

超音波バイオテレメトリの音響系の評価および設計方法

朴 柱三, 古澤昌彦*

(2001年8月13日受付, 2001年12月10日受理)

東京水産大学海洋生産学科

The evaluation and design method of ultrasonic biotelemetry system

JU SAM PARK AND MASAHIKO FURUSAWA*

Department of Marine Science and Technology, Tokyo University of Fisheries, Minato, Tokyo 108-8477, Japan

A method for evaluating and designing acoustic systems for ultrasonic biotelemetry for investigating fish behavior is developed. The objective of the method is to surely receive the signal from a pinger by increasing the signal-to-noise ratio (SNR) and widening the detectable range. First, the SNR is derived as a function of source pressure of the pinger, sound traveling characteristics, receiving directivity, and noise level. Based on the SNR, the detectable beam width is defined as a new concept and the indices that describe the maximum detectable range and the detectable beam width are introduced. A universal diagram for the basic design of the biotelemetry system where SNR is plotted against frequency is developed. An appropriate frequency, receiving transducer diameter, detectable beam width, and number of receiving transducers are easily determined by using the diagram.

キーワード：超音波バイオテレメトリ, ピンガ, 信号対雑音比, 最大検知距離, 検知範囲, 検知ビーム幅, 設計の汎用図

海洋生物の行動特性や生態を解明するための、超音波を利用するバイオテレメトリは、音波標識を海洋生物に装着し、それが出す音を目印として、海洋生物の行動を追跡する。^{1,2)} 超音波バイオテレメトリ（以下バイオテレメトリと略す）の最大のメリットは、対象生物を特定して、その行動生態と棲息環境情報を同時に、即時かつ詳細に知ることができることである。これは、他の手法からは得られないものである。

バイオテレメトリの音響系は、Fig. 1に示すように、観測対象とする生物に装着する音波標識と測定側におく受波器とからなる。

音波標識には、トランスポンダとピンガとが使われる。³⁾ トランスポンダは、質問信号を受信して適当な応答信号を自動的に送信する小型送受信機であり、一方、ピンガは送信機能だけを備えたものである。音波標識は、海洋生物に装着するため、小型軽量であることが望ましい。その点、トランスポンダは送受信機能を揃える必要があるため、小型化が難しい。これまでに、300 kHzの高周波マルチビームを用いるセクタースキニングソナーとトランスポンダを利用した例^{4,7)}などが報

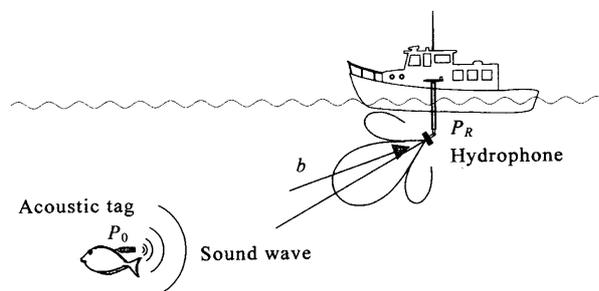


Fig. 1. Tracking of a fish by an ultrasonic biotelemetry system.

告されているが、最近ではトランスポンダを小型海洋生物に装着し、バイオテレメトリに応用した例は少ない。小型海洋生物には、音波標識を装着することによる負担をできる限り軽減し、安価にし、多数使用する目的から、ピンガが一般的に採用されている。本研究では、これらの理由から、音波標識としてはピンガを主に考える。

ピンガ音の受波方式には、1)受波ビームをピンガからの音を大きく受信できるように向け、その受波ビーム

* Tel : 81-3-5463-0489. Fax : 81-3-5463-0518. Email : frsw@tokyo-u-fish.ac.jp

の方向から海洋生物の方向を判断する最大感度方式、2)受波器またはハイドロフォンを既知の間隔に設置し、各受波器に到達したピンガ音の時間差または位相差から、海洋生物の位置を計測する音響測位方式、などがある。音響測位方式は、通常の音響測位と同様であり、ベースライン長を基にしてLBL (Long Base Line), SBL (Short Base Line), SSBL (Super Short Base Line) 方式に分類される。⁸⁾

最大感度方式では、1個⁹⁾や複数^{10,11)}の指向性を持つ受波器でピンガ音を受信し、受波器の方向または、複数の受波器の指向性ビームの交差点¹⁰⁾から海洋生物の方位を判断する。最初のバイオテレメトリシステムでは、水平と垂直方向に各々2個の指向性を持つ受波器を設置し、ピンガ音を受信した受波器の方向から海洋生物の方位を判断する最大感度方式を利用した。¹¹⁾このような最大感度方式は、開かれた海域での小型海洋生物の行動追跡に広く利用されてきて、現在も多用されている。

LBL方式は、ピンガ音を無指向性の3個以上のハイドロフォンで受信し、双曲線測位方式で位置を求める。¹²⁾このLBL方式は、クジラの鳴音によって3次元位置を求めるためにも使用されたが、¹³⁾ピンガを装着した海洋生物にも利用できる。SBL方式では、ピンガ音を無指向性の4個の受波器で受信し、その時間差から位置を求める。¹⁴⁾最近では、スプリットビーム方式で、ピンガ音を受信し、前後、左右の位相差から海洋生物の方位を求め、エコーから距離を求める方式も試みられた。¹⁵⁾

このように、バイオテレメトリの音響系も進歩してきたが、まだ問題点も多い。その問題点としては、1)音波標識の大きさが海洋生物にとって必ずしも小さいと言えない、2)音波標識の寿命が十分長くはない、3)海洋生物の詳細な動きの把握が難しい、4)装備や取り扱いが簡便でない、5)海洋生物の群れとしての行動生態の把握が難しい、6)海洋生物を見失いやすいために長期にわたる確実な追跡が容易でない、などがあげられる。

これらバイオテレメトリの問題点の多くは、ピンガ音を、より遠く、より広く、自動かつ連続に受信し、検知できるような音響系を構築することにより、解決される。このためには、高性能なピンガの開発もさることながら、受波方式、受波器構成、受波のビーム特性などを適切に決めることも重要である。本研究では、このような観点から、バイオテレメトリの音響系を一般的に考察し、性能の評価および合理的設計が行えるようにする。

これまでもバイオテレメトリの音響系に関する研究がなされている。¹⁶⁻¹⁸⁾これらでは、使用周波数、検知距離、ピンガの送波音圧やサイズなどの音響系の評価、および、設計における重要なパラメータの相互関係が、議論されている。これらの研究では、無指向性受波器に対

して、最大検知距離をパラメータとして、送波音圧の周波特性を求めている。しかし、最大感度方式で重要となる受波器の指向性を考慮した議論はなく、またバイオテレメトリの音響系全体を容易に見渡すための検討は十分なされていない。特に、検知できる距離に加え、検知できる幅および検知できる全体の範囲を検討する必要がある。そこで、本研究では、受波方式、受波器の大きさ、受波のビーム数なども検討対象とし、広い範囲で確実な追跡を行うことができる音響系の総合的な評価および設計方法を開発する。

