

研究

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

今泉 智人, 古澤 昌彦 (東京海洋大学) *¹

赤松 友成 (水産工学研究所) *²

imaizumitomohito@yahoo.co.jp

(2006年1月17日原稿受付)

Abstract :

Dolphins detect, pursuit, and prey fish as their food by using their excellent sonar ability. If some advantages of their sonar such as object identification ability are introduced to our fisheries echo sounder, improvement should be possible because the purposes are similar. We focus on the wideband characteristics of dolphin's sonar in this study. We measured the frequency characteristics of the scattering amplitude of metal spheres and goldfish using the dolphin's sonar signal. We measured the absolute scattering amplitude of the metal spheres by the incident wave and the reflected wave by using sonar signals of bottlenose dolphin and finless porpoise. The measured scattering amplitudes agreed fairly well with the theoretical values in wideband. The scattering amplitudes of goldfish obtained in wideband were almost reasonable. These observations suggested that the dolphin possibly use the wideband scattering amplitude, which exhibits features of objects clearer than the echo spectrum, for the object identification.

分類：水産音響・バイオアコースティック

キーワード：イルカ, 金属球, 散乱振幅

1. 緒言

イルカは、超音波を用いたエコーロケーションと呼ばれるソーナー能力を有している。Auらの実験によれば、ハンドウイルカのソーナー能力は、直径7.6 cmの金属球の存在を100 m以上の距離から認識でき、大きさが同じで材質の異なる2種類の球を、高い確率で識別可能である^{1), 2)}。このような能力を

人工のソーナーに応用できれば、魚種判別方法などの高度化が期待でき、音響水産資源調査の高度化や選択的漁獲などに資すると考えられる。そこで、イルカの持つ高い対象識別能力を探ることを目的とし、イルカのソーナー音を用いて、金属球と魚のターゲットストレングス(TS)または散乱振幅の周波数特性の計測を行う。

Measurement of the Frequency Characteristics of the Scattering Amplitude Using the Dolphin's Sonar Signal

* 1 Tomohito IMAIZUMI, Masahiko FURUSAWA (Tokyo University of Marine Science and Technology)

* 2 Tomonari AKAMATSU (National Research Institute of Fisheries Engineering)

金属球の散乱振幅の理論はFaranによって確立された³⁾。Hicklingは、バースト波を用いて実験的に金属球のエコーレベルが、この理論に一致することを検証している⁴⁾。広帯域の短パルスを用いて金属球の広帯域の散乱振幅を求め、理論と比較する研究も、いくつか行われてきた^{5), 6)}。

イルカのバイオソナーで用いられるソナー音も、100 μ s程度と相当に短く、一般に広帯域である^{1), 7)}。そこでこのソナー音により、対象の広帯域散乱特性を調べることも可能である。Auは、イルカのソナー音によって金属球のエコーのスペクトルを求めた¹⁾。しかし、エコーのスペクトルには、自身の音響系の周波数特性も含まれ、対象識別には十分でないと考えられる。

本研究では、イルカのソナー音の広帯域性に着目し、イルカのソナー音の利点を明らかにする。イルカが対象識別を対象のみに依存する散乱振幅の周波数特性の違いも利用して行っていると想定し、典型的な2種類のイルカのソナー音で、水槽において金属球の広帯域散乱振幅の絶対的な値を計測する。金属球としては、理論計算が可能な特性が既知である異なる材質のものを用いる。また、比較のため短バースト波による散乱振幅の計測も行う。使用する広帯域トランスデューサは、送受を別として、対向させることにより対象への入射波も測定し、較正なしで広帯域散乱振幅の絶対的な値を得られるようにする。

2. 材料と方法

2.1 散乱振幅

まずFig. 1のような構成で、対象の散乱振幅を測定する方法について述べる^{3-6), 8)}。

送波トランスデューサ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)として到達するとする。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、この入射波にキャリア周波数での散乱振幅を掛けたものが戻り散乱波となる。しかし、今の場合広帯域信号を扱うので、受波トランスデューサに戻る反射波 $p_r(t)$ は次式のフーリエ変換で表される。

