研究

準理想ビーム送受波器の最適設計*

(平成元年12月7日受理)

笹倉豊喜 遠藤保彦 吉森 久**

Recent advancement in electronics technology is helping accelerate the development of new generation of underwater acoustic equipment. The transducer, a sensor of the underwater acoustic equipment, generally has directivity in its beam pattern. Many papers on the improvement of the directivity have so far been presented. However, most of the papers have focused the suppression of the level of sidelobe, and the improvement of the mainlobe has not been presented much.

We have made their effort in the improvement of the mainlobe and have succeed in developing "quasi-ideal beam transducer". This paper describes the theory of its beam forming and the method of its optimum design. Further, the practical design method and the measurement result of the directivity of the quasi-ideal beam transducer are described.

1. はじめに

電子技術の進歩は、水中音響機器にも大きな発展をもたらした。水中音響機器の多くは、送受波器、送受信機、演算処理装置及び表示装置から構成されているが、これらの4つの構成要素のうち、送受波器以外については電子技術の進歩を享受しており、その革新は近年特に著しい。しかし、水中音響機器のセンサである送受波器に関しては、顕著な進歩があったとは言えない。その中でも指向特性に関しては、従来サイドロープの低減¹⁾という観点からの研究は種々なされていたが、メインロープの改善については余り関心が持たれていなかった。

近年、音響技術を応用した水産資源調査が盛んになり、計量魚群探知機²⁾が多く用いられるようになった。計量魚群探知機による資源量推定³⁾の方法を単純化して述べれば、調査海域の体積散乱強度を計測すると共に、その調査対象資源の単体のターゲットストレングス(以下TSと略す)を測定し、両者からその海域の現存資源量を推定しようとするものである。この場合、計量魚探のセンサである送受波器の指向特性はFig. 1に示すような理想

ビーム⁴⁾の概念で表される。理想ビームとはある指向角内の感度が一定で、それ以外の角度に対しては感度が0であるようなビームパターンと定義されている。計量魚

Fig. 1 Concept of ideal beam.

The transducer has a constant response level in any directions within its beam angle and no response outside it.

* Optimum design for quasi-ideal beam transducer.

** 古野電気株式会社

Toyoki SASAKURA, Yasuhiko ENDO

Kyu YOSHIMORI (FURUNO Electric Co. LTD.)

探では指向角の全立体角からの散乱を積分演算するわけであるが、このとき実際のビームパターンと等価であるような理想ビームパターンを想定し、そのビーム幅を用いて演算を行っている。従って、実際のビームパターンと理想ビームパターンがかけ離れていると、そのために誤差が生ずる。また、TS 測定においても、正確なTS の値を得るためには、用いる送受波器が理想ビームでない場合、ターゲットが送受波器の真下に存在する場合以外は、なんらかの方法で指向特性の補正が必要となる。TS 測定におけるこれらの要求に答えるため、デュアルビーム⁵⁾やスプリットビーム⁶⁾送受波器が開発されている。しかしながら、逆に、理想ビーム送受波器が容易に実現できて計量魚探システムに採用されるならば、散乱強度計測やTS 測定において、精度の向上とシステムの簡略化が期待できる。

筆者らは、かねてから理想ビームに近い送受波器の実現を目指した研究^{7),8)}を行ってきたが、その開発に一定の成功を収め、その送受波器を「準理想ビーム送受波器」と名づけた。本論文は、準理想ビームの形成理論と、その理論に基づいて試作した送受波器の指向特性の測定結果について示すものである。

2. 遠距離における音場の一般表現

Fig. 2 で示すような面積 S 振動数 ω の音源が xy 平面にあり、平面上の P 点の振動分布を $V_z(P)$ とした場合、十分遠距離の観測点 P' における音場の速度ポテン

Fig. 2 Far-field observation with spherical coordinates (r', θ, ψ) for circular piston source.

