

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	高音速材料の装着による深海用超音波送受波器の指向特性制御法
Title	
著者(和文)	蜂屋 弘之, 大槻 茂雄, 奥島 基良
Author	hiroyuki hachiya, SHIGEO OHTSUKI, Motoyoshi Okujima
出典(和文)	日本音響学会誌, Vol. 46, No. 3, pp. 236-241
Journal/Book name	, Vol. 46, No. 3, pp. 236-241
発行日 / Issue date	1990, 3

高音速材料の装着による深海用超音波送受波器の指向特性制御法*

蜂屋 弘之・大槻 茂雄・奥島 基良**

(東京工業大学精密工学研究所)

(平成元年 8 月 17 日 受付)

内容梗概 水中で使用する各種の音響機器の性能を十分に発揮するためには、機器の使用目的に合った指向特性を持つ送受波器を使用することが重要である。本論文では、振動子素子の周囲に水中の音速と異なる音速を持つ材料を装着することで、高静水圧下の深海で指向特性を制御する方法を提案する。振動子として円筒振動子を、音速の異なる材料として高音速材料を用い、数値設計により希望する指向特性を実現する高音速材料の最適形状、配置を求め、送受波器を試作した。測定結果と設計値を比較したところ、本論文で提案する指向特性制御法により、指向特性を制御することができ、高静水圧下の深海で所望の指向特性を持つ送受波器を実現できる見通しを得た。

1. はじめに

水中で使用する各種の音響機器の性能を十分に発揮するためには、機器の使用目的にあった指向特性を持つ送受波器を使用することが重要である。しかし、送受波器の素子として使用する振動子の形状や使用環境の制約により、必ずしも所望の指向特性が得られないことも多い。例えば、深海中に係留した種々の観測機器を浮上回収するための音響切離装置や、海中又は洋上で位置計測に使用されるトランスポンダの超音波送受波器に広く用いられている円筒振動子を深海中で用いると、高静水圧により内面からの音響放射を防ぐことができず、内外面からの音響放射のため、円筒振動子の指向特性はある方向で感度が低下し、装置の機能を十分に発揮できないことがある。そこで、この指向特性を高静水圧下の深海において制御を行い、所望の指向特性を実現する方法が望まれている。

本論文では、振動子素子の周囲に水中の音速と異なる音速を持つ材料を装着することで、指向特性を制御する方法を提案する。その実例として、振動子素子として円筒振動子を、音速が水のそれと異なる材料として高音速材料のシンタクチックフォームを用いて、この高音速材料を円筒振動子の内側あるいは外側に装着する場合について考えることとする。この送受波器構造を用いて希望する指向特性の深海用送受波器の数値設計を試みた。計

算には、さきに定式化した無限領域を考慮した有限要素法¹⁾を用い、高音速材料シンタクチックフォームの最適形状、配置を求めた。また、数値設計により得られた最適形状、配置を持つ送受波器を実際に製作し、設計値と比較することで、本論文で提案する指向特性制御法について検討を加えた。

2. 高音速材料の装着による指向特性の制御

本論文では、深海で所望の指向特性を実現するための方法として、振動子周囲に水中(海中)の音速と異なる音速を持つ材料を装着し指向特性を制御する方法を提案する。本手法は、適当な音速と密度を持ち、高静水圧に耐える音響材料があれば、種々の形状の振動子と組み合わせで応用が可能と考えられるが、ここでは現実的な例として、振動子素子として円筒振動子を、水と音速の異なる材料として、深海の高静水圧下でも使用可能な高音速材料であるシンタクチックフォームを用いることとする。

円筒振動子は、 Q を比較的容易に小さくできるうえ、平板型振動子などと比べ小さな寸法で低周波音波を発生できるので水中音響機器に広く用いられている。広い指向特性を得ようとするときは、通常内側からの音響放射を空気層などで抑え、広指向性を実現している。しかし、深海で使用する音響機器に円筒型振動子を用いようとする、高静水圧のために、内面からの音響放射を空気層により防ぐ方法は用いることができず、内外面からの音響放射のため、円筒振動子の指向特性はある方向で感度が低下し、装置の機能を十分に発揮できないことがある。

指向特性制御のために用いようとする高音速材料シン

* A control technique of transducer directivity for use in deep seas attaching high-sound-speed material.