音響系の評価および設計方法では、信号対雑音比(SN比)を大きくし、広い検知範囲に対して、確実にピンガ音を受信できることを主要な指針とし、かつ、装置の操作および装備が容易になることも目指す。音響系の評価には、ピンガ音を検知できる範囲を用いるが、この検知範囲には、魚群探知機の探知範囲の研究で開発した方法¹⁹⁾を応用し、設計には計量魚群探知機の設計方法²⁰⁾を参考とする。

本研究の構成は以下の通りである。まず、ピンガのサイズ、重量、寿命、送波音圧の相互関係を検討する。次に、評価および設計の際に必要なSN比を導出する。SN比を基にした検知範囲、すなわち最大検知距離、検知ビーム幅などを中心に、音響系の特性を検討、評価する。これらの準備の基に、主に受信系の一般的設計方法を開発する。それを用い、広い検知範囲で海洋生物を追跡できる周波数、受波器の直径、検知できる幅、受波のビーム数について検討する。

方 法

ピンガ バイオテレメトリで用いられるピンガは、どの方向からでも検知できるように無指向性であり、小型海洋生物に装着するため小型かつ軽量であり、音波の到達距離が大きく、寿命は長くする必要はある。これまでも、バイモルフ型振動子の採用、²¹⁾ピンガ用のICの開発、²²⁾300 kHzという高周波数の利用²³⁾など、小型ピンガの開発²⁴⁾や音響系に対する研究¹⁶⁻¹⁸⁾でも、これらが議論されている。ここではそれらを参考にして、ピンガの特性を総合的に検討する。

ピンガは、送波用の超音波振動子、電池、回路、情報センサ(情報ピンガの場合)と、これらを収容する容器から構成されている。これらのうち、振動子と電池が、ピンガのサイズと重量を大きく支配している。振動子は、圧電定数が大きいジルコン酸チタン酸鉛(PZT)の円筒形振動子が多く使われている。これは、感度を高くでき、小型軽量にでき、容易に無指向性を実現できるためである。また、電池は安定した電圧が取り出せる酸化銀電池が一般的に採用されている。そこで、振動子としてはジルコン酸チタン酸鉛(PZT)の円筒形、電池

としては酸化銀電池に対して検討を行うが、大きく一般性を失うことはない。

円筒形振動子の径方向共振周波数 f_0 は

$$f_0 = \frac{1}{2\pi a_T} \sqrt{\frac{E}{\rho_T}} \quad (1)$$

で表される。²⁵⁾ ここに、 a_T は円筒形振動子の平均半径、 E と ρ_T は材料のヤング率と密度である。この式で $2a_T f_0$ は周波数定数と呼ばれ、円筒形 PZT の径方向振動の場合約 850 Hz・m である。共振特性はあまり鋭くないことと、極力小型にしたいために、共振周波数より低いところが利用されることもあるが、¹⁷⁾ 振動子のサイズと質量は、基本的にこの共振周波数で決まる。円筒形の振動子では、円筒軸に垂直方向では無指向性であるが、軸方向でもほぼ無指向性にするためには、振動子の高さ h は波長の 0.5 倍程度以下にすればよい。¹⁶⁾ 以上により振動子の体積 V_T 、したがって質量は、大づかみには周波数 f の 3 乗に反比例し、

$$V_T \propto \frac{1}{f^3} \quad (2)$$

となる。振動子のサイズと質量は極力小さくしたいから、この特性によって、低い周波数は急に使いにくくなる。

小型海洋生物に装着するためには、電池のサイズと重さも極力小さくしたいが、小さいほど電池容量が少なくなり、送波音圧や寿命を大きくすることが困難になる。円筒形振動子と円柱もしくは円盤形電池との組合せは、それらの軸を揃えて並べれば、無駄なく全体を円柱状にまとめられるので、一般に採用されている方法である。周波数の増加とともに振動子の直径が小さくなるので、電池の直径もそれに合わせて小さくする必要がある。また、電池容量（小型電池では普通 mAh の単位で表される） C は、ほぼ電池の体積に比例する（Toshiba battery co., Ltd. の酸化銀ボタン電池などの資料による）。以上の議論から、電池の体積を V_B 、厚さを h_B とすると

$$C \propto V_B \propto \frac{h_B}{f^2} \quad (3)$$

の関係が得られる。電池容量を増すためには、低い周波数が有利であるが、サイズの面からは振動子ほどではないが高周波が有利である。容量は、電池の厚さを増すか、複数のセルを使うことによっても大きくできる。

ピングの送波音圧は、直接検知距離に関係し、電池容量と寿命の制限を受けるので、送波音圧を検討するには、これらと一緒に考える必要がある。検知距離については、受波器の大きさなど受信系によっても異なるので、SN 比の議論の後に考察する。ここでは、送波音圧と寿命の関係について検討を行う。

送波音圧 P_0 は

$$P_0^2 = \frac{W\eta\rho c}{4\pi r_0^2} \quad (4)$$

と表される。ここに、 W は電気パワ、 η は電気音響変換効率、 ρ は海水の密度、 c は音速、 r_0 は基準距離（1 m）である。

ピングの寿命 H は

$$H = \frac{C}{I_P \frac{\tau}{T_P} + I_0} \quad (5)$$

で計算できる。¹⁸⁾ ここで、 I_P はパルス送信時の電流、 I_0 はパルスを発生していないときの暗電流、 τ はパルス幅、 T_P はパルス繰り返し周期、 τ/T_P はデューティレイシオである。

(5)式と $W = VI_P$ (V は電池の電圧) の関係を (4)式に代入すると

$$P_0^2 = \frac{\rho c \eta}{4\pi r_0^2} \frac{V}{\tau/T_P} \left(\frac{C}{H} - I_0 \right) \quad (6)$$

となる。1項目はほぼ定数とみなせる。2項目は送波音圧の2乗が電圧に比例しデューティレイシオに反比例することを示す。3項目（括弧内）はパルスの発生に使用される電流を表す。

信号対雑音比 ピンガから送波された音を受波器で受信し、ピングの方位や位置を推定する。受信信号には希望信号であるピングからの受波音圧と、妨害成分である雑音が含まれている。音響系の評価および設計は、受波音圧と雑音で決まる SN 比を基にして行う。ここでは、受波音圧、雑音について明らかにし、SN 比を導く。

ピングから送波された音波は、Fig. 1 に示すように、拡散減衰と吸収減衰の2種の減衰を受け、受波器に到達する。そこで受波器の指向性関数を b とすると、受波器に至る音圧 P_R は

$$P_R^2 = P_0^2 \left(\frac{1}{r} \right)^2 10^{-0.1\alpha r b} \quad (7)$$

となる。ここに、 α は吸収係数である。

バイオテレメトリの受信系が受ける雑音には、自船の船舶雑音、環境雑音、電氣的雑音がある。船舶で海洋生物を追跡する方式を対象とする場合は、一般に自船の船舶雑音が最も大きい。

この船舶雑音は、船の種類、船速、受波器の設置方法、海況などにより変わる。ここでは、西村の研究²⁶⁾を基にした下式の雑音スペクトルレベルを用いる。

$$N_P^2 = N_{P0}^2 f^{-1.8} \quad (8)$$

ここで、 f は周波数、 N_{P0} は 1 Hz における雑音スペクトルレベルに相当する係数（雑音スペクトル係数と呼ぶ）であり、船の種類や大きさ、船速などによって異なる。²⁷⁾ 総トン数 220 t の鋼船が船速 11 kt で航走している際に得られた値 $NP_0 = 20 \log N_{P0} = 145 \text{ dB}$ ($0 \text{ dB} = 1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$) を用いると、雑音スペクトルレベルは、Wenz²⁸⁾ が示した環境雑音の上限より約 12 dB 高い値になる。船速が 0、もしくは定置した受信系の場合、環

