

深海用パラメトリック・サブボトム プロファイラの基礎的研究

中村 敏明^{*1} 中西 俊之^{*1} 土屋 利雄^{*1}
越智 寛^{*1} 森松 秀治^{*2}

筆者等は、現在、媒質の非線形現象を利用したパラメトリックサブボトムプロファイラを計画中であるが、深海用の潜水船や無人探査機に搭載されるサブボトムプロファイラに要求される条件としては、小型軽量の送受波器と鋭いビーム幅である。鋭いビーム幅は、海底下の堆積層の高分解能探査だけでなく、海底で作業中のビークルからの不要反射を防ぐためにも必要である。このようなことを考慮すると、深海で使用するサブボトムプロファイラの音源としては、パラメトリック音源が適していると考えられる。

しかしながら、深海のような高水圧におけるパラメトリック現象の効率に関しては、実験的にも、理論的にも未だ報告されていない。そこで、まず最初に、実海域で得られた海水の物理パラメータを用いて、パラメトリック効果によって発生する二次波の音圧の深度依存性を数値計算により検討した。次に、パラメトリック音源の試作器を作り、常圧下の水槽で実験して、理論特性との比較を行った。

キーワード：パラメトリックアレイ，サブボトムプロファイラ，地層探査，非線形現象

Basic Study of Parametric Sub-bottom Profiler for Deep Sea

Toshiaki NAKAMURA^{*1} Toshiyuki NAKANISHI^{*1}
Toshio TSUCHIYA^{*1} Hiroshi OCHI^{*1}
Hideharu MORIMATSU^{*2}

A parametric sub-bottom profiler is being planned using the nonlinear phenomena. Small sized transducers and narrow beam width required for sub-bottom profiler installed on manned or unmanned submersibles for deep sea use. A narrow

* 1 深海開発技術部

* 2 古野電気株式会社

* 1 Deep Sea Technology Department

* 2 Furuno Electric Co., Ltd.

beam width is also needed for high resolution measurements of sedimentary layers in the sub-bottom and for preventing reflection from the vehicle working over the sea bottom. Taking into account these requirements, a parametric acoustic source is suitable as the source of a sub-bottom profiler in the deep ocean.

However, the efficiency of parametric phenomena under high ambient pressure as found in the deep sea, has not been studied theoretically or experimentally. Therefore, as a first step, the dependency of the secondary pressure level generated as a function of water depth was examined numerically using data of physical parameters obtained in the real sea. Following this, a prototype of the parametric acoustic source was made, and experimental results measured in a water tank under ordinary ambient pressure were compared to the theoretical characteristics.

Key word : parametric array, sub-bottom profiler, geophysical prospecting, nonlinear phenomena

1 はじめに

深海潜水調査船や無人探査機にサブボトムプロファイラを搭載し、水深6,000m程度の海底面より100~200mの高度から海底表層の探査を行う場合を考えると、まず小型軽量であることが要求される。次にビーム幅はシャープな方が望ましい。これは、探査分解能を上げるということ以外に、例えば、海底面近くに降ろしたビークル等からの不要反射を防ぐという意味もある。これらのことを考えると、一次周波数を数十kHzにとり、数kHzの二次波を発生させるパラメトリック音源が適していると考えられる。

パラメトリック音源とは、音源から2つの周波数の大振幅音波を放射し、媒質の非線形性を利用して、差の周波数をもつ二次波を新たに発生させるもので、効率は低い、小型の音源にもかかわらず鋭いビームの低周波音波を発生させることができる。しかしながら、高水圧下における二次波の発生効率を論じた報告は未だなされていない。そこで、まず最初に、海水の各種パラメータの実測データをもとに、二次波音圧の深度依存性を計算し、深海での使用の可能性を検討した。次に、深海用の音源を作るための各種データを得る目的で、常圧下での実験用音源を試作し、水槽実験を行ったので、これらの結果について報告する。

2 パラメトリック音源の原理

2.1 媒質の非線形現象

音波を伝える媒質である空気や水は、それ自体バネの性質を持っている。音波の振幅の小さな場合はバネの伸び縮みも小さく、バネはフックの法則に従う。すなわち、バネにかかる力と伸びは比例（線形）関係にある。バネに吊るした重りを重くしていくと重りと伸びの関係はフックの法則から外れ、非線形になるが、これと同様の現象が音波の場合にも起こる。音波の伝搬に伴う媒質の伸び縮みは、断熱変化を引き起こす。周知のように、断熱変化を表す状態方程式（圧力と密度の関係）は非線形になるが、これが音波の非線形現象の主な要因である。媒質の非線形性を引き起こすような大振幅の音波が伝搬すると、音波の波形は図1

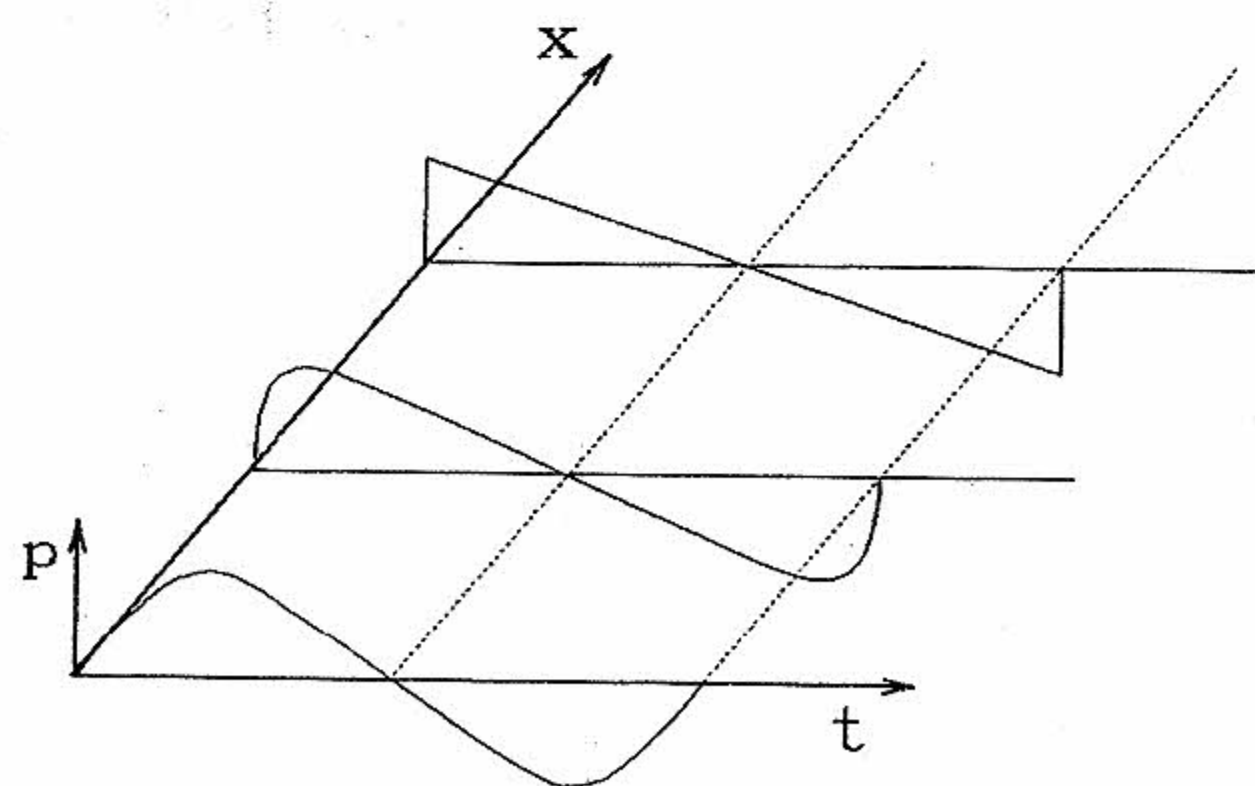


図1 非線形伝搬に伴う波形変化

Fig. 1 Waveform distortion due to nonlinear propagation.