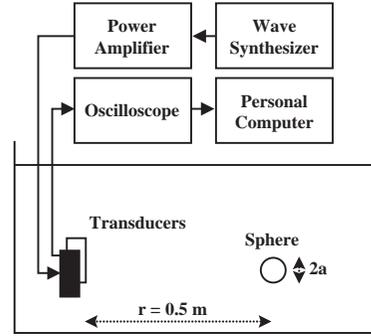


Fig. 1 Measurement system of scattering amplitude.

Two transducers are set parallel to each other.

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_r(t) e^{-i\omega t} dt = \frac{1}{r} \Gamma(\omega) \int_{-\infty}^{\infty} p_i(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

ここで j は虚数単位、 ω は角周波数、 $\Gamma(\omega)$ は対象の散乱振幅である。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。

対象が球の場合は、その半径を a 、水中での波数を k 、波長を λ 、音速を c とすると、 $ka = 2\pi a/\lambda = a\omega/c$ であるので、 $\omega t = (a/c) \omega (c/a) t$ と表し、 $\tau = ct/a$ と置けば、 ω と t の倍率が変わるだけで、フーリエ変換ができる。具体的には(1)式の ω の代わりに ka を、 t の代わりに τ を代入し整理すると

$$\Gamma(ka) = r \frac{\int_{-\infty}^{\infty} p_r(\tau) e^{-ika\tau} d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} p_i(\tau) e^{-ika\tau} d\tau} \equiv r \frac{G_r(ka)}{G_i(ka)} \quad (2)$$

となる。対象が球の場合、散乱振幅は球の半径 a と、遠距離における規準化散乱振幅 $f_{\infty}(ka)$ で表せ、

$$\Gamma(ka) = \frac{a}{2} f_{\infty}(ka) \quad (3)$$

である。これを(2)式に代入し、散乱振幅の絶対値について表すと

$$|f_{\infty}(ka)| = \frac{2r}{a} \frac{|G_r(ka)|}{|G_i(ka)|} \quad (4)$$

となる。以上より、入射波と反射波のスペクトル、球の半径、球までの距離を用いることで、対象の球の散乱振幅を求めることができる。

なお、ターゲットストレングスの線形量 T_S およびデシベル量 TS は

$$TS = 10 \log T_S = 20 \log |\Gamma| \tag{5}$$

で表される。

球以外の魚などの散乱体では、(4)式の $a/2$ の寸法による規準化が難しいので、それを行わない(1)式の $\Gamma(\omega)$ を散乱振幅として扱う。(4)式の散乱振幅をこれと明確に区別する場合には、規準化散乱振幅と呼ぶ。

金属球の反射特性はFaran³⁾により導かれ、Hickling⁴⁾らが実験的に検討している。金属球の規準化散乱振幅は、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 とした時、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。

ここで、Rudgers⁸⁾にならって規準化散乱振幅の求め方を、短バースト波の剛球反射の場合を例に、シミュレーションによって示す。Fig. 2(a)は2サイクルよりなる入射パルスを示し、(b)はそのスペクトル((4)式の $|G_i(ka)|$)である。これと理論により計算された規準化散乱振幅の絶対値(c)を掛け、反射波のスペクトル((4)式の $|G_r(ka)|$) (d)を得る。これを逆フーリエ変換すると(e)の反射波が得られる。実際には(e)を計測してフーリエ変換により $G_r(ka)$ を求め、(4)式により規準化散乱振幅(c)を求める。なお(e)における副次的な波は、クリーピング波であり、球の周囲を回ってくるので遅れ、これが(c)の規準化散乱振幅に緩やかな波状の特性を与えている。