シャル $\Phi(P')$ は、無意味な振動項を省いて表現すると、(2-1) 式で示される。

$$\Phi(P') = \frac{1}{2\pi} \int_S V_z(P) \frac{e^{jkR}}{R} dS \quad (2-1)$$

但し、 k は波数で、 $k = 2\pi/\lambda$ (λ は波長) である。音源上の点 P と観測点 P' 間の距離 R は、Fraunhofer 近似により $R \approx r' - r \sin \theta \cos(\psi - \phi)$ 、また $1/R \approx 1/r'$ とすれば、(2-1) 式は(2-2) 式のように書き換えられる。

$$\Phi(P') \approx \frac{e^{jkr'}}{2\pi r'} \int_S V_z(P) e^{-jkr \sin \theta \cos(\psi - \phi)} dS \quad (2-2)$$

ここで、指向性関数 $D(u, \psi)$ 及び開口関数 $A(r, \phi)$ を(2-3)、(2-4) 式のように定義する。

$$D(u, \psi) = \Phi(P') \quad (2-3)$$

$$A(r, \phi) = \frac{e^{jkr'}}{r'} V_z(P) \quad (2-4)$$

微小面積 dS は $dS = r dr d\phi$ なので、指向性関数 $D(u, \psi)$ は、(2-5) 式のようになる。

$$D(u, \psi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^a A(r, \phi) e^{-jkr \sin \theta \cos(\psi - \phi)} r dr d\phi \quad (2-5)$$

但し、 $u_0 = k \sin \theta_0$ である。すなわち、指向性関数は開口関数の2次元 Fourier 変換になっている。次に、 $\alpha = \psi - \phi - \pi/2$ とおくと(2-5) 式は(2-6) 式のように表せる。

$$D(u, \psi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^a r A(r, \phi) e^{-jkr \sin \alpha} dr d\phi \quad (2-6)$$

いま開口関数 $A(r, \phi)$ が、 r だけの関数ならば、

$$A(r, \phi) = A(r) \quad (2-7)$$

であるから、(2-6) 式は(2-8) 式のように書き換えることができる。

$$D(u, \psi) = \int_0^a r A(r) \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{3}{2}\pi - \psi}^{+\frac{3}{2}\pi - \psi} e^{-jkr \sin \alpha} d\alpha \right\} dr \quad (2-8)$$

ここで Bessel 関数の積分表示

$$J_n(z) = \frac{1}{2\pi} \int_c^{c+2\pi} e^{j(n\alpha - z \sin \alpha)} d\alpha \quad (2-9)$$

を利用すれば、(2-8) 式は(2-10) 式のように表せる。

$$D(u) = \int_0^a r A(r) J_0(ur) dr \quad (2-10)$$

これが半径 a の円盤振動子に開口関数 $A(r)$ を与えたときの遠距離における指向性関数の一般的表現である。

最も単純な例として Fig. 3(a) に示すように開口関数が振動子面上で一様である場合、 $A(r)$ は、

$$A(r) = \begin{cases} 1 & 0 \leq r \leq a \\ 0 & a < r \end{cases} \quad (2-11)$$

と表現できるから、このときの指向性関数 $D(u)$ は、

$$D(u) = \int_0^a r J_0(ur) dr = \frac{a^2}{2} \frac{2J_1(au)}{au} \quad (2-12)$$

となることはよく知られている。Fig. 3(b) にその関数を示す。

開口関数と指向性関数は Fourier 変換対を成していることから、理想ビームパターンを得るためには、無限大

の振動子に (2-13) 式で与えられる関数を開口関数として与えればよいことは想像がつく。すなわち開口関数として、Fig. 4(a) に示すような

$$A(r) = \frac{2J_1(u_0 r)}{u_0 r} \quad (2-13)$$

を与えれば、このときの指向性関数 $D(u)$ は、(2-10) 式に (2-13) 式を代入して、

$$D(u) = \int_0^\infty r A(r) J_0(ur) dr = \frac{2}{u_0} \int_0^\infty J_1(u_0 r) J_0(ur) dr \quad (2-14)$$

を得る。但し、 $u_0 = k \sin \theta$ である。

ここで、積分公式⁹⁾

$$\int_0^\infty J_1(c_0 z) J_0(cz) dz = \begin{cases} 1/c_0 & 0 < c < c_0 \\ 0 & 0 < c_0 < c \end{cases} \quad (2-15)$$

を利用すれば、指向性関数 $D(u)$ は、

Fig. 3 (a) Aperture function and (b) directivity function of conventional transducer. For a circular-plane transducer with flat aperture function like (a), directivity function is expressed by (b).