** Hiroyuki Hachiya, Shigeo Ohtsuki and Motoyoshi Okujima (Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, 227)

タクチックフォームはもともと高静水圧下での浮力材として開発された材料で、中空の微小ガラス球をエポキシ樹脂で固めたものである。シタクチックフォームの音速と密度は、種類により若干の違いがあるが、本論文で用いたシタクチックフォームは、音速 2,500 m/s、密度 0.57 g/cm³ であり、音響特性インピーダンスが水のそれとほぼ等しいので、シタクチックフォームと水との境界での反射損失もほとんどなく音波が伝搬すると考えられる。シタクチックフォームの音速は水の音速 1,500 m/s より大きいのでこの音速差により音波の位相を制御することができる。シタクチックフォームは深海での高静水圧に耐えることができる材料ではあるが、圧力により若干の音速変化があり、その変化量は、深度 5,000 m の海中の圧力 500 kgf/cm² で、2% (44 m/s) 程度の音速増加である²⁾。

円筒振動子の周囲に装着する高音速材料シタクチックフォームの形状、配置としては種々の場合が考えられるが、複雑な形状や配置は実際に送受波器を構成する場合に制約を与えるうえ、必要以上に自由度を大きくし、設計を煩雑にしてしまう。また、種々の水中音響機器に装着されている円筒振動子では、通常、軸対称な振動モードが用いられているので、軸対称な形状、配置について考えていけばよい。そこで、本論文では実際的な送受波器の構成法として、円筒振動子の内側にシタクチックフォーム円柱を装着する方法と円筒振動子の外側にシタクチックフォーム円筒を装着する方法について考えていくことにする。

Fig. 1 に円筒振動子の内側にシタクチックフォーム円柱を装着する場合の基本的な配置を示す。シタクチックフォーム円柱の外径を円筒振動子の内径と一致させ、シタクチックフォーム円柱が左右対称であるとすれば、指向特性の制御のために変化させるパラメータはシタクチックフォーム円柱の片側長さ d となる。

Fig. 2 に円筒振動子の外側にシタクチックフォーム円筒を装着する場合の基本的な配置を示す。シタクチックフォーム円筒は左右対称であり、この円筒の内径

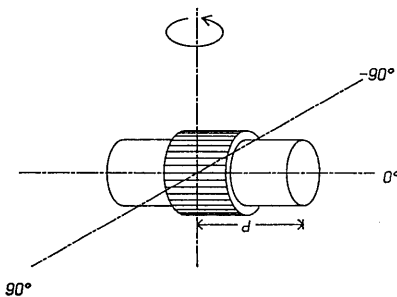


Fig. 1 Basic configuration of cylindrical transducer with syntactic foam. Syntactic foam is attached to the inside of the element.

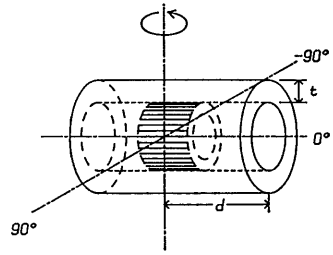


Fig. 2 Basic configuration of cylindrical transducer with syntactic foam. Syntactic foam is attached to the outside of the element.

を円筒振動子の外径と一致させることとすれば、変化させるパラメータはシタクチックフォーム円筒の片側長さ d と厚さ t となる。

3. 指向特性の計算

振動子の指向特性の計算には、無限領域を考慮した軸対称放射音場の計算法¹⁾を用いる。円筒振動子の指向特性は、円筒の内面と外面が一樣な振幅で振動する呼吸振動モードを使用していれば、軸対称な問題として計算できる。本計算法では軸対称な外部無限領域の音場を球面調和波により展開し、仮想境界球面上の音響アドミタンスの形で表す。