Dragonetteは短バースト波を用いて、アルミニウム、真鍮、タンゲステンカーバイド(以下WC)などの金属球からの反射波を解析し、(4)式から金属球の規準化散乱振幅を計測しているが、そのほとんどは相対値である⁵⁾。また、Auは、ハンドウイルカのソーナー

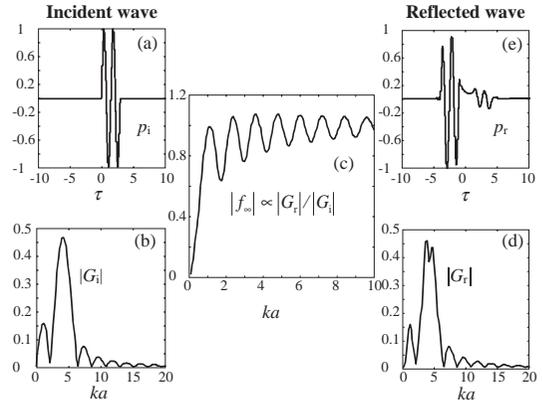


Fig. 2 Simulation for measurement of frequency characteristic of scattering amplitude. The scattering amplitude (c) is obtained as the ratio of the Fourier transformation (b) of an incident wave (a) and the Fourier transformation (d) of the reflected wave (e).

音を用い(4)式の G_r を求めているが、散乱振幅までは求めている¹⁾。我々は、イルカのソーナー音により、対象のみに依存する散乱振幅の絶対的な値の周波数特性まで求め、対象識別の可能性について検討する。

2.2 実験方法

金属球としては、ほぼ同じ径の銅、スチール、WC球を用いた。Table 1に規準化散乱振幅の理論値を計算するために必要な各球のパラメータ⁹⁾と半径を示す。

本格的な魚に対する計測は、次のステップとするが、試みとして淡水水槽で実験の行えるキンギョにつ

Table 1 Physical parameters of metal spheres to calculate scattering amplitude.

Parameters	Material		
	Steel	Copper	WC
Sound speed c [m/s]	1500	1500	1500
Longitudinal wave speed c_1 [m/s]	5764.5	4760	6867
Transverse wave speed c_2 [m/s]	3230.8	2288.5	4161.2
Medium density ρ [kg/m ³]	1027	1027	1027
Target density ρ_1 [kg/m ³]	7830	8947	14900
Poisson's ratio σ	0.271	0.350	0.210
Diameter a [mm]	41.40	32.05	38.10

いて、金属球と同様に散乱振幅を計測した。通常の海洋のアジやサバなどの有用魚種は鰾を持っており、これが主要な反射体である¹⁰⁾。キンギョも鰾を持っており、その意味では似た反射体である。生きたキンギョを0.01%ベンゾカイン溶液で麻酔し、背中から音波が当るようにテグスで吊るした。体長は、4.0 cmと4.2 cmの2尾を用いた。

イルカのクリックスは、その特性から大きくハンドウイルカ型とスナメリ型に分類できる⁷⁾。そこで、ソーナー音として、ハンドウイルカとスナメリのクリックス、及び比較のため短バースト波を用いた。短バースト波は、キャリア周波数を100 kHz、波の数を1, 3, 5とした。Table 2に、実際に測定した入射波について、各ソーナー音の中心周波数、パルス幅、3 dB帯域を、Fig. 3にハンドウイルカとスナメリのクリックス

Table 2 Characteristics of sonar signals.