境雑音を考える必要があるが、その場合 NP_0 で調節すればよい。

受信系の帯域幅を Δf 、受波器の指向性利得を D_I とすると、雑音の音圧 P_N は

$$P_N^2 = \frac{N_p^2 \Delta f}{D_I} \quad (9)$$

である。

(7)式の受波音圧 P_R と(9)式の雑音音圧 P_N から、SN比は次の式で表すことができる。

$$S_{NR} = \frac{P_R^2}{P_N^2} = \frac{P_0^2 b D_I 10^{-0.1\alpha r}}{r^2 N_p^2 \Delta f} \quad (10)$$

(10)式には指向性関数 b と指向性利得 D_I の項が含まれる。バイオテレメトリーの受波器としては、無指向性ハイドロフォンや円形もしくは矩形指向性受波器が利用されている。指向性に関する項は受波器の形によって異なるが、本研究の場合一般的な性能や特性を考えるので、円形のみで充分である。円形振動子の指向性関数 b は次の式で表される。

$$b = \left(\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right)^2 \quad (11)$$

ただし、 J_1 は第1種1次のベッセル関数、 k は波数、 a は受波器の半径、 θ は指向性主軸からの角度である。計算を容易にするため、上の指向性関数を Hamilton らによるメインローブに対する簡易式

$$b \cong \exp \left(- \left(\frac{\pi a f}{c} \right)^2 \theta^2 \right) \quad (12)$$

で近似する。²⁹⁾

指向性利得 D_I は次の式で表される。³⁰⁾

$$D_I = (ka)^2 = \left(\frac{2\pi f a}{c} \right)^2 \quad (13)$$

(10)式に(8)式、(12)式と(13)式を代入すると、最終的なSN比は

$$S_{NR} = \frac{4\pi^2 P_0^2 a^2 f^{3.8} \exp \left(- \frac{\pi^2 a^2 f^2}{c^2} \right) 10^{-0.1\alpha r}}{c^2 r^2 N_p^2 \Delta f} \quad (14)$$

となる。

検知範囲 ピンガ音を確実に受信し、より遠く、より広く検知できるように、受波方式、受波器の大きさ、受波のビーム数などを決めるためには、受波器によるピンガの検知範囲を明確にしておく必要がある。魚群探知機の探知範囲の特性は Furusawa らにより評価されたが、¹⁹⁾ ここでは同様な手法によりピンガ音の検知範囲を求める。魚群探知機の場合とバイオテレメトリーの場合の大きな違いは、後者では送波音圧がピンガで独立に決まること、伝搬が片道であることであり、使用するソナー方程式が異なる。なお、魚群探知機では海洋生物を探すことが目的であり、バイオテレメトリーでは海洋生物を常に検知することが目的であるので、検知範囲の名称を用

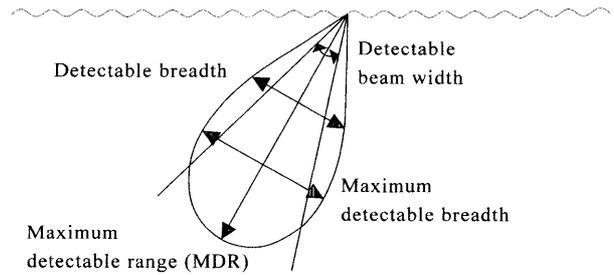


Fig. 2. Definition of terms concerning detectable range of biotelemetry.

いる。

Fig. 2 に、以下に議論する最大検知距離 (maximum detectable range, MDR)、検知幅 (detectable breadth)、最大検知幅 (maximum detectable breadth)、検知ビーム幅 (detectable beam width) を図示する。これらを検知範囲と総称する。以下、最大検知距離、検知範囲、検知ビーム幅の順に説明する。

最大検知距離は、(14)式で指向性関数 b の項を1とし、SN比が規定値になる距離を求めればよい。(14)式で、 b の項を1にすると、SN比は送波音圧 P_0 、距離 r 、周波数 f 、受波器の半径 a に大きく依存する。そこで、送波音圧レベル $SL = 20 \log P_0$ と $2a$ をパラメータとし、最大検知距離 r_m を周波数に対して調べる。この際、SN比 $SNR = 10 \log S_{NR} = 10 \text{ dB}$ 、 $c = 1500 \text{ m/sec}$ 、 $\Delta f = 2.5 \text{ kHz}$ 、 $NP_0 = 145 \text{ dB}$ を定数とする。吸収減衰係数 α は、Francois and Garrison の式により計算する。³¹⁾ ここで必要になるパラメータは、吸収係数の値に大きく影響しないので、平均的な値、塩分濃度 $S = 34 \text{ psu}$ 、水温 $T = 15^\circ\text{C}$ 、 $pH = 8$ 、深度 $d = 100 \text{ m}$ とする。

上で最大検知距離について定義したが、バイオテレメトリーにおいてはビームに垂直方向の検知範囲の広がり (検知幅) も重要である。そこで、全体の検知範囲について検討する。(14)式において、 r 、 θ 以外の変数を与え、 θ を変化させつつ r を求めれば、 r と θ の対である検知範囲が決まる。検知範囲は周波数 f 、受波器の直径 $2a$ 、送波音圧 P_0 により大きく変化するので、これらによる特性を調べる。SN比を 10 dB とし、他のパラメータの値を Table 1 に示したように与え、 f 、 $2a$ 、 SL に対して検知範囲を検討する。

バイオテレメトリーでは、広い範囲を検知したいため、複数のビームを使用するケースが多い。この場合、検知幅の検討により、効率的な受波のビーム数を決めることができる。これまでは、検知幅の指標として指向性に関する一般的な指標であるビーム幅が利用されてきた。ビーム幅は、指向特性が主軸での感度から 3 dB 下がる所の角度の幅である。周波数 f と受波器の半径 a を与えると、円板ピストン振動子についてのビーム幅 B_W は、次

Table 1. Parameters used for computing detectable range

Parameter dependence	$2a$	SL
f [kHz]	30, 70, 120, 300	30, 70, 120, 300
$2a$ [cm]	1~64	8
SL [dB]	136	130~170
Fig. No.	5	6
Other parameters	$SNR=10$ dB, $NP_0=145$ dB, $\Delta f=2.5$ kHz, $c=1500$ m/s α is calculated by Francois and Garrison's formula ³¹⁾ for parameters $S=34$ psu, $T=15^\circ\text{C}$, $pH=8$, and $d=100$ m.	