Fig. 4 (a) Aperture function and (b) directivity function of ideal beam transducer. An aperture function like (a) would produce an ideal beam pattern like (b).

$$D(u) = \begin{cases} 2/u_0^2 & |u| < u_0 \\ 0 & |u| > u_0 \end{cases} \quad (2-16)$$

となる。但し、 $u = -u$ とする。(2-16)式は Fig. 4(b) に示すようなビーム幅 $2u_0$ の理想ビームを表している。

3. 準理想ビーム形成理論

前節で述べたように、(2-13)式で与えられる開口関数をもつ振動子が理想ビームパターンを形成する。しかし、無限大に大きい振動子を実現することは不可能なので、完全な理想ビームを実現することはできない。現実には、有限の大きさの振動子を用いて理想ビームに近い指向特性をもつ送受波器を設計する。有限大の振動子から得られる理想ビームに近いビームを「準理想ビーム」と定義する。また、準理想ビームを形成する振動子を、「準理想振動子」と呼ぶ。本節では、準理想ビーム形成の理論を述べる。

有限大の振動子で準理想ビームを形成する方法として Fig. 4(a) で示した開口関数をどこかで打ち切る必要がある。現実的には、送受波器の寸法をできるだけ抑えて、より理想に近いビームを作る必要がある。我々は振動子の現実的な大きさを考慮し、Fig. 4(a) で示した関数の第2番目のゼロまでを有限開口に選んだ。そして、この開口関数の正の部分と負の部分のウェイトを調整し、準理想ビームを形成することを試みた。すなわち、この関数の正の部分は変化させず、負の部分に一定倍率を掛けることによって得られる指向性関数がどのようなかを解析的に求めた。

準理想振動子の開口関数 $A(r)$ は、次のように書ける。

$$A(r) = g(r)B(r) \quad (3-1)$$

$$B(r) = \frac{2J_1(\nu_1 r/a)}{(\nu_1 r/a)} \quad (3-2)$$

$$g(r) = \begin{cases} 1 & 0 < r < b \\ \sigma & b < r < a \\ 0 & a < r \end{cases} \quad (3-3)$$

$$b = \nu_0 a / \nu_1 \quad (3-4)$$

ここで、 $B(r)$ は理想振動子の開口関数であり、 $\nu_0 \approx 3.83$ 、 $\nu_1 \approx 7.02$ は、それぞれ $B(r)$ の第1、第2の0点である。振動子上で ν_1 の位置は、振動子の外周 $r = a$ であり、 ν_0 の位置は $r = b$ である。 $g(r)$ は、有限開口の関数で、理想振動子の開口関数に掛けられる窓関数であり、理想化関数 (Idealized function) と呼ぶ。 σ は

Fig. 5 (a) Aperture function of ideal transducer
(b) Idealized function
(c) Aperture function of quasi-ideal transducer

正の実数で、理想化因子 (Idealized factor) と名付けた。これらの関数を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a) が理想振動子の開口関数、(b) が理想化関数であり、両者の積の関数が (c) であり、これが準理想振動子の開口関数である。

3.1 準理想ビームの指向性関数

(3-1) 式で与えられる開口関数を (2-10) 式に代入すれば、準理想ビームの指向性関数が求まり、(3-5) 式のように表せる。

$$D(u) = \int_0^b r B(r) J_0(ur) dr + \sigma \int_b^a r B(r) J_0(ur) dr \quad (3-5)$$

ここで、 $x = \nu_1 r/a$ とおき、

$$Q(\mu, \nu) = \int_0^\nu J_1(x) J_0(\mu x / \nu) dx \quad (3-6)$$

なる2変数関数を定義すると $D(u)$ は,

$$D(u) = \frac{a^2 \left(\frac{\nu_1}{2}\right)^{-2}}{2} \{ \sigma Q(au, \nu_1) + (1-\sigma) Q(bu, \nu_0) \} \quad (3-7)$$

となる。そこで、(3-6)式の積分を実行すると $Q(\mu, \nu)$ は、次のように表せる(付録参照)。

$$Q(\mu, \nu) = \left(\frac{\nu}{2}\right)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\{(n+1)!\}^2} \left(\frac{\mu}{\nu}\right)^{2n} \times G_n(-2n-1, 1; (\mu/\nu)^2) \quad (3-8)$$

ここで,

$$G_n(-2n-1, 1; Z) = \sum_{m=0}^n \frac{n!}{m! (n-m)!} \times \frac{(n+1)!}{m! (n-m+1)!} Z^m = \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} \binom{n+1}{m} Z^m \quad (3-9)$$

