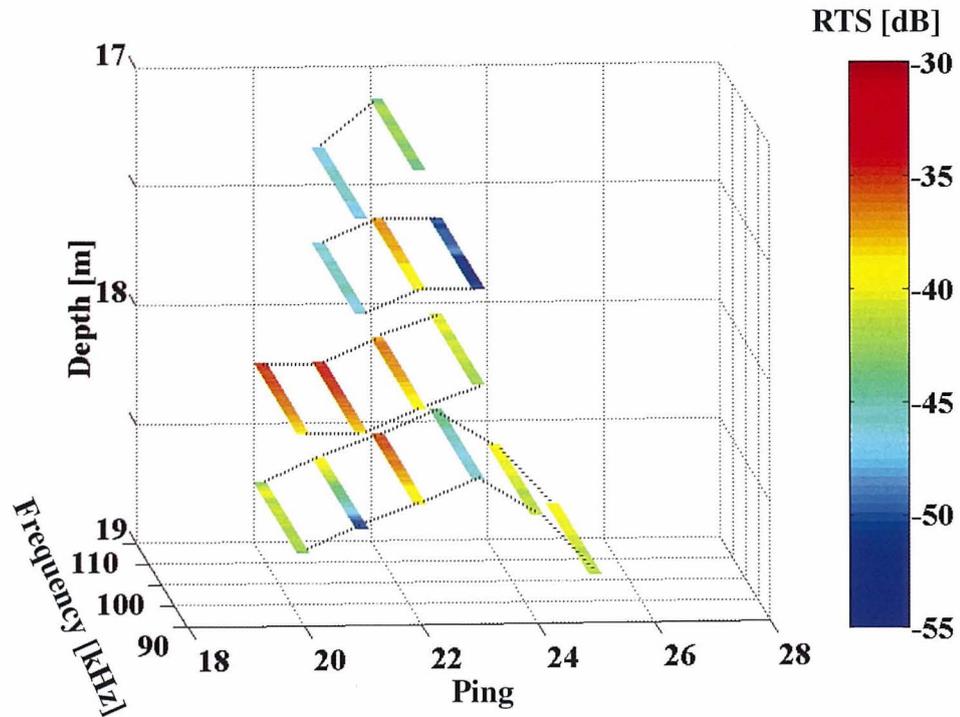


Fig. 4-19. The echo strength of *in situ* fish. The x axis shows ping number, the y axis shows depth, the z axis shows frequency and color shows echo strength value.

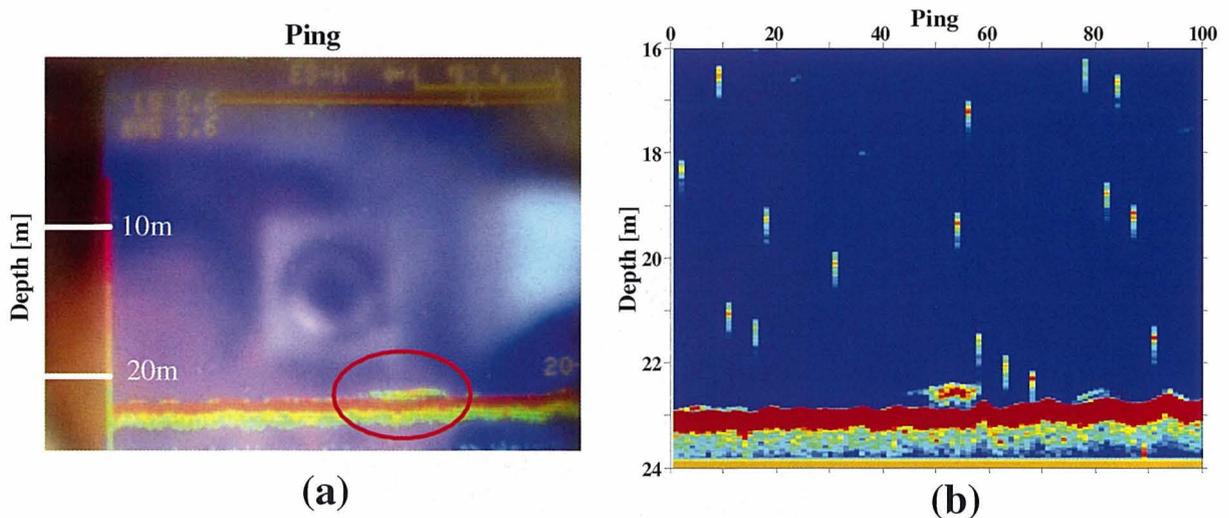


Fig. 4-20. Comparison of the echogram measured by the echo sounder (a), by using our measurement system (b).

吸収係数の補正方法を既往の研究から決定した。この値を用いて麻酔をかけて懸垂したマアジのエコーストレンジスを測定し、既往の研究と比較し、妥当な値を得ているのを確認した。この中で、指向性関数の補正が1つの大きな問題点となった。

第4.4節では、TC球を用いて指向性関数の補正を試みた。計算により理論的に求めたTC球の散乱特性を利用して指向性関数を補正し、準自然状態の魚のTSスペクトルを測定できた。しかし、TC球の散乱特性の共振点(92 kHz)付近では精確なTSスペクトルを求めることが出来なかった。この点から連続のTSスペクトルを求められてはいない。しかし反射に指向性のない金属球は、システムの較正だけでなく、指向性関数の補正にも有効であることが示された。

第4.5節では、自然状態の魚のエコーストレンジスを測定した。指向性関数を含んだ状態ではあったが、高い距離分解能でエコーストレンジスを計測でき、自然状態の魚のTSスペクトルが、対象識別のための基礎情報増加に資すると結論付けた。また、通常魚群探知機のエコーグラムと比較して、高い距離分解能を確認した。本実験では、スナメリのソーナー音を用いたが、ハンドウイルカのソーナー音を用いた場合は、理論的な距離分解能は、8 cmである。つまり、ハンドウイルカのソーナー音を用いれば、大幅な距離分解能の向上に繋がる。しかし、通常魚群探知機の信号の混信が確認できた。一般に広帯域信号は、高い信号対雑音比(SN比)を得ることができない。そこで、フィルタなどを用いてSN比を上げ、混信を除去する必要がある。

本章では、シングルビームの受信機とTC球を用いて指向性関数の補正を行ったが、限界があることがわかった。そこで、次章においてイルカのような広帯域音波を用いたスプリットビーム法を開発し、指向性関数の補正を行い、対象のTSスペクトルを求める。

第5章 広帯域スプリットビーム(BSB)システムの開発

5.1 緒言

前章では、海で準自然状態の魚のTSスペクトルの測定に成功した。しかし、前章までのような単一ビームを用いるシステムでは、送受波器と魚がなす相対角度が不明であるため、真に自然状態の魚に対しては、指向性関数の補正が出来ず、広帯域での精確なTSスペクトルの測定は不可能である。そこで、本章では、指向性関数の補正を行い、自然状態の魚のTSスペクトルを精確に求められる、イルカのような広帯域信号を送受波可能な、広帯域スプリットビーム

(Broadband Split-Beam, 以下BSB)法を提案し、システム開発を行なう。BSB法は、世界でも初めての試みであり、その処理方法が従来のスプリットビーム(Split-Beam, 以下SB)法とは異なるため、装置と処理方法の新規開発が必要である。そこで、本章では、BSB法のシステムを構築し、処理方法を確立し、イルカのような広帯域音波を用いて、対象の位置角を測定し、指向性関数の補正を行い、精確なTSスペクトル測定を可能とする。

イルカが、このような方法を使用しているかは不明であるが、人間と同じ様に2つの内耳を持ち、左右の内耳への反射波の到達時間差やレベル差などの違いにより、対象の方向を推定していると考えられる(Au, 1993)。また、イルカは対象の方向を向くことにより、対象方向に指向性主軸を合わせることもでき、指向性主軸での観測をしているとも考えられる。これらは、我々がSB法で指向性補正を行うのに等価であり、その結果、対象に固有の反射強度の真に近い値を知ることができ、対象の大きさの判断や種別に有利に働いているであろう。そこで、BSB法の開発は、イルカのソーナーに似せた人工ソーナーの開発でもある。

以下、5.2節において、SB法の原理について述べ、BSB法を構築する際の検討項目を確認する。5.3節で開発した広帯域スプリットビームシステムについて述べる。5.4節において、広帯域で送受波器の指向性関数を補正するためのモデルの決定と、位置角推定のために必要なパラメータであるアレイ中心間距離を決定する。また、SB法の礎になる時間差(位相差)検出方法を決定し、BSB法を確立する。さらに、送受分離システムを利用する上で問題になる送波器と受波器の中心間距離による誤差角度についても検討する。最後に、BSB法を用いてTSスペクトルを求める方法について述べる。

5.2 スプリットビーム(SB)法

自然状態の魚のTSを精確に測定する上で、魚と送受波器がなす相対的な位置角を測定し、送受波器の指向性関数を補正することは、必要不可欠である。本節では、指向性関数補正のための1つの方法であるSB法に関して述べる。また、BSB法を確立する上での検討項目の確認を行う。

SB法の原理をFig. 5-1に示す。SB法は受波器を分割し、方位測定用アレイ(方位アレイ)のペアを前後と左右用に2つ作り、それぞれの方位測定用アレイに到達するエコーの時間差により、前後方向、左右方向の位相差(又は時間差)の測定を行う。ここでは、受波器中心を原点、船首(fore)–船尾(aft)方向をx軸、

左舷 (port) - 右舷 (starboard) 方向を y 軸, 受波面に垂直な向きを z 軸とし, 方位アレイのアレイ中心間距離を d とする。対象の極座標を (r, θ, ϕ) とすると, 直交座標系 (x, y, z) は $(r \sin \theta \cos \phi, r \sin \theta \sin \phi, r \cos \theta)$ となる。したがって, 対象から各位相アレイ中心までの距離 l は, f を船首方向ビーム, a を船尾方向ビームを表す添え字とすると, 次式のように近似できる。

$$\begin{aligned} l_f &\cong r - \frac{d}{2} \sin \theta \cos \phi \\ l_a &\cong r + \frac{d}{2} \sin \theta \cos \phi \end{aligned} \quad (5.1)$$

また, 右舷 (添え字 s), 左舷 (添え字 p) 方向では,

$$\begin{aligned} l_s &\cong r - \frac{d}{2} \sin \theta \sin \phi \\ l_p &\cong r + \frac{d}{2} \sin \theta \sin \phi \end{aligned} \quad (5.2)$$

となる。いまここで, 方位アレイで受けたエコー (方位信号) 間の位相差を δ_x, δ_y とすると, k を波数として,

$$\begin{aligned} \delta_x &= k(l_a - l_f) = kd \sin \theta \cos \phi \\ \delta_y &= k(l_p - l_s) = kd \sin \theta \sin \phi \end{aligned} \quad (5.3)$$

と表せる。(5.3) 式より, 対象の位置角 (θ, ϕ) は, 次式のように表される。

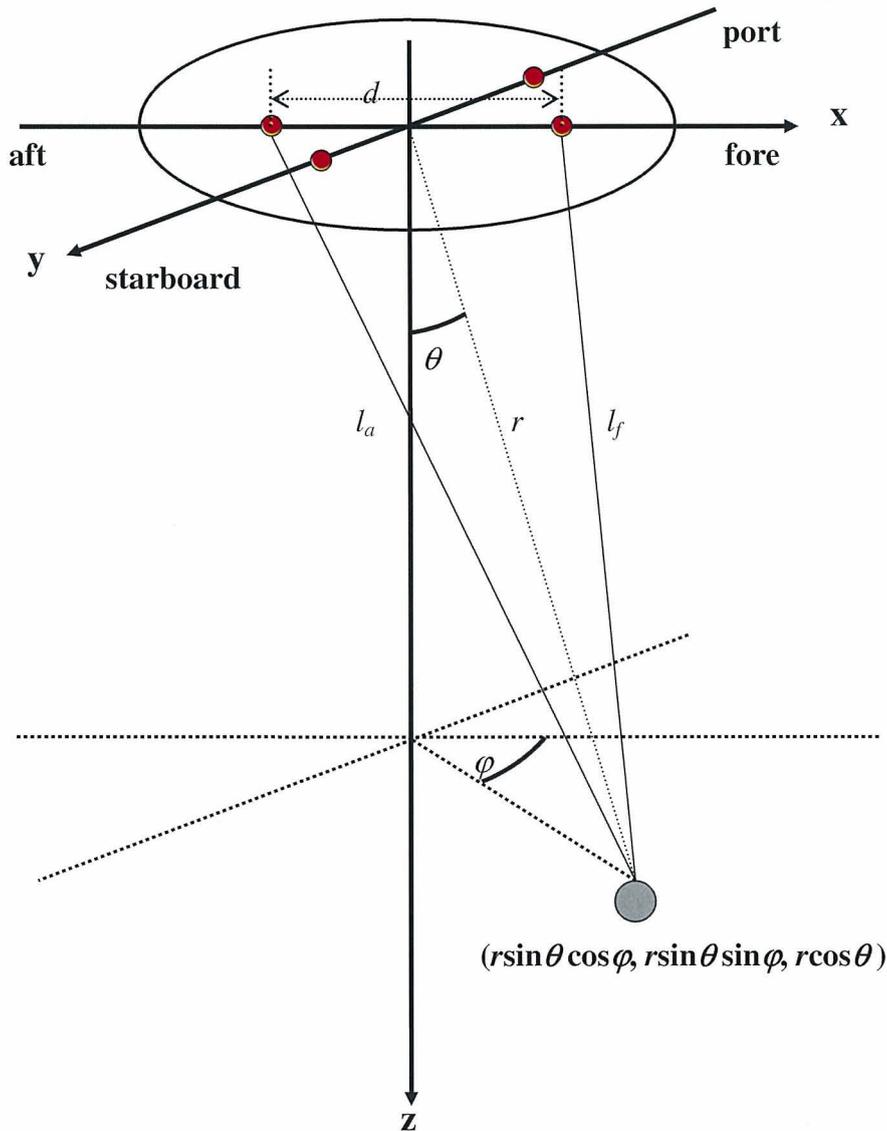


Fig. 5-1. Principle of the split - beam method.

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

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\delta_y}{\delta_x} \right) \quad (5.4)$$

また、パルスエコー法（反射波の到達時間測定）により、対象までの直線距離 r が得られ、これと SB 法により測定した位置角 θ 、 ϕ とを組み合わせ、位置推定が可能である。

一般的な計量魚群探知機である狭帯域音波を用いた TS 測定の場合には、SB 法において、4 分サンプル相互相関法（甘糟, 2001; Hsieh, 1986）などにより位相差 δ_x 、 δ_y を検出し、対象の位置角 θ 、 ϕ を求めている。しかし、本研究では、イルカのような時間に対して周波数成分が変化する広帯域音波（Fig. 2-5）を用いて、対象の位置角を推定する。つまり、位相差または時間差を検出する方法が従来の方法とは異なるので、検討する必要がある。本研究では時間差を用いた位置角測定法を採用する。すなわち、上記の方法と同様に得られた反射波の船首 - 船尾方向における到達時間差 Δ_x と、右舷 - 左舷方向の到達時間差 Δ_y を利用して対象の位置角を求める。(5.3)、(5.4) 式を変形すると

$$\Delta_x = \frac{l_a - l_f}{c} = \frac{d}{c} \sin \theta \cos \phi$$

$$\Delta_y = \frac{l_p - l_s}{c} = \frac{d}{c} \sin \theta \sin \phi \quad (5.5)$$

となり、位置角 θ 、 ϕ は、

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{c \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}}{d} \right)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta_y}{\Delta_x} \right) \quad (5.6)$$

で求められる。

(5.4)、(5.6) 式において、位置角を決定するための重要なパラメータは、

- (1) 位相差 δ_x 、 δ_y 、または時間差 Δ_x 、 Δ_y
- (2) アレイ中心間距離 d
- (3) 水中音速 c

である。この中で水中音速 c は、使用する音波の周波数には関係がなく、水温、塩分、水深を用いた Mackenzie の式で、実用的には十分な精度で求められる (Foote, 1983)。つまり、(1)、(2) の 2 つのパラメータが SB 法の位置角推定において重要である。

時間差検出のためには、フーリエ変換による位相差検出、ヒルベルト変換による位相差検出、相互相関による時間差検出など、いくつかの方法が考えられる。

本研究ではこのうち、雑音に強くまた 1 回の処理で比較的容易に時間差が求められる相互相関を用いることとした。

以上、指向性関数補正のための SB 法の原理を述べ、BSB 法の構築に向けて、対象の位置角推定に際しての重要なパラメータを確認した。

5.3 広帯域スプリットビーム (BSB) システム

本節では、実際に用いる広帯域送受信システムについて述べる。Fig. 5-2 に構築したシステムを示す。本システムも、前章までのシステム（以下前システム）と同じように特性の揃った送受分離のシステムを用いた。前システム (Fig. 3-5) におけるパワアンプと、信号発生器以外を新たに製作し、受波器、プリアンプの SB 化と、その受波器とほぼ同じ特性を持つ送波器を開発した (古野電気㈱に特注)。また、SB 化に対応して、同時に多くのデータを計測できるように、オシロスコープを変更した。まず、送波部では、任意波形発生装置により発生した信号をパワアンプにより増幅し、送波器へと出力する。次に、受波部では、反射波を円配列を 4 分割した受波器で受波し、それぞれの 4 分円信号はプリアンプを介し、オシロスコープ (Lecroy, Wave Runner 6000A) で直接観察および測定される。このとき、プリアンプには、4 分円信号を全て合成したレベル信号と、4 分円信号それぞれで、合計 5 つの出力がある。得られた各信号を PC へ転送し、オフラインで解析を行う。