に示すように伝搬につれて変化する。これは音波の伝搬速度が音圧にほぼ比例して変化するためであり、音圧の正の部分は速く伝搬し、逆に負の部分は遅く伝搬する。そのため図のように、正弦波は、伝搬に伴ってピークの位置が移動し、ある時点で衝撃波面をもつ鋸歯状波に変化する。以上が時間軸上での変化であるが、周波数軸上では基本波以外に多数の高調波成分が発生する。

ここで音源から二つの周波数の正弦波を放射する場合を考えると、それぞれの周波数の高調波の外に、今度は二つの周波数の和あるいは差の周波数、高調波どうしの和と差の周波数等、種々の組み合わせの周波数を持つ二次波が、波形変化によって発生する。これらの内、差周波を新たな音源として利用しようというのがパラメトリック音源である。

2.2 パラメトリックアレイ

パラメトリック音源実現の可能性は、1963年に Westervelt によって理論的に予測された¹⁾。彼は、二つの周波数の大振幅音波を音源から共軸で放射した時の、二つの差の周波数の音波の振る舞いを解析し、その二次波が従来の音波には見られない特徴を備えていることを見出した。彼の理論モデルでは、一次波のビームに沿って、二次波を発生する仮想音源が分布していると考え、それらの仮想音源が全体として、縦型アレイを形成するため、小口径の音源でありながら非常に鋭いビームが形成される。彼はこれをパラメトリックアレイと名付けた。アレイの長さは媒質の吸収に依存するため、一次波の周波数によって異なるが、数十kHzだと海水中で数100mに達する。

一般に、鋭いビームを発生させるには、音源の大きさを発生させようとする音波の波長よりずっと大きくする必要があるが、周波数が低くなればなるほど波長は長くなるので、音源も大きくなる。例えば3.5kHzの周波数の音波でビーム幅 5° を実現しようとする、直径約5mの音源が必要になる。重量は恐らく数トン以上になると考えられるが、このような音源を、最初に述べたような深海潜水船や無人探査機に搭載することは到底不可能である。パラメトリックアレイでは、後に示すように同じ条件で直径35cmとなり、通常の音源に比べて十分の一以下ですむ。さらに、通常の音

源では、サイドローブが生じ、ソーナーとして用いた場合には分解能の劣化をもたらす原因となるが、パラメトリックアレイでは上で述べたように縦型音源のため、このサイドローブを小さくすることができる。欠点は、効率が大変低いことで、一次波から二次波への変換効率がせいぜい1%に過ぎないのが現状である。これがパラメトリックアレイが今まで殆んど実用化されていない理由であるが、次に述べるような特殊な状況下においては、その特徴を生かした使い方が可能となる。

2.3 サブボトムプロファイラへの応用

音波を用いて海底下の地層探査をする装置のうち、海底下数十mまでの表層探査装置をサブボトムプロファイラと呼んでいるが、音源には周波数3.5kHzの圧電振動子が一般的に用いられる。このような音源では、前節で述べたように、シャープなビームを発生しようとする、巨大な音源が必要になり、逆に現実的な、例えば直径50cm程度の大きさの音源では、ビーム幅が 50° と広がってしまう。ビーム幅が広いと図2に示すように、音波が広い範囲に照射されるので、いろいろな所からの反射波が重なってしまい、結果的に地層の分解能が悪くなる。したがって地層の微細構造を観測しようとする、音波のビーム幅を狭くすることが必要である。例えば、ビーム幅を 5° にすると図2に示すように、水平、垂直分解能とも 50° の場合の十分の一以下になる。ただ実際には、垂直方向の分解能はパルス幅に依存し、例えばパルス幅1msの場合、約75cmの距離分解能に相当

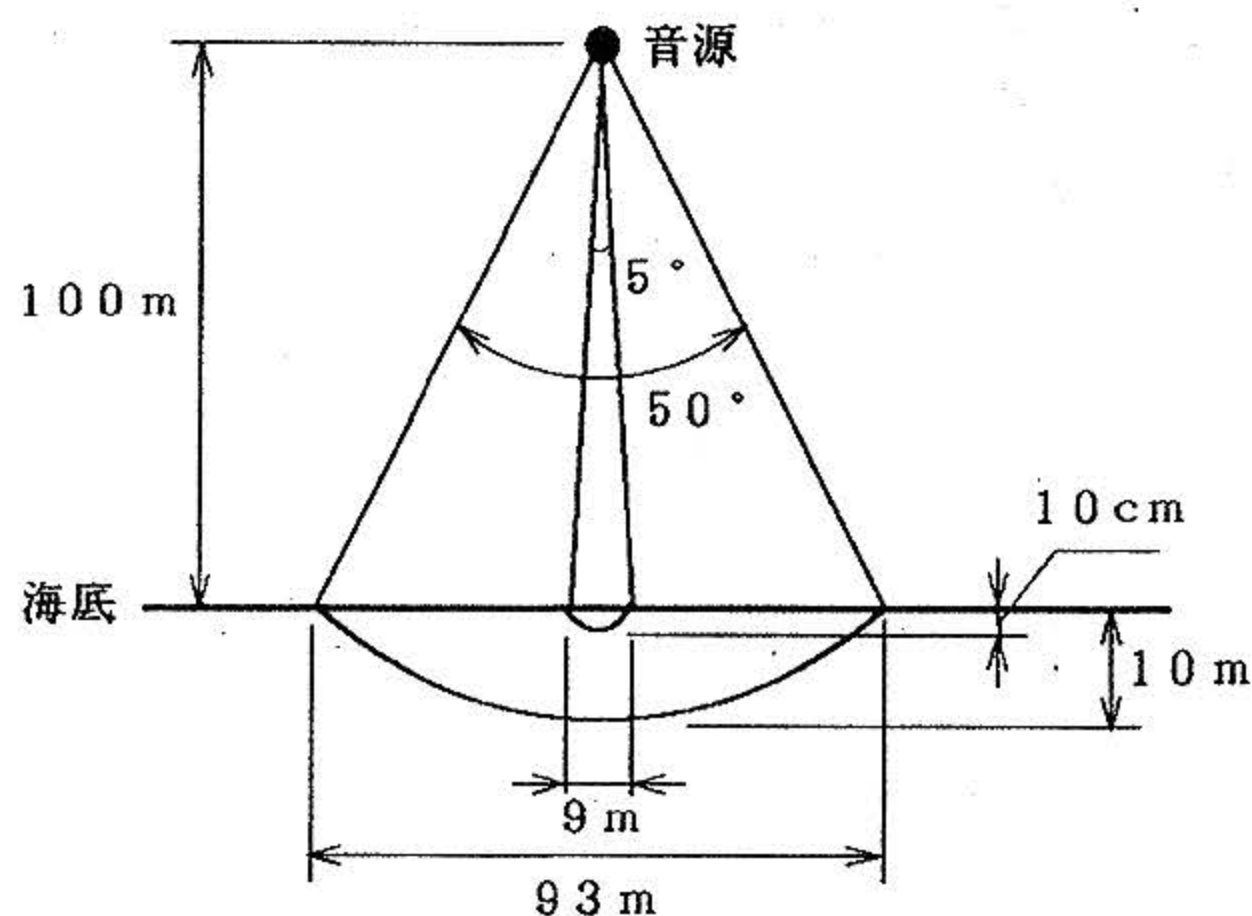


図2 ビーム幅と分解能

Fig. 2 Beam width and vertical and horizontal resolutions.

する。したがって、ビーム幅 5° の場合の垂直分解能は75cmになるが、それでも 50° の場合の十分の一以下である。

3 サブボトムプロファイラの性能予測計算

3.1 海底モデル

サブボトムプロファイラの性能を予測するために、海底のモデルを仮定する必要がある。ここでは、日本近海における水深 6000m 前後の数箇所の海底で採取されたコアサンプル中の平均的なものを選び、海底下数十mまでの堆積物の音速と密度のデータ²⁾をもとに、図3に示す単純化した2層の海底モデルを考える。海底は硬さの異なる2つの泥層からなり、上層の厚みを d とし、下層は半無限と仮定している。図中 h は音源の高さである。海水と上層の境界をA、上層と下層の境界をBとし、Aにおける反射と透過、およびBにお