	Short burst wave			Bottlenose dolphin	Finless porpoise
	1	3	5	type	type
Cycle	1	3	5	—	—
Peak freq. [kHz]	100	100	100	107	120
3 dB bandwidth [kHz]	35	23	16	51	19
Duration [μ s]	10	30	50	30	50

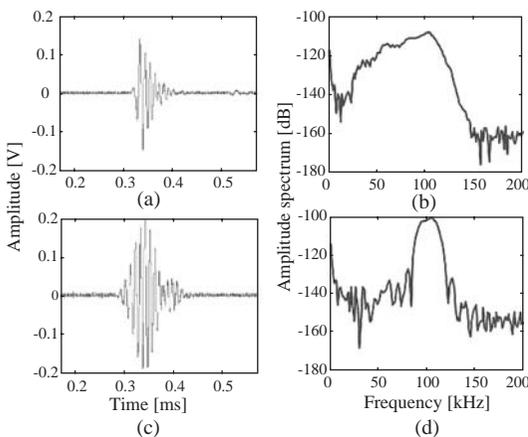


Fig. 3 Click waveforms and spectrums of bottlenose dolphin and finless porpoise: signals received at target position. (a) click of bottlenose dolphin, (b) its spectrum, (c) click of finless porpoise, and (d) its spectrum.

の入射波形とスペクトルを示す。元となるハンドウイルカのソーナー音は、1996年に御蔵島で赤松らが収録したもの¹¹⁾、スナメリのソーナー音は、1995年に赤松らが伊豆三津シーパラダイスで収録したものを⁷⁾用いた。

ハンドウイルカのクリックスは、鋭く立ち上がり、非常に広帯域である。一方、スナメリでは、正規関数状の包絡線をもち、ハンドウイルカに比べると狭帯域ではあるが、それでも魚群探知機などのパルスに比べるとかなり広帯域である。2種類のイルカの元の収録信号のスペクトルと、実際の実験で測定した入射波のスペクトルには、元の信号のスペクトルの3 dB帯域幅内で最大6.1 dBの差があったが、全体的には大きな差はなかった。また、今回は基礎的な実験でもあるので、送受波器の感度の周波数特性の補正は行わなかった。そこで以下、送波信号は、それぞれハンドウイルカ型、スナメリ型と「型」を付けて表記する。

先に示したFig. 1に実験システムを示す。基礎的な実験であるので、直径1.4 m、深さ1 mの円形の小型アクリル水槽を用い、淡水中で実験を行った。淡水で近距離であるため吸収減衰は無視できる。探傷用の広帯域トランスデューサ(Panametrics, V1011-RB)に防水処理を施して、1台を送波用、もう1台を受波用として使用した。2台のトランスデューサの送波感度と受波感度の積(感度積)をFig. 4に示す。

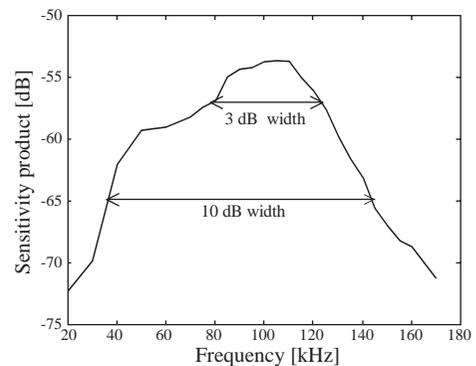


Fig. 4 Sensitivity product of transducers used. 3 dB band width is 45 kHz from 80 kHz to 125 kHz, and 10 dB bandwidth is 110 kHz from 35 kHz to 145 kHz.

3 dB帯域が約45 kHzと広く、Fig. 2のハンドウイルカのクリックスの主要成分を送受波可能である。任意波形発生装置(NF回路, Wave Factory, WF1946)で発生させた信号を、パワーンプ(NF回路, 4005)を介して、送波用トランスデューサから送波した。受波用トランスデューサによる入射波と反射波の両者の受波信号は、その出力を直接デジタルオシロスコープ(Tektronix, TDS3014)により観察・測定・データ収録した。トランスデューサへの印加電圧は150 V_{p-p}、AD変換のサンプリング周波数は25 MHzである。また、反射波は100ピングのデータを測定した。