の近似式で計算できる。²⁰⁾

$$B_w = \frac{1.6c}{\pi af} \quad (15)$$

この式から, B_w は f と a の増加とともに単純に狭くなるが, 実際の検知幅はそのように単純ではない。(14)式により総合的に考える必要がある。そこで, 新たな概念として検知ビーム幅を導入する。この検知ビーム幅 B_D を, 距離 r が最大検知距離 r_m の γ (<1) 倍となる時の角度を基に決定する。すなわち, (14)式において, b の項を1とおいて得られる r_m の式と, r が r_m の γ 倍であるとした時の式との比を取り, その時の θ の2倍(半角でなく幅とするため)として定義する。すると,

$$B_D = \frac{2c}{\pi af} \sqrt{0.23\alpha r_m (1-\gamma) - 2 \ln(\gamma)} \quad (16)$$

が得られる。検知ビーム幅はビーム幅と同じく af に反比例するが, 平方根の項で示されるように, r_m と γr_m の距離差による吸収減衰の影響を受ける。

設計方法 上で導いた最大検知距離や検知ビーム幅などの検知範囲の検討結果を用いれば, 受波音響系に関して, 周波数, 受波器の大きさ, 受波のビーム数などが評価できる。ここでは, これらを総合して音響系の設計方法を開発する。方法で議論したように, ピンガの特性は追跡対象などにより大きく変わるので, 送波音圧などについては, 後に考察する。

設計の基本は, どのような音響系(周波数, 送波音圧, 受波器径, 受波ビーム数)を用いれば, どのような空間範囲内でピンガの検知が可能になるかを示すことである。

(14)式でSN比は送波音圧 P_0 , 周波数 f , 受波器の半径 a と距離 r に大きく依存するので, これらの変数に対するSN比の特性が容易にわかるようにする必要がある。また, 検知範囲を予想するためには, 検知ビーム幅 B_D も同時に知ることができるようになる必要がある。そこで, いくつかの最大検知距離 r_m に対して, S_{NR} を f

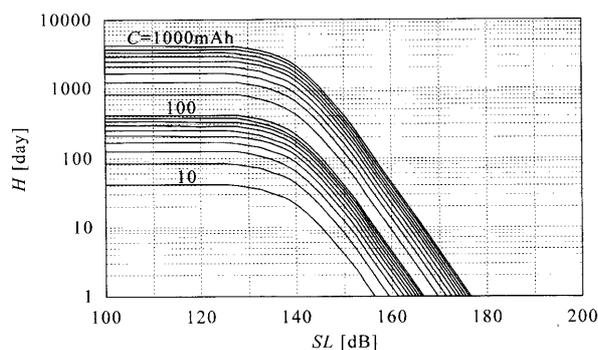


Fig. 3. Pinger longevity (H) as functions of source pressure for various battery capacities (C , mAh). The specific acoustic impedance $\rho c = 1.5 \times 10^6$ kg/m²/s, transducer efficiency $\eta = 30\%$, voltage of 2 battery cells $V = 3$ V, current when circuit in quiescent state $I_0 = 0.01$ mA, and duty ratio $\tau/T_p = 0.01$ are assumed.

の関数として示し, $2a$ と B_D をパラメータにとる。この際, $SL = 136$ dB, $c = 1500$ m/sec, $\Delta f = 2.5$ kHz, $NP_0 = 145$ dB を, 一旦定数として扱う。これらのうち, c は実際に定数と考えてよいが, その他のパラメータ SL , Δf , NP_0 は, (14)式からわかるように, SN比に対する影響が直接的であるので, これらの影響を見ようと思えば, 上記の定数に対する変化分を縦軸のスケールで調節すればよい。

この方法によれば, ほとんど全ての要因を一度に知ることができ, 総合的な設計が可能となる。この方法は Furusawa が計量魚群探知機の設計に用いた方法²⁰⁾ になったものであるが, 基となるソナー方程式が異なること, ビーム幅の代わりにバイオテレメトリにとってはより重要である検知ビーム幅を用いること, が大きな違いである。

結 果

ピンガ Fig. 3 に, (6)式による寿命 H と送波音圧レベル $SL = 20 \log P_0$ の関係を, 電池容量 C の変化に対して示す。固有音響インピーダンス ρc は, 1.5×10^6 kg/m²/s, η は 30% とした。 V は 2 個の酸化銀ボタン電池の電圧である 3 V, I_0 は 0.01 mA とした。現在使用されている多くのピンガのパルス繰り返し周期は, ピンガを見失っても次の信号からピンガの存在を確認できるように 1 s 程度であり, パルス幅は 10 ms 程度であるので, τ/T_p は 0.01 とした。

寿命は, 低い送波音圧では $I_p(\tau/T_p) \leq I_0$ になるのでほぼ一定であるが, 送波音圧がある値 (Fig. 3 では $SL = 140$ dB 程度) 以上で送波音圧の増加につれて減少する ((6)式で $I_0 = 0$ とした特性)。例えば, $C = 100$ mAh で, $SL = 130$ dB での H は 381 日, 140 dB では 216 日,

150 dB では 40 日, 160 dB では 4 日になる。

以上の議論を整理する。ピンガとしては, 小型軽量 (体積小), 長寿命 (H 大), 送波音圧大 (SL 大) の 3 条件が重要である。(6)式もしくは Fig. 3 から, 寿命を長くするためには, 送波音圧を小さくかつデューティレシオを小さくしなければならず, これらは用途や条件により妥協的に決めなければならない。小型軽量にするには, (2)と(3)式から高い周波数が好ましい。しかし, 一方で周波数を高くすると, (3)式から電池容量が小さくなり, (6)式から寿命や送波音圧の制限を受ける。また, 周波数を高くすれば, 後に見るように伝搬上の制約を受ける。いずれにせよ, ピンガの周波数などの主要諸元は, 用途, 条件, 受信系などを総合して決める必要がある。受信系の検討の後に, ここで調べたピンガの特性を再考する。

検知範囲

1. 最大検知距離 Fig. 4 に, 最大検知距離を, 周波数 f に対して, 受波器直径 $2a$ と送波音圧レベル SL をパラメータとして示す。 SL としては, 現在市販されているピンガ (Vemco 社製) の値 136 dB, 155 dB, 168 dB を用い, ピンガは無指向性とする。 $2a$ は 1~64 cm の範囲で変えた。

最大検知距離は, 一旦 $f^{3.8}$ の項によって周波数の増加につれて増加するが, 周波数が高くなるにしたがって α が急激に増加するので, 減少に転じ, ピークを生じる。 SL や $2a$ が大きくなるほど最大検知距離は大きくなり, そのピークを示す周波数は低くなる。すなわち, 高周波では SL と $2a$ を大きくしても, 低周波ほど効果が大きくないことがわかる。

Fig. 4 は, バイオテレメトリの音響系の設計やピンガの選択に指針を与える。例えば, 500 m 以上での追跡が必要な場合, SL が 136 dB 以上はほしい。 SL が 136 dB の場合, 周波数は 30 kHz から 400 kHz くらいまでの広い範囲が使用できる。

2. 検知範囲 Fig. 5 は, 受波器の直径 $2a$ と周波数 f の変化による検知範囲の変化を示した。現在, バイオテレメトリに利用されている受波器の周波数は 25 kHz~307 kHz (Vemco 社, Lotek 社, Hydroacoustic Technology 社, Sonotronics 社の 4 社のカタログによる) であり, 70 kHz 付近が多く使われている。そこで, 70 kHz を含め, 低周波としては 30 kHz, 高周波としては 300 kHz, 計量魚群探知機で使用されている 120 kHz について調べる。送波音圧レベル SL は市販されている汎用の小型ピンガのうち最も小さいピンガ (Vemco 社の model V8-1 L, 長さ 33 mm×直径 8 mm) の値 136 dB とする。横軸は検知幅, 縦軸は検知距離であり, スケールは全て合わせてある。