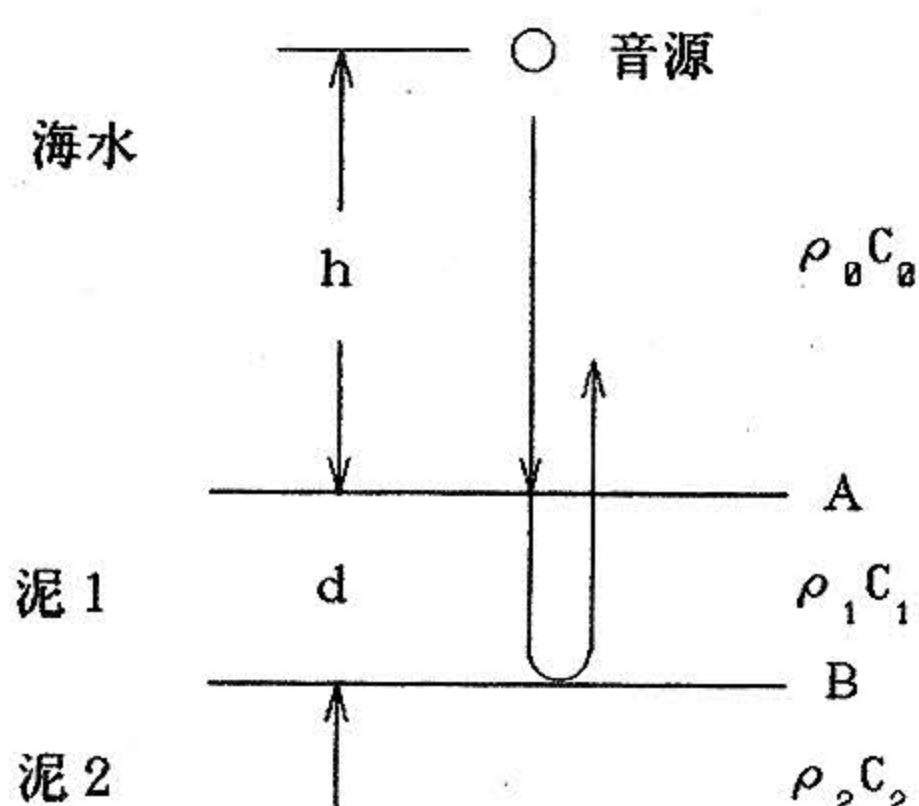


図3 2層海底モデル

Fig.3 Model of sea bottom with two layers

表1 モデル海底のパラメータ

Table 1 parameters of the sub-bottom model.

	ρ (kg/m ³)	C (m/s)	ρC
海水	1.03×10^3	1460	1.504×10^6
泥1	1.32×10^3	1480	1.954×10^6
泥2	1.40×10^3	1499	2.099×10^6

る反射と、上層中の吸収減衰を考慮する。海水および各層の定数を表1に示す。

ここで、音速と密度はいずれも常温、常圧下で測定されたデータであるので、海水のデータも同じ条件にしている。また、泥層中の吸収減衰は、Hamilton³⁾による北太平洋底における泥性堆積物のポロジティの実測値 (76~86%) より、同じく Hamilton⁴⁾ のポロジティ η に対する吸収係数 α (dB (m)⁻¹ (kHz)⁻¹) の実験式、

$$\alpha = 0.7602 - 0.01487 \eta - 0.000078 \eta^2 \quad (1)$$

を用いて計算する。

3.2 許容ノイズレベルと探知距離

前節で示した海底モデルに対して、 d をパラメータとし、式(2)に示すソナー方程式を用いて許容ノイズレベル NL (dB/√Hz) と探知距離の評価を行う。

$$NL = SL - TL_0 - TL_1 - AL_1 - RL_2 - DT - DI - 10 \log W \quad (2)$$

ここで、 SL は 1 m 換算時の送波音圧である。

TL_0 は拡散による伝搬損失で、

$$TL_0 = 20 \log 2(h+d) \quad (3)$$

となる。境界Aにおける往復の透過損失 TL_1 は、まず境界Aにおける音圧反射率 r_1 が

$$r_1 = \frac{\rho_1 C_1 - \rho_0 C_0}{\rho_1 C_1 + \rho_0 C_0} \quad (4)$$

であるので、往復の音圧透過率 t_1

$$t_1 = (1 + r_1)(1 - r_1) \quad (5)$$

を用いて、

$$TL_1 = -20 \log t_1 \quad (6)$$

となる。 AL_1 は泥層中の吸収損失であり、式(1)の α を用いて、

$$AL_1 = 2 \alpha f_2 d \quad (7)$$

と表される。ここで f_2 は二次波周波数 (kHz) である。 RL_2 は境界Bにおける反射損失であり、境界Aの場合と同様に音圧反射率 r_2 、

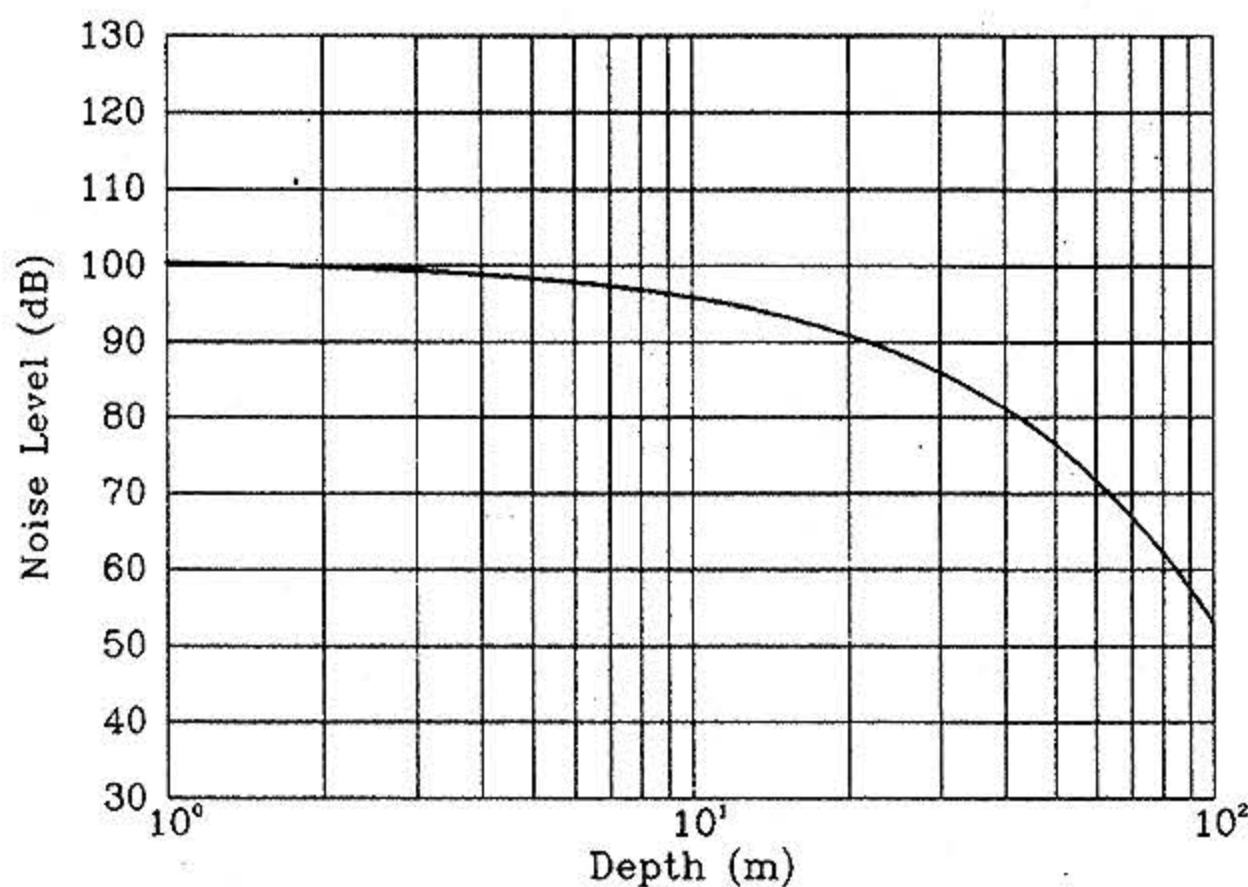


図4 許容ノイズレベル

Fig. 4 Permitted noise level.

$$r_2 = \frac{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \quad (8)$$

を用いて,

$$RL_2 = -20 \log r_2 \quad (9)$$

で表される。 DT は検出閾値、 DI は受波指向性利得、 W は受信帯域幅である。

今、音源の高度 $h=100\text{m}$ 、指向性利得 $DI=30\text{dB}$ 、帯域幅 $W=1000\text{Hz}$ 、二次波周波数 $f_2=3.5\text{kHz}$ 、送波音圧 $SL=186\text{dB}$ の条件で、泥層厚 D を変化させた時の許容ノイズレベル NL を計算した。結果を図4に示す。 $d=30\text{m}$ の時、 NL は86dBであることがわかる。