まず、Fig. 3 のような半径 a の仮想境界球面上の音圧 p と粒子速度 v をそれぞれ球面調和波で展開する。軸対称の場合を考えているので、

$$p(\mathbf{r}) = p(a, \theta) = \sum_{l=0}^{\infty} p_l(a) Y_l^0(\theta) \quad (1)$$

$$v(\mathbf{r}) = v(a, \theta) = \sum_{l=0}^{\infty} v_l(a) Y_l^0(\theta) \quad (2)$$

ここで、 $p_l(a)$ 、 $v_l(a)$ は l 、0 次の球面調和波成分の振幅である。また、 Y_l^0 は l 、0 次の球面調和関数である。

半径 a の仮想境界球面を $L+1$ 個の点で離散化すれば、境界球面上の音圧と粒子速度は $L+1$ 個の球面調和

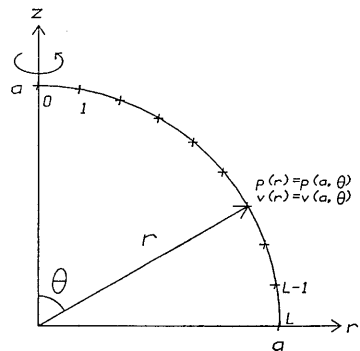


Fig. 3 Axisymmetrical sound field and boundary to be considered.

関数の和として表現でき、仮想境界面上の音響アドミタンスを求めることができる。外部無限領域を考慮した音響問題の有限要素法は、従来の有限要素法にこの無限領域の効果を示す音響アドミタンス項 $[y]$ を加えることにより、次のように表される。

$$\begin{bmatrix} [Y]_{vv} & [Y]_{vF} & [Y]_{vc} \\ [Y]_{Fv} & [Y]_{FF} & [Y]_{Fc} \\ [Y]_{cv} & [Y]_{cF} & [Y]_{cc} - [y]_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{p\}_v \\ \{p\}_F \\ \{p\}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{v\}_v \\ \{0\}_F \\ \{0\}_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、

$$[Y] = j \left(\frac{1}{\rho\omega} [M] - \frac{\omega}{\rho} [K] \right)$$

$[M]$: イナータンス・マトリクス

$[K]$: エラスタンス・マトリクス

$\{p\}$: 音圧ベクトル

$\{v\}$: 体積速度ベクトル

添字 v は駆動面を、 c は境界面を、 F はその他の要素分割された境界面内部の点を示す。

本論文では、軸対称問題を考えているので、軸対称環状要素を用いて、イナータンスマトリクス、エラスタンスマトリクスを求める³⁾。音源の形状と振幅に応じて体積速度ベクトルを与え、式(3)の1次方程式を解けば内部領域の各点の音圧が求まる。

外部無限領域の任意の点の音場 $p(r, \theta)$ は、境界面上の球面調和波展開係数 $p_l(a)$ を用いて次式で求まる。

$$p(r, \theta) = \sum_{l=0}^L p_l(a) [h_l^{(2)}(kr) / h_l^{(2)}(ka)] Y_l^0(\theta) \quad (4)$$

ここで、 $h_l^{(2)}(ka)$ は l 次の第2種球ハンケル関数である。このように、本計算法では外部無限領域の音場が球面調和波展開の形で記述され、容易に指向特性や振動子近傍の音場を求めることができる。

高音速材料シンタクチックフォームの2種類の配置法に対して、パラメータを種々に変化させて指向特性の変化を検討し、必要とする特性を実現する最適形状・配置を決定する。シンタクチックフォームは固体であるから厳密には剛性を考慮しなければならないが、斜め入射の場合に横波の影響で透過損失が大きくなることが指摘されているが⁴⁾、シンタクチックフォームの寸法が波長よりも小さければ、その影響はわずかであると考え、シンタクチックフォームを音速 2,500 m/s、密度 0.57 g/cm³ の流体として取り扱い計算を行った。また、水の音速は 1,500 m/s、密度は 1 g/cm³ とした。

4. 無指向性送受波器の設計

深海中に係留した種々の観測機器を浮上回収するための音響切離装置や、海中又は洋上での位置計測に使用さ

れるトランスポンダの超音波送受波器には広い指向特性が要求されることが多い。そこで、PZT 円筒振動子 (内径 46mm・外径 62mm・高さ 30mm) に高音速材料シンタクチックフォームを装着し、振動子の指向特性を無指向性に近づけることを考える。