低周波では $2a$ の増加とともに, 最大検知距離は急激

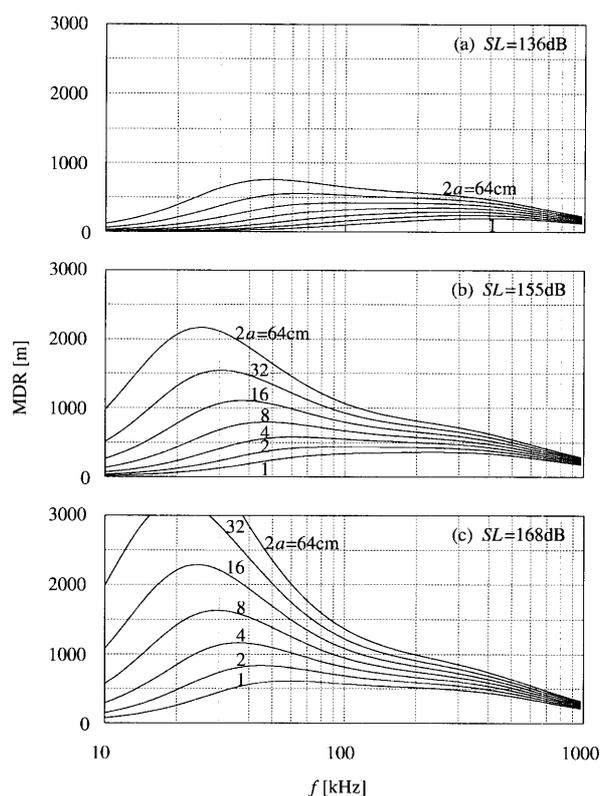


Fig. 4. Maximum detectable ranges for source pressure of 136 dB (a), 155 dB (b), and 168 dB (c). The receiving transducer diameters range from 1 to 64 cm. $SNR=10$ dB, $c=1500$ m/s, $\Delta f=2.5$ kHz, and $NP_0=145$ dB are fixed. The absorption attenuation coefficient α is calculated by Francois and Garrison's formula.

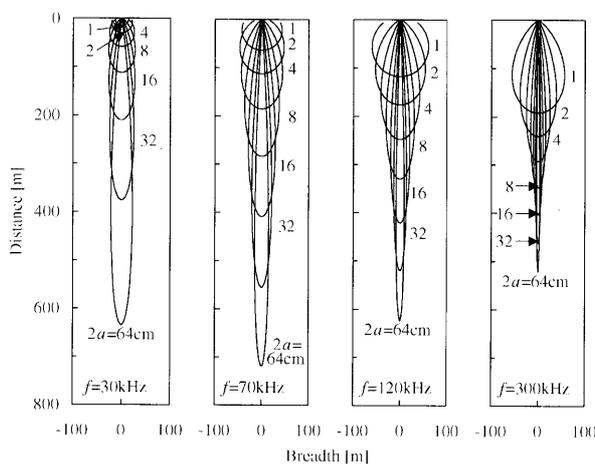


Fig. 5. Dependence of detectable range on receiving transducer diameter for frequencies of 30 kHz, 70 kHz, 120 kHz, and 300 kHz. Parameters are shown in Table 1.

に増加するが, Fig. 4(a)からもわかるように, この SL では検知距離をあまり伸ばせない。70 kHz 辺りで大き

な検知距離となるが、300 kHzになると吸収減衰の増加により、遠方の検知が難しくなる。一方、高周波の近距離では、小さい受波器で検知範囲をかなり大きくできる。

Fig. 6は送波音圧レベル SL と周波数 f の変化による検知範囲を示した。低周波では SL の増加とともに検知範囲が急激に増加するが、高周波では SL が増加しても検知範囲は徐々にしか増加しないので、低周波ほどの効果が期待できない。

3. 検知ビーム幅 Fig. 7に例として、 $SNR = 10$ dB, $SL = 136$ dB, $f = 70$ kHz, $2a = 8$ cm とし、(a)ビーム幅 B_W , (b) $\gamma = 1/2$ での検知ビーム幅 $B_{D(1/2)}$, (c) $\gamma = 1/\sqrt{2}$ での検知ビーム幅 $B_{D(1/\sqrt{2})}$ のところで、ビームが重なるように受波器3個を配置した場合の検知範囲を示す。隣り合うビームの検知範囲が重なる領域に影を施した。横軸と縦軸のスケールは合わせてある。この図により効果的な検知ビーム幅を定義できる。(a)の B_W で重ねた場合は、最大検知距離までほとんど検知できるが、全体としての検知可能な幅が狭く、重なる領域が広いので無駄が多い。また、図には示していないが重なり範囲が

送波音圧などで変化し好ましくない。(b)は検知可能な幅が広く、重なる領域は小さいが、ビーム間に広い検知できない部分が生じ、検知漏れを生じにくい検知ビーム幅としては、(c)の $B_{D(1/\sqrt{2})}$ が適当であると考えられる。そこで、以下 $\gamma = 1/\sqrt{2}$ として $B_{D(1/\sqrt{2})}$ を用い音響系の評価および設計を行う。

Fig. 8は、 $SNR = 10$ dB として、 $2a$, SL の変化による B_W (点線) と B_D (実線) の周波数特性を示した。近似式を用いているので、低周波の $2a$ が小さいところで、非現実的な角度となっている。 $2a$ は1~64 cm, SL は136 dB と155 dB とした。 B_W は(15)式のように f , $2a$ のみで決まり af に反比例して小さくなるが、 B_D と B_W との比は周波数の増加とともに大きくなる。この比が1から外れ出す周波数は、 SL と $2a$ が大きくなるにしたがって低くなる。

設計方法 Fig. 9に、最大検知距離 $r_m = 200$ m, 400 m, 800 m に対するSN比の周波数特性を示した。実線は受波器の直径 $2a$ をパラメータとしたSN比の周波数

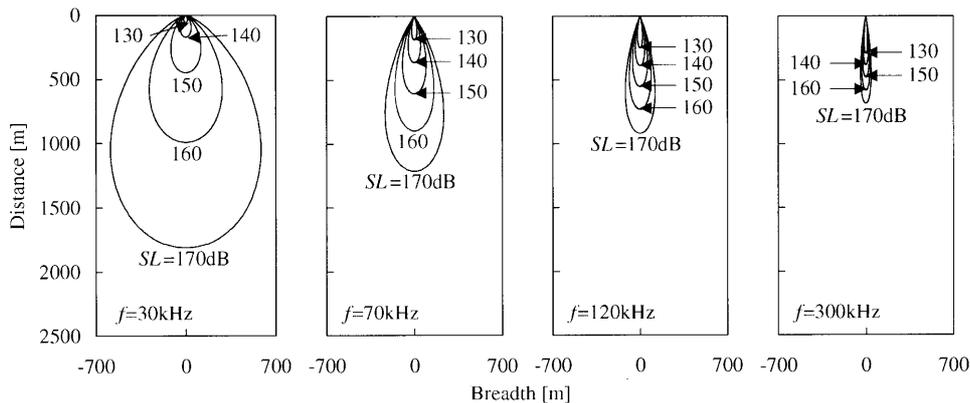


Fig. 6. Dependence of detectable range on source pressure for frequencies of 30 kHz, 70 kHz, 120 kHz, and 300 kHz. Parameters are shown in Table 1.