は、Jacobi の多項式¹⁰⁾である。

音軸上 ($z=0$) の値,

$$G_n(-2n-1, 1; 0) = 1 \quad (3-10)$$

を(3-8)式を代入すると,

$$Q(0, \nu) = 1 - J_0(\nu) \quad (3-11)$$

したがって、(3-7)式より

$$D(0) = \frac{a^2 \left(\frac{\nu_1}{2}\right)^{-2}}{2} \{ 1 - J_0(\nu_0) + \sigma \{ J_0(\nu_0) - J_0(\nu_1) \} \} \quad (3-12)$$

となる。

規格化した指向性関数 $D_N(u)$ は、 $J_0(\nu_0) = -0.403$, $J_0(\nu_1) = 0.300$ を利用すると,

$$D_N(u) = \frac{D(u)}{D(0)} = \frac{Q(bu, \nu_0) + \sigma \{ Q(au, \nu_1) - Q(bu, \nu_0) \}}{1.403 - 0.703\sigma} \quad (3-13)$$

と表される。

規格化した指向性関数を Fig. 6 に示す。Idealized factor $\sigma = 0$, すなわち、振動子の $0 < r < b$ の部分のみを駆動した場合には、指向性関数は、従来通りの単峰性を示す。また、 $\sigma = 1$ とした場合は、ビームの中央が極端に落ち込んだビームパターンとなっている。これは、仮定した関数(3-1)式の位相が、 $r=b$ において反転するために、 $0 < r < b$ の中心部分からの寄与と、 $b < r < a$ の環帯からの寄与が軸付近で互いに打ち

Fig. 6 Normalized directivity function $D_N(u)$ for Idealized factor $\sigma = 0$ and 1

Single-peak beam pattern is obtained if $\sigma = 0$, beam center is concaved if $\sigma = 1$.

消し合うためである。

準理想ビームは、Idealized factor σ を適当に選ぶことによって実現される。

3.2 準理想ビームの形成

Idealized factor を適当に選ぶことにより、指向性関数(3-5)式をメインローブ内の特定の方位角で理想ビームと一致させることができる。このことを調べるためには、以下に導入する評価関数を利用すると便利である。

(3-12)式で $\sigma = 0$ とおくと,

$$D(0) = \frac{b^2 \left(\frac{\nu_0}{2}\right)^{-2}}{2} \{ 1 - J_0(\nu_0) \} \quad (3-14)$$

が得られる。これは、半径 b の振動子に関数 $B(r)$ の第1番目の0点 ν_0 までの部分の重みを与えたときの、遠方における音軸上の音場に等しい。さて、(3-6)式で導入された関数 Q はその定義によって ν の値に制限はないから、(3-14)式の ν_0 の値にも制限はない。そこで、(3-14)式において b/ν_0 を一定に保ちながら、 ν_0 の値を大きくすると、(3-14)式は理想ビームの音軸上の音場に近づく。このとき、自動的に $b \rightarrow +\infty$ となり、振動子の大きさは無限大となる。これを表現すると,

$$D_{ideal} \equiv \lim_{\nu_0 \rightarrow +\infty} D(0) = \frac{b^2 \left(\frac{\nu_0}{2}\right)^{-2}}{2} \quad (3-15)$$

となる。これが理想ビームにおける音軸上の音場である。

そこで、準理想ビームの評価関数を

$$S(\mu) \equiv \frac{D(\mu)}{D_{ideal}} = \sigma Q(\mu, \nu_1) + (1-\sigma)Q(\mu\nu_0/\nu_1, \nu_0) \quad (3-16)$$

で定義する。但し、

$$\mu = au = ak \sin \theta \quad (3-17)$$

は、無次元化したパラメータである。

指向性関数が理想ビームと一致する条件は、その方位角における特定の μ において、

$$S(\mu) = 1 \quad (3-18)$$

が満たされることである。

特に、音軸上を考えると、(3-12)式を(3-16)式に代入して

$$S(0) = 1 - J_0(\nu_0) + \sigma \{ J_0(\nu_0) - J_0(\nu_1) \} \quad (3-19)$$

を得る。(3-19)式の右辺第1項の1は理想ビームを表す。第2項は理想ビームの開口関数 $B(r)$ を $r=b$ で打ち切ったときの補正項である。第3項は、 $b < r < a$ なる環帯からの寄与である。そこで、第2項と第3項に打ち消し合うように、Idealized factor σ を決定すれば、音軸上で指向性関数を理想ビームと一致させることができる。すなわち、

$$\sigma_i = \frac{J_0(\nu_0)}{J_0(\nu_0) - J_0(\nu_1)} \approx 0.573 \quad (3-20)$$

である。このときの評価関数を Fig. 7 に示す。この場合

Fig. 7 Estimate function $S(\mu)$ of quasi-ideal beam.