まず、円筒振動子単体の指向特性を Fig. 4 に示す。点線が測定結果、実線が無限領域を考慮した有限要素法による計算結果である。周波数は 21 kHz である。測定は振動子を送波器として用い、円筒軸に対し -90° から $+90^\circ$ の範囲で行った。送波信号は水面などからの反射波を分離するため幅 1 ms のバースト波とした。本論文で用いた計算法では仮想境界球面の内側は有限要素法を用いて離散化されるが、この振動子の指向特性の計算に用いた要素分割を Fig. 5 に示す。対称性を考慮すれば、指向特性の計算には図のように円筒振動子断面の 1/4 の領域を考えればよい。節点数は 240 個、要素数は 415 個とした。要素は 1 次試験関数による軸対称三角要素である。円筒振動子は内面と外面は、一様に等振幅、逆位相で振動しているものとした。Fig. 4 に示すように、円筒振動子単体の指向特性は、円筒軸方向の感度が低く、受波方向による最大感度と最小感度の差は 10 dB 程度である。計算結果と測定結果は ± 2 dB の範囲で一致しており、この計算法で十分な精度で指向特性を予測

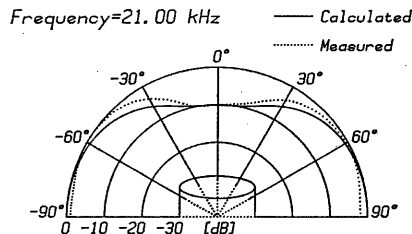


Fig. 4 Calculated and measured directivity patterns of the cylindrical transducer element.

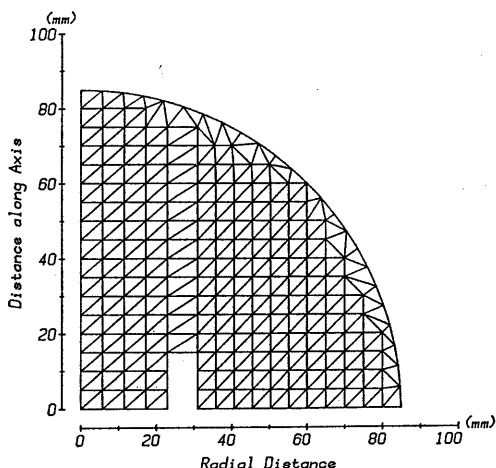


Fig. 5 Cross-section of acoustic field and cylindrical transducer divided into elements.

できることが分かる。円筒振動子の内外面で音波を放射したとき、円筒軸正面方向で感度が低下するのは、振動子の内側と外側から放射される音波が逆位相で干渉するためと考えられる。

この円筒振動子の指向特性が、高音速材料シンタクチックフォームの装着によりどのように変化するかを検討し、無指向性に近い指向特性を得るためのシンタクチックフォームの最適形状、配置を数値設計する。計算はシンタクチックフォームの形状・配置を Fig. 2 に示すように円筒振動子の外側にシンタクチックフォーム円筒を装着することを考え、この円筒の厚さ t と片側長さ d を変化させたときの指向特性の変化を評価する。シンタクチックフォーム円筒の片側長さ d と厚さ t を 0 mm から 40 mm まで変化させたときの指向特性の受波方向による最大感度と最小感度の差の計算結果を等高線マップにして Fig. 6 に示す。周波数は 21 kHz である。等高線の間隔は 1 dB であり、この感度差が小さいほど無指向性に近い。図より $t=20$ mm, $d=30$ mm のとき全方向の感度差が約 0.6 dB のほぼ無指向性に近い特性が得られており、この形状より大きくても小さくても指向特性は無指向性から劣化すると予想できる。このときの指向特性の計算結果を Fig. 7 に示す。

数値設計により得られた最適形状、配置のシンタクチックフォームを装着した送受波器を実際に製作し、特性を測定した。円筒振動子に $d=30$ mm, $t=20$ mm のシンタクチックフォーム円筒を装着したときの指向特性の