4 二次波音圧の深度依存性

4.1 一次波の非線形減衰を考慮した二次波音場

二次波の放射音場を求める理論式は今まで種々提案されているが、いずれも一長一短があり、決定的なものはまだ無い。ここでは、Garrett et al.⁵⁾によって得られた積分表現による式を基礎に置く。この式は二次の微小量まで考慮した波動方程式を放物近似を用いて解いたもので、音源は円形ピストンのような軸対称のものに限られるが、近距離音場から遠距離音場まで統一的な解析解が得られる特長をもっている。ただ導出の過程で準線形近似を用いており、衝撃波面によって生ずる非線形減衰を伴うような大振幅領域での適用は考慮されていない。しかしながら、一次波音圧

を増加させて行った時、非線形減衰が生じた時点から飽和に至るまでの間にはある程度の遷移領域があり、その領域では送波器の入力パワーの増加に応じて音圧振幅の増大が見られる。したがって、できるだけ大きな二次波音圧を得ようとするため、今回の送波器は、この遷移領域で使用することを考える。そこで非線形減衰の影響を考慮する必要があるが、ここでは近似的に、Moffett et al.⁶⁾のTaper関数 T^2 を上述の式に導入することにより、非線形減衰による効果を考慮する。音軸上に距離 z をとり、それに直交する軸を r とすると、二次波音圧 $q(r, z)$ は、

$$q(r, z) = j \frac{\beta k_1 k_2 k}{2 \pi p c^2 z} P_1 P_2 \int_0^\pi \int_0^z \frac{T^2(z')}{z'} e^{-\alpha z'} \times \exp \left[j \frac{k_1 k_2 (r_1^2 + r_2^2 - 2 r_1 r_2 \cos \phi)}{2 k z'} \right] dz' \times J_0 \left(\frac{r F^{1/2}}{z} \right) d\phi \int_0^a \int_0^a \exp \left[-j \frac{(kr)^2 + F}{2 k z} \right] r_1 dr_1 r_2 dr_2 \quad (10)$$

となる。ここで、 $F = (k_1 r_1)^2 + (k_2 r_2)^2 - 2 k_1 r_1 k_2 r_2 \cos \phi$ 、 k_1, k_2 は二次波の波数、 P_1, P_2 は音源面 ($z=0$)における音圧である。またTaper関数 T^2 は、

$$T^2(z') = \frac{2}{K^2} \left(\frac{1+K}{\sqrt{1+2K}} - 1 \right) \quad (11)$$

$$K = 3 \left(\frac{\xi}{2\pi} \right)^2 \quad (12)$$

$$\xi = 2 \chi \sinh^{-1} \left(\frac{z'}{R_0} \right) \quad (13)$$

$$\chi = \frac{2 \pi \beta P R_0 f_0}{\rho C^3} \quad (14)$$

で与えられる。ここで、 P は一次波ピーク音圧、 f_0 は一次波中心周波数、 R_0 はRaleigh長 ($= \pi a^2 f_0 / c$)である。音軸上 ($r=0$)では、 $J_0(r F^{1/2} / z) = 1$ となり、また公式、

$$\int_0^\pi e^{j x \cos \phi} d\phi = \pi J_0(x) \quad (15)$$

を用いると,

$$q(0, z) = j \frac{\beta k_1 k_2 k}{2 \rho c^2 z} P_1 P_2 \int_0^a \int_0^a \int_0^z \frac{T^2(z')}{z'} e^{-2 \alpha z'} \\ \times \exp \left[j \frac{k_1 k_2 (r_1^2 + r_2^2)}{2 k z'} \right] \exp \left[-j \frac{(k_1 r_1)^2 + (k_2 r_2)^2}{2 k z} \right] \\ \times J_0 \left[\frac{k_1 k_2 r_1 r_2}{k} \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{z'} \right) \right] dz' r_1 r_2 dr_1 dr_2 \quad (16)$$

と書ける。

4.2 一次波の最適周波数

前節で述べたように、伝搬中に、一次波に衝撃波面が生ずると、非線形減衰によって振幅が減少するが、この現象は周波数が高いほど顕著となる。すなわち媒質の非線形効果による波形変化は、周波数が高いほど大きくなるので、二次波の発生音圧も大きくなるが、さらに一次波周波数が高くなると、非線形減衰の影響が顕著になり、一次波音圧が減少するため、二次波音圧も減少する。したがって、音源の大きさ、音源からの距離を固定した場合、二次波音圧を最大にする最適周波数が存在すると考えられる。そこで、式(16)を用いて一次波周波数に対する二次波音圧の変化を計算した。この時、音源面の振動速度を周波数に依らず一定にする方法と、一次波の送波音圧を一定にする方法が考えられるが、ここでは、振動速度を一定にして計算している。これは、音源を駆動するパワーアンプ出力が、周波数によって変化しないと仮定し、また振動子の電気音響変換効率も周波数に依

らないと仮定すると、音源面の振動速度は周波数に依らず一定になると考えられるからである。上の仮定は今回計算した程度の周波数の範囲では妥当だと考えられる。

音源半径 $a=0.2\text{m}$ 、二次波周波数 $f_2=3.5\text{kHz}$ とし、音源からの距離 z を4種類変えて計算した。結果を図5に示す。60kHz付近で二次波音圧が最大になる結果が得られた。そこで以下の議論では、一次波周波数 $f_1=60\text{kHz}$ として行う。

4.3 深度依存性

計算に必要な温度、塩分濃度、密度は、北太平洋 ($17^\circ 04' \text{ N}$, $162^\circ 24' \text{ W}$) で得られた実測データ⁷⁾を用いた。それぞれのデータを図6～8に示す。ここで密度は、 $\sigma=10^3 (\rho-1)$ で表示している。また、塩分濃度が水深300m前後低くなっているが、これは中低緯度海域特有の現象であり、高緯度寒冷海域の低塩分濃度の海流が潜り込んでいる結果だと言われている。音速 c は Wilson (October) を用いた。非線形パラメータ β は竹内ら⁸⁾によって、C.T. Chen et al. の実験式⁹⁾を基に温度、圧力、塩分濃度の関数として、次式のように与えられている。

$$\beta = \frac{\mu + 1}{2} \quad (17)$$

$$\mu = 5.66 + 1.58 \times 10^{-2} T \\ + (1.20 \times 10^{-3} - 1.25 \times 10^{-5} T) P_0 \\ + 7.58 \times 10^{-3} S \quad (18)$$