用いた受波器の写真と、海上実験、水槽実験で反射波を測定する送受波器の支持具を Fig. 5-3 に示す。受波器は、頂点に船首印があり、受波円アレイが 4 分割されている (Fig. 5-3 (a))。また、SB 法で必要な方位信号は、2 つの 4 分円信号を足し合わせ、半円状に 2 分割されアレイ (半円アレイ) により求める。例えば、船首方位信号は 4 分円アレイ CH1 と CH2 を足し合わせて合成する。本システムではスペクトル比法を実現するために、前章までと同様に同じ特性の送波器と受波器を用いており、送波器ではすべての四分円アレイを用いて音波の送波を行う。

5.4 指向性関数およびアレイ中心間距離

本節では、5.2 節において確認した検討すべきパラメータを検討・決定し、BSB 法を構築する。BSB 法において最終目的は、受波器を 2 分割した 2 組の方位アレイを用いた SB 法により対象の位置角を測定し、レベルアレイの指向性関数を補正して、対象の TS スペクトルを正確に求めることである。しかし、広帯域の音波を用いる場合、周波数により指向性関数

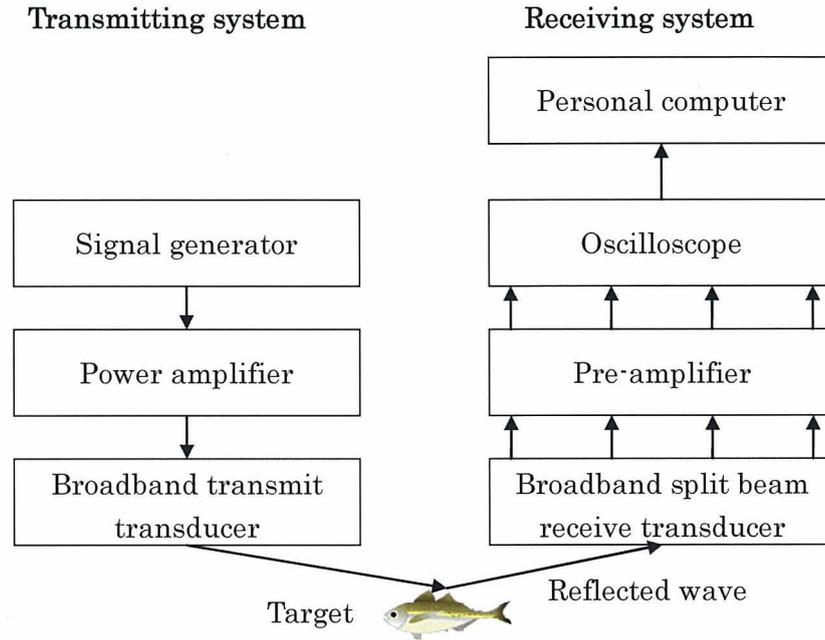


Fig. 5-2. Schematic diagram of broadband split beam (BSB) experimental set up. Reflected wave is received each split arrays of BSB receive transducer.

が異なる (Fig. 3-7参照)。使用するすべての帯域の周波数について指向性関数を測定し、補正することは、現実的ではない。そこで、理論的な指向性関数と実測値とを比較・検討し、レベルアレイの広帯域での指向性モデル (等価円板振動子の指向性) を決定する。

また、(5.4)、(5.6) 式において、対象の位置角を求めるために、受波器を2分割した方位アレイのアレイ中心間距離 d を使用する。この値は、送受波器の設計時にほぼ決定されるが、素子の配列方法やモードの過程で、多少の誤差が生じる。そこで、アレイ中心間距離を理論により検討し、素子の配置の重心から計算した結果と比較し、実際に使用するアレイ中心間距離を決定する。

5.4.1 指向性関数の決定方法

いま、Fig. 5-1の座標系に反射対象があり、対象からの反射波が送受波器のアレイを構成する各素子に入射するとする。この各素子への入射波を合成する。この時、素子の座標を (x, y) とすると対象と各素子間の距離 R は、

$$R = \sqrt{(r \sin \theta \cos \phi - x)^2 + (r \sin \theta \sin \phi - y)^2 + (r \cos \theta)^2} \\ \cong r - \sin \theta (x \cos \phi + y \sin \phi) \quad (5.7)$$

と近似できる。(5.7) 式において $-\sin \theta (x \cos \phi + y \sin \phi)$ が

アレイ中心を基準とした距離差であり、これを Δr とおくと、アレイ全体の指向性 D_a は、

$$D_a = \left| \frac{\sum_i \exp(jk \Delta r_i)}{M} \right| \quad (5.8)$$

と表せる。ここで i はアレイを構成する素子番号、 k は波数、 M は分子の絶対値の最大値を表す。(5.8) 式は、各アレイ位置に無指向性の点音源をおいた場合の指向性であり、実際の指向性は、素子の指向性を D_e とすると、積定理 (Clay and Medwin, 1977) より、

$$D = D_a D_e \quad (5.9)$$

と表される。ここで素子の指向性 D_e は、通常円形ピストンの指向性に、ソフトバッファ条件を加味した次式を用いる (海洋音響学会, 2004)。

$$D_e = \left| \frac{2J_1(ka_e \sin \theta)}{ka_e \sin \theta} \cos \theta \right| \quad (5.10)$$

ここに、 J_1 は1種1次のベッセル関数、 a_e は素子半径、 θ は指向性主軸 (ビーム軸) からの角度である。(5.8)、(5.10) 式に素子配列座標と素子半径を与えれば、指向性関数を理論的に計算可能である。

Fig. 5-4に、周波数100 kHzの場合の、アレイ配列から計算した結果と測定結果、および、それらに合うように (5.10) 式を用いて等価的な半径を5.3 cmと

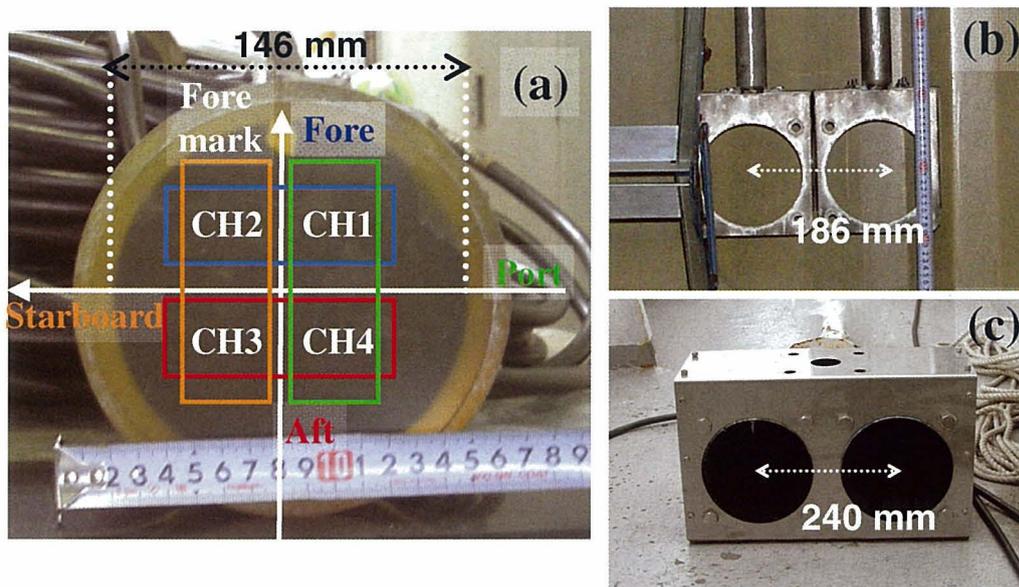


Fig. 5-3. Photograph of the split beam receive transducer (a), transducer installation in tank experiment (b), and at sea experiment (c). The receive transducer is separated in four quadrant array channels. Direction signals are composed by adding two quadrant signals, for example fore direction signal is made by CH1 and CH2 signals.

決めて円形ピストンモデルによって計算した指向性関数を示す。ビーム幅 (-3 dB) は、すべての結果において 8.3° である。実測値と理論値、理論値と等価的モデルによるそれぞれの結果が一致した。したがって、この等価的な指向性関数を元に、他の周波数の指向性関数も求められる。等価的指向性関数を用いて求めた、本システムで用いる主要な周波数における -3 dBビーム幅は、

60kHz	13.8°
80kHz	10.4°
100kHz	8.3°
120kHz	6.9°

である。

次に、他の周波数の指向性関数も実際に確認するために、4つの周波数について送波器の指向性関数の測定を行い前述のモデルと比較した。実験は、水産総合研究センター水産工学研究所（茨城県神栖市）の測器電子機器実験棟内の球面波水槽（長さ15 m × 幅10 m × 深さ10 m）で行った。Fig. 5-5に実験方法を示す。球面波水槽には、送受波器の位置を、上下左右、回転など精密に電子制御可能な移動台車があり、精確な測定が可能である。送波器の正面に広帯域のハイドロフ

オンを設置し、送波器からの直接波を測定した。実験の始めに送波器を上下左右に動かし、送波ビームの主軸を探した。送波器を水平面内で 1° おきに回転させ、送波器とハイドロフォンの相対角度を変化させ測定を行った。用いたソーナー音は、パルス幅がそれぞれ異なるが、一定の振幅を得られる170サイクルの長バースト波で、中心周波数が60, 80, 100, 110 kHzの4種類を用いた。

測定した指向性関数とモデルとの比較結果を Fig. 5-6に示す。四角が実測値を、直線が半径5.3 cmの円形ピストンモデルによる指向特性である。4つの周波数すべてで、モデルと実測値の指向性関数がほぼ一致した。つまり、本研究で使用する帯域内において、上記モデルによる指向性関数を使用でき、レベル信号に対する指向性関数の補正が広帯域で可能である。

5.4.2 アレイ中心間距離の決定

方位アレイは半円形をしているので、アレイ中心間距離 d を簡単には決められない。そこで、アレイ中心間距離を、各方向からアレイへ入射する位相込みの音圧を、素子配列に与えるシミュレーションによって決定する。いま、(5.8) 式の指向性と同様の考えから、

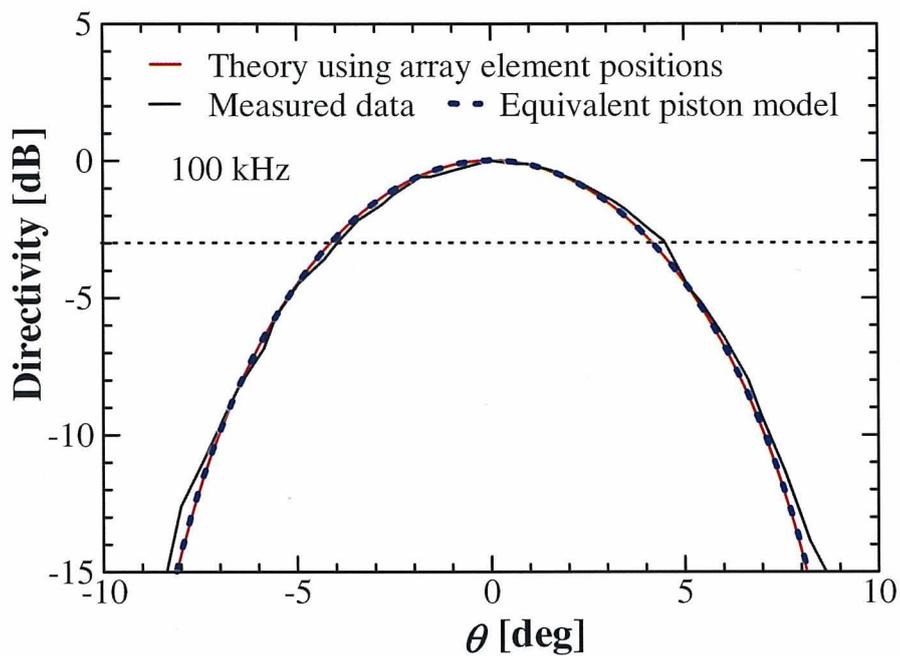


Fig. 5-4. Comparison of the directivities by theory using array element positions, by measurement, and by circular piston model with equivalent radius of 5.3 cm. The dotted line shows -3 dB level.

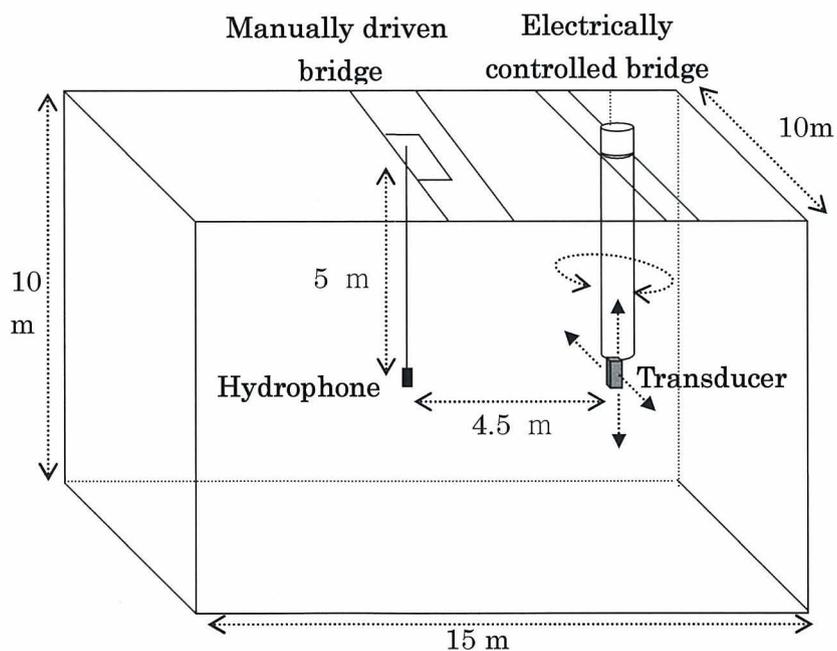


Fig. 5-5. Schematic diagram of measurement of the transmit transducer directivity. Electrically controlled transducer base can be moved up, down, right, and left, and rotated accurately.

各半円アレイの位相込みの音圧を,

$$p_h = \sum_i \exp(jk\Delta r_i) \quad (5.11)$$

と考え、前後左右方向の各アレイ信号を得る (Fig. 5-3 (a) 参照)。これらの信号の位相の船尾-船首、左舷-右舷方向の位相差を (5.4) 式を用いて、対象の位置角に変換することが可能である。実際には (5.4) 式において θ と ϕ を予め与えるので、この式を d を求める形に変形して、アレイ中心間距離 d を決めることが出来る。

いま、 θ を 0.5° から 6° まで 0.5° 刻みで、 ϕ を 0° から 90° まで 7.5° 刻みで変化させた場合、 d の平均は 45.25 mm であり、方向による変動もわずかであり、標準偏差は 0.12 mm であった。また、 ϕ は、与えた値と完全に一致した。単純に実際のアレイ配列の座標の平均 (重心) から計算したアレイ中心間距離は、 45.1 mm であり、シミュレーションによる結果とほぼ一致している。そこで以降、アレイ中心間距離は 45.2 mm として、時間差を位置角に変換する。

5.4.3 送受分離システムの指向性主軸偏移

本研究では、同じ特性の送波器と受波器を使用するので、送波器の指向性関数と受波器の指向性関数が等

しいとおける。しかし、スペクトル比法を用いるために、また送受波器周辺の回路を複雑にしないために、送受波器を分離する。そこで、送受波器を極力近づけ、かつ指向性主軸が平行になるように設置する必要がある。しかし、近距離においては主軸がずれるので、正確な指向性関数の補正の為に必要な対象までの距離と、送波器と受波器の中心間距離の関係を調べておく必要がある。

水槽実験で用いる送受分離の送受波器支持具の中心間距離は、 18.6 cm (Fig. 5-3 (b))、海上実験で用いる送受一体型の支持具では 24.0 cm (Fig. 5-3 (c)) である。いま、送波器と受波器の中心間距離を r_d 、対象までの距離を r とすると、角度偏移は、

$$\theta_e = \tan^{-1}\left(\frac{r_d}{r}\right) \quad (5.12)$$

となる。それぞれの支持具を用いた送波器と受波器の中心間距離を用いて求めた角度偏移を Fig. 5-7 に示す。比較の為に送受波器の直径から決定できる最小の中心間距離 (16.6 cm) による計算結果も示す。 r_d が 24.0 cm の場合、対象までの距離が 10 m であれば、約 1.4° の角度偏移がある。この角度偏移と、5.4.1 節において理論計算された -3 dB ビーム幅と比較する。使用する帯域内の最大の周波数である 120 kHz の

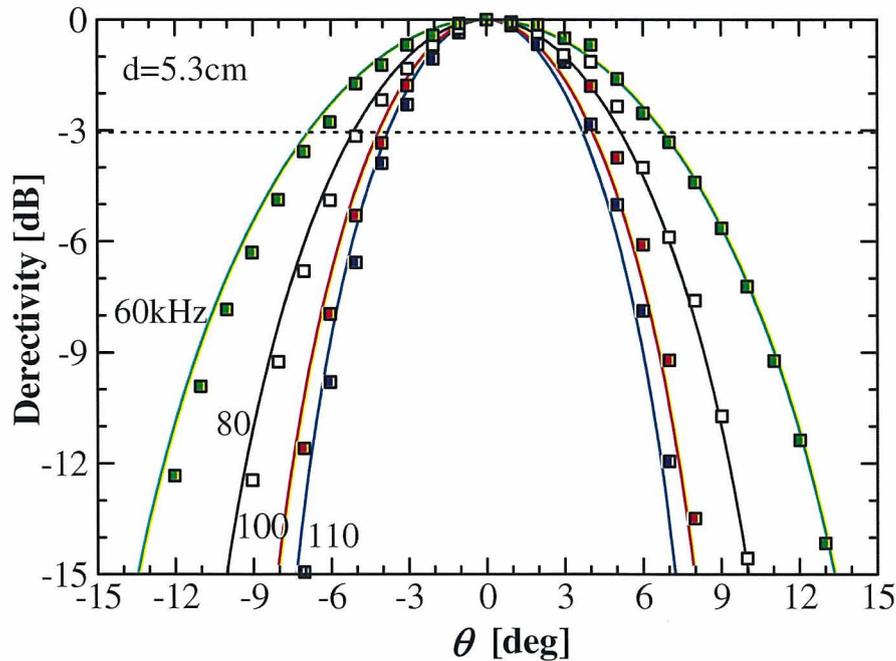


Fig. 5-6. Comparison of the measured directivities (squares) with theory (lines) at four frequencies.