測定結果を Fig. 8 に実線で示す。点線は円筒振動子単体の指向特性である。両者とも同一の感度を基準としてあるので、シンタクチックフォームの装着により、円筒軸正面方向 (0°) の感度は 10 dB 程度向上していることが分かる。この図に示すとおり、シンタクチックフォームの装着により指向特性が変化し、21 kHz において全方向感度差 3 dB 以内とほぼ設計値どおりの無指向性といえる良好な結果を得ることができた。

5. 海洋構造計測用送受波器指向性の設計

海流の流速分布などの詳細な海洋情報を水平方向伝搬音波を用いて長期連続的に観測する手法の研究が進められている⁵⁾。このような観測手法では、Fig. 9 に示すように海中深く設置した送受波器から、海洋中に音波を水平方向に送波し、長距離伝搬させる必要がある。長距離伝搬させるためには、ある程度の大きさの放射面を持つ振動子により十分な音響出力を得る必要がある。しかし、波長と同程度の放射面を持つと、指向特性はある方向で大きな感度の谷を生じ、設置した送受波器のほぼ直上に位置する船上からの動作確認や送受波器の位置計測、音響信号を用いた動作制御などに支障をきたすこととなる。そこで、水平方向への音波伝搬と船上との音響信号の伝達の両者に適した送受波器の指向特性を設計する。円筒振動子をこの送受波器として用いることとすると、Fig. 1, Fig. 2 の $\pm 90^\circ$ 方向が水平方向、 0° 方向が送受波器の直上方向となる。

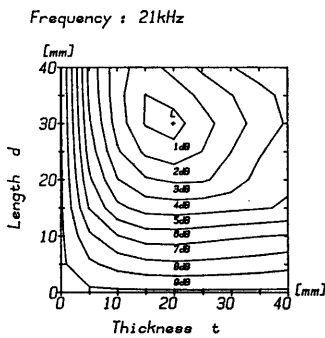


Fig. 6 Contour map of sensitivity difference in directivity.

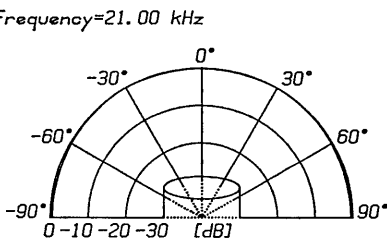


Fig. 7 Calculated directivity pattern of cylindrical transducer with syntactic foam ($t=20$ mm, $d=30$ mm).

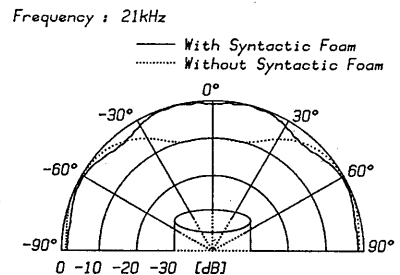


Fig. 8 Measured directivity pattern of cylindrical transducer with syntactic foam ($t=20$ mm, $d=30$ mm).

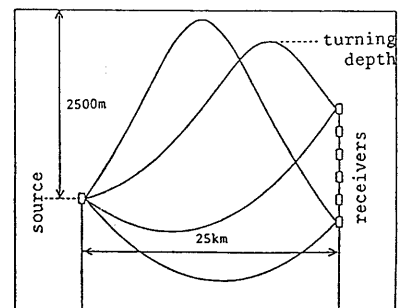


Fig. 9 Transducers geometry for monitoring ocean structure.