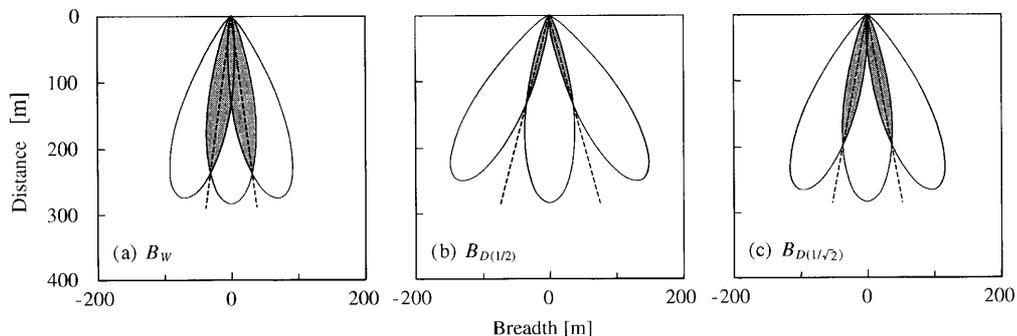


Fig. 7. Example of three beam arrangements by three methods overlapping at beam width (a), at detectable beam widths with $\gamma = 1/2$ (b), and $\gamma = 1/\sqrt{2}$ (c) for signal-to-noise ratio of 10 dB, source pressure of 136 dB, frequency of 70 kHz, and receiving transducer diameter of 8 cm. Shaded areas show an area of overlapping.

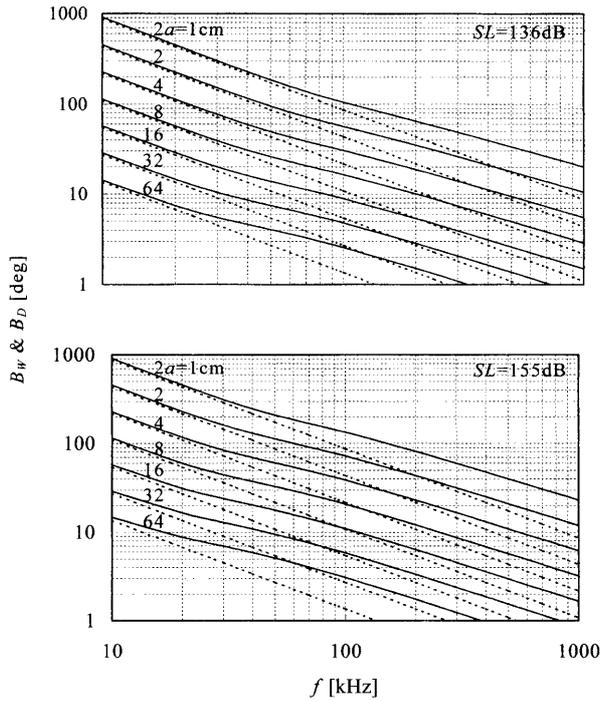


Fig. 8. Dependence of beam width (dotted lines) and detectable beam width (solid lines) on frequency with parameters of source pressure and receiving transducer diameter.

特性である。検知ビーム幅 B_D を点線で示し重ねた。Fig. 9 では、全体を見渡せるようにするため、 f は 10 kHz~1 MHz, $2a$ は 1~64 cm (実線), B_D は $7.5^\circ \sim 240^\circ$ (点線) と、極力広くとってある。

SN 比は低周波では $f^{3.8}$ の項によって増加するが、高周波では α の急激な増加によって下がる。また、 a^2 の項によって SN 比は $2a$ とともに 6 dB/oct で増加する。この図により、バイオテレメトリの音響系の一般的な設計が可能になるので、文献²⁰⁾ にならって、この図をバイオテレメトリの受信系の設計の汎用図と称する。この設計の汎用図から、バイオテレメトリの検知範囲、周波数、受波器の直径、検知ビーム幅、ビーム数などを決めることができる。

周波数の下限を決定する要因は、この図に見られる低周波における SN 比の低下と、方法で調べたピンガのサイズと重量 (体積) である。ピンガの性能の選択もしくは設計は、寿命、検知距離、対象生物の大きさ、技術の発展段階など、目的や対象によって決まり、一般的な定式化がむずかしい。一方で、受波系の特性は、以上に示したように相当程度定式化が可能である。本来、両者を総合的、定量的に組合せたバイオテレメトリ全体の設計もしくは評価法があればよいが、ピンガの性能を一般的に表すことの困難さから、これは出来ない。そこで、受

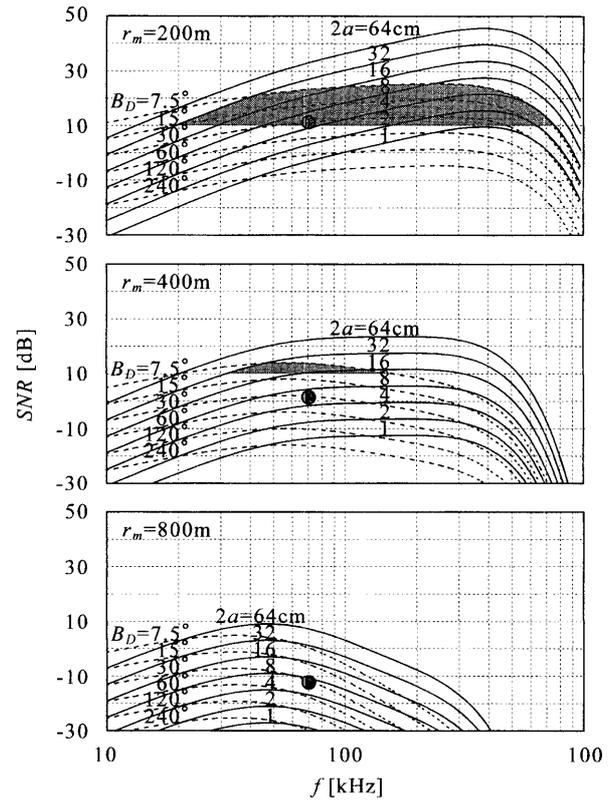


Fig. 9. Universal diagrams for basic design of receiving system of biotelemetry. Signal-to-noise ratio (SNR) is plotted against frequency, changing the parameters of range 200 m (upper), 400 m (middle) and 800 m (lower), receiving transducer diameter (solid lines), and detectable beam width (dashed lines). The $SL = 136$ dB, $\Delta f = 2.5$ kHz, and $NP_0 = 145$ dB are fixed but can be easily changed by re-scaling the ordinates. The absorption attenuation coefficient α is calculated by Francois and Garrison's formula. Shaded areas show the suitable area for the design point.