規準化散乱振幅を(4)式にしたがって測定するために、入射波と反射波の両者を測定した。入射波は、2台のトランスデューサを対向させ、器間距離を0.5 mとして測定した。反射波は、球をその中心までの距離を0.5 mとなるように設置して、送受波用のトランスデューサを並べて測定した。

3. 結果と考察

Fig. 5に、3種の短バースト波による3種の金属球の規準化散乱振幅を、 ka に対するスペクトルとして、

理論値と共に示す。Fig. 5の太線が理論値を、細線が測定値を、点線の間が用いたソーナー音の3 dB帯域を表す。各ソーナー音の3 dB帯域内では、理論値と測定値がほぼ一致しており、このような方法で対象の規準化散乱振幅の周波数特性の測定または特徴把握が可能なることを示している。特に共振による急峻な落ち込みがよく再現されている。

理論値から大きく外れている部分は、入射波のスペクトル成分が小さく、信号対雑音比(以下SN比)が低い部分である。特に入射波のスペクトルが0近くなるノッチ部分では大きく外れる。また、実測値には理論値にはない短い周波数間隔の波状のスペクトルが見られる。これは、反射体を水面反射としたり、送受波器配置を変えたり、送受波器を兼用にしても、表れた。信号の切り出し範囲を変えると、波状のスペクトルの周期が変化することから、エコーの全成分をとらえられていないためと推察された。

次に、イルカのソーナー音を用いた場合の結果をFig. 6に示す。この場合も、Fig. 5の短バースト波の場合と同様に、3 dB帯域内で理論値と測定値が大体一致している。

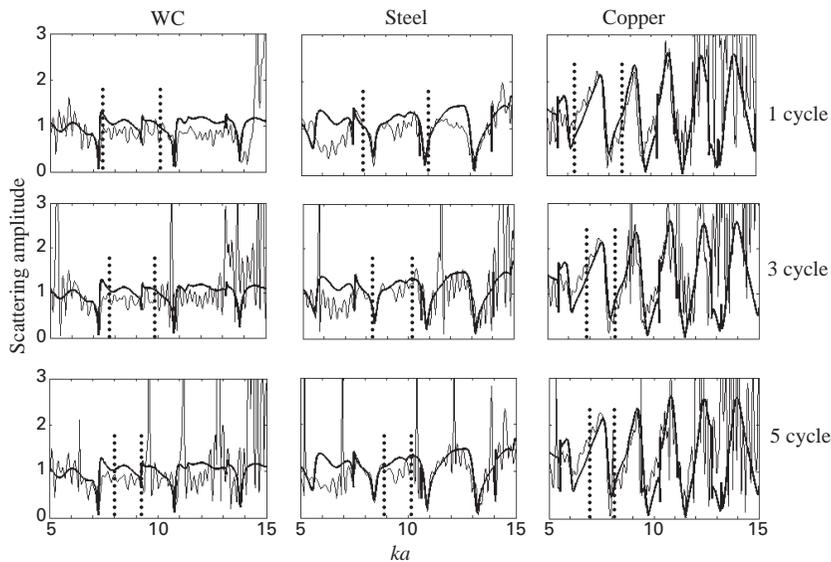


Fig. 5 Normalized scattering amplitudes of tungsten carbide (WC), steel, and copper spheres measured by 1 cycle, 3 cycle, and 5 cycle burst waves. The thin lines show measurements, the bold lines show theory, and dotted lines show 3 dB bandwidth of incident waves.