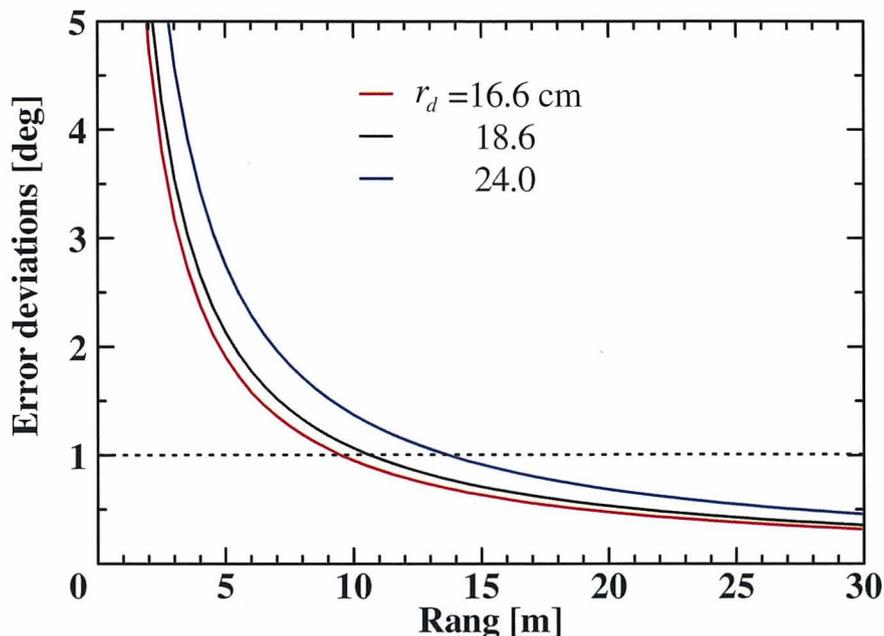


Fig. 5-7. Angle deviations by the separation distance r_d between transmit and receive transducers. The black line is for the case of tank experiment, the blue line for sea experiment, and the red line for the smallest separation determined by the transducer diameters. The dotted line shows 1 degree.

理論計算されたビーム幅は 6.9° であるので、偏移による影響が大きい。つまり、対象までの距離が10 m未満の状態では測定された対象からの反射波に対して、指向性関数を補正する場合は、送波器と受波器の指向性関数を別に扱う必要がある。また、対象までの測角誤差を 0.5° 未満にするためには、 r_d が24.0 cmの場合、対象までの距離が28 m以上必要である。

5.5 広帯域スプリットビーム法によるTSスペクトル計測のための処理

Fig. 5-8に、前章までの成果と本章での検討結果を総合して構築した、BSB法を用いて自然状態の魚のTSスペクトルを求めるための、フローチャートを示す。測定は、大きく入射波（レベル信号）測定と、反射波（レベル信号と方位信号）測定の3つに分かれる。

まず、入射波測定では、送受分離のシステムを用いて、送受波器を対向させて設置し、入射波を測定する。レベル信号の振幅スペクトルを入射波の振幅スペクトルとして求める。

次に、反射波測定では、対象からの反射波の各方位アレイへの到達時間差を、相互相関処理を用いて検出する。この時間差、アレイ中心間距離、音速を用いて

(5.4)式により対象の位置角を推定する。この位置角と等価指向性関数モデルより、広帯域での指向性補正関数が求まる。

最後に、4分円アレイ信号をすべて足し合わせた反射波のレベル信号の振幅スペクトルを、この指向性補正関数を用いて補正し、入射波のスペクトルとの比を取り、対象のTSスペクトルを得る。

5.6 結 言

本章では、広帯域スプリットビーム（BSB）法を実現できるシステムを構築し、その特性と実際に用いる場合の処理方法や留意点を述べた。

5.2節では、まずスプリットビーム（SB）法一般の原理について述べ、これをBSB法の原理に発展させた。

5.3節では、本研究で実際に用いる広帯域スプリットビームシステムについて述べた。また、前章までのシステムとの違いを述べた。広帯域音波の時間差検出方法として、相互相関処理を用いることとした。

5.4節では、広帯域の指向性関数を補正するために送受波器の指向性関数を、アレイ素子信号を合成する理論と、等価理論モデル（円形ピストンモデル）に

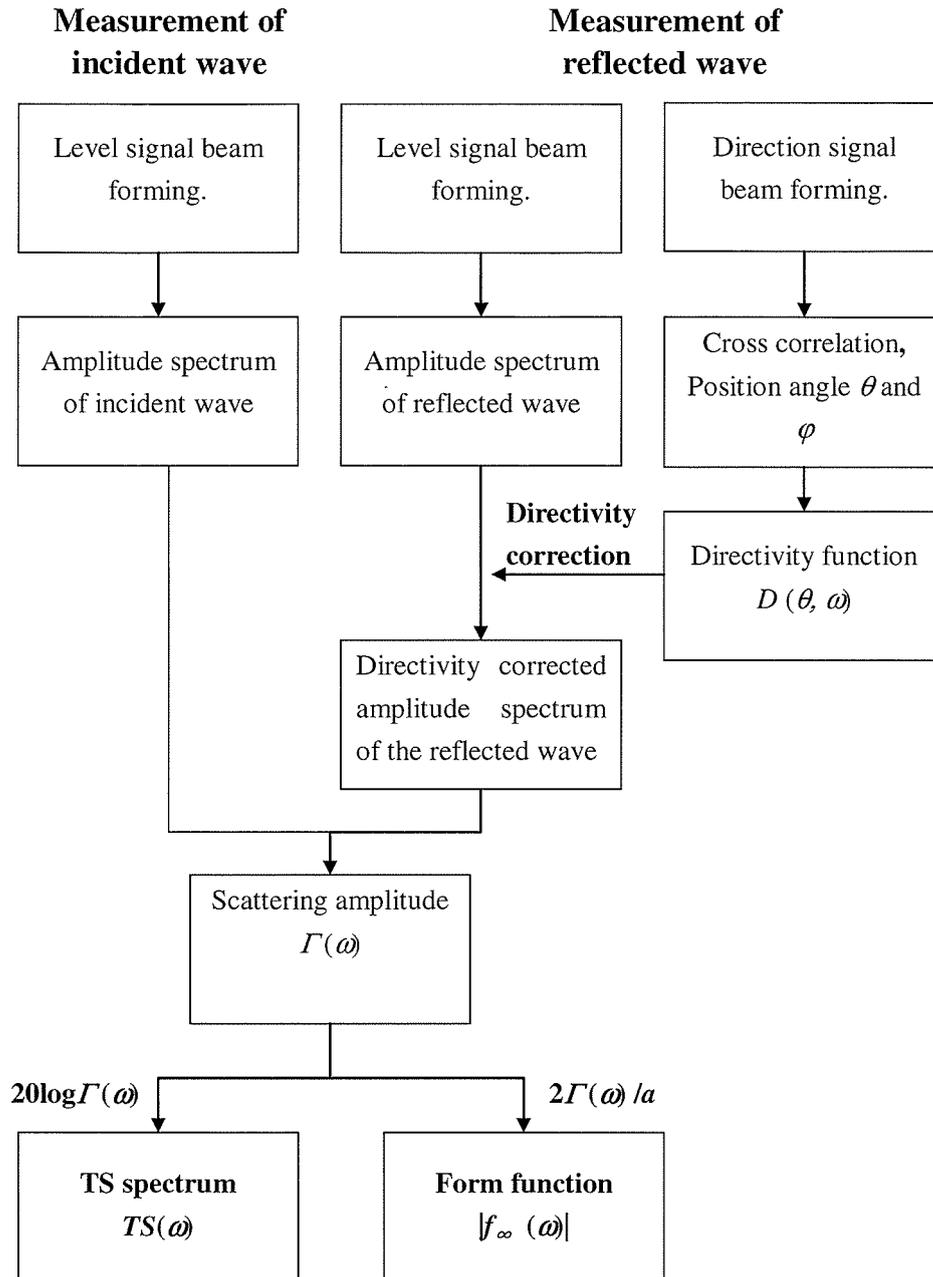


Fig. 5-8. Flowchart to measure form function or TS spectrum by broadband split-beam method compensating for the directivity function of transducers.

より求め、実測値と比較し、これらの間での良い一致を確認した。これにより、広帯域の指向性関数の補正は、半径が5.3 cmの円形ピストンの指向性モデルで行なうこととした。次に、アレイ中心間距離を理論計算から求め、アレイ位置の重心から求めたアレイ中心間距離とほぼ等しいことを確認し、45.2 mmとした。送受分離システムを用いる上での指向性主軸の偏移について検討し、対象までの距離が10 m未満と小さい場合は、注意が要ることを示した。

5.5節では、前章までの成果と本章での検討結果から、BSB法とスペクトル比法を用いて、TSスペクトルを求めるための方法を述べた。

次章においては、各種の対象について実際にTSスペクトルを測定する。

第6章 イルカのソナー音を用いた広帯域スプリットビーム法によるTSスペクトルの測定

6.1 緒言

前章で、広帯域スプリットビーム(BSB)法のシステムを開発し、アレイ中心間距離、時間差検出方法、指向性関数の補正に用いるモデル、送受分離システムの角度偏差など、BSB法の基礎を構築した。そこで、本章では、BSB法を実際の魚などに適用し、ターゲットストレングス(TS)スペクトル計測などに実用可能であるかを確認する。

まず、6.2節において、反射体の位置を精確に移動可能な水槽で、BSB法の基本性能を確かめる。すなわち、タングステンカーバイド(TC)球の位置測定を行う。TC球の位置角を、BSB法を用いて検出し、実際に動かしたTC球の位置と比較する。

次に、6.3節では、BSB法の最大目的である、ビーム内であればどこでもTSスペクトルを計測できることを、TC球を用いて、海上実験で確認する。反射波より位置角を測定し、送波、受波の指向性関数を補正した上で、3章で用いたスペクトル比法と組み合わせ、形状関数を測定する。これらにより、BSB法と開発システムを用いて、対象の広帯域での反射特性を精確に測定可能であることを確認する。

これらを確認した上で、6.4節において、準自然状態の魚のTSスペクトルと、自然状態の魚のTSスペクトルを連続で測定する。

6.2 水槽における金属球の位置の測定

本節ではまず、BSB法により正確に位置角を求める方法を開発する。TC球の位置を3.6節で用いた水槽(Fig. 3-9)で測定する。

反射波測定のための送受波器支持具は送波器と受波器の中心間距離が18.6cmのもの(Fig. 5-3 (b)参照)を用い、送波器、受波器と球との器間距離を3.8 mになるようにして、反射波測定を行った。送波器の120 kHzにおけるビーム幅は、約6.9°であるので、-3 dBのビームの開きは、対象までの距離が4 mの時、直径が約50 cmである。つまり、本実験では近距離であるために、角度偏移は、2°以上と大きい(Fig. 5-7)ので、送波、受波の指向性関数が異なり、対象の形状関数を精確に測定するのはむずかしい。そこで、本節では、BSB法の要の1つである位置角測定のみ焦点を当てる。

送波器と受波器を平行に設置しTC球からの反射波を測定した。壁、水面、底からの反射とTC球からのエコーを分離するために、3.6節の金属球の形状関数を測定した時と同様に、水深1.4 mに送波器、受波器とTC球を設置した(Fig. 3-9参照)。Fig. 6-1にTC球の移動位置と座標系を示す。TC球を10 cmおきに上下(x軸方向)、左右方向(y軸方向)に動かし、49箇所のそれぞれの位置で反射波を測定した。測定の始めに、TC球を上下左右方向に移動させて、各4分円アレイで測定される反射波信号の位相が一致する点、つまり、受波ビームの正面を探し、その位置を中心とした。用いたソナー音は、パルス幅が30 μ sで中心周波数が100 kHzの短パルス波、ハンドウ型、スナメリ型の3種類のソナー音であり、サンプリング周波数5 MHzで反射波の収録を行った。

Fig. 6-2に代表として、最も広帯域のハンドウイルカのソナー音を用いて測定した、TC球が中心位置の場合の各方位信号と、それぞれの方向の相互相関処理の球の場所がFig. 6-1中e4における結果を示す。相互相関処理により検出されたx方向の時間差は、1.6 μ s、y方向で-1.6 μ sであった。この値を(5.6)式に代入すると、 θ が4.2°、 ϕ は45°である。

同様の方法で、検出したTC球の位置と、120 kHzにおける送波と受波のビームの開き(-3 dBビーム幅による)をFig. 6-3に示す。位置角を測定するのは受波器であり、この場合の送波器は単に音を照射する役目をするので、測定位置は受波ビームの開きに対して正確であればよい。受波ビームの開きの中では、x、y方向で10 cmおきの位置の検出ができています。ビームの開きの中でも、実際の位置とBSB法により検出した位置とで、若干の差はあるが、この差は最大で2.4 cmと、測定したTC球の直径よりも小さく、誤差としては小さい。また、受波ビームの開きの外側でも、x、y方向でほぼ10 cmおきに位置の検出ができています。ビームから外れるにつれ誤差が大きくなるが、

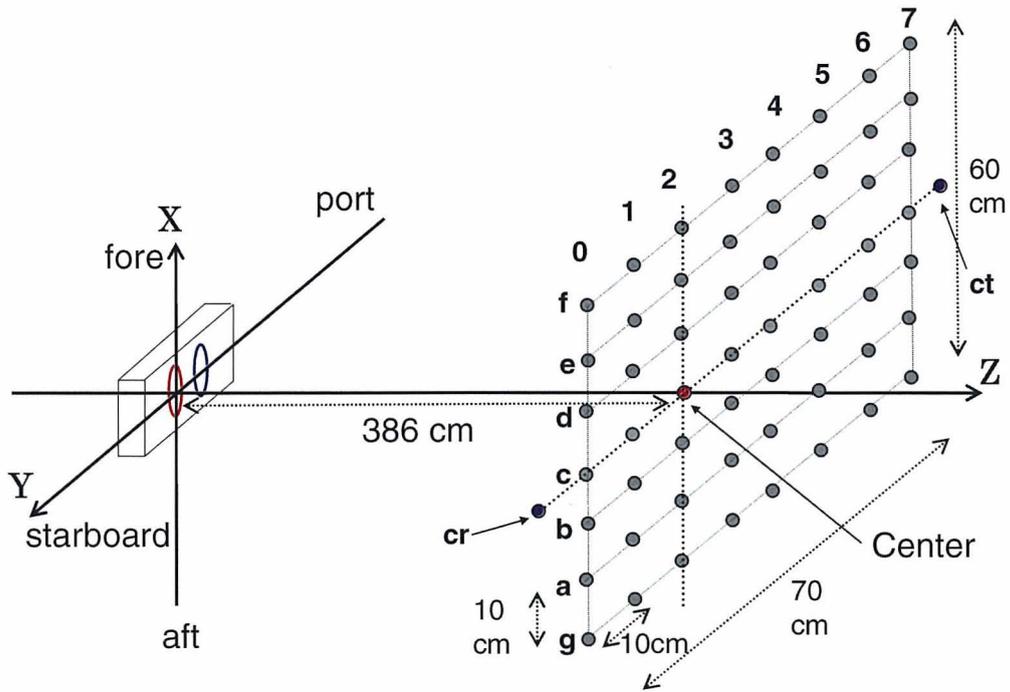


Fig. 6-1. Relationship between the transducers and TC sphere positions. TC sphere was moved by 10 cm step.

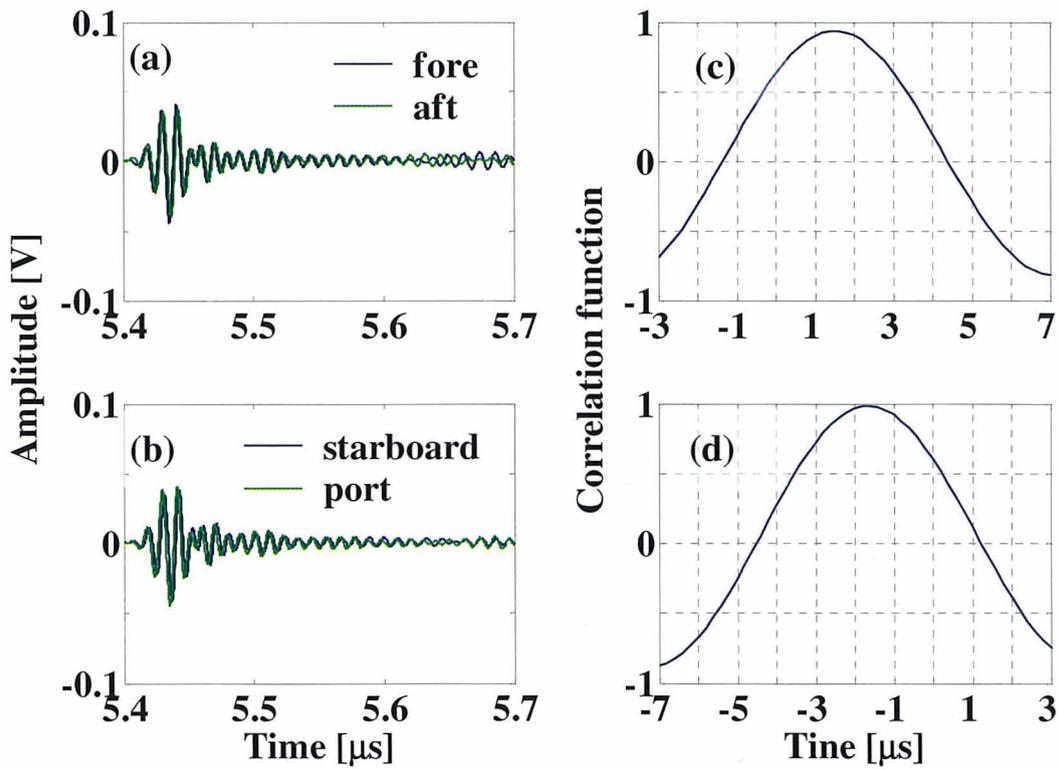


Fig. 6-2. Direction signals (left) and their cross correlation functions (right). The x axis (fore - aft) direction signals (a), the y axis (starboard - port) signals (b), the result of cross correlation processing for x axis direction signals (c), and for y axis direction signals (d).