波系の一般特性をピンガの特性をやや定性的に配慮しつつ利用せざるを得ない。

ピンガはサイズが小さく、寿命が長く、検知範囲が大きいほどよい。このうち、サイズが大きいと対象の動きを不自然にするという意味で、バイオテレメトリにとっては決定的な要因になると考えられる。その意味で(2)式を重視し、高い周波数の方がよい。(3)式の関係からは、周波数を上げると電池体積は小さくなるが、電池容量も小さくなり、長短が相殺する方向に働くため、周波数に対する要求は強くない。以上を総合すると、ピンガから来る周波数に対する要求は、強くないが、高周波が好ましい。寿命と検知範囲については、(6)式もしくは Fig. 3 により、妥協的に決定する以外ないと考えられる。

受波器の直径は、小さいほどよいが、Fig. 9 では上限を 32 cm とする。検知ビーム幅は広い方がよい。これ

が狭いと、多くの受波器を使用する必要があり、装置や取り扱いが簡便でなくなる。そこで、検知ビーム幅の下限を 7.5° とする。検知ビーム幅を 7.5° とすると、 45° の範囲を検知するためには、6個の受波器が必要となる。広い検知範囲でピンガ音を確実に受信するためには、10 dB以上のSN比が必要である。

Fig. 9には、以上の議論に基づいて、適切な設計領域に影を施した。この影を施した領域内に設計点をとれば、適当な周波数や受波器の直径、検知ビーム幅などがわかり、広範囲検知のための受波のビーム数や受波方式などが決定できる。この図は $SL=136$ dBと市販のピンガのうち小さい値としている。もし $SL=146$ dBの場合は、この図のSN比の下限を0 dBに移せばよく、適切な領域も大幅に広がるのがわかる。 NP_0 および Δf の特性についても同様に調べることができる。

例として、周波数70 kHz、送波音圧136 dB、検知ビーム幅 30° の追跡用の単純なピンガの設計点を、Fig. 9の設計の汎用図上に●でプロットした。受波器の直径は5.3 cm、最大検知距離200 mでのSN比は11.5 dBである。最大検知距離200 mで検知幅を 90° にするためには、5.3 cmの直径を持った3個の受波器を使用すればよい。

最大検知距離を大きくするためには、受波器の直径を大きくする必要があり、検知幅も狭くなる。例えば、最大検知距離を800 mとすると、受波器の直径が大きく、検知ビーム幅が狭過ぎるので、送波音圧をあげる必要がある。例えば20 dB送波音圧を上げられれば (Fig. 9でSN比の下限を -10 dBとする)、20-100 kHzくらいの範囲で十分実用的な音響系が実現できる。

考 察

以上、超音波バイオテレメトリのピンガと受波音響系について、音響的評価方法とそれを利用した受信系の設計方法を調べてきた。従来の音響系の検討は、主にピンガについて行なわれ、また、定置ハイドロフォンによる無指向性の受信を前提としたものであった。¹⁶⁻¹⁸⁾ また、特にFig. 9の設計の汎用図で示したように、周波数を始めとする多くの重要な要因を総合的に取り扱える方法はなかった。本研究により、最近多い、指向性の受波器を用いるバイオテレメトリシステムを、総合的に評価もしくは設計できるようになった。特に、SN比を含む総合的な概念である検知ビーム幅によって、検知範囲を適切に評価、設計できるようになった。

計量魚群探知機的设计²⁰⁾と異なり、バイオテレメトリの場合は、送信系すなわちピンガと受波系とを完全に統合して検討するのは難しい。ピンガが、音響的諸元以外に、装着する生物、電池、回路の技術的進歩 (例えばASIC²²⁾)などに左右され、かつ、バイオテレメトリは

送波と受波が異なる装置によって行なわれるからである。そこで、本研究でも完全な総合化は行わなかったが、方法におけるピンガの特性の検討結果を、結果において間接的に受信系の設計に反映させた。ピンガの特性から来る最も重要な点は、大きさの面で周波数の2乗から3乗の特性で高周波が有利になる点である。計量魚群探知機の主要周波数が38 kHzであるのに対して、バイオテレメトリでよく使用される周波数が70 kHz付近であるのは、一つにはこの理由である。Fig. 4からもわかるように、特に長距離を必要としなければ、300 kHzといった高周波も魅力的である。

音響系の評価および設計は、(14)式のSN比を基にして行った。(14)式で雑音スペクトル係数 N_{T0} は、SN比に対して影響が大きく、また、定置系にするか船に装備するかや、船の航走速度といった測定条件によって大きく異なるので、検討する必要がある。例えば、 NP_0 が10 dB小さければ、Fig. 9の縦軸のスケールを10 dB低くすればわかるように、設計範囲が大きく広がる上に、適切な周波数も低周波側にずれる。調査船で海洋生物を追跡する場合を考察する。 NP_0 は、船の種類、船速、海況などによって異なり、一般に船が小さいほど、また船速は遅いほど低い。バイオテレメトリを行うための船の速度は、最大でも海洋生物の最大速度となる。この最大速度を海洋生物の体長の4倍にすると、50 cmの海洋生物を追跡するバイオテレメトリを行う船の船速は2 m/sになる。船速を2 m/s (4 kt) とすると、西村²⁶⁾が示したデータにより、 NP_0 は135 dBになる。(14)式で NP_0 を135 dBにすると、最大検知距離は、周波数69 kHz、送波音圧レベル136 dBの小型ピンガの仕様 (Vemco社カタログによる) に示されている最大検知距離に一致する。設計では安全を見て高い NP_0 を選ぶ必要があるから、145 dBの NP_0 の値は妥当であると考えられる。

Fig. 9の設計の汎用図は、バイオテレメトリシステムが与えられた場合の性能評価にも有効である。すなわち、使用するピンガの送波音圧レベル、受波器の直径、使用条件における調査船の雑音スペクトル係数を与えれば、Fig. 9に動作点を示すことが可能であり、最大検知距離、検知ビーム幅、SN比を知ることができる。上記パラメータのうち受波器の直径は、メーカーが提供するビーム幅から(15)式を用いて推定できる。雑音スペクトル係数は、現状では上記したような大づかみな値しかわからない。しかし、計量魚群探知機による雑音の測定法³²⁾と同様な、バイオテレメトリの受波系による雑音測定は比較的容易に実現できると考えられるので、それに期待できる。