Depth of concave of $S(\mu)$ curve on acoustic axis is about 1 dB.

の音軸上でのくぼみの深さは約 1 dB である。

実用的見地から望ましい Idealized factor は (3-20) 式の値以下であり、指向性関数が単峰性を示す直前までの間にあると考えられる。そこで、指向性関数が単峰性を示し始める時の Idealized factor の値を求めてみる。

そのために(3-16)式を μ で微分すると、

$$\frac{\partial S(\mu)}{\partial \mu} = \sigma \frac{\partial Q}{\partial \mu}(\mu, \nu_1) + (1-\sigma) \left(\frac{\nu_0}{\nu_1} \right) \frac{\partial Q(\mu\nu_0/\nu_1, \nu_0)}{\partial (\mu\nu_0/\nu_1)} \quad (3-21)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q(\mu, \nu)}{\partial \mu} &= \frac{\nu}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{\{(n+2)!\}^2} \left(\frac{\nu}{2} \right)^{2n+2} \\ &\quad \times \sum_{m=0}^n \binom{n+1}{m+1} \binom{n+2}{m+1} (m+1) \left(\frac{u}{\nu} \right)^{2m+1} \end{aligned} \quad (3-22)$$

である。

さて、(3-21)式は μ の奇数次のべき乗だけからなる関数であり、指向性関数がくぼみから単峰性に移行するときに、原点で 3 重根をもたなければならない。このためには、 μ の 1 次の係数が 0 であればよい。(3-21)式からこの項 ($m=0$) を抜き出すと、

$$-\frac{\mu}{2} \left[\sigma J_2(\nu_1) + (1-\sigma) \left(\frac{\nu_0}{\nu_1} \right)^2 J_2(\nu_0) \right] \quad (3-23)$$

が得られる。これが 0 に等しければよい。このときの Idealized factor σ_f は、

$$\sigma_f = \frac{\nu_0^2 J_2(\nu_0)}{\nu_0^2 J_2(\nu_0) - \nu_1^2 J_2(\nu_1)} \approx 0.286$$

となる。このときの評価関数は音軸上で平坦な関数となる (Fig. 7 参照)。

我々は準理想ビームパターンを定量的に評価するために、Fig. 8 に示すような、3つのパラメータを取り上げた。1つはサイドローブのレベル、2つめはメインローブのリップル、3つめは新たに定義した Ideality という値で、ビームパターンがどのくらい理想ビームに近いを示すものである。Ideality はビームの -3 dB 幅と -20 dB 幅の比として定義した。理想ビームでは、当然 Ideality = 1 である。 σ の値に対するこれらの値の変化を Fig. 9 に示した。 σ の値を大きくすると、Ideality は上がるが、メインローブのリップルは増える。またサイドローブレベルを最小にする σ の値が存在することも判明した。

Fig. 8 Definition of three parameters to evaluate the quality of quasi-ideal beam pattern. Sidelobe level, ripple of mainlobe, and ideality.

Fig. 9 Ideality, sidelobe level and ripple vs. Idealized factor.

4. 準理想ビーム送受波器の設計

前節では、有限の振動子で準理想ビームを実現するための開口関数を解析的に求めた。しかし実際の振動子に(3-1)式で与えられる開口関数を与えるのは困難なので、Fig. 10のように振動子の電極を幾つかに分割してウェイトを与えることになる。この際、どれくらいの分割数にすればよいかを計算機によるシミュレーションで推定した。

電極の分割数は、2, 4, 8及び16分割の4通りについて行った。シミュレーションに用いた円盤振動子の大きさは半径 $a = 8\lambda$ (λ は波長)とした。分割された電極に与えたウェイトは、Idealized factor $\sigma = 0.47$ を用いた。Fig. 11は、電極分割数の違いによる指向特性を示したものであるが、主極の形は分割数により大きく変わらないが、サイドローブは少ない分割ほど大きくなっている。しかし、8分割と16分割では、指向性パターンに大きな違いは見られない。電極の分割数によるサイドローブレベルと Ideality について定量的に評価したのが、Fig. 12である。これによると、Ideality は、2分割の場合が最も高く、0.70を示しており、4～16分割では0.61～0.64であった。サイドローブレベルは、2分割では-14 dBと大きく、4分割では-22 dBであった。8, 16分割では、-34 dBであり、連続的な開口関数を与えたときに得られる計算結果とほぼ同じ値である。従って、電極の分割数は8分割が適当であるとの結論に達した。

Table 1は8分割電極の準理想振動子に与えるウェイト値である。

Fig. 10 Divided electrode on transducer element.