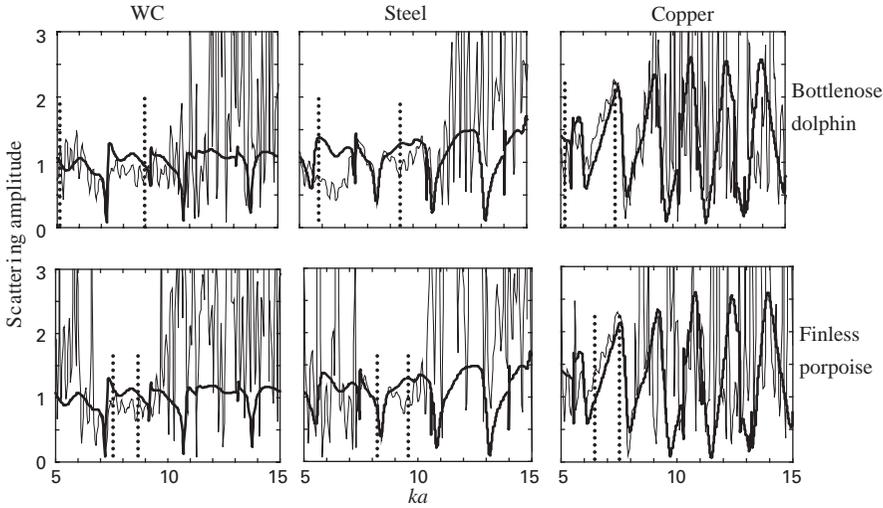


Fig. 6 Normalized scattering amplitude of tungsten carbide (WC), steel, and copper spheres measured by click of bottlenose dolphin type (upper) and finless porpoise type (lower). The thin lines show measurements, the bold lines show theory, and dotted lines show 3 dB bandwidth of incident waves.

ソーナー音ごとに理論値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を $|f_m(ka)|$ 、理論散乱振幅を $|f_t(ka)|$ とすると、測定値のRMS誤差 Δ_{mt} は

$$\Delta_{mt} = \sqrt{\int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{\beta - \alpha} \{|f_m(ka)| - |f_t(ka)|\}^2 dka} \quad (6)$$

で測ることができる。ここで α と β はそれぞれ各ソーナー音の3 dB帯域の下限と上限を示す。Fig. 7に代表として、対象がWC球のRMS誤差 Δ_{mt} の100ピングの平均値と標準偏差を示す。ソーナー音の帯域が広がるほど誤差が大きくなる。しかし、その誤差は金属球の標準的な規準化散乱振幅値の1.0に比べると小さい。つまり、ハンドウイルカや1サイクルの短バースト波のような広帯域信号を用いても、金属球の規準化散乱振幅の実測値が理論値とほぼ一致しているといえる。

次に、使用するソーナー音がどれだけ対象を区別しやすいかを評価する。本実験で用いた金属球は対象の半径が異なる。大きさに規準化しない散乱振幅 $\Gamma(\omega)$ を使用すれば、大きさに関する情報も含むことになる。そこで、得られたWC球の散乱振幅

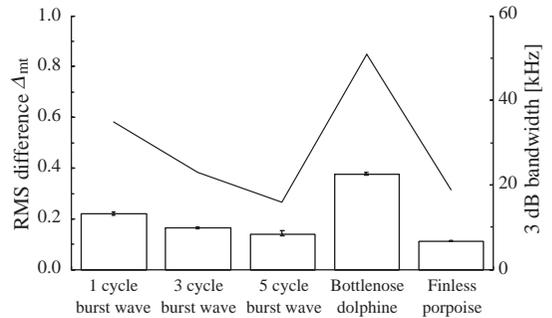


Fig. 7 RMS differences (average and standard deviation for 100 pings) of normalized scattering amplitude of tungsten carbide sphere between measurement and theory. The bold line shows 3 dB bandwidth.