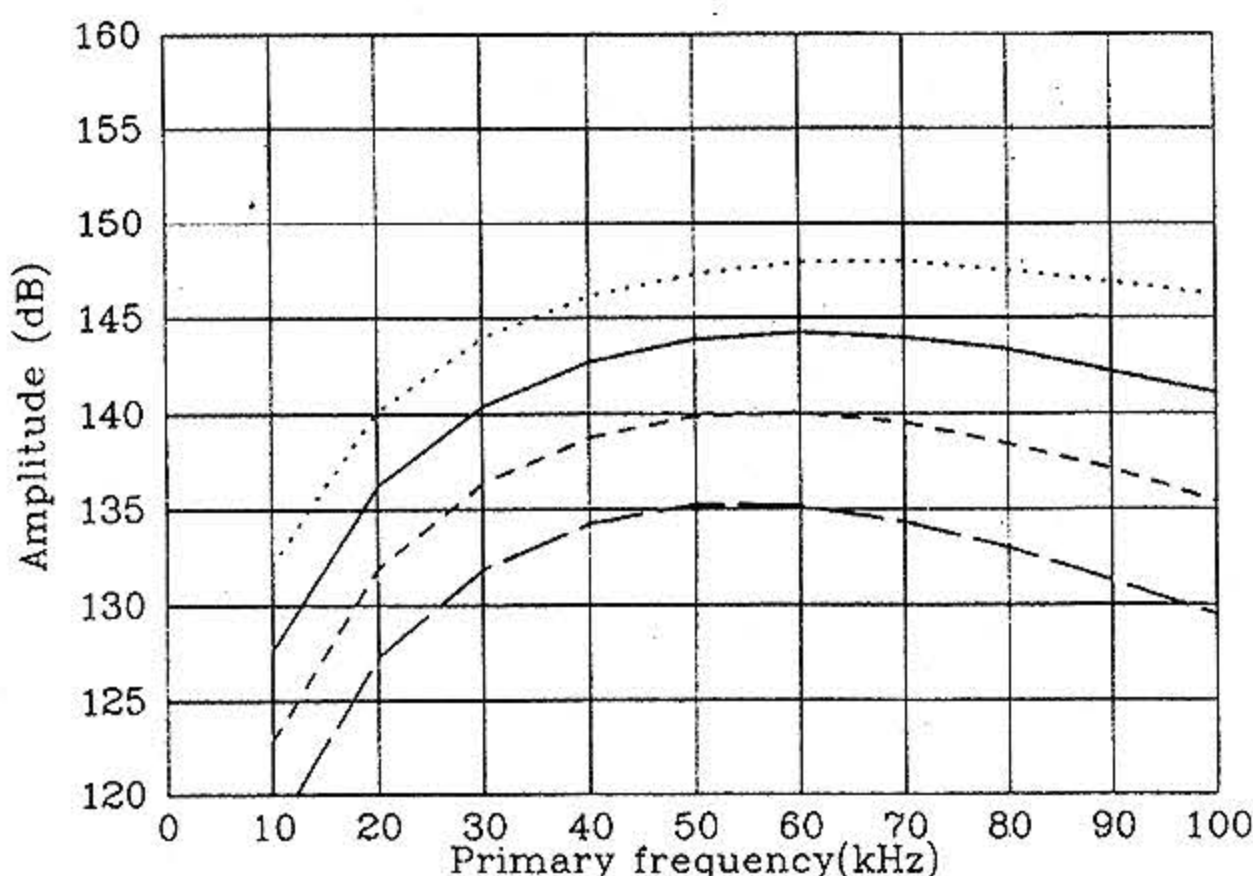


図5 一次波の最適周波数

Fig. 5 Optimum frequency of the primary wave.

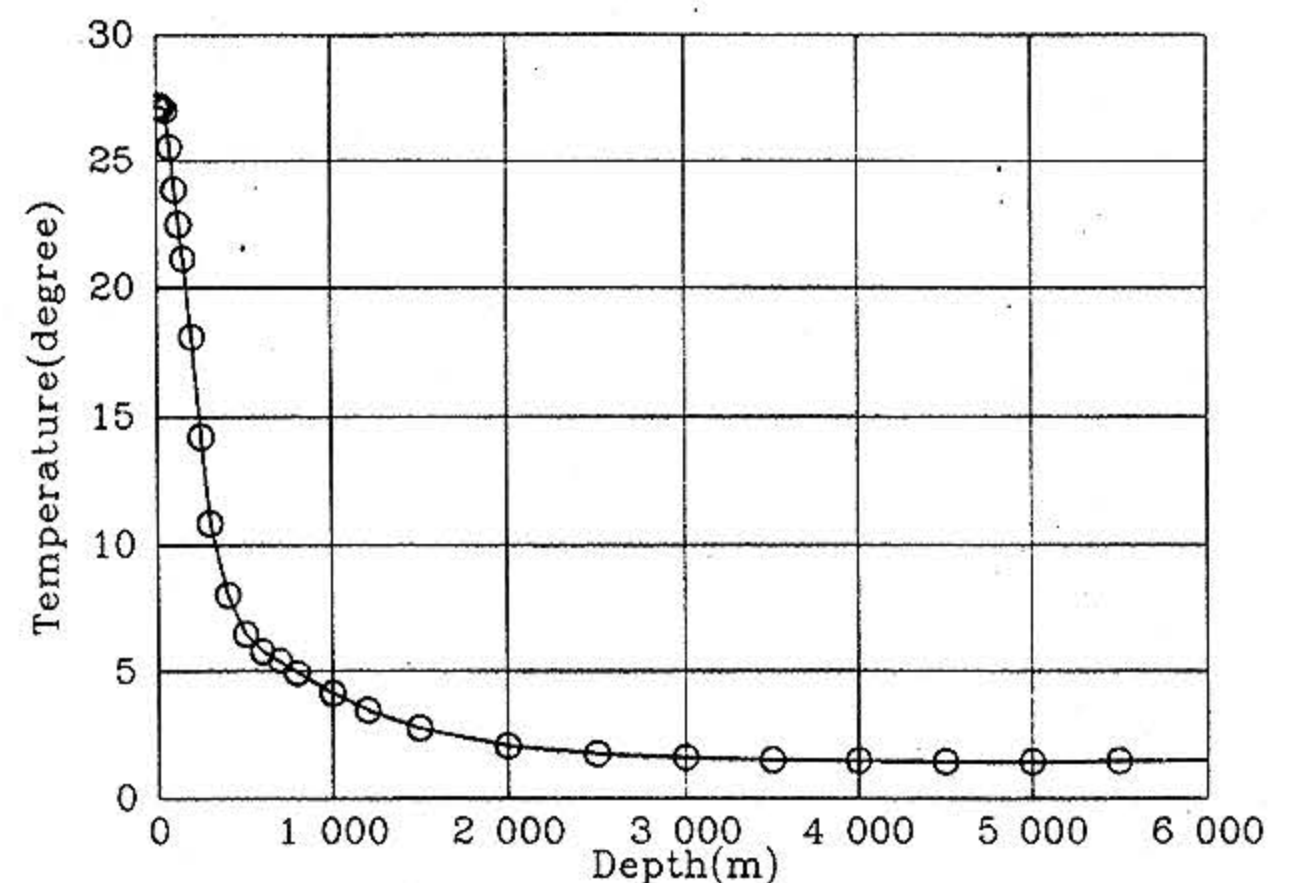


図6 温度の深度依存性

Fig. 6 Temperature vs. depth.

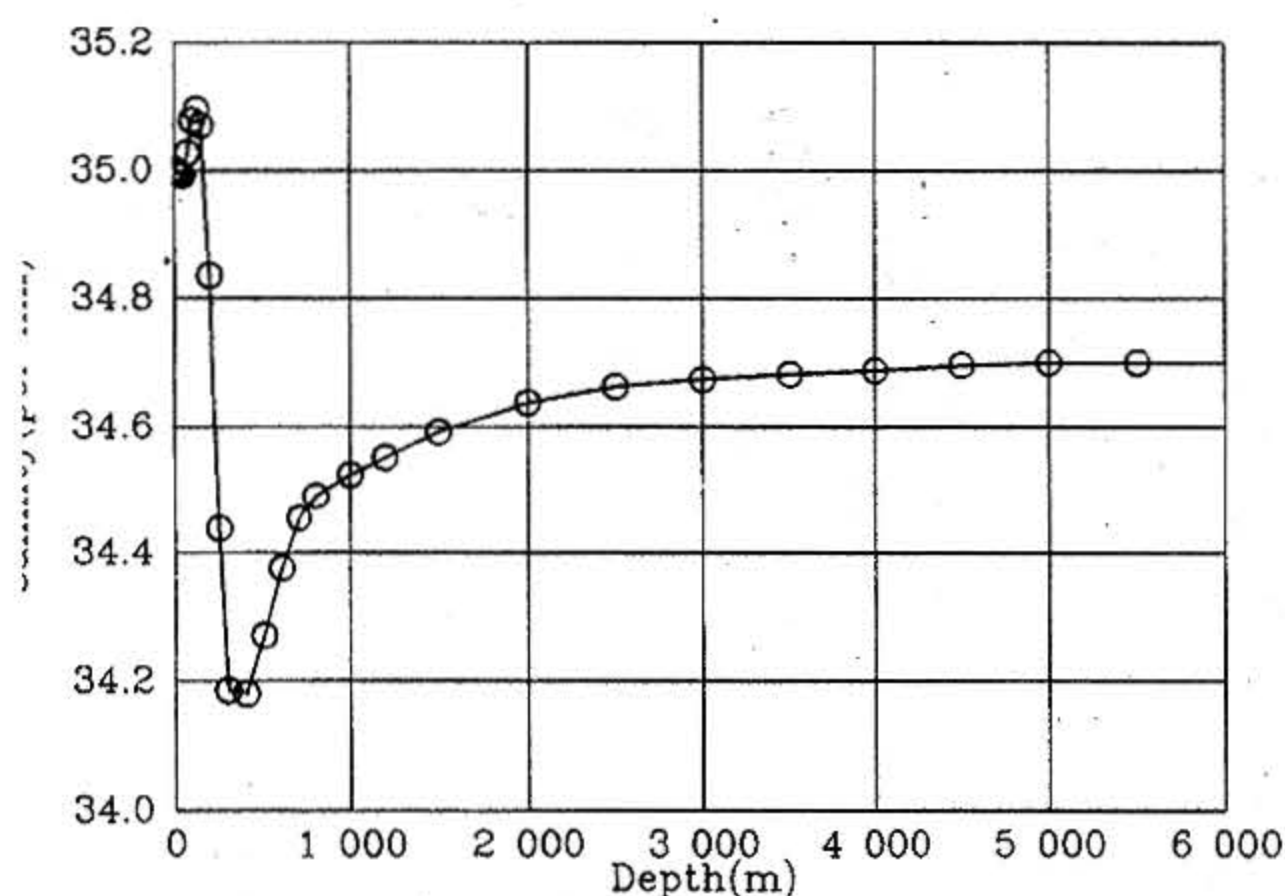


図7 塩分濃度の深度依存性
Fig.7 Salinity vs. depth.