Electrode on one side of transducer is divided in a concentric pattern.

Fig.11 The number of segments into which a single electrode is divided determines the beam pattern.

- (a) 2-segment electrode
- (b) 4-segment electrode
- (c) 8-segment electrode
- (d) 16-segment electrode

Fig.12 Practical design for dividing electrode into multiple segments.
Sidelobe level and ideality vs. the number of segments on electrode.

Table1 Weight values applied to 8-segment electrode.

Electrode No.	Weight	Note
1	1.000	Center
2	0.820	
3	0.520	
4	0.200	
5	-0.011	Outside
6	-0.060	
7	-0.054	
8	-0.018	

5. 試作送受波器の測定結果

周波数 200 kHz で半径 $a = 60 \text{ mm} (= 8 \lambda)$ の円盤振動子の片面の電極を分割したものを試作し、その指向特性を測定した。電極の分割数は前節の結果から 8 分割とした。この結果を Fig.13 に示すが、計算値と測定値が非常に良く一致していることが分かる。

Fig.13 Measurement results of directivity of quasi-ideal beam transducer.
Measurements correspond to theoretically calculated values pretty well.

6. 結 論

準理想ビーム送受波器の最適設計について、理論的解析と実際の設計方法について述べた。また試作した送受波器について、その指向特性の測定を行った。その結果、ここで導いた最適設計理論は、実際と非常に良く一致することが確認された。準理想ビームを実現するための Idealized factor σ は、その値を変化させることによって準理想ビームパターンを一定の範囲で変化させることができる。Table 2 は σ を変化させる場合の Ideal-ity とサイドローブレベルがどのように変化するかを計算した結果である。また、同時にメインローブのリップルがどの程度であるかについても計算した。この結果から次の結論を得た。

Table 2 Ideality, sidelobe level and ripple of mainlobe versus Idealized factor σ .

σ	Ideality	Sidelobe (dB)	Ripple (dB)	Note
0.29	0.58	-33.43	-0.00	Flat mainlobe
0.38	0.62	-33.87	-0.15	Minimum sidelobe
0.47	0.65	-33.35	-0.50	Scientific sounder
0.57	0.69	-31.76	-1.02	Maximum Ideality

- 1) メインローブを平坦にする Idealized factor の値は $\sigma = 0.29$ である。
- 2) サイドローブを最小にする Idealized factor の値は $\sigma = 0.38$ である。このとき、サイドローブレベルは、-33.87 dB である。
- 3) 計量魚群探知機に許される誤差を 1 dB 以内とす

れば、振動子の送受双方での特性が積算されるので、メインローブに許されるリップルは 0.5 dB 以内である。メインローブのリップルを 0.5 にする Idealized factor $\sigma = 0.47$ を計量魚探に使用する準理想送受波器の仕様とした。

- 4) メインローブのリップル 1 dB を許容すれば, Ideality は最大になり、その値は 0.69 である。ちなみに従来型の円盤送受波器の Ideality は 0.48 である。この結果、準理想振動子は、サイドローブの抑圧とメインローブの実用上の理想化を同時に実現したものである。

7. あとがき

音響による水産資源の調査・研究はますます重要になり、送受波器を含めたシステムの高精度化が要求されている。筆者らの行った研究によって開発された準理想ビーム送受波器がこれに役立てば幸いである。準理想ビーム送受波器は、計量魚探知機 FQ-70¹¹⁾ に採用され多くの調査船に装備されている。この装置を用いた調査も数多く行われており、貴重な調査報告が次第に発表されるであろう。また、この準理想ビーム振動子は、計量魚群探知機の送受波器だけではなく、今後は他の水中音響計測の分野でも採用されるものと思われる。なお、この理論は音響機器にとどまらず、電磁波を対象とするアンテナにも応用できるものである。