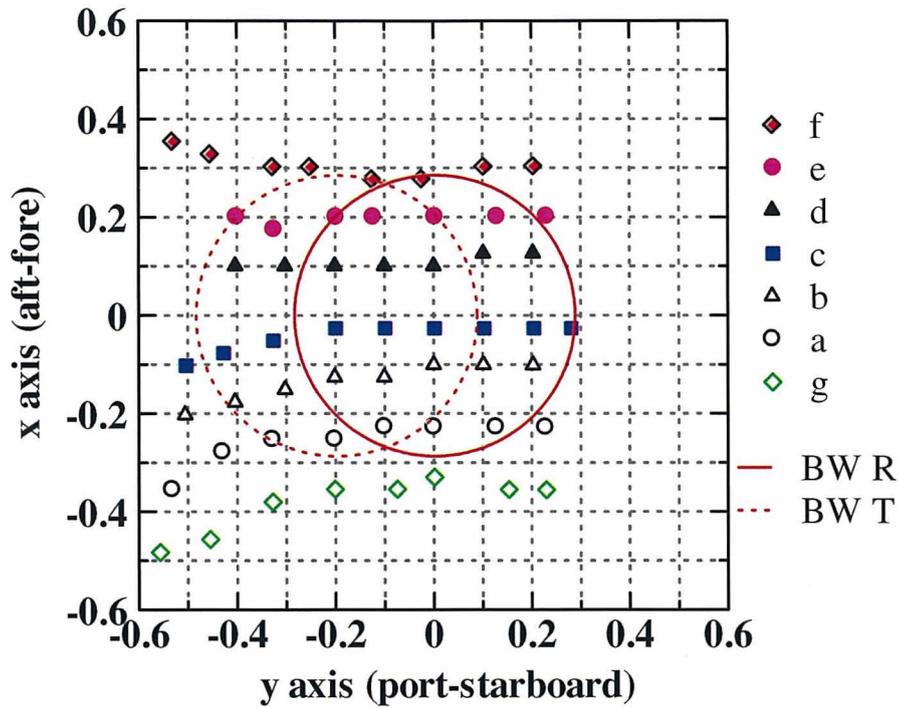


Fig. 6-3. Measured TC sphere positions by BSB method using bottlenose dolphin sonar signal. Red solid line shows the beam spread of receive transducer which is calculated by using two times the -3 dB beam width 120 kHz and red dotted line shows that of transmit transducer.

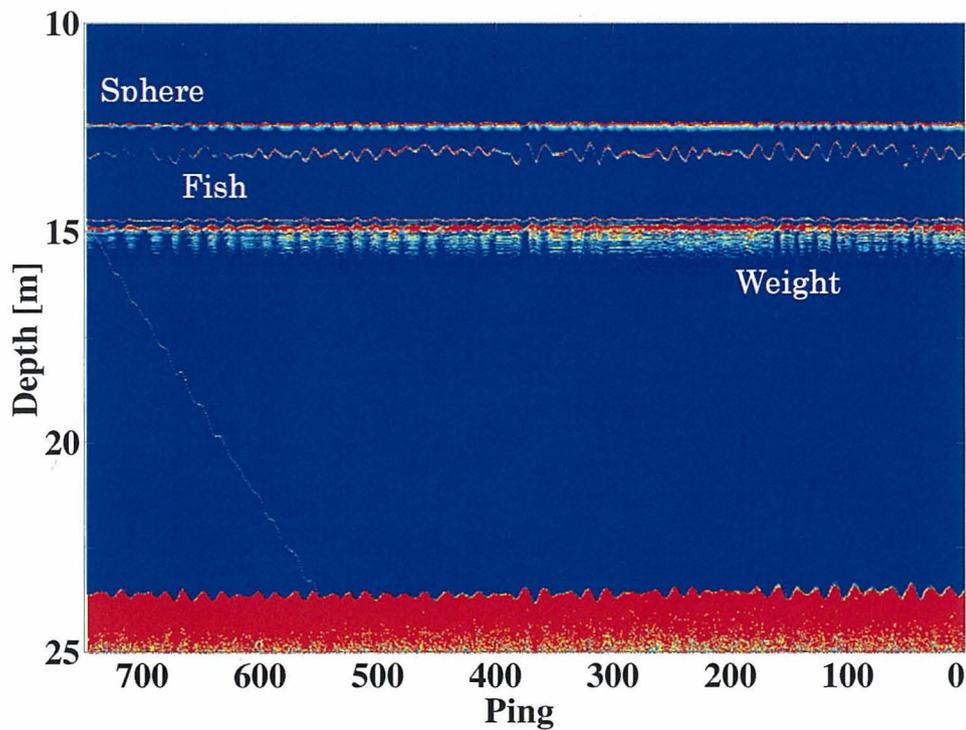


Fig. 6-4. Echogram of a tethered semi in situ fish and a tungsten carbide sphere at sea experiment using bottlenose dolphin sonar signal. X axis shows pings (375 s) and y axis shows depth of the targets.

これは5.4.2節で考えたアレイ中心間距離が変化するためであることを確かめた。

他のソーナー音を用いてもほぼ同じ結果を得られた。つまり、イルカのような広帯域の音波を用いても、相互相関処理を用いて時間差を検出できれば、対象の精確な位置角測定が可能である。

6.3 海上における TC 球の形状関数の測定

6.2節で、TC球の位置角を精確に測定できることを示した。しかし、近距離であるために、送波器と受波器を同じ位置に設置できないことによる角度偏移が大きく、指向性関数を補正して、対象の形状関数を測定することがむずかしかった。そこで、本節では、対象までの距離を大きく取れ、角度偏移を小さくできる海上で、TC球の反射波の計測実験を行った。

実験は、2007年10月に東京湾沖で、実習艇「ひよどり」を用いて、4.5節と同様に錨泊して、TC球と、テグスで懸垂した準自然状態の魚のTSスペクトルを測定した。用いた送受波器支持具は、送波器と受波器の中心間距離が24.0 cmのもの（Fig. 5-3 (c) 参照）である。Fig. 6-4に、ハンドウイルカのソーナー音を用いて得られた、TC球と準自然状態の魚の反射波を示すエコーグラムを示す。サンプリング周波数5 MHz、音波の送信周期を0.5秒で実験を行った。12.5 m付近にTC球からの反射波がある。魚の結果については次節で述べる。

BSB法を用いて、このTC球の位置角を推定し、指向性関数を補正し、TC球の形状関数を測定する。このとき、対象までの距離が12 m以上であることから角度偏移は小さく、送波器と受波器の指向性関数が等しいとみなしても、大きな誤差にならない。また、海水であるため、4.4節同様に、海水の吸収係数項の補正も行う。

Fig. 6-5にBSB法を用いて検出したTC球の位置角 θ 、 ϕ と、パルスエコー法を用いて検出したTC球までの距離 r の時間変化を示す。船の動揺や波浪の影響を受けており、位置角、距離が変化している。得られた位置角 θ の中で、使用する最高周波数である120 kHzのビーム幅の2倍である 6.9° 以下の値のときの形状関数を求めた。位置角 θ が 0.81° 、 2.0° 、 4.0° 、 6.0° と、比較のために 7.6° のときに測定した形状関数（比較のため指向性関数補正前も示す）をFig. 6-6示す。また、BSB法とパルスエコー法を用いて得られたTC球の位置を同時に示す。まず、受波ビーム主軸付近の結果である θ が 0.81° の時（Fig. 6-6 (a)）は、指向性関数を補正する前と、補正した後（形状関数）で大きな差がない。これは、測定されたTC球の位置がビー

ム主軸付近だからである。しかし、位置角 θ が大きくなるにつれ、指向性関数補正による効果が形状関数に現れている。つまり、指向性関数を補正することで、形状関数の理論値と実測値がよく一致しており、対象の広帯域での散乱特性を測定可能である。一方で θ が 7.6° の時（Fig. 6-6 (e)）は、形状関数の理論値と実測値の一致がよくない。つまり、使用する最高周波数の120 kHzのビーム幅の2倍の外側では精確に対象の散乱特性を得られない。

以上本節では、TC球の形状関数を、BSB法を用いて指向性関数を補正して求めた。受波ビームの主軸上になくても、使用する最高周波数のビーム幅の2倍以内であれば、対象の散乱特性、つまりはTSスペクトルを精確に測定可能であることが実証できた。

6.4 魚のTSスペクトルの測定

前節で、反射に指向性がないTC球からの反射波に対して、BSB法を用いて指向性関数を補正し、ビーム主軸付近にTC形状関数を精確に測定できた。すなわち、受波ビーム主軸にない対象のTSスペクトルも広帯域で、精確に測定可能である。本節では、TC球で確かめられたBSB法を用いて、魚のTSスペクトルを測定する。

まず、TC球と同時に懸垂した、準自然状態の魚のTSスペクトルを測定する。次に、この実験中に得られた自然状態の魚からの反射波に対しても、指向性関数を補正し、TSスペクトルを連続に求める。なお、本節で解析を行ったデータは、6.3節で示したハンドウイルカのソーナー音を用いたデータである。

6.4.1 準自然状態の魚のTSスペクトルの測定

Fig. 4-14に示したように、TC球の1 m下に、鉛直テグスから枝状もしくは手網状に30 cmのテグスを結び、それに釣り針で活きた魚をつけた。このとき用いた魚は、尾又長が21.1 cmのメジナ（*Girella punctata*）である。

Fig. 6-7にBSB法を用いて検出した、この準自然状態の魚の位置角 θ 、 ϕ とパルスエコー法を用いて検出した魚までの距離 r の時間変化を示す。同時に検出したFig. 6-5のTC球の位置角変化と比べると、0-200 ピングの間などで位置角 θ 、 ϕ の変動が大きい。これらは、テグスに繫いだ魚がビーム内を大きく暴れており、位置角が変化したためである。また、魚までの距離の変化を見ると、最大で28 cm魚が動いており、これは枝状に結んだテグスの長さと同程度である。

得られた準自然状態の魚の反射波において、検出された位置角が 6.9° 以下（120 kHzにおける-3 dBビ

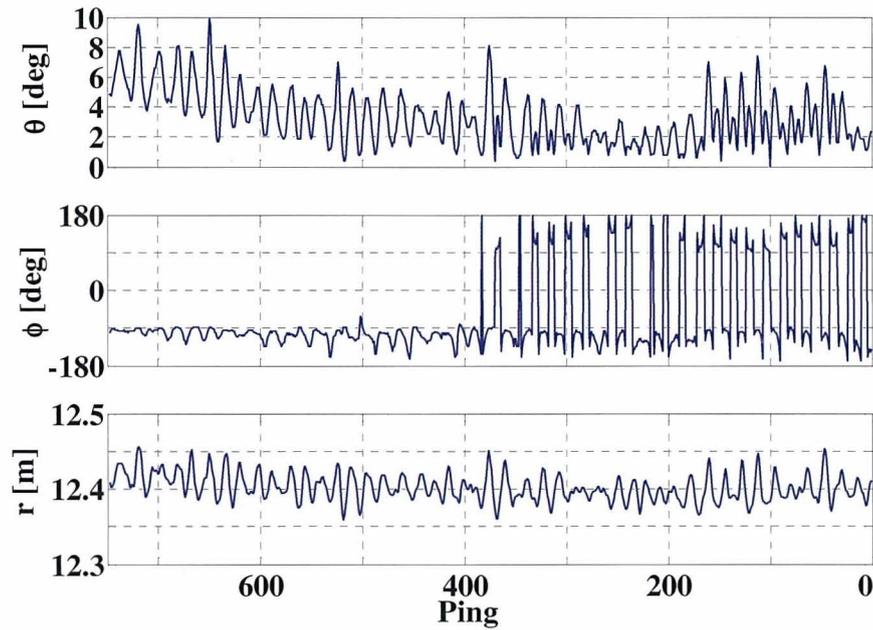


Fig. 6-5. TC sphere position angles, θ and ϕ (upper and middle), and the range between the transducers and TC sphere (lower) as a function of ping number, respectively. The x axis shows ping number (325 s)

ーム幅の2倍)のデータに対して、指向性関数を補正し、TSスペクトルを求めた。Fig. 6-8に代表として位置角 θ の値が等しいが、異なる時間の時に得られた準自然状態の魚のTSスペクトルを示す。(a)と(b)を比較すると、両者とも位置角 θ は 0.8° で、魚がビーム主軸近くにあるにもかかわらず、426ピング目(Fig. 6.8 (b))のTSスペクトルが、どの周波数に対しても小さい。これは、魚の反射波スペクトルが小さいのが原因である。つまり、魚の反射波のレベルが、姿勢変化などにより小さく、TSスペクトルに影響を及ぼしている。同様の方法で求めた400~430ピング(15s)間の準自然状態の魚のTSスペクトルをFig. 6-9に示す。この間、魚の上に吊るしたTC球の反射波より、位置角を求め、形状関数を求めたところ、TC球はビーム主軸付近にあり、位置角 θ はビーム幅の2倍である 6.9° 以下であり、精確な形状関数を求められている。魚のTSスペクトルは、時間と共に大きく変動しており、反射に指向性のないTC球のように、一定の値ではない。これらのTSスペクトルの変動は、4.6節における準自然状態の魚のTSスペクトル(TC球の反射波により指向性関数を補正, Fig. 4-17 (b))にも表れている。つまり、繫いだ魚が暴れ、それによる姿勢角変化によるTSスペクトルの変化を測定して

いと結論付けた。過去の研究と比較するために、単一の周波数である70 kHzと100 kHzの時のTS値に注目する。まず100 kHzでのTS値は、408ピングで41.7 dBの最大値をとり、 -40 dBから -65 dBの間を激しく変動している。一方で、70kHzでは、424ピングで39.8 dBと最大値をとり、 -39 dBから -65 dBを変動している。得られたTS値と魚の尾叉長を(4.5)式の基準化TSの式に代入し、姿勢平均の基準化TSを求めた。得られた70, 100 kHzにおける姿勢平均基準化TSと最大基準化TSは、それぞれ

	姿勢平均	最大
70 kHz	-72.8 dB	-66.3 dB
100 kHz	-77.3 dB	-68.2 dB

であった。最大、姿勢平均規準化TS共に、既往の研究で得られている有鰈魚の規準化TSの値よりも、小さい結果である。これは、テグスで吊るされた準自然状態の魚の激しい姿勢変化によりFig. 6-8 (b)のようにTS値そのものが、小さいことに起因する。

以上、広帯域のイルカのソナー音でBSB法を用いて、海上において準自然状態の魚の位置角を推定し、TSスペクトルを測定した。この際、魚の1 m上に吊るしたTC球の形状関数を測定し、精確な散乱特性を得られていることから、準自然状態の魚のTSスペク