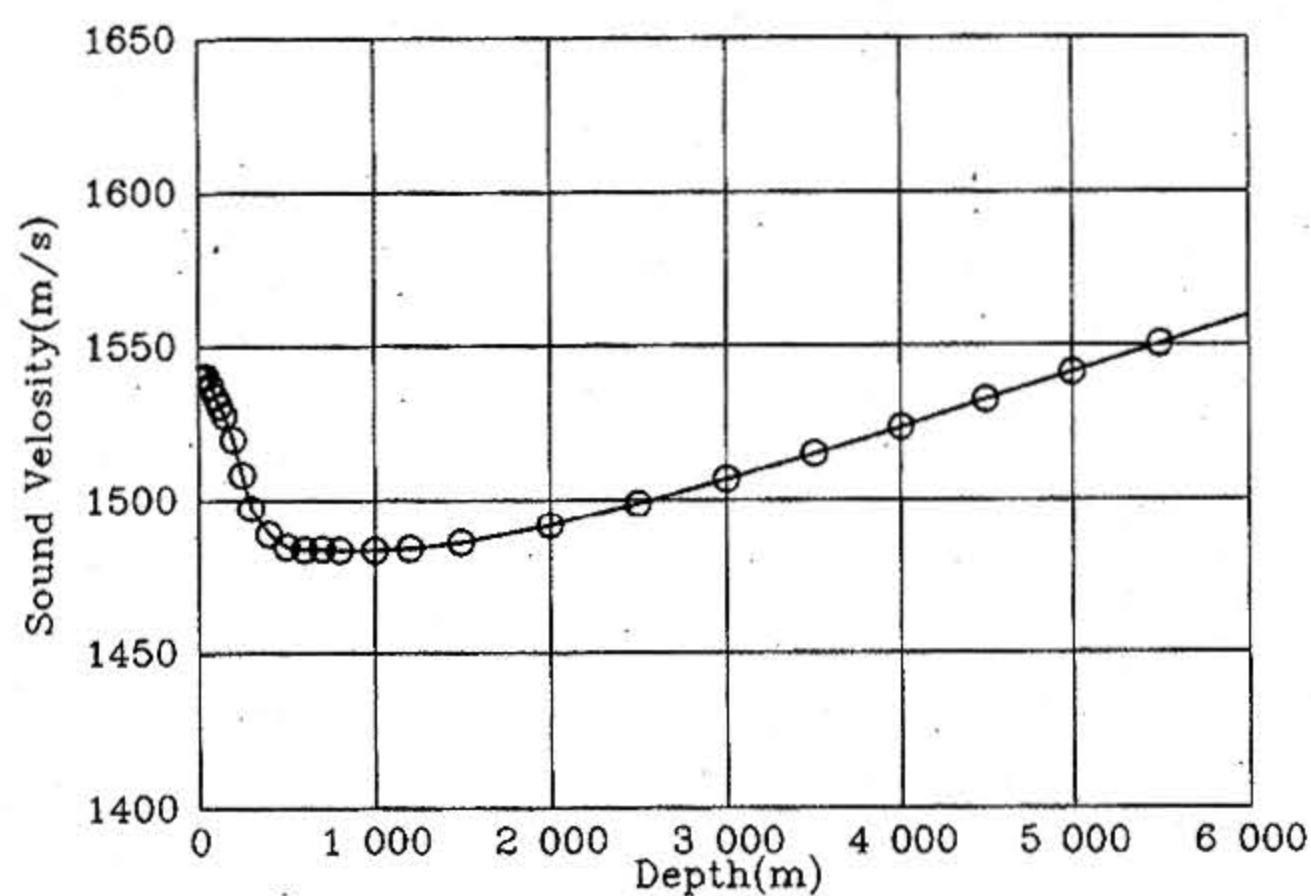


図9 音速の深度依存性
Fig.9 Sound velocity vs. depth.

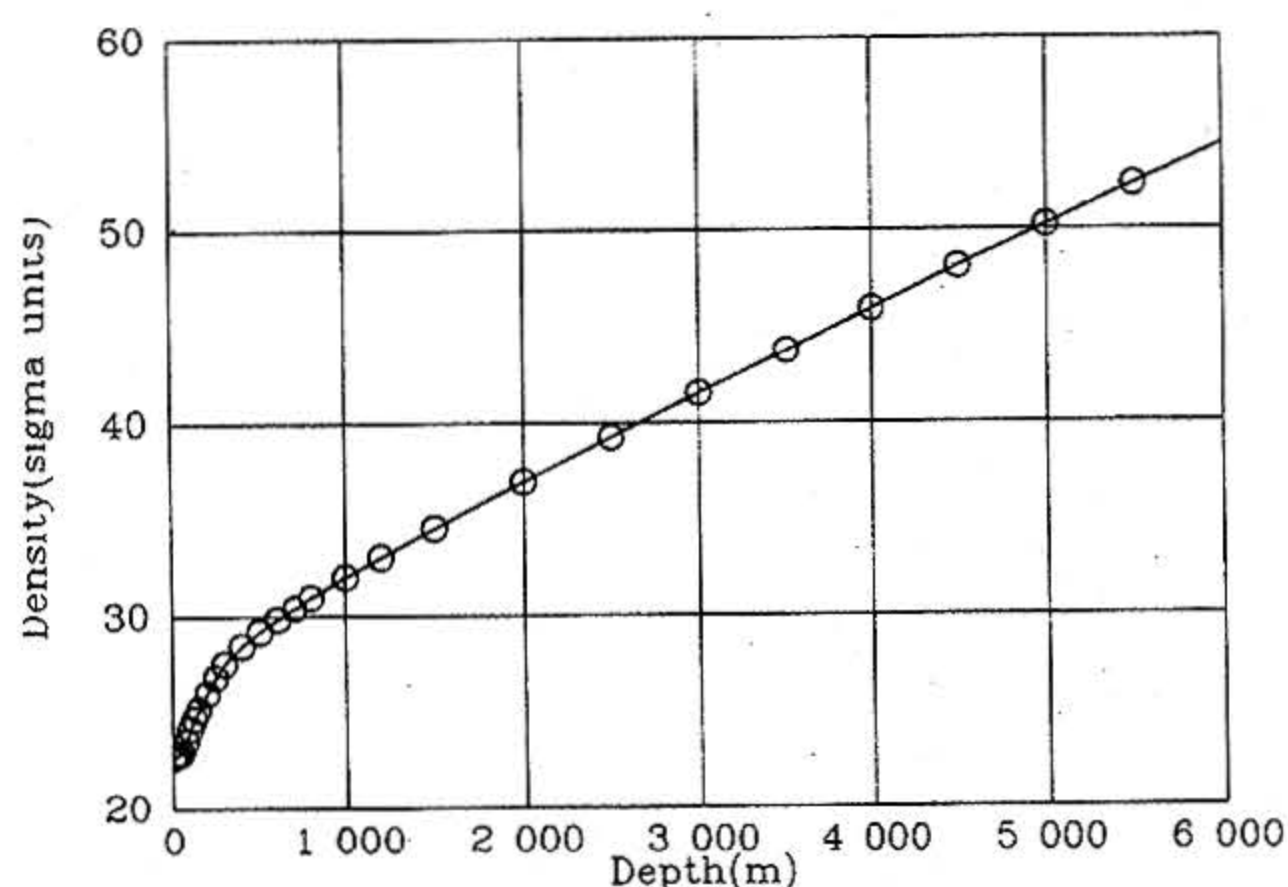


図8 密度の深度依存性
Fig.8 Density vs. depth.