Fig. 10 に内径 90 mm, 外径 110 mm, 高さ 300 mm の円筒振動子の指向特性を示す。周波数は 11 kHz であり、振動子の高さは波長の 2.2 倍である。実線が測定結果、点線が無限領域を考慮した有限要素法による計算結果である。計算に用いた要素分割を **Fig. 11** に示す。ここでも、対称性を考慮して円筒振動子断面の 1/4 の領域を考えている。節点数は 386 個、要素数は 674 個とした。要素は 1 次試験関数による軸対称三角要素である。本振動子は高さ 50 mm の円筒振動子を 6 個並べて構成されたものであるが、振動子の特性と支持の影響により振動子ごとに振幅が異なっている。そこで、近距離音場の測定結果から、それぞれの振動子の振幅を推定し、その振幅で円筒振動子の内面と外面が、逆位相で振動しているものとした。

Fig. 10 に示すように、この円筒振動子の指向特性は円筒軸方向の感度が低く、軸から $\pm 30^\circ$ 以内の方向の感度が -20 dB 以下で、船上との音響信号の送受にとって大きな問題となる。計算結果と測定結果を比較すると、円筒軸方向の感度は測定結果の方が 5 dB 程度小さいが、計算結果と測定結果は、比較的良好一致している。水平方向音波の送波する $\pm 90^\circ$ 方向の感度を低下させずに、この円筒軸正面方向の感度を改善することを考える。

円筒振動子自身の寸法がかなり大きく、これ以上寸法

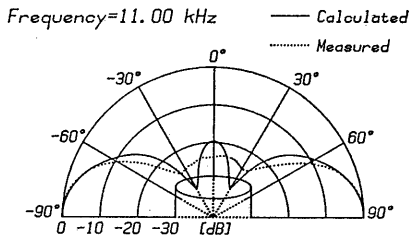


Fig. 10 Calculated and measured directivity patterns of the cylindrical transducer element.

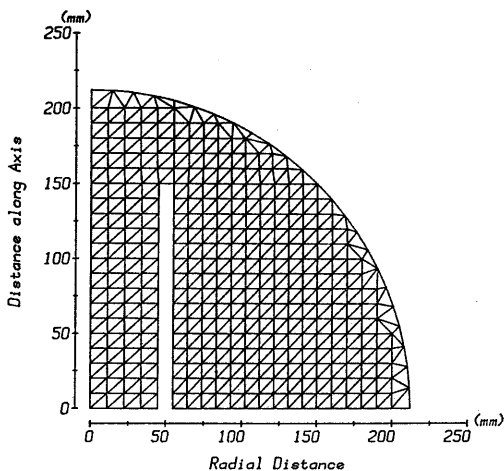


Fig. 11 Cross-section of acoustic field and cylindrical transducer divided into elements.

を大きくしないためと、感度の高い水平方向 ($\pm 90^\circ$) の指向特性が主に振動子外面の影響を強く受けていると考えられることから、この感度を低下させずに円筒軸方向の感度を向上させるため、ここでは円筒振動子内面にシタックチックフォームを装着することを考える。計算はシタックチックフォームの形状・配置を **Fig. 1** に示すように円筒振動子の内側にシタックチックフォーム円柱を装着することを考え、この円柱の片側長さ d を変化させたときの指向特性の変化を評価する。指向特性の変化を定量的に評価するため、シタックチックフォームの装着による $\pm 30^\circ$ 以内の感度向上の平均値を指標とする。

Fig. 12 にシタックチックフォーム円柱の片側長さ d と感度の向上の平均値の関係を示す。この値が大きいくほど望ましい指向特性と考えることができる。図よりシタックチックフォーム円柱の片側長さ d が 40 mm のとき感度向上の平均値が 15.8 dB と最も大きくなるのが分かる。この時の指向特性の計算結果を **Fig. 13** に示す。

数値設計により得られたシタックチックフォームの形状・配置を持つ送受波器を実際に製作し、特性を測定した。円筒振動子に $d=40$ mm のシタックチックフォーム円筒を装着したときの指向特性の測定結果を **Fig. 14** に実線で示す。点線は円筒振動子単体の指向特性である。両者とも同一の感度を基準としてあるので、シタックチックフォームの装着により指向性が変化し、11 kHz において軸から $\pm 30^\circ$ 以内の方向の感度が平均 10 dB 向上しているのが分かる。感度の向上値は設計値 15.8 dB よりも小さくなっているが、これはシタックチックフォー

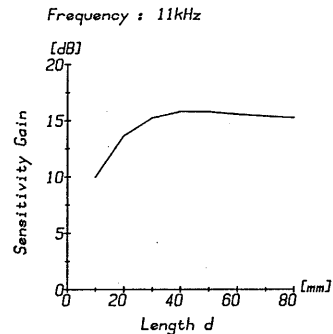


Fig. 12 Sensitivity gain in directivity.