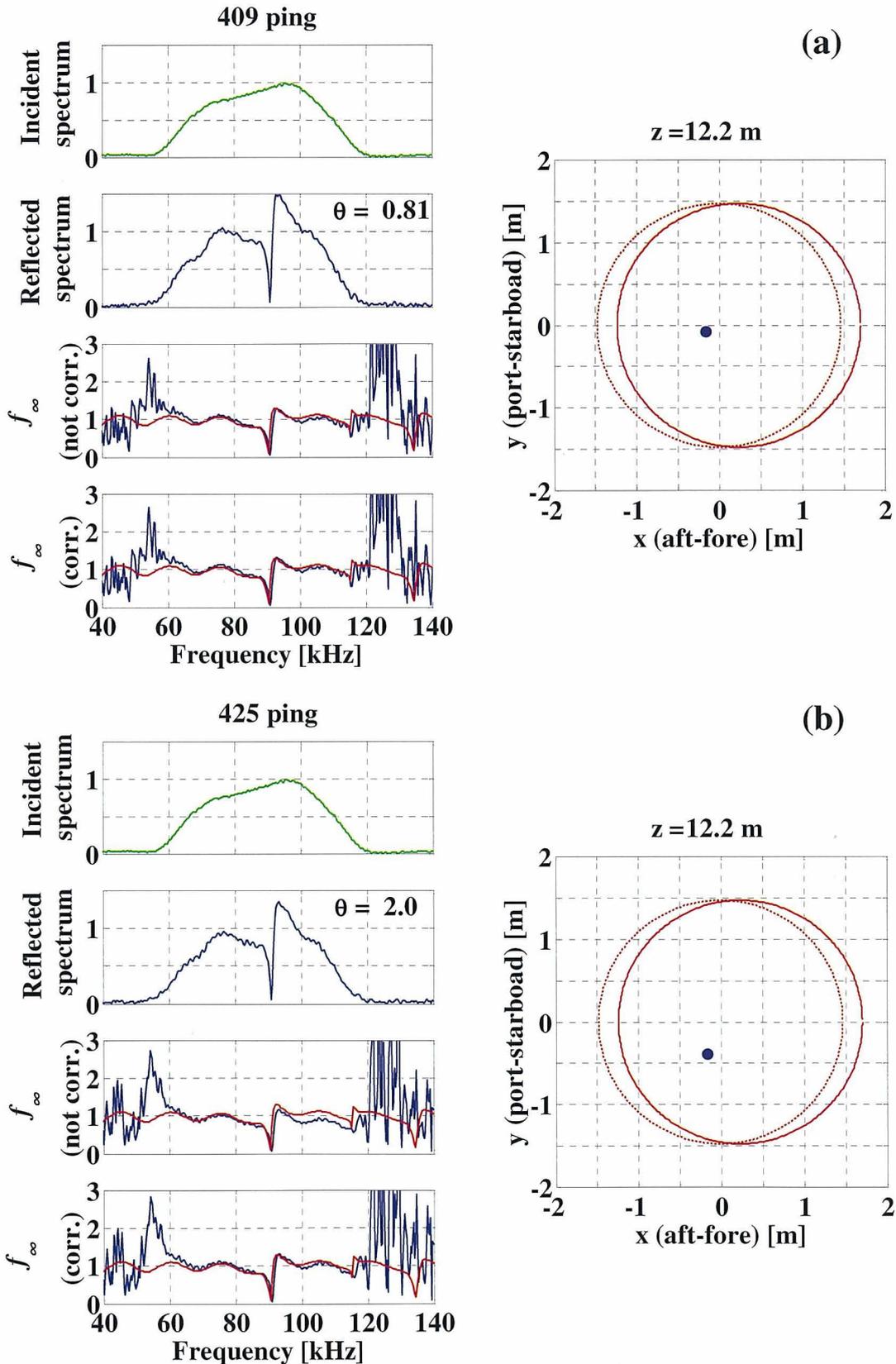
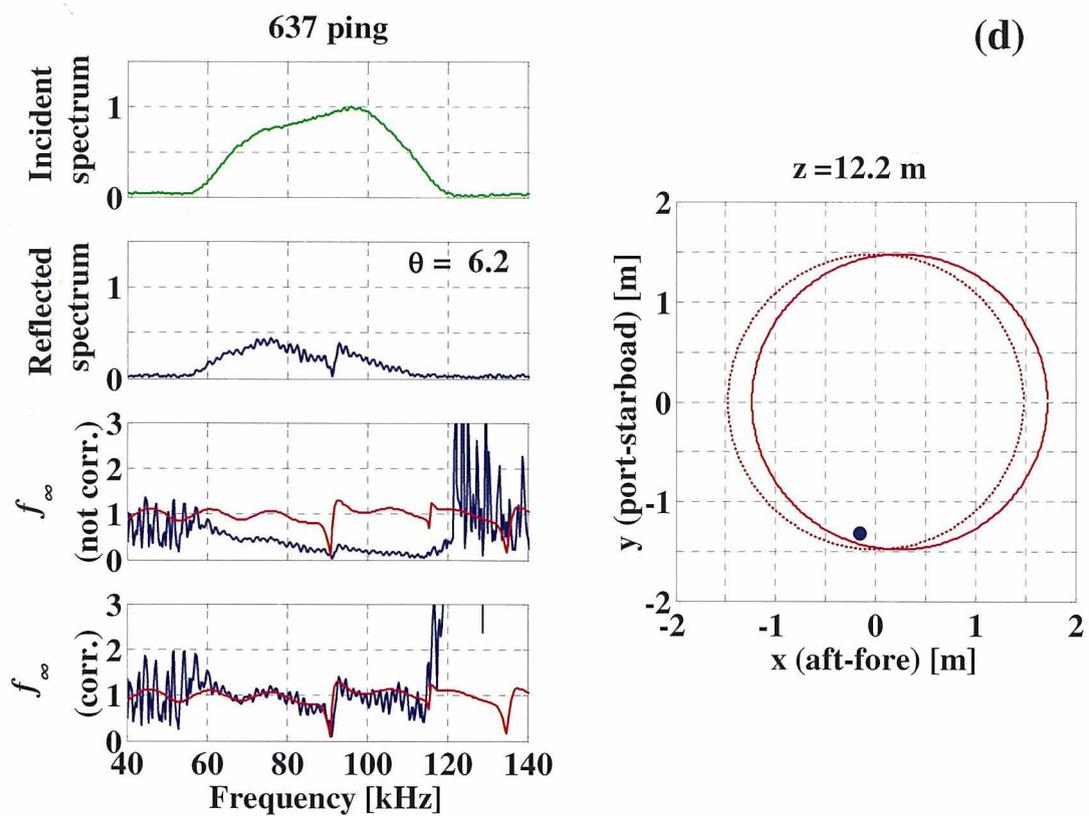
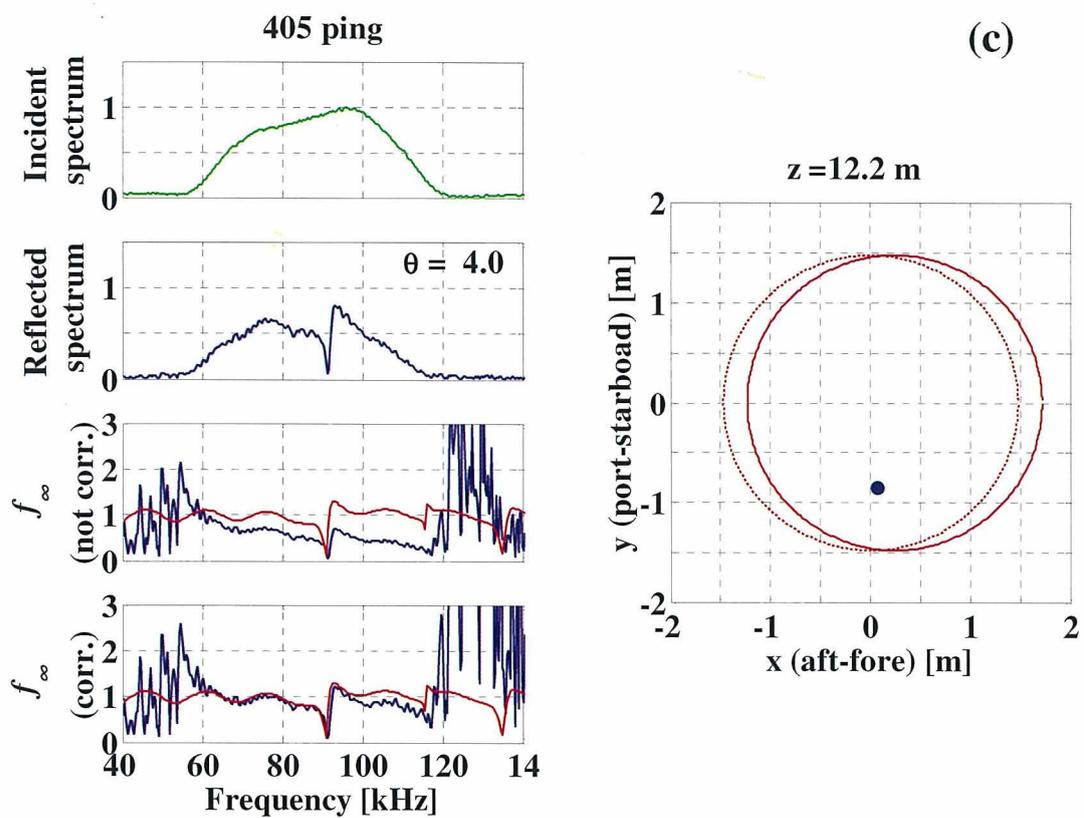


Fig. 6-6. The measured form function of TC sphere and sphere position using bottlenose dolphin sonar signal. Left side shows processes to calculate form function: amplitude spectrum of incident wave and reflected wave (first and second line), form function without directivity correction (third line) and final form function (forth line). In the form function figures, red line shows theoretical value and blue line shows measured data by the spectrum ratio method. Right side shows detected sphere position; red solid line shows the beam spread of receive transducer which is calculated by using two times the -3 dB beam width at 120 kHz, and red dotted line shows that of transmit transducer. The position angle θ for (a) to (e) are 0.81 , 2 , 4 , 6 , and 7.6 degrees, respectively.



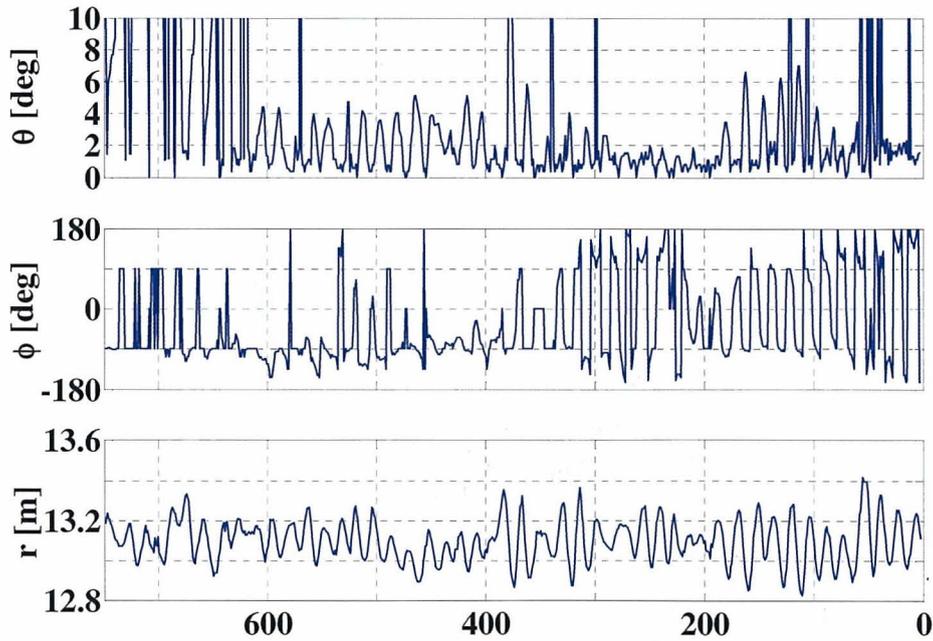
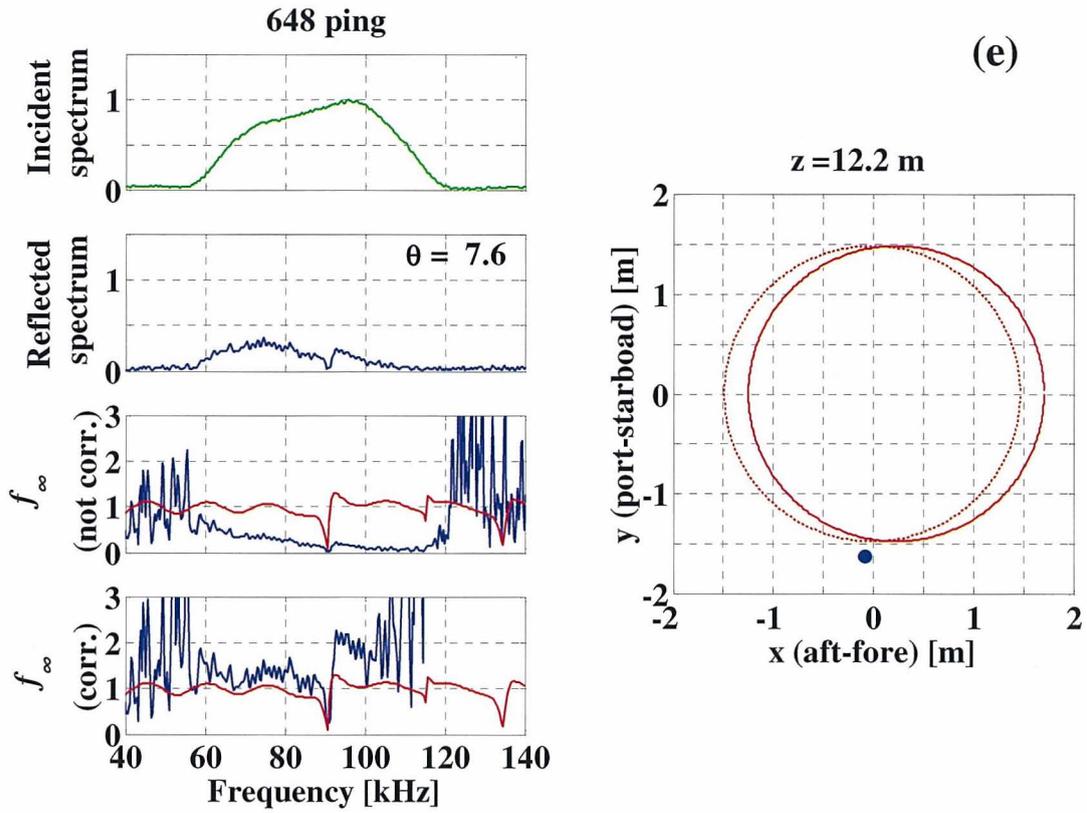


Fig. 6-7. Position angles θ and ϕ (upper and middle) of tethered fish, and the range between the transducers and the fish (lower) as a function of ping number, respectively. The x axis shows ping number (15 s)

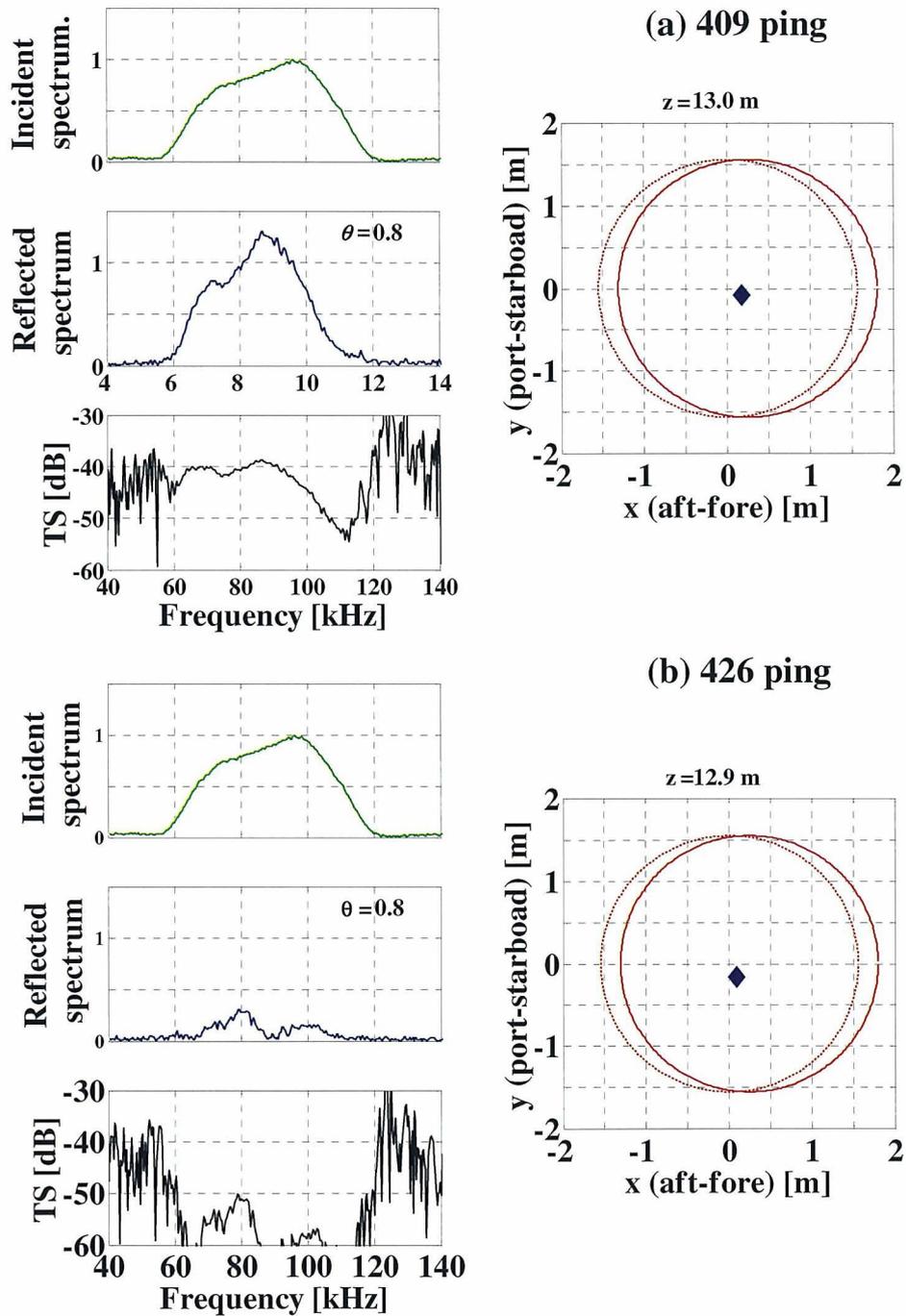


Fig. 6-8. The measured TS spectra of semi-*in situ* fish and fish position using bottlenose dolphin sonar signal. Left side shows processes to calculate TS spectra: amplitude spectrum of incident wave and reflected wave (top and middle), and TS spectra (lower). Right side shows detected the fish position; red solid line shows the beam spread of receive transducer which is calculated by using two times the -3 dB beam width at 120 kHz, and red dotted line shows that of transmit transducer. The measurements result of 409th ping (a), and 426th ping (b), respectively.