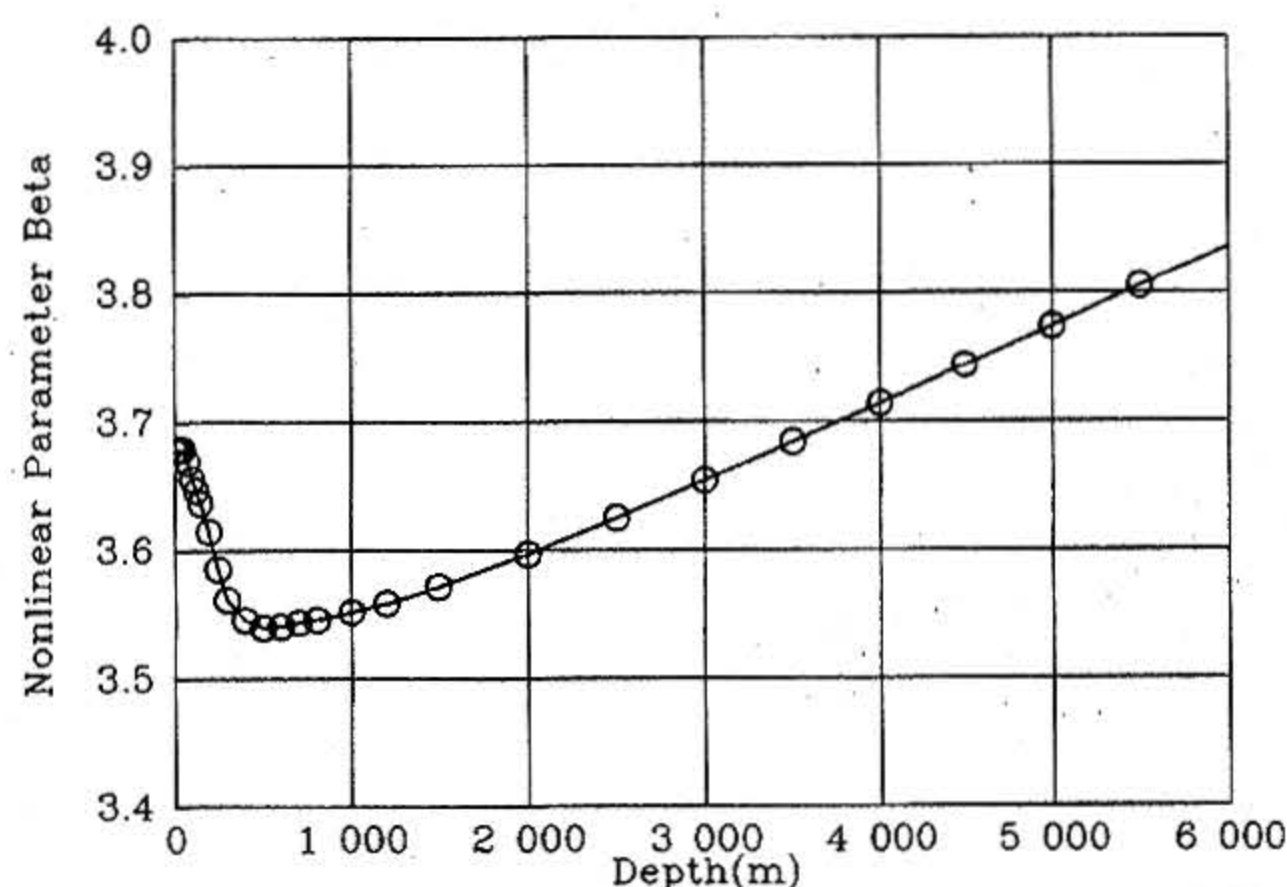


図10 非線形パラメータの深度依存性
Fig.10 Nonlinear parameter vs. depth.

ここで、 T は温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 P_0 は静圧(bar)、 S は塩分濃度 (‰)である。線形吸収 α は、種々提案されている中で唯一の圧力項をもつ Francois & Garrison の式¹⁰⁾を用いて計算した。この式は潜水船を用いた実測値とも良く合う結果が得られている¹¹⁾。結果を図9～11に示す。これらの値を式(16)に代入し、二次波の軸上音圧を水深0mの値を基準にして計算した。音源の条件は、一次周波数 $f_1=60\text{kHz}$ 、二次周波数 $f_2=3.5\text{kHz}$ 、音源半径 $a=0.2\text{m}$ 、音源からの距離 $z=100\text{m}$ 、一次音圧約240dB (re μPa at 1m)である。なお、音源の振動速度は水深によらず一定と仮定している。

結果を図12に示す。二次波の音圧は水深300m前後で僅かに低下しているが、それ以後は、深くなるにつれ、徐々に大きくなる結果が得られた。各種パラメータの中では、吸収係数 α との相関が最も高く、深海では吸収係数が小さくなるため、

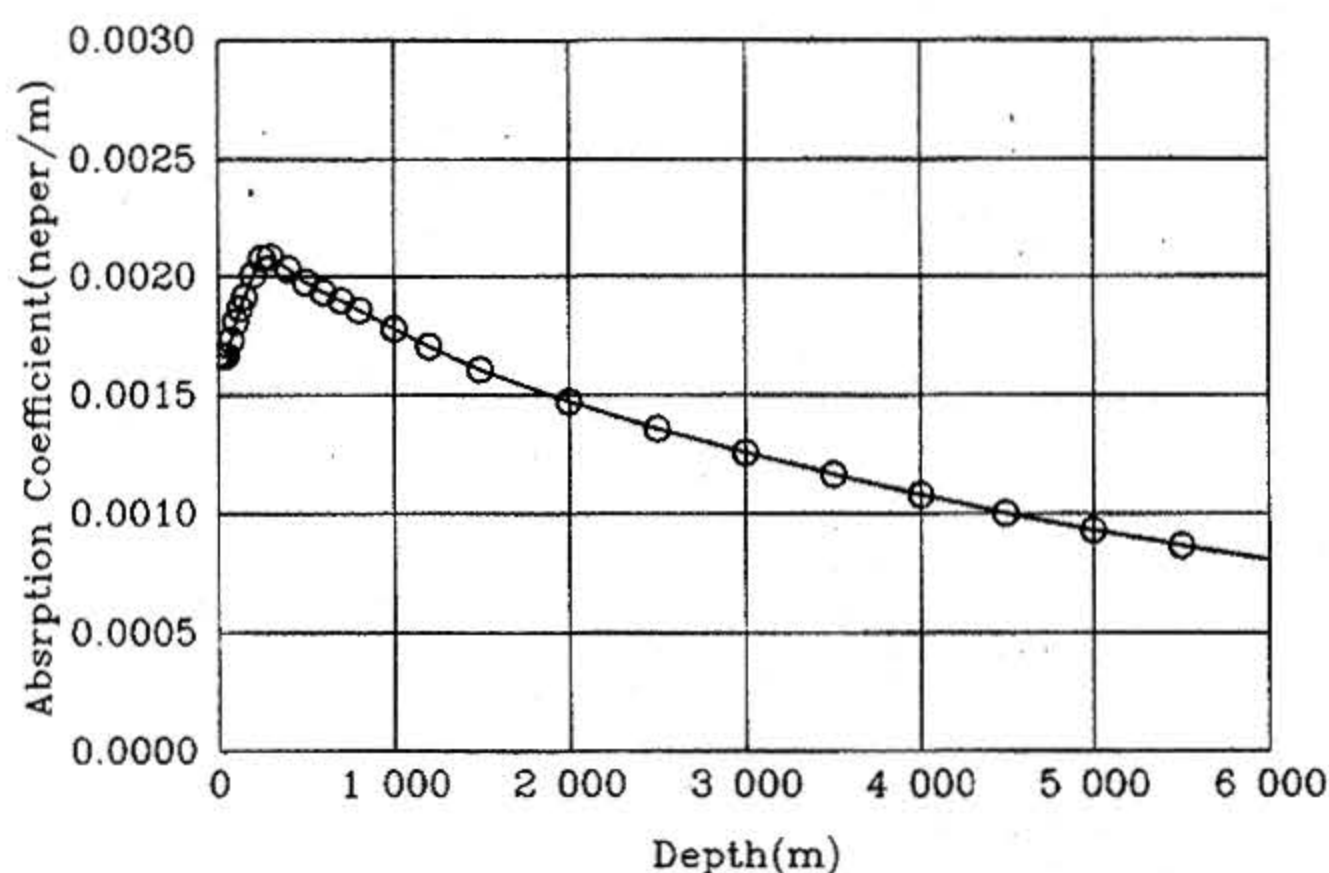


図11 吸収係数の深度依存性
Fig.11 Absorption coefficient vs. depth.