$\Gamma_{WC}(\omega)$ を規準として、異なる対象の銅球やスチール球からの散乱振幅との差を

$$\Delta_{sp} = \sqrt{\int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{\beta - \alpha} \{|\Gamma_m(\omega)| - |\Gamma_{WC}(\omega)|\}^2 d\omega} \quad (7)$$

として評価する。ここで $|\Gamma_m(\omega)|$ は銅球かスチール球の散乱振幅とする。Fig. 8に差 Δ_{sp} の100ピングの平均値と標準偏差を示す。差 Δ_{sp} はハンドウイルカ型、スナメリ型、1サイクル、3サイクル、5サイクルの順番で小さくなった。つまり、ハンドウイルカ型や1サイクル

の短バースト波のような広帯域信号の方が、対象の違いに関する情報を得られやすいと考えられる。

Fig. 9に2尾のキンギョの散乱振幅の測定結果を、5波の短バースト波、ハンドウイルク型、スナメリ型の各ソーナー音に対して示す。いずれの波形を用いても、入射波の3 dB帯域内ではほぼ同様な結果が得られる。100 kHzにおけるTSは、3種のソーナー音でほぼ等しく、平均値は、4.0 cmのキンギョで-54.0 dB、4.2 cmで-53.2 dBである。これを、TSの簡易モデル¹²⁾

$$TS = TS_{cm} + 20 \log L \tag{8}$$

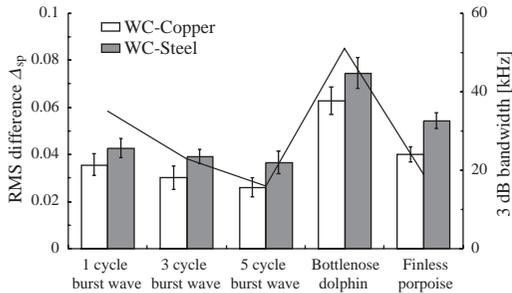


Fig. 8 RMS differences (average and standard deviation for 100 pings) of scattering amplitude between two targets. The bold line shows 3 dB bandwidth.

によって検討する。ここでLはcm単位の体長、 TS_{cm} は規準化TSである。 TS_{cm} を求めると-66.0 dBおよび-65.6 dBになり、通常の有鰭の海産魚の場合の姿勢平均TSについての平均的な値約-67 dBにほぼ等しい。淡水魚であるキンギョの鰭は海産魚に比べ相対的に大きく、その分TSも大きくなるはずなので、この値はやや過小と考えられるが、ほぼ妥当な値である。周波数特性についてはほぼ滑らかであり、あまり変化がない。魚に対する本格的な研究は次の段階とする。

4. 結論

以上、イルカの広帯域のソーナー音を用い、金属球のエコーにより規準化散乱振幅の絶対値を測定し、理論値と比較し、広い範囲で理論値と一致することを確認できた。また、キンギョについても広帯域で散乱振幅を得ることが出来、TSの値がほぼ妥当であることを確認した。また、イルカのソーナー音を用いて測定した規準化散乱振幅の理論値との誤差が、短矩形波を用いた場合と同じレベルであった。これらから、イルカのソーナー音の一つの利点は、対象の音響散乱の広帯域での周波数特性を知ることができることであると考えられる。

本研究の特徴は、Hammer and Au²⁾がハクジラの

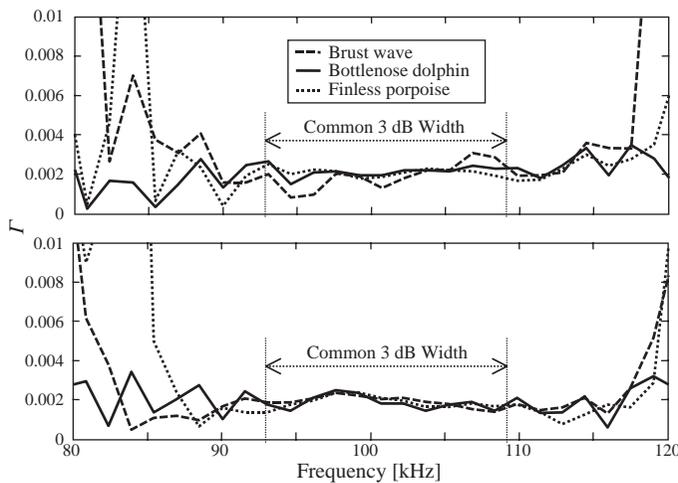


Fig. 9 Measured scattering amplitude of two golden fish by three sonar signals. The body lengths (L) are 40 mm (upper) and 42 mm (lower).