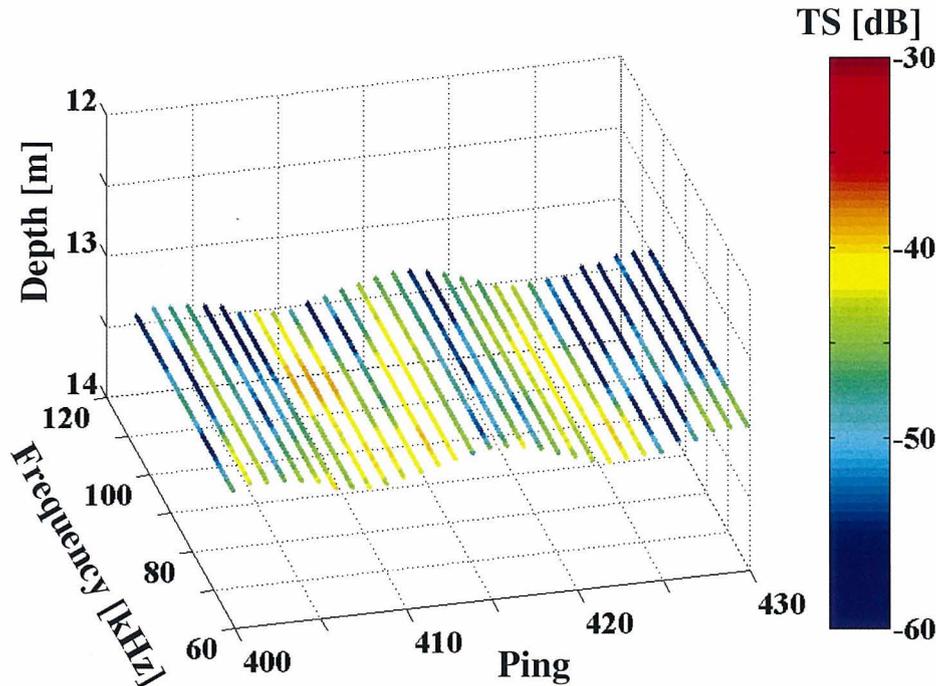


Fig. 6-9. Result of semi-*in situ* fish TS spectra using bottlenose dolphin sonar signal. The x axis shows ping number (15 s), the y axis shows frequency, the z axis shows depth, and color shows TS value.

トルにおいても、精確な値を得られたと結論付けられる。

6.4.2 自然状態の魚の TS スペクトルの測定

次に、上の実験中に得られた自然状態の魚の TS スペクトルを求める。Fig. 6-4の550ピングから700ピングにかけて、水面方向に移動する魚によると思われる反射波を取得したので、これを解析する。準自然状態の魚の TS スペクトルと同様に、検出した位置角が 6.9° 未満のデータに対して解析を行った。

得られた TS スペクトルの結果 (30ピング分, 15s) を Fig. 6-10に示す。この時の TS スペクトルの値は、 -60 から -48 dB の間を変動しており、653ピングでは、全体が -48 dB になっている。この魚は15sの間に約1.8 m 水面方向に移動しており、気泡などの平均的な上昇スピード (18 m/min) に比べると (吉田ら, 2002), ゆっくりと上昇している。また, TS スペクトルにも細かい変動 (100 kHz において最大で20 dB) があり, 姿勢変動による TS スペクトルの変化が観測できていると考えられ, この対象は自然状態の魚と考えられる。このように, 連続した TS スペクトルは, 対象弁別の基礎情報に資する。

以上本節において, 準自然状態の魚の TS スペクト

ルを測定し, 姿勢変動による TS スペクトルの変化を測定した。また, 魚と思われる反射波の TS スペクトルも連続で測定できた。このエコーは, 水深方向への移動スピードと, TS スペクトルの大きな変動から, 自然状態の魚からの反射波であると考えられる。

6.5 結 言

本章では, 前章で構築した広帯域スプリットビーム (BSB) 法の有効性と実用性を TC 球の形状関数を用いて確認し, また実際の魚の TS スペクトル計測に成功した。

まず6.2節において, 相互相関処理を用いて方位アレイ間の時間差を検出し, TC 球の位置角を水槽内で測定し, イルカのような広帯域のソーナー音を用いても, 対象の位置角を精確に測定できるのを確認した。

次に6.3節で, 海上において TC 球の形状関数を測定し, 指向性関数を補正することで, 使用する音波のビーム幅の2倍以内であれば, 対象の散乱特性, つまり, TS スペクトルを精確に測定可能であることを示した。

6.4節では, 同じく海上実験で, テグスに繋いだ準自然状態の魚と自然状態の魚の TS スペクトルを連続で測定した。この中で, 姿勢変動によると思われる

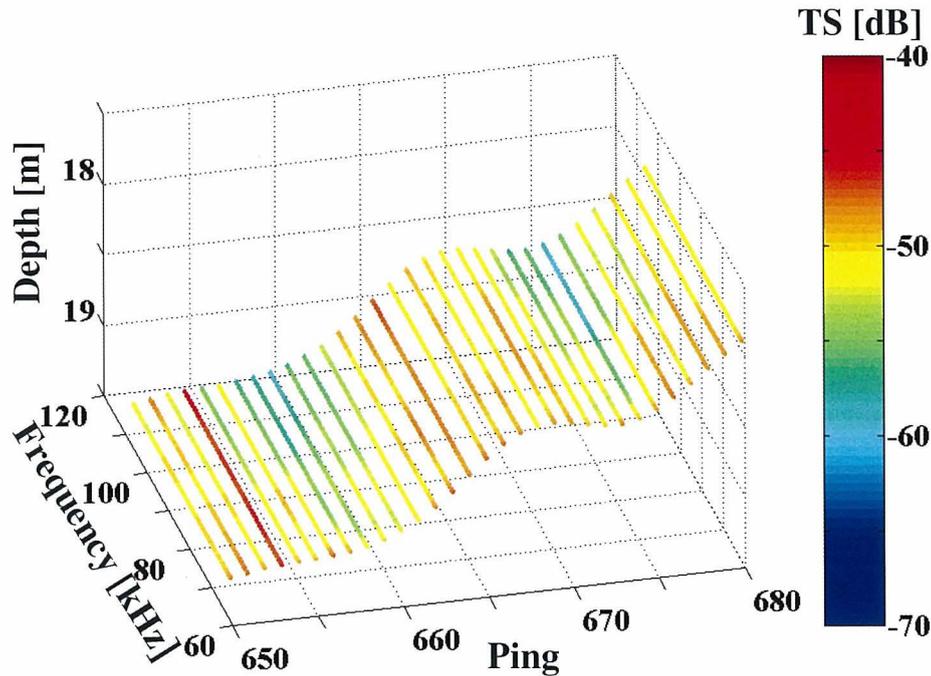


Fig. 6-10. *In situ* fish TS spectra using bottlenose dolphin sonar signal. The x axis shows ping number (15 s), the y axis shows frequency, the z axis shows depth, and color shows TS value.

TS スペクトルの変動や、水深方向での移動距離などにより、対象識別の情報を抽出可能であるのが示唆された。

第7章 イルカのソナー音の魚群探知機への適用に向けて

7.1 緒言

前章までで、イルカのソナー音を人工的に送受波して、高い分解能を有した状態で、魚などの対象固有の散乱特性である自然状態での TS スペクトルを、ビーム内であれば測定するのに成功した。そこで展開した内容は、主にイルカのソナーの広帯域で短パルスという特長を活かした、広帯域スプリットビーム (BSB) 法という形で結実させた。イルカのソナー音もしくはエコー処理には、それ以外にも活用できる特長があると考えられる。一方で、例えば大きな音を長時間発生できないなど、生物ソナーとしての制限もある。

本章では、実際にイルカのソナー音を魚群探知機に適用する上でのメリットや問題点について考察し、将来のイルカ型の魚群探知機やソナー開発に向けての検討や提案を行なう。

7.2 節では、広帯域ソナー音の信号対雑音比が小さくなるという弱点を緩和するための手法として、相互相関処理を用いて信号対雑音比の向上を試みる。第7.3 節でイルカのソナー音の特徴について工学的検知から考察する。7.4 節で、イルカのソナー音の魚群探知機への適用の提案を行う。

7.2 相互相関処理による信号対雑音比の向上

一般的に広帯域信号では高い信号対雑音比を得ることが難しい。しかし実際の海においては、雑音環境はよくなく、魚群探知機などのような計測機器を運用する上で、一般的に高い信号対雑音比で魚からの反射波を得るための工夫が必要である。しかし、ソナー方程式などで示したように、(2.2 節) 拡散による減衰、海水の音波吸収による減衰は、避けることは出来ず、また環境雑音や自船の発する雑音など、多くの雑音がある。そこで、様々な方法により信号対雑音比 (以下 SN 比) を上げる工夫がされている。具体的には、

- (1) 送波音圧をキャビテーション発生の寸前まで上げ、信号のレベルを上げる
- (2) 送波、受波に指向性を持たせ、指向性利得を得る
- (3) 平均化やフィルタリングといった後処理を用い

る
 などである。本研究では、(1)、(2)のようなシステム自身よる利得は、現状ではこれ以上大幅には望めない。そこで、(3)の後処理（または受信処理）によるSN比の向上を試みる。具体的には、整合フィルタ処理に等価な相互相関処理を行い、信号対雑音比の向上を試みる。

Fig. 7-1に、SN比算出のための、信号レベルとノイズレベルの定義を示す。信号レベルは、反射波の振幅の最大値を実効値にした値を、ノイズレベルは、その最大値から各ソーナー音の入射波のパルス幅の15倍前からパルス幅分を、平均した値をノイズレベルとした。入射波のパルス幅はそれぞれ

短バースト	20 μ s
ハンドウイルカ	24 μ s
スナメリ	42 μ s

である。SN比は、信号音圧レベルを S 、ノイズレベルを N とすると、

$$R_{SN} = 20 \log \frac{S}{N} \quad (7.1)$$

と表せる。(7.1)式を用いて、相互相関処理を行う前の生のデータと、相互相関処理後のデータでSN比をそれぞれ求めた。解析対象は、4.3節で用いた海上実験でのTC球からの10ピング分の反射波を用いた。

相互相関処理に用いた参照波（レプリカ）は、水槽実験で計測した各ソーナー音の入射波を用いた。

Fig. 7-2に代表としてハンドウイルカのソーナー音を用いて求めた相互相関処理の結果を示す。生の反射波よりも、相互相関処理を行ったもののほうがTC球の前のノイズ成分が軽減されている。これらのSN比を求め、各ソーナー音で10ピング分の解析結果を平均し比較した。結果を Fig. 7-3に示す。どのソーナー音を用いても、相互相関処理を行った後のSN比の方が、元の信号のSN比よりも高い。各ソーナー音における相互相関処理を用いて得られたSN比の平均利得と最大利得は、

	平均利得[dB]	最大利得[dB]
短バースト波	5.3	11.4
ハンドウイルカ	7.7	14.3
スナメリ	9.2	16.1

であった。同じようなパルス幅の短バースト波とハンドウイルカのソーナー音では、ハンドウイルカの方が相互相関処理による利得が大きい。また、平均、最大利得共に、スナメリのソーナー音を用いた場合が最も良くなった。つまり、人工のソーナー音よりも、イルカのソーナー音を用いた方が、相互相関による利得が大きい。

この特長を活かす試みを行なった。Fig. 7-4(a)は、

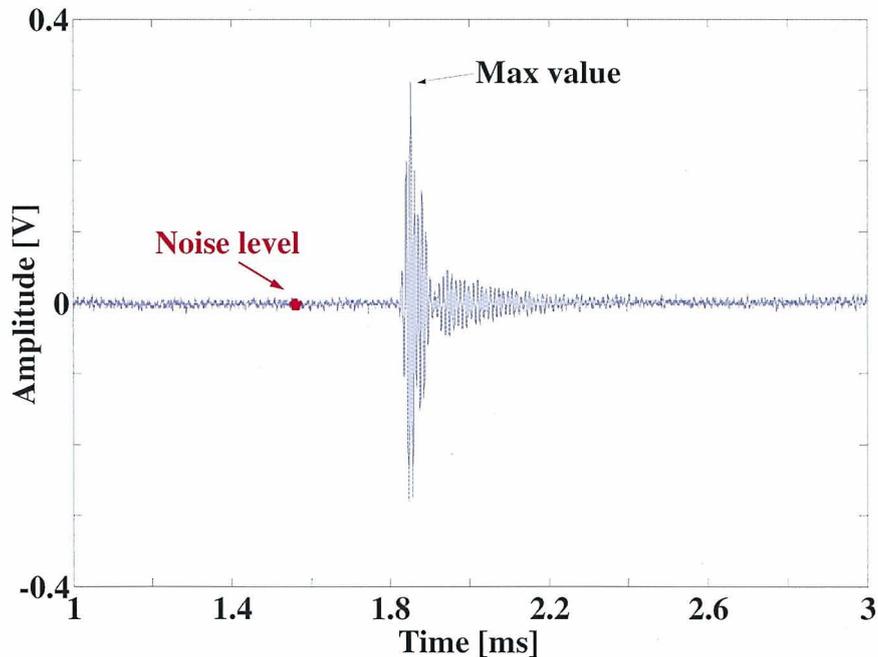


Fig. 7-1. The definition of the noise level and the signal level. The signal level are defined that changing the maximum amplitude value (V_p) to effective value (V_{rms}). From before 15 times the pulse duration, the noise level made the pulse duration minute to be the noise level from the maximum value (Red color).

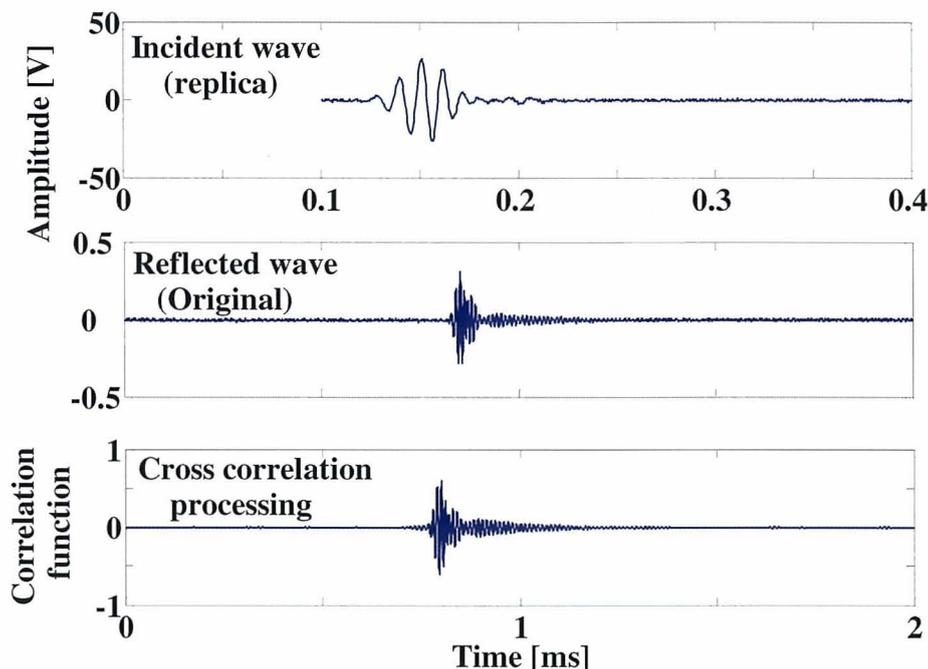


Fig. 7-2. The result of cross correlation processing. The reflected wave from the tungsten carbide sphere (top), the incident wave form as replica (center), the result of correlation function by cross correlation processing.

6.4節で解析をした、ハンドウイルカのソーナー音を用いて取得した準自然状態の魚からの反射波のエコーグラムの拡大図である。TC球、魚、錘が分離できているが、そのほかの部分（水深14 mなど）で、雑音があり、SN比が悪いのがわかる。そこで、広帯域のイルカのソーナー音を活かすために2つの検討を行った。まず1つ目は、必要帯域のみを通す、バンドパスフィルタ処理によりSN比を改良することを試みた。バンドパスフィルタ処理は、40-140 kHzの帯域で、直線位相型のFIRフィルタを用いた。次に、フィルタをかけた上で、先に述べた方法である相互相関処理を行った。相互相関処理は、整合フィルタであり、フィルタ処理の一種である。この時レプリカに用いたのは、任意のピングのときの魚からのエコーを用いた。フィルタリングによる結果をFig. 7-4 (b)に、フィルタリング後に相互相関処理を行った結果をFig. 7-4 (c)に示す。バンドパスフィルタをかけただけでも、元のエコーグラムにあるような雑音成分が軽減され、かなり高いSN比になっているのがわかる。次に、相互相関処理を行った場合は、レプリカに魚からのエコーを用いているので、準自然状態の魚の信号が強くなっており、また(b)と(c)を比較するとさらに、雑音成分が取り除かれているのがわかる。つまり、どちらの手法も、イルカのような広帯域音波の送受波に

おいて、雑音成分を除く働きがあり効果的な雑音対策だといえる。

イルカのソーナー音は、大きくハンドウイルカ型とスナメリ型に別れることを2.5節で述べた。送波音圧の最大値は、ハンドウイルカで220 dB re μPa at 1 m, スナメリで180 dB re μPa at 1 m程度との報告がある(2.5節参照)。このような2種類のソーナー音に別れる理由には2.5節でも述べたとおり諸説がある。ここでは、工学的見地から考察を行う。上記に述べたSN比を向上させる方法は、(1)の場合、生物の場合も人工のソーナー同様にキャビテーションの発生という限界がある。そこで、人工ソーナーの場合は、220 dB程度のキャビテーション発生限界の音波を常時発生するのが通常である。それに対してイルカは、自然界を生き抜くために、効率の良い探査を行っていると考えられるが、使用できるエネルギーには限りがあり、送波音圧に限界があると考えられる。したがって、送波レベルは一般に人工ソーナーに較べ小さい。次に、(2)の送波受波に指向性を持たせ、利得を得ている点に関しては、様々なイルカは魚群探知機並みの指向性利得を持っていることが知られている(Au, 1993)。さらに、イルカは広帯域音を用いるので一般にSN比を高くとりにくい。つまり、低めの送波音圧で広帯域音を用いて探査するためには、何らかの脳内

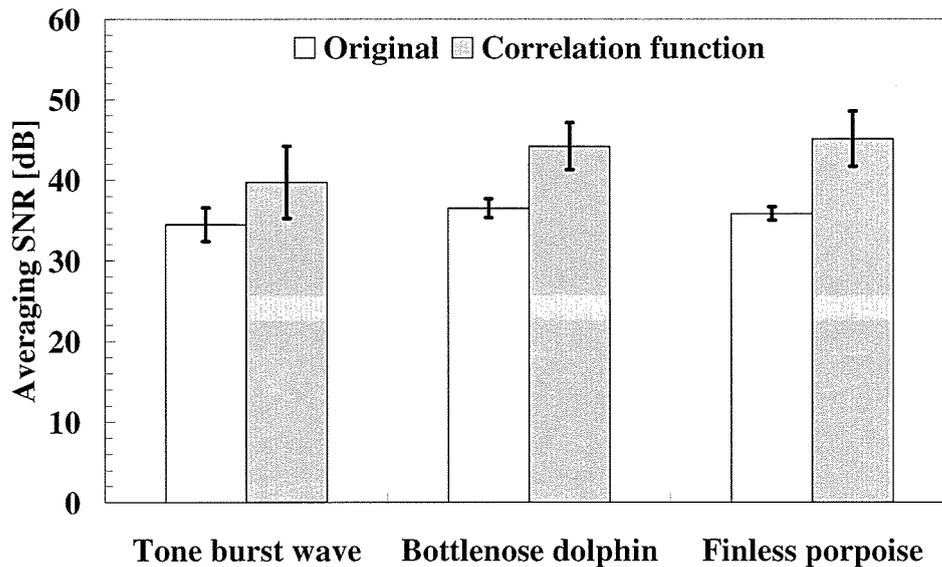


Fig. 7-3. Comparison of averaging signal per noise ratio between original reflected wave from TC sphere and cross correlation processing.