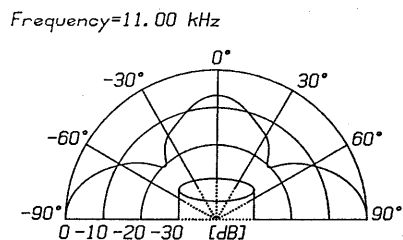


Fig. 13 Calculated directivity pattern of cylindrical transducer with syntactic foam ($d=40$ mm).

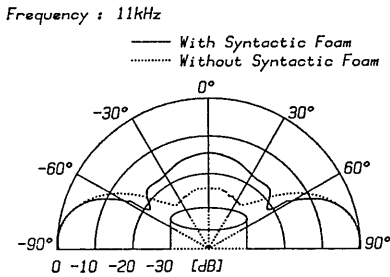


Fig. 14 Measured directivity pattern of cylindrical transducer with syntactic foam ($d=40$ mm).

ムを剛体として扱わずに、液体として近似したことによる影響と考えられる。しかし、数値設計により目的とする指向特性に近い良好な結果を得ることができた。

6. おわりに

本論文では、振動子の周囲に水中音速と音速の異なる材料を装着し、深海用送受波器の指向特性を制御する方法を提案し、その数値設計を試みた。振動子として円筒振動子を音速の異なる材料として高音速材料のシタクチックフォームを用い、振動子内外面から放射される音波の位相を制御した。

まず、無指向性に近い指向特性の深海用送受波器の設計を試みた。円筒振動子に音波の位相を制御する目的で装着するシタクチックフォームの形状・配置を種々に変化させたとき、指向特性がどのように変化するかを計算により検討し、最適形状・配置を求めた。この送受波器を実際に製作し、特性を測定したところ、ほぼ設計値通り全方向感度差 3 dB 以内の無指向性に近い特性を得た。

次に、海洋構造計測用送受波器の円筒軸方向の感度を

向上させることを目的に数値設計したところ、シタクチックフォームを内面に装着することで軸から $\pm 30^\circ$ 以内の方向の感度を平均 10 dB 向上させることができた。

これにより、円筒振動子に高音速材料シタクチックフォームを装着することで、指向特性を制御することができ、無限領域を考慮した有限要素法により、高静水圧下の深海で任意の指向特性を持つ送受波器を数値設計できる見通しを得た。

本論文で提案した方法は、適当な音速と密度を持ち高静水圧に耐えることのできる音響材料があれば、様々な応用が可能と考えられる。しかし、現在の設計法では音速材料の形状・配置によりどこまで希望した指向特性に近づけることができるのか、どの程度まで指向特性を変化させることができるのかといった点については、試行錯誤によって見通しを得る必要があり、今後この点についての合理的な設計手順が必要と考えられる。

本研究の一部は、文部省科研重点領域研究「深層海水循環」の補助を受けた。

文 献

- 1) 蜂屋弘之, 大槻茂雄, 奥島基良, “無限領域を考慮した軸対称音源による放射音場の計算,” 音響学会誌 45, 115-119 (1989).
- 2) W. M. Madigosky, I. Rosenbaum and R. Lucas, “Sound velocities and B/A in fluorocarbon fluids and in several low density solids,” J. Acoust. Soc. Am. 69, 1639-1643 (1981).
- 3) 加川幸雄, 有限要素法による振動・音響工学/基礎と応用(培風館, 東京, 1981), p. 160.
- 4) 中西俊之, 菊池年晃, 長谷川秋雄, 高橋純夫, “高分子材料固体平板の音速及び吸収係数の測定,” 音響学会誌 45, 354-360 (1989).
- 5) 蜂屋弘之, 大槻茂雄, 奥島基良, “水平伝搬音波の伝搬時間計測による黒潮海域の音速鉛直分布の推定法,” 音響学会誌 44, 377-381 (1988).