最後に、本研究について多大な援助を与えていただいた古野電気株式会社の関係各位に感謝する。

参考文献

- 1) T. T. Taylor, "Design of circular apertures for narrow beamwidth and low sidelobes", IRE Trans. on Antennas and Propagation, AP-8 (1960) 17.
- 2) T. Sasakura et al., "Echo sounder for fish stock assessment", ICES Symposium in Bergen, 1982.
- 3) 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", 学位論文, 1989.
- 4) R. J. Urick, Principles of underwater sound (McGraw-Hill, Inc., New York, 1975) pp. 216-218.
- 5) J. E. Ehrenberg, "Two application for dual beam transducer in hydroacoustic fish assessment system", Proc. IEEE Conf. Eng. Ocean Environ. 1, 152-155 (1974)

- 6) K. G. Foote, A. Aglen and O. Nakken, "Measurement of fish target strength with split-beam echo sounder", J. Acoust. Soc. Am. 80, 612-621 (1986)
- 7) 笹倉豊喜・遠藤保彦, "理想ビームパターンに近い送受波器", 昭和60年度海洋音響研究会講演論文集, 82(2), 5-8.
- 8) T. Sasakura and Y. Endo, "Quasi-ideal beam transducer", J. J. A. P., vol. 26 (1987) supplement 26-1.
- 9) 森口繁一他, 数学公式Ⅲ (特殊函数), 岩波全書, 第VI篇第4章, pp.178.
- 10) 森口繁一他, 数学公式Ⅲ (特殊函数), 岩波全書, 第IV篇, pp. 94-96.
- 11) T. Sasakura et al., "Scientific sounder using quasi-ideal beam transducer", International Symposium in Seattle USA, 1987.

[付 録]

ここでは, (3-6)式の積分を求める。

Bessel関数の積分表示(2-9)式を(3-6)式に代入し, x に関する積分を実行すると,

$$Q(\mu, \nu) = \frac{j\nu}{(2\pi)^2} \int_{\alpha}^{2\pi+\alpha} e^{j\psi} \frac{e^{-j(\mu \sin \theta + \nu \sin \psi)} - 1}{\mu \sin \theta + \nu \sin \psi} d\theta d\psi \quad (\text{A-1})$$

となる。ここで, 被積分関数の指数部を $(\mu \sin \theta + \nu \sin \psi)$ のべきで展開すると,

$$R.H.S = \frac{\nu}{(2\pi)^2} \int_{\alpha}^{2\pi+\alpha} e^{j\psi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-j)^n}{(n+1)!} (\mu \sin \theta + \nu \sin \psi)^n d\theta d\psi \quad (\text{A-2})$$

となる。さらに $(\mu \sin \theta + \nu \sin \psi)^n$ を2項展開し, $\exp[j\theta] = z$, $\exp[j\psi] = z'$ において, θ と ψ の積分を複素平面における単位円上の積分におきかえると,

$$R.H.S = \frac{\nu}{(2\pi)^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n+1)!} \times \sum_{m=0}^n \frac{n!}{m!(n-m)!} \left(\frac{\mu}{2}\right)^m \left(\frac{\nu}{2}\right)^{n-m} \times \frac{1}{j} \oint \left(z - \frac{1}{z}\right)^m \frac{dz}{z} \times \oint \left(z' - \frac{1}{z'}\right)^{n-m} dz' \quad (\text{A-3})$$

となる。ここに現れた2種類の積分は次のようになる。

$$\frac{1}{j} \oint \left(z - \frac{1}{z}\right)^m \frac{dz}{z} = \begin{cases} 2\pi \frac{m!(-1)^{m/2}}{\{(m/2)!\}^2} & m=0,2,4,\dots \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A-4})$$

$$\frac{1}{j} \oint \left(z' - \frac{1}{z'}\right)^k dz' = \begin{cases} 2\pi \frac{k!(-1)^{\frac{k+1}{2}}}{\{(k-1)/2\}!\{(k+1)/2\}!} & k=1,3,5,\dots \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A-5})$$

これらを(A-3)に代入し, $n \rightarrow 2n+1$, $m \rightarrow 2m$ と置き換えると関数 Q は,

$$Q(\mu, \nu) = \left(\frac{\nu}{2}\right)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n+1)!} \left(\frac{\nu}{2}\right)^{2n} \times \sum_{m=0}^n \frac{1}{(m!)^2 (n-m)! (n-m+1)!} \left(\frac{\mu}{\nu}\right)^{2m} \quad (\text{A-6})$$

と表される。そこで(3-9)式を利用すると(3-8)式が得られる。