での処理を行わなければ、対象までの距離が100 m以上離れて、高い確率で、大きさ、材質、形状などを弁別することは出来ないと考えられる。つまり、(3)の処理利得が大きいと推察できる。

上記の相互相関処理の実験では、自然界のイルカのソーナー音のレベルではなく、人工のソーナーとはほぼ同じ送波レベルを用い、ソーナー音ごとの処理利得を調べた。解剖学的検知から述べられた考察として、スナメリは体が小さいためにハンドウイルカのような広帯域で大きな音圧を出すことが出来ないと考えられ (Au, 1993; Space and Naval Warfare Systems Center, 1998), ハンドウイルカよりかなり狭帯域の音波を用い (Fig. 2.5 参照) 帯域フィルタに似た処理で、雑音の多い海中での探査を行っていると考えられる。Altesらは、イルカのソーナーでは、相関処理などにより SN 比を大きく改善しないとしている (Altes *et al.*, 2003)。しかし、複数のパルス列を用いることにより、SN 比が向上するとしている。本研究では、若干ではあったが、短パルス波を用いた結果よりも SN 比の向上が見られた。また、イルカが処理利得を利用して、識別を容易にしている点では、本研究と同じ結論である。このイルカのソーナー音を用いた処理利得 (フィルタリング, 相互相関処理, フーリエ変換, ウェーブレット変換) に関する研究は多く行われており (例えば, Huang and Solorzano, 1991), 高い SN 比を得るためには、まだ研究が必要である。

以上、本節ではイルカのソーナーと人工のソーナーの SN 比および処理利得について検討し、イルカのソーナー音を人工ソーナーに適用する場合、相互相関処理をすることで、広帯域信号の SN 比が小さくなるという弱点を緩和できることを示した。

7.3 イルカのソーナー音の特徴

イルカのソーナー音は、広帯域、短パルスという特性を持っている。このソーナー音を使うことの利得を多くの研究が明らかにしようとしてきた。これらの研究は、大きく分けると、周波数解析を行うものと、反射波信号の継続時間や振幅のピークに注目するもの、その両者に分けられる。

Au はハンドウイルカが数 mm の厚みを検出できるのは、反射波のスペクトルにタイムセパレーションピッチと呼ばれるノッチが現れ、それらを距離に換算することで、厚みを検出できるとしている (Au, 1993)。また、Au and Benoit-Bird は、イルカの音波を人工的に送受波し、鰐の軟 X 線写真と実際の魚の反射点を推測し、モデルにより検証を行っている (Au and Benoit-Bird, 2003b)。これらの研究に代表されるように、イルカの広帯域のソーナー音の利用により、広帯域の反射特性を得られ、特に対象識別に効果が期待できる。本研究でも、対象に固有の TS スペクトルの計測という形で、その効果を実証した。このような広帯域性の利用方法に関しては、今後ともさらなる研究が必要であろう。

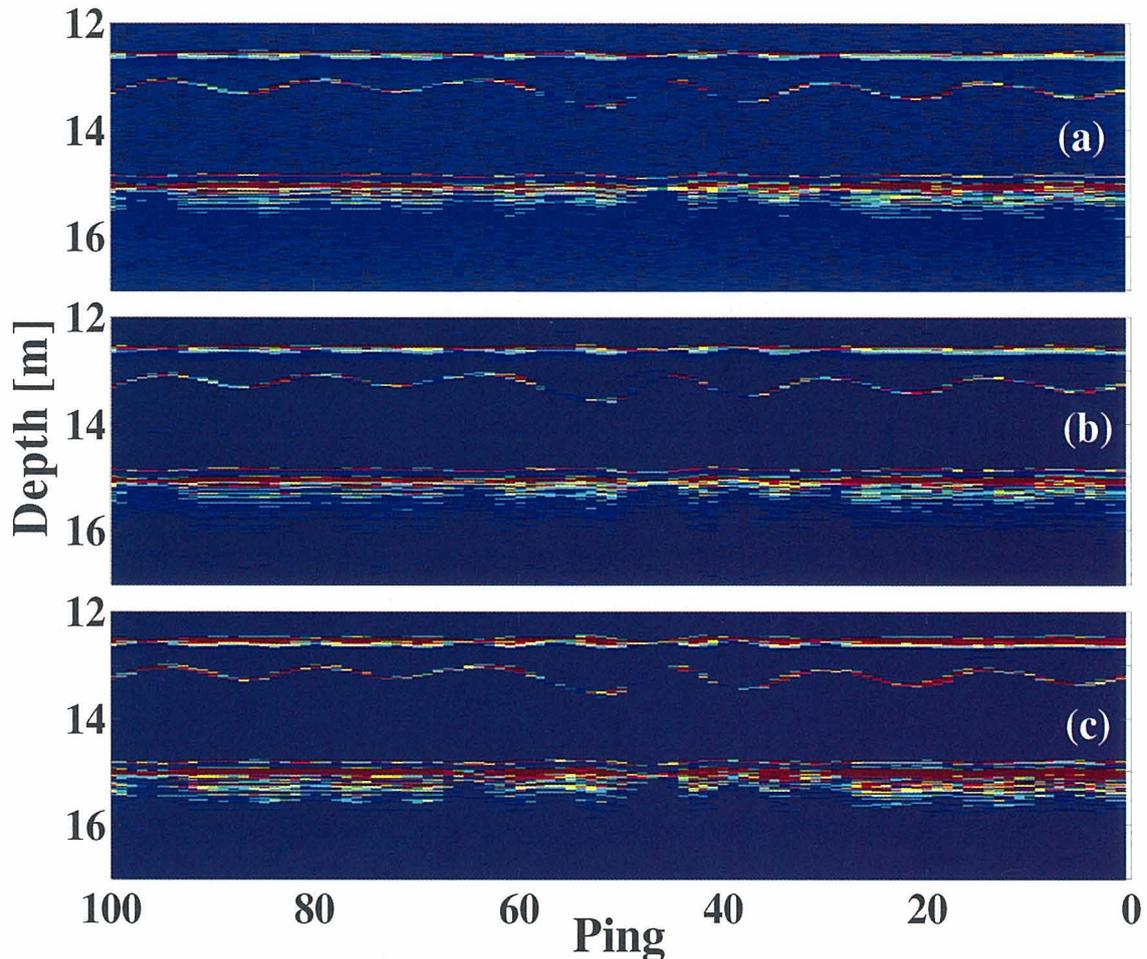


Fig. 7-4. Comparison of the signal processing results, the original echogram (a), band pass (40kHz - 140kHz, FIR filter) filtering (b), and cross correlation processing with filtering (c).

また一方で、イルカのソーナー音の送波の方式も人工ソーナーにはない仕組みがある。イルカと対象までの距離が短くなれば、彼らは送波する音圧を下げるが、送波する頻度は増える (Au and Benoit-Bird, 2003a)。これは、同じくバイオソーナーであるコウモリも同じ傾向がある。イルカもコウモリも餌と思われる対象を見つけると、標的を定め、パルスの送信間隔を変化させて、対象へと近づいていく。この時の音波の送信間隔と、移動距離に関係があるのが確かめられている。また、標的として定めた対象からの多くの反射波を取得し、対象の情報の確度を向上させていると考えられる。このような機能を人工ソーナーに適用するとするとは、Autonomous Underwater Vehicle (AUV) などの水中を移動可能なシステムの場合は良いが、船につけるような人工ソーナーとしては、適用できない。しかし、標的を定め、情報の確度を高める

るという方法は有用である。2.3節で示したエコートレース解析などで、詳細に知りたい部分をより多くの情報を取得し、確度を高めるといった点で、イルカのような可変の送信間隔、標的を定める手法は有効である。

以上見てきたように、イルカのソーナー音の大きな特徴は、広帯域、短パルス、対象に応じた送波方式であるが、それ以外にも混信回避や、7.2節で検討したような信号対雑音比の向上のための後処理方法など、多くの利点が考えられる。本研究では、広帯域、短パルスという2つの特徴に焦点をあて、人工ソーナーへの適用技術として、広帯域スプリットビーム法を開発した。処理利得や混信回避といった部分では、未だ研究の余地がある。

7.4 イルカのソーナー音の魚群探知機への適用の提案

本節では、イルカのソーナー能力と人工のソーナーのメリットを整理し、両者のメリットをまとめ、実際の魚群探知機への適用を考える。

まず、広帯域、短パルスのイルカのソーナーのメリットは、下記のように整理される。

- 1) 高分解能化による自然状態の TS 測定制限の緩和
- 2) 広帯域の TS スペクトルによる魚種識別情報の増加
- 3) 魚の TS 特性の解明のための情報増加
- 4) 相互相関処理などにより広帯域の信号対雑音比低下という弱点を緩和

一方で人工のソーナーのメリットは、下記のように整理される。

- 1) キャビテーション寸前までの大きな送波音圧を継続使用可能
- 2) 規則的な制御・処理により精密解析が可能
- 3) TS などの反射の指標を、サイズ、行動、魚種推定などの有用な情報にする

実際にイルカのソーナー音を魚群探知機に適用する際には、信号対雑音比が問題になるが、イルカのソーナー音のメリットの1つである処理利得と、人工のソーナーのメリットである大出力を連続送信可能という両者を、合わせて用いることが望ましい。また、イルカのソーナー音で得られる対象の広帯域の反射特性は、人工ソーナーの財産としての既往の研究成果と比較し、対象識別情報に結びつけるべきである。そして、イルカのソーナー音の特長である短パルスを用いることで、自然状態の TS 測定の限界点の緩和に繋がる。以上をまとめると、

- 1) 人工ソーナーのメリットである送波音圧を最大限まで活用
- 2) イルカのソーナー音のメリットである短パルスを用いて、群れからの反射波を単体魚の集まりとして測定可能
- 3) イルカのソーナー音のメリットである広帯域信号を用い処理利得の向上
- 4) 定量的で広帯域の TS スペクトルに、既往の研究成果を結びつけることにより、サイズ、行動、種の判定や推定に発展

となる。将来システムでは、提案したような人工ソーナーとバイオソーナーの両者のメリットを融合させ、現状よりも多くの情報を精度が高く得られるようになるであろう。

7.5 結 言

7.2 節では、イルカのソーナー音によるエコーに相互相関処理を行い、8 dB 程度の処理利得が得られた。これは人工のソーナー音を用いるよりも高い信号対雑音比である。これにより SN 比の低下という広帯域音の弱点を相当に緩和できる。

7.3 節では、イルカのソーナーと人工のソーナーの長所と欠点をまとめ、比較し、両者のメリットを融合させるべきとの提案を行った。

7.4 節では、イルカのソーナー能力と人工のソーナーのメリットを整理し、両者のメリットをまとめ、実際の魚群探知機への適用について述べた。

以上、本章では実際にイルカのソーナー音を魚群探知機に適用する上でのメリットや問題点について考察し、将来のイルカ型の魚群探知機やソーナー開発に向けての検討や提案を行なった。

第8章 結 論

8.1 まとめ

本研究では、イルカのソーナー音の短パルス、広帯域という特性に注目し、実際にイルカのソーナー音を送受波し、広帯域の反射特性を高分解能で測定した。これらは、自然状態ターゲットストレンジス (TS) 測定の測定条件の緩和、魚種識別などのための情報の増強につながり、現状の音響資源調査における問題点の解決に資する。

本研究における主な成果を以下にまとめる。

- 1) 広帯域のイルカのソーナー音を用いて、2種類の異なる材質の金属球の形状関数を測定し、スペクトル比法を用いた対象の反射の周波数特性 (TS スペクトル) の精確な測定方法を確立した。
- 2) 麻酔をかけた魚の TS スペクトルを測定し、魚種、個体、姿勢角による TS スペクトルの変化を調べた。TS スペクトルの連続取得が、対象の行動情報推定に繋がり、魚種識別の情報になることが示唆された。
- 3) 海上において、自然状態の魚の探知実験を行い、イルカのソーナー音の適用による高分解能なエコーを取得した。また、送受波器の指向性関数の補正を試みて、金属球が較正だけでなく、指向性関数の補正にも使用できることを確認した。
- 4) 広帯域信号を用いたスプリットビーム (BSB) システムと処理方法を新規に開発した。タングステンカーバイド球を用いて、ビーム主軸上にない場合も、指向性関数の補正が行え、形状関数を精確に計測できることを示した。

- 5) BSBシステムにより、イルカのソーナー音を用いて指向性関数を補正して自然状態の魚のTSスペクトルを測定することに成功した。
- 6) イルカのソーナー音の広帯域性に伴う信号対雑音比の低下を、相互相関処理により8 dB程度改善できることを示した。
- 7) 今後イルカ型の人工ソーナーを開発するために、イルカのソーナー音のメリットと人工のソーナーのメリットをまとめ、両者を合わせた提案を行った。

以上述べた本研究の成果は、特に魚種識別に道を拓くことから、音響を用いた水産資源量調査方法や漁船用音響機器の発展に大きく寄与するものと考えられる。

8.2 今後の課題

以下に今後の課題を述べる。

まず、本研究での実験システムは、市販のパワアンプを使用したために、出力が最大で1 kWと、通常の計量魚群探知機などに比べると、小さい。そこで、よりさらに大出力のパワアンプを用いる、パワアンプとのインピーダンスマッチングをとるなど、送波音圧を上げ、より広い範囲を探知・計測する必要がある。また、これに伴い、処理利得の方法も検討し、より高いSN比を得る必要がある。

次に本研究では、すべての解析をオフラインで行った。これを一般の調査で使用できるように、計算アルゴリズムなどを工夫し、実用レベルに引き上げる、つまりは、広帯域スプリットビーム法の実用レベル化が求められる。

最後に、本研究では、TSスペクトルを魚種推定のための情報に直接結びつけることができなかった。そこで、さらに魚のTSスペクトルの特性を測定するとともに、現在あるモデルと比較し、より確度の高い魚種識別のための基礎情報に繋げられるようにする。つまり、TSスペクトルの連続情報による魚種識別方法の開発である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、東京海洋大学海洋環境学科、海洋計測学研究室の名誉教授古澤昌彦博士には、終始御指導、御鞭撻を受け賜りましたことを厚く御礼申し上げます。海洋安全工学研究室の武田誠一博士には、多大なる御協力と御指導をいただきました。深く感謝申し上げます。また、独立行政法人水産工学研究所の赤松友成博士には、研究に多大なる協力と、指導をしていただきました。御礼を申し上げます。研究を進め

るに当たり、本研究室卒業生で、先端科学技術センター助教の甘糟和男先生にも多くの助言、助けをいただきました。厚く御礼を申し上げます。

海洋計測学研究室の准教授岡本峰雄博士、助教樊春明博士には本論分の取り纏めにあたり、多くの御助言をいただきました。また、御教示と御校閲を賜った応用情報システム工学研究室の教授柿原利治博士、准教授宮本桂則博士に深く感謝するとともに、平素御助言をいただいた千葉工業大学精密工学研究室の教授白井靖幸博士、東北学院大学情報科学科の准教授である松尾行雄博士に感謝の意を表します。

本研究で使用したすべてのシステム設計を株式会社古野電気との共同研究で行いました。株式会社古野電気の技術研究所研究部西森 靖室長、小河慎二主任研究員、船舶機器事業部音響開発課の西田 優主任を始めとして多くの方に、多大なる御協力、御助言をいただきました。厚く御礼を申し上げます。

東京海洋大学実習艇「ひよどり」の酒井一英艇長、深草啓司元機関長、川上長、山根勝行機関長には、4章、6章の海上実験において、多大なる御協力をいただきました。深く感謝いたします。

水産工学研究所、資源情報工学研究室長の高尾芳三室長、澤田浩一主任研究員、安倍幸樹研究員、には第5章における水槽実験でお手伝いをいただきました。厚く御礼申し上げます。

共同で実験を行った、重竹誠二さん、原口裕子さん、豊田陽子さん、小田川絢さん、実験を手伝ってくれた元吉敏和さん、宮城亜紀さん、松裏知彦さん、小川誠記さん、山口 諒さんに御礼を申し上げます。また、海洋計測工学研究室の学生諸子には、本研究に対する御協力、御助言を日々いただくと共に充実した毎日が送れたことを深く感謝申し上げます。