エコーのスペクトル((4)式の $G_r(\omega)$)のみを議論したのに対し、入射波のスペクトル((4)式の $G_i(\omega)$)で割ることにより、対象のみに依存する規準化散乱振幅を、イルカのソーナー音を用いて求めたことにある。また、本方法のようにして、相対的ではなく絶対的な値での散乱振幅を測れば、対象のサイズに関する情報も得られる。

本研究では、基礎研究として、金属球およびキングギョを対象とし、淡水の水槽で0.5 mという至近距離で実験を行ったが、今後より魚の鰾に近い円柱や実際の有用魚についても測定する。また、実際のフィールドで遠距離の魚などを対象にするためには、雑音対策及び吸収減衰によるスペクトル変化を考える必要がある。広帯域信号でSN比を上げるためには、適切なフィルタ処理や相互相関処理といった処理も考える必要がある。

今回の研究では、イルカのソーナー音による広帯域散乱振幅の計測に焦点を当て、それが短パルスによると同等に可能なことを、示せた。今後は、イルカのソーナー音の他のメリットも探り、それらを魚群探知機などに応用する研究を進めてゆく。

謝辞

本研究に助言を古野電気様に感謝いたします。また、この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研究支援センター「新技術・新分野創出のための基礎研究推進事業」の援助をいただきました。

参考文献

- 1) W. W. L. Au, *The Sonar of Dolphins* (Springer-Verlag, New York, Inc., 1993).
- 2) C. E. Hammer, jr. and W. W. L. Au, "Porpoise echo-recognition: an analysis of controlling target characteristics," *J. Acoust. Soc. Am.*, **68**, 1285-1293 (1980).
- 3) J. J. Faran, Jr., "Sound scattering by solid cylinders and spheres," *J. Acoust. Soc. Am.*, **23**(4), 405-418 (1951).
- 4) R. Hickling, "Analysis of echoes from a solid sphere in water," *J. Acoust. Soc. Am.*, **34**, 1582-1592 (1962).
- 5) L. R. Dragonette, R. H. Vogt, L. Flax, and W. G. Neubauer, "Acoustic reflection from elastic sphere and rigid sphere and spheroids. II. Transient analysis," *J. Acoust. Soc. Am.*, **55**(6), 1130-1137 (1974).
- 6) L. R. Dragonette, S. K. Numruch, and L. J. Frank, "Calibration technique for acoustic scattering measurements," *J. Acoust. Soc. Am.*, **69**(4), 1186-1189 (1981).
- 7) 中村耕司, 赤松友成, "イルカ類のエコーロケーション信号の種間比較," 日本音響学会聴覚研究会資料, **106** (1998).
- 8) A. J. Rudgers, "Acoustic pulse scattered by a rigid sphere immersed in a fluid," *J. Acoust. Soc. Am.*, **45**(4), 900-910 (1969).
- 9) 宮野鼻洋一, "魚のターゲットストレングスの特性に関する研究," 水産工学研究所報告, **15**, 8-144 (1994).
- 10) K. G. Foote, "Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish: A comparison of gadoid and mackerel target strength," *J. Acoust. Soc. Am.*, **67**, 2084-2089 (1980).
- 11) T. Akamatsu, T. Hatakeyama, Y. Kojima, "Echolocation range of captive and free-ranging baiji (*Lipotes vexillifer*), finless porpoise (*Neophocaena phocaenides*), and bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*)," *J. Acoust. Soc. Am.*, **80**(2), 688-691, (1986).
- 12) 古澤昌彦, "水産資源推定のための超音波による魚群探知に関する研究," 水産工学研究所報告, **11**, 173-249 (1990).