以上の超音波バイオテレメトリの音響系の評価および設計方法の研究結果をまとめる。

- 1) ピンガのサイズ, 寿命, 送波音圧 (強度) などの相互関係を検討した。送波強度は, 暗電流のウェイトが少ないところでは, デューティレイシオと寿命に反比例し, 電池容量に比例する。ピンガの大きさは, 周波数を高くすることにより大幅に小さくできる。
 - 2) 音響系の評価および設計のために, バイオテレメトリシステムの信号対雑音比を, 送波音圧, 周波数, 受波器の直径などの関数として導いた。信号対雑音比は, 低周波では受波器の半径の2乗と周波数のほぼ4乗に比例して増加し, 高周波では吸収減衰によって急激に小さくなる。
 - 3) 信号対雑音比を基にして, 最大検知距離や検知ビーム幅などの検知範囲を示す指標を導入した。検知範囲の概念は, 受波器の大きさ, 受波のビーム数, 周波数, 送波音圧などを評価するのに有効である。
 - 4) 検知範囲において, 送波音圧をあげる効果は, 低周波では著しいが, 高周波では少ない。
 - 5) 最大検知距離は, 周波数の増加につれて大きくなり, ピークに達した後, 減少する。ピークを示す周波数は, 送波音圧と受波器の直径が大きくなるほど, 低くなる。
 - 6) 検知ビーム幅は, 総合的なビームの広がりを示す指標として重要であり, 特に高周波でビーム幅より大きい。
 - 7) 複数の受波ビームを使用する場合, 検知漏れを生じない検知ビーム幅は, 最大検知距離の $1/\sqrt{2}$ の幅が適当である。検知ビーム幅により, ビーム数を決めることができる。
 - 8) 超音波バイオテレメトリーの音響系の設計の汎用図を作成した。この汎用図では, 信号対雑音比を周波数に対して, 受波器の直径, 検知ビーム幅, 検知距離をパラメータとして表す。汎用図上に信号対雑音比が高く実用性の高い適切な領域を選び, その内部に設計点を定めることにより, 総合的に適切な設計が行える。すなわち, 信号対雑音比を大きくして確実な追跡ができる適切な周波数, 受波器の直径, 検知ビーム幅, 受波のビーム数を決めることができる。
 - 9) この設計の汎用図は, バイオテレメトリシステムが与えられた場合は, その性能評価に応用できる。
- 文 献
- 1) Ireland LC, Kanwisher JW. Underwater acoustic biotelemetry: Procedures for obtaining information on the behavior and physiology of free-swimming aquatic animals in their natural environments. In: Mostofsky DI (ed) *The Behavior of Fish and Other Aquatic Animals*. Academic Press, New York. 1978; 341-379.
 - 2) Urquhart GG, Stewart PAM. A review of techniques for the observation of fish behaviour in the sea. *ICES mar. Sci. Symp.* 1993; **196**: 135-139.
 - 3) Hawkins AD, Urquhart GG. Tracking fish at sea. In: MacDonald AG, Priede IG (eds) *Experimental Biology at Sea*. Academic Press, London. 1983; 103-166.
 - 4) Greer Walker M, Mitson PR, Storeton-West T. Trials with a transponding acoustic fish tag tracked with an electronic sector scanning sonar. *Nature* 1971; **229**: 196-198.
 - 5) Mitson RB, Storeton-West TJ. A transponding acoustic fish tag. *Radio Electr. Eng.* 1971; **41**: 483-489.
 - 6) Greer Walker M, Harden Jones FR, Arnold GP. The movements of plaice (*Pleuronectes platessa L.*) tracked in the open sea. *J. Cons. int. Explor. Mer* 1978-1979; **38**: 58-86.
 - 7) Arnold GP, Metcalfe JD. Acoustic telemetry: Progress and potential in understanding fish behaviour. *Proc. I. O. A.* 1989; **11**: 96-103.
 - 8) Milne PH. *Underwater Acoustic Positioning Systems*. E. & F. N. Spon, London. 1983; 19-92.
 - 9) Stasko AB, Polar SM. Hydrophone and bow-mount for tracking fish by ultrasonic telemetry. *J. Fish. Res. Board Can.* 1973; **30**: 119-121.
 - 10) Young AH, Tytler P, Holliday FGT, MacFarlane A. A small sonic tag for measurement of locomotor behaviour in fish. *J. Fish Biol.* 1972; **4**: 57-65.
 - 11) Trefethen PS, Dudley JW, Smith MR. Ultrasonic tracer follows tagged fish. *Electronics* 1957; **30**: 156-160.
 - 12) Hawkins AD, MacLennan DN, Urquhart GG, Robb C. Tracking cod *Gadus morhua L.* in a Scottish sea loch. *J. Fish Biol.* 1974; **6**: 225-236.
 - 13) Watkins WA, Schevill WE. Sound source location by arrival-times on a non-rigid three-dimensional hydrophone array. *Deep-Sea Res.* 1972; **19**: 691-706.
 - 14) 韓 軍, 宮本佳則, 濱田悦之, 中村善彦. 魚の行動解析のための同期法超音波ピンガー追跡システム. *日水誌* 1995; **61**: 369-374.
 - 15) Hedgepeth J, Fuhrman D, Geist D, Johnson R. Fish movement measured by tracking radar-type acoustic transducers. In: Alippi A, Cannelli GB (eds) *Proceedings of the Fourth European Conference on Underwater Acoustics*. Rome. 1998; 199-204.
 - 16) Mitson RB, Young AH. A survey of the engineering problems of developing small acoustic fish tags. *Proc. IERE Conf. Inst. Oceanography*. Univ. of N. Whales, England. 1975; 163-174.
 - 17) Pincock DG, Luke DMCG. Systems for telemetry from free-swimming fish. *Proc. IERE Conf. Inst. Oceanography*. Univ. of N. Whales, England. 1975; 175-186.
 - 18) Mitson RB. Telemetry, Underwater. In: Singh MG (ed) *Systems & Control Encyclopedia*. Pergamon Press, Oxford. 1988; 4842-4848.
 - 19) Furusawa M, Asami T, Hamada E. Detection range of echo sounders. In: Arimoto T, Haluan J (eds) *3rd JSPS Inter. Semi. Sustainable Fishing Technology in Asia towards the 21st Century*. TUF International JSPS Project, Tokyo. 1999; 207-213.
 - 20) Furusawa M. Designing quantitative echo sounders. *J. Acoust. Soc. Am.* 1991; **90**: 26-36.
 - 21) Shin HO, Hamada E, Suzuki H. Miniaturization of the pinger for biotelemetry using a biomorph vibrator. In: Uchiyama A, Amlaner Jr CJ (eds) *Proc. 11th Int. Symp. Biotelemetry*. Waseda University, Tokyo. 1991; 28-31.
 - 22) Voegeli FA, Lacroix GL, Anderson JM. Development of miniature pingers for tracking Atlantic salmon smolts at sea. *Hydrobiologia* 1998; **371-372**: 35-46.

- 23) Steig TW. The use of acoustics tags to monitor the movement of juvenile salmonids approaching a dam on the Columbia River. *Proc. 15th Int. Symp. Biotelemetry*. Juneau AK. 1999.
- 24) Jain SK, Gupta Reeta. Development of a miniature acoustic pinger tag device for tagging on to fish for fish behavioral studies. *Indian J. Mar. Sci.* 1997; **26**: 234-237.
- 25) 海洋音響学会. 海洋音響—基層と応用—. ラボ企画, 東京. 1984; 27-38.
- 26) 西村 實. 魚群探知機の最適周波数に関する研究. 博士論文, 東海大学, 清水. 1969.
- 27) Mitson RB. Underwater noise radiated by research vessels. *ICES mar. Sci. Symp.* 1993; **196**: 147-152.
- 28) Wenz GM. Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources. *J. Acoust. Soc. Am.* 1962; **34**: 1936-1956.
- 29) Hamilton D, Lozow J, Suomala Jr J, Werner R. A Hydroacoustic measurement program to examine target quantification methods. *Rapp. P. -v. Réun. Cons. int. Explor. Mer* 1977; **170**: 105-121.
- 30) Clay CS, Medwin H. *Acoustical Oceanography: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, New York. 1997; 146-149.
- 31) Francois RE, Garrison GR. Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982; **72**: 1879-1890.
- 32) Takao Y, Furusawa M. Noise measurement by echo integrator. *Fish. Sci.* 1995; **61**: 637-640.