また研究を行うにあたり、多大な御協力をいただきました、元全日本潜水連盟の須賀次郎理事長、海洋哺乳類の研究の面白さを教えていただきました、故鳥羽山照夫博士に感謝の意を、科学の道を示してくれた故今泉吉典博士に敬意を表します。

本研究は、独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構 生物系特定産業技術センター「新技術・新分野創出のための基礎研究推進事業」、「生物系産業創出のための異分野融合研究支援事業」日本学術振興会「科学研究費補助金」の援助をいただきました。御礼を申し上げます。

本研究は、ここに書ききれないほどの人たちに支えられて、見守られ、遂行出来ました。感謝の意を表します。

最後に在学中、生活、精神のすべての面で支えてい

ただいた、両親、兄、祖母に感謝します。

参考文献

- Akamatsu T., Wang D., Nakamura K., and Wang K., 1998: Echolocation range of captive and free-ranging baiji (*Lipotes vexillifer*), finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides*), and bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*). J. Acoust. Soc. Am. **104**, 2511-2516.
- Altes R. A., Dankiewicz L. A., Moore P. W., and Helweg D. A., 2003: Multiecho processing by an echolocating dolphin. J. Acoust. Soc. Am. **114**, 1155-1166.
- 甘糟和男, 2005: 音響によるナンキョクオキアミの計量方法に関する研究, 博士論文, 東京水産大学, 東京, pp.43
- Amundin M., 1991: Sound Production in Odontocetes with Emphasis on the Harbour Porpoise *Phocoena phocoena*, Ph. D. dissertation. University of Stockholm, Kingdom of Sweden.
- Au W. W. L., 1993: The Sonar of Dolphins, Springer-Verlag, New York.
- Au W. W. L., and Benoit-Bird K. J., 2003a: Automatic gain control in the echolocation system of dolphins. Nature, Vol. **423**, 861-863.
- Au W. W. L., and Benoit-Bird K. J., 2003b: Acoustic backscattering by Hawaiian lutjanid snappers II. Broadband temporal and spectral structure. J. Acoust. Soc. Am. **114**, 1118-1123.
- Au W. W. L., Benoit-Bird K. J., and Kastelein R. A., 2007: Modeling the detection range of fish by echolocating bottlenose dolphins and harbor porpoises. J. Acoust. Soc. Am. **121**, 3954-3962.
- Benoit-Bird K. J., Au W. W. L., Kelley C. D., and Taylor C., 2003: Acoustic backscattering by deepwater fish measured in situ from a manned submersible. Deep-Sea Res., Part I **50**, 221-229.
- Benoit-Bird K. J., Au W. W. L., and Kastelein R. A., 2006: Testing the odontocete acoustic prey debilitation hypothesis: No stunning results. J. Acoust. Soc. Am. **120**, 1118-1123.
- Capus C., Paihas Y., Brown K., Lana D. M., Moore P. W., and Houser D., 2007: Bio-inspired wideband sonar signals based on observations of the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*). J. Acoust. Soc. Am. **121**, 594-604.
- Clay C. S. and Medwin H., 1977: Acoustical Oceanography, Wiley, New York.
- Dragonette L. R., Vogt R. H., Flax L., and Neubauer W. G., 1974: Acoustic reflection from elastic spheres and rigid spheres and sphereroids. II. Transient analysis. J. Acoust. Soc. Am., **55**, 1130-1137.
- 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.
- Faran Jr. J. J., 1951: Sound scattering by solid cylinders and spheres. , J. Acoust. Soc. Am. **23**, 405-418.
- Furusawa M., 1988: Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength," J. Acoust. Soc. Jpn. (E) **9**, 13-24.
- 古澤昌彦, 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. 水工研技報, **11**, 173-249.
- 古澤昌彦, 2001: 音で海を見る, 成山堂書店, 東京.
- Foote K. G., 1980: Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish: a comparison of gadoid and mackerel target strength. J. Acoust. Soc. Am. **67**, 2084-2089.
- Foote K. G., 1983: Maintaining precision calibrations with optional copper spheres. J. Acoust. Soc. Am., **73**, 1054-1063.
- Foote K. G., 1987: Linearity of fisheries acoustics, with addition theorems. J. Acoust. Soc. Am., **82**, 1932-1940.
- Foote K. G., Knudsen H. P., and Vestnes G., 1987: Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide. ICES Cooperative Research Report, No.144.
- Goodson A. D., 1997: A narrow band Bio-sonar: Investigating echolocation in the Harbour porpoise, *Phocoena phocoena*. Proceedings of the Institute of Acoustics, **19 Pt 9**, 19-28.
- Gyrin A., Rojewski, M. and Somla, K., 1981a: About the possibility of sea creature species identification on the basis of applying pattern recognition to echo signals. In: Meeting on Hydroacoustical Methods for the Estimation of Marine Fish Populations, 25-29 June, 1979, edited by J. B. Suomala. Cambridge, Massachusetts, Charles Stark Draper Laboratory Inc., Vol.2,

- Part a, 455-456.
- Gyrin, A., Somla, K. and Rojewski, M. 1981b: The number parameters of echo-sounder signals with respect to their usefulness to sea creatures species identification. In: Meeting on Hydroacoustical Methods for the Estimation of Marine Fish Populations, 25-29 June, 1979, edited by J. B. Suomala. Cambridge, Massachusetts, Charles Stark Draper Laboratory Inc., Vol.2, Part a, 467-489.
- Harley H. E., Putman E. A., and Roltblat H. L., 2003: Bottlenose dolphins perceive object features through echolocation. *Nature* **424**, 667-669.
- Hickling R., 1962: Analysis of echoes from a solid elastic sphere in water. *J. Acoust. Soc. Am.* **34**, 1582-1592.
- 本田 聡, 2004: 音響資源調査によるスケトウダラ (*Theragra chalcogramma*) 太平洋系群の若齢魚の年級豊度推定. 水研センター研報告, **12**, 25-126.
- Huang W. Y., Solorzano M. R., 1991: Wavelet preprocessing of Acoustic signals. *Conf. Rec. Asilomar. Conf. Signals, Syst. Comput.*, Vol.25, 1114-1118.
- Hsieh H. E., 1986: A split-beam target strength processor," Master degree thesis, Washington Univ., Seattle.
- 今泉智人, 古澤昌彦, 赤松友成, 2006: ハクジラのソーナー音を用いた散乱振幅の周波数特性の測定. 海洋音響学会誌, **33**, 143-150.
- 海洋音響学会, 2004: 海洋音響の基礎と応用 成山堂書店, 東京.
- 経済産業省資源エネルギー庁長官官房総務課, 2007a: 総合エネルギー統計 (平成19年版). 通商産業研究社.
- 経済産業省, 2007b: 通商白書平成19年度版. 時事画報社.
- 許 正憲, 中西俊之, 土屋利雄, 野並健二, 網谷泰孝, 新井嘉人, 1990: 海中における鉛直方向の音波の減衰について. 海洋科学技術センター試験研究報告, **R 23**, 31-41.
- Love R. H., 1971: Dorsal-Aspect Target Strength of an Individual Fish. *J. Acoust. Soc. Am.* **49**, 816-823.
- Mackenzie K.V., 1981: Nine-term equation for sound speed in the oceans. *J. Acoust. Soc. Am.*, **70**, 807-812.
- MacLennan D. N., and Simmonds E. J., 1992: Fisheries Acoustics. Chapman & Hall, New York.
- Mckelvey R. D., and Wilson D. C., 2006: Discriminant classification of fish and zooplankton backscattering at 38 and 120 kHz. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **135**, 488-499.
- Miyanohana 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. Réun. Cons. Int. Explor. Mer.*, **189**, 317-324.
- 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. 水工研技報, **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.
- Mukai T., Foote K. G., 1997: On the depth dependence of fish target strength. *ICES Council Meeting Papers*, 15.
- 村瀬弘人, 木和田広司, 2002: 鯨類調査の新技術 第10回計量魚群探知機による鯨類餌生物調査. 海洋と生物, **140**, 238-242.
- Móhl B., Wahlberg M., Madsen P. T., Heerfordt A., and Lund A., 2003: The monopulsed nature of sperm whale clicks. *J. Acoust. Soc. Am.*, **114**, 1143-1154.
- Nakahara F., Takemura A., Koido T., and Hiruda H., 1997: Target discrimination by an echolocating finless porpoise *Neophocaena phocaenoides*. *Mar. Mamm. Sci.*, **13**, 639-649.
- Nakamura K. and Akamatsu T., 1998: Comparison of echolocation signal among dolphins and porpoises. *Trans. Tech. Comm. Psychol. Physiol. Acoust. Acoust. Soc. Jpn.*, **H-98-106**.
- Nakken O. and Olesn K., 1977: Target strength measurements of fish. *Rapp. P.-V. Réun. Cons. Int. Explor. Mer.*, **170**, 52-69.
- 梨本勝昭, 飯田浩二, 1994: 特集「水産資源の音響調査手法の現状と展望」について. 月刊海洋, **26**, 599-601.
- Neubauer W. G., Vogt R. H., and Dragonett L. R., 1974: Acoustic reflection from elastic spheres. I. Steady-state signals. *J. Acoust. Soc. Am.*, **55**, 1123-1129.
- 農林水産省, 2007: 図説2007年度水産白書. 農林統計

- 協会.
- Ohshimo S., 2004: Spatial distribution and biomass of pelagic fish in the East China Sea in summer, based on acoustic surveys from 1997 to 2001. *Fish. Sci.* **70**, 389-400.
- 大村秀雄著, 1974: クジラの生態 共立出版, 東京.
- Ona E. (Editor), 1999: Methodology for target strength measurements (with special reference to *in situ* techniques for fish and mikro-nekton). ICES Cooperative Research Report No. **235**.
- Pauly T., Nicol S., Higginbottom I., Hosie G., and Kitchener J., 2000: Distribution and abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*) off East Antarctica (80-150°E) during the Austral summer of 1995/1996. *Deep-Sea Res. II*, **47**, 2465-2488.
- Reeder D. B., Jech J. M., Stanton T. K., 2004: Broadband acoustic backscatter and high-resolution morphology of fish: Measurement and modeling. *J. Acoust. Soc. Am.*, **116**, 747-761.
- Reid D. G. (Editor), 2000: Report on echo trace classification. ICES Cooperative Research Report No. **238**.
- Rudgers A. J., 1969: Acoustic pulses scattered by a rigid sphere immersed in a fluid. *J. Acoust. Soc. Am.*, **45**, 900-910.
- 実吉純一, 菊池喜充, 熊本乙彦監修, 1968: 超音波技術便覧. 日刊工業新聞社, 東京.
- 澤田浩一, 高尾芳三, 高橋秀行, 安倍幸樹, 奥村都誉司, 小林朝子, 杉森守宏, 2004: 水産調査のための音響・光学複合システム (J-QUEST) の開発 I — 音響システムの開発 —. *水工研技報*, **26**, 23-33.
- Sawada K., Ye Z., Kieser R., McFarlane G., Miyanoohana Y., and Furusawa M., 1999: Target strength measurements and modeling of Walleye Pollock and Pacific hake. *Fish. Sci.*, **65**, 430-435.
- 貞安一廣, 安倍幸樹, 澤田浩一, 高尾芳三, 向井 徹, 飯田浩二, 2005: 遊泳による魚体の屈曲運動がターゲットストレングスに与える影響. *海洋音響学会誌*, Vol.**32**, 30-39.
- Simmonds E. J., Williamson N. J., Gerlotto F., and Aglen A., 1992: Acoustic survey design and analysis procedure: a comprehensive review of current practice. ICES Cooperative Research Report No.**187**.
- 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.
- Space and Naval Warfare Systems Center, 1998: Annotated Bibliography of Publications from the U. S. Navy's Marine Mammal Program. U. S. Navy Marine Mammal Program, Revision D.
- Stanton T. K., Chu D., Wiebe P. H., Martin L. V., and Eastwood R. L., 1998: Sound scattering by several zooplankton groups. I: Experimental determination of dominant scattering mechanisms. *J. Acoust. Soc. Am.*, **103**, 225-235.
- 社団法人海洋水産システム協会, 2003: 平成14年度水産業持続的生産・流通技術開発事業 魚種識別計量魚群探知機開発報告書. 社団法人海洋水産システム協会, 東京.
- 高尾芳三, 1994: スケトウダラの音響資源調査. *月刊海洋*, **26**, 660-665.
- 吉田昭仁, 久郷信俊, 佐藤圭司, 黒田真生, 石田憲治, 2002: 気泡群の終端速度に関する研究. *マリンエンジニアリング学術講演会論文集*, Vol.**68**, 153-156.
- Zakharia M. E., Magand F., Hetroit F., and Noël Diner, 1996: Wideband sounder for fish species identification at sea. *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 203-208.

イルカのソーナー能力の魚群探知機への適用に関する研究

今泉智人（水産工学研究所）

水産資源の持続的・管理・利用が求められており、そのための水産資源調査に計量魚群探知機を用いた音響資源量調査が現在広く行われている。音響を用いた資源量調査は、広範囲の資源量を直接迅速に推定できる強力な方法である。しかし、未だ音響手法のみで魚種

を識別することが難しいこと、自然状態の魚の反射強度などの基礎情報の計測において、疎な分布にしか適用できないことなど、問題点も残されている。一方で、イルカは、エコーロケーションと呼ばれるソーナー能力を有しており、自身の発した超音波を利用して、対象までの距離、対象の大きさ、材質などの情報を得ている。イルカの主な対象も魚であることから、このようなイルカのソーナー能力を人工のソーナーに応用することが出来れば、音響を用いた資源量調査や水産用音響機器の大幅なレベルアップが期待される。

そこで、本研究では、イルカのソーナー能力を魚群探知機に適用することを目的として、研究を行った。特に本研究では、イルカのソーナー音の短パルスかつ広帯域という特長に焦点を当て、そのソーナー音を送受して、対象に固有の反射（反射強度）の周波数特性（TS スペクトル）を計測できるようにし、魚種識別や行動推定に道を開く。

まず、イルカのソーナー音を用いた TS スペクトルの計測システムを構築し、反射波と入射波のスペクトルの比で TS スペクトルを求める計測方法（スペクトル比法）を、反射特性明確な金属球により検証した。金属球の散乱特性は、理論計算により求めることができ、戻り反射に指向性がないので都合が良い。水槽において金属球の広帯域での散乱特性を計測し、この理論値と比較し、よく一致することを確かめた。したがって、以降、広帯域で正確な魚の散乱特性の測定が、構築したシステムとスペクトル比法を用いて実現できる。

次に、麻酔をかけたマアジ、マダイ、マサバの背方向の TS スペクトルを、イルカのソーナー音を用いて水槽で測定した。また1尾のマダイの姿勢角を変化させ、TS スペクトルの測定を行った。その結果、魚の TS スペクトルは、魚種、姿勢角、個体によりかなり大きく異なるが、その値は既往の研究と同じ傾向であった。

次に、海上で自然状態に近い魚の TS スペクトルを測定した。海では送受波器と対象の魚の位置関係が確認できないため、送受波器の指向性の影響を受け、正確な TS スペクトルを得ることは難しい。そこで、金属球を魚の近傍に吊るしそのエコーで指向性関数の補正を行った。その結果、活発に泳いでいるイサキの姿勢角変化による TS スペクトルの変動を計測できた。このような姿勢変動を含んだ TS スペクトルの連続的な測定が、魚種推定のための情報量増加に資すると考えられる。また、イルカのパルス幅が短い広帯域の音波を用いることで、高い距離分解能を実現することができ、自然状態の魚の群れを分解して、単体の集まり

として認識できた。

海上実験で問題となった指向性関数補正のために、広帯域の音波を送受信可能なスプリットビーム（以下 SB）方式を採用したシステム（広帯域 SB システム）を試作した。SB 方式では、受波器を分割して、対象からの反射波の到達時間差を用いて、送受波器から見た相対的な対象の方位と位置を測定できる。広帯域の音波を用いる SB 方式は初めての試みであるので、対象からの時間差検出方法をシミュレーションにより検討し、時間差検出法を相互相関方式に決定した。次に、広帯域での指向性関数補正のために、指向性関数モデルを作成し、実際に測定した指向性関数と比較した結果、両者が良く一致したことから、モデルを利用することとした。次に、広帯域 SB システムの性能を確かめるため、金属球と送受波器との相対位置を変化させ、金属球の散乱特性を測定したところ、理論値と実測値が良く一致した。最後に、この広帯域 SB システムを用いて海上実験を行い、高い距離分解能を有したまま、自然状態の魚の TS スペクトルを測定することに成功した。

イルカのソーナー音の他のメリットを探るために、ほぼ同じパルス幅の短バースト波との比較実験を行った。イルカのソーナー音と短バースト波の両者による金属球の反射波に対して、それぞれの入射波を参照波として相互相関処理を行った。その結果、両者で 10 dB 程度信号対雑音比が向上し、またイルカのソーナー音の方が最大で 9 dB 高い信号対雑音比を得られた。一般に広帯域信号は雑音に弱い、イルカのような広帯域のソーナー音を用いれば、広帯域信号の弱点を補えることが示唆された。

以上、本研究により、高い距離分解能を有した状態で、広帯域で対象の TS スペクトルが正確に測定可能な、方法とシステムを開発できた。自然状態の魚の行動や姿勢変化を含んだ TS スペクトルの変化は、魚種識別、行動推定、サイズ推定などのための有用な情報である。イルカのような時間的に短く広帯域の音波を用いることで、音響資源量調査の大きな問題点の1つである個々の魚のエコーの測定条件の緩和を実現し、また、TS スペクトルという魚種識別などのための基礎情報増加を実現した。以上により、本研究は、音響を用いた資源量調査方法の発展に大きく寄与した。