アレイ長が長くなり、二次波の発生効率が上がる要因になっている。また式(16)からわかるように、非線形パラメータ β は効率向上に寄与しているが、音速は効率を下げる方向に働いている。これらの要因が作用しあって、僅かではあるが、深海での

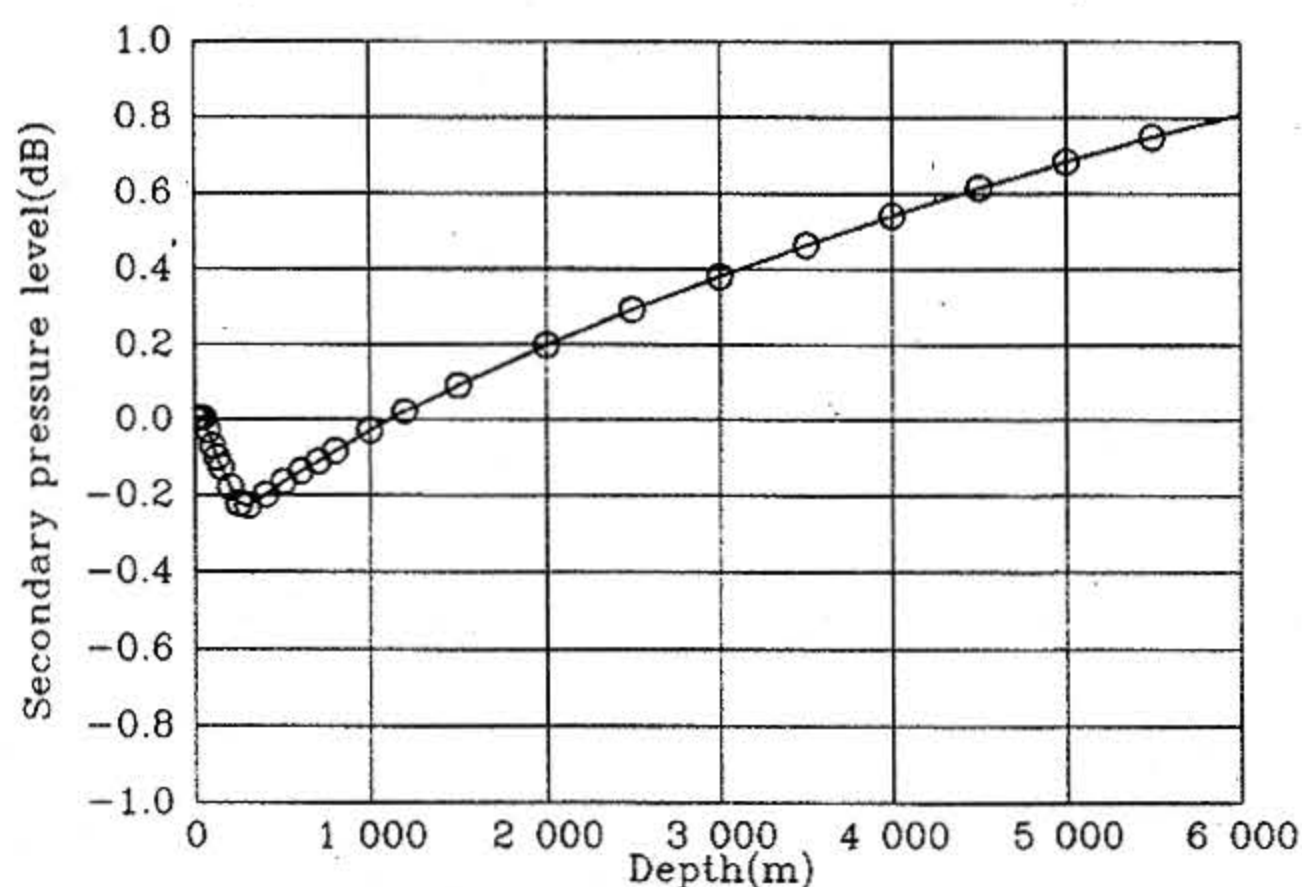


図12 二次波軸上音圧の深度依存性

Fig. 12 Secondary pressure level on axis vs. depth.

効率の向上が見られたと考えられる。なお、300 m付近の吸収係数のピークは、塩分濃度よりも、温度と圧力の影響である。

5 常圧下実験用パラメトリック音源の試作

5.1 実験装置

音源は、図13に示すように、径30mmのPZT素子91個が同心円状に配列された構成で、有効径は35cmである。圧力バランス構造にするため、素子全体を油漬けにし、放射面はネオプレンゴムで覆われている。素子は45個と46個の2グループに分けられ、図14に示すように、それぞれ、2 kWのパワーアンプで駆動される。パラメトリック音源の駆動方式としては、二つの周波数の信号を電氣的に足し合わせた変調波信号を作り、それで1系統の送波器を駆動する変調波駆動方式と、二つの信号で2系統の送波器を駆動し、音響的に二つの信号を足しあわせて変調波を得る2周波駆動方式がある。変調波駆動方式では、パワーアンプで歪が発生した場合、二次波の高調波が発生するほか、電氣的に生じた二次波に相当する周波数の音波が直接音源から放射され、二次波の指向性を乱す危険性がある。

今回は2周波駆動方式を採用し、58.2kHzと61.7kHzの一次波から3.5kHzの二次波を得ている。受波は、水槽の大きさの制約から、音源から数mの距離を置いた水中マイクで行うが、近距離のため一次波のレベルが非常に大きい。このような大振幅の変調波信号が受信アンプに入った場合、ア

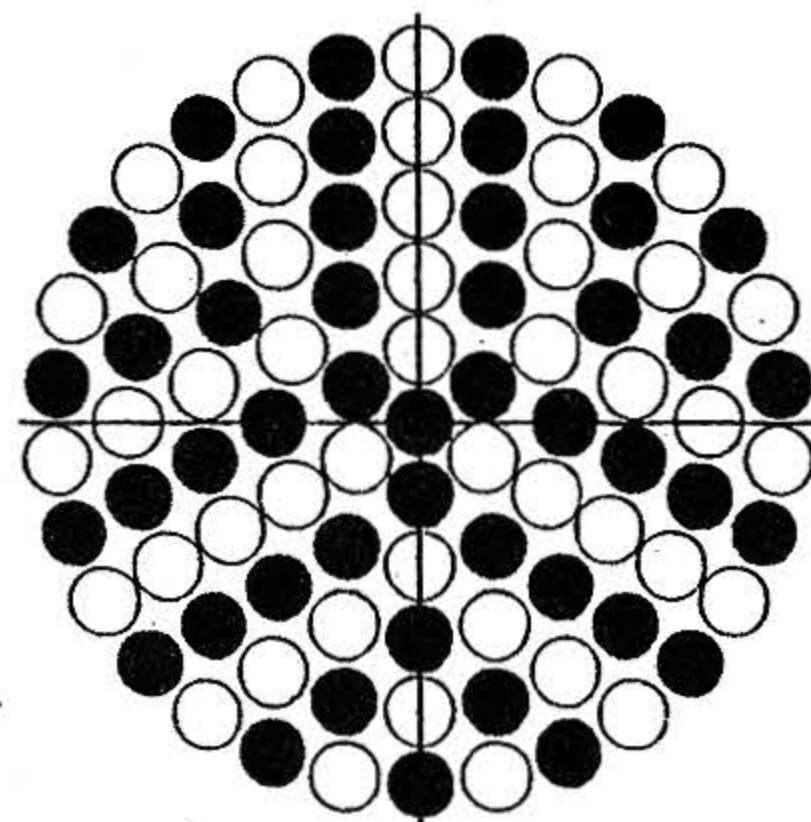


図13 音源の素子配置

Fig. 13 Arrangement of elements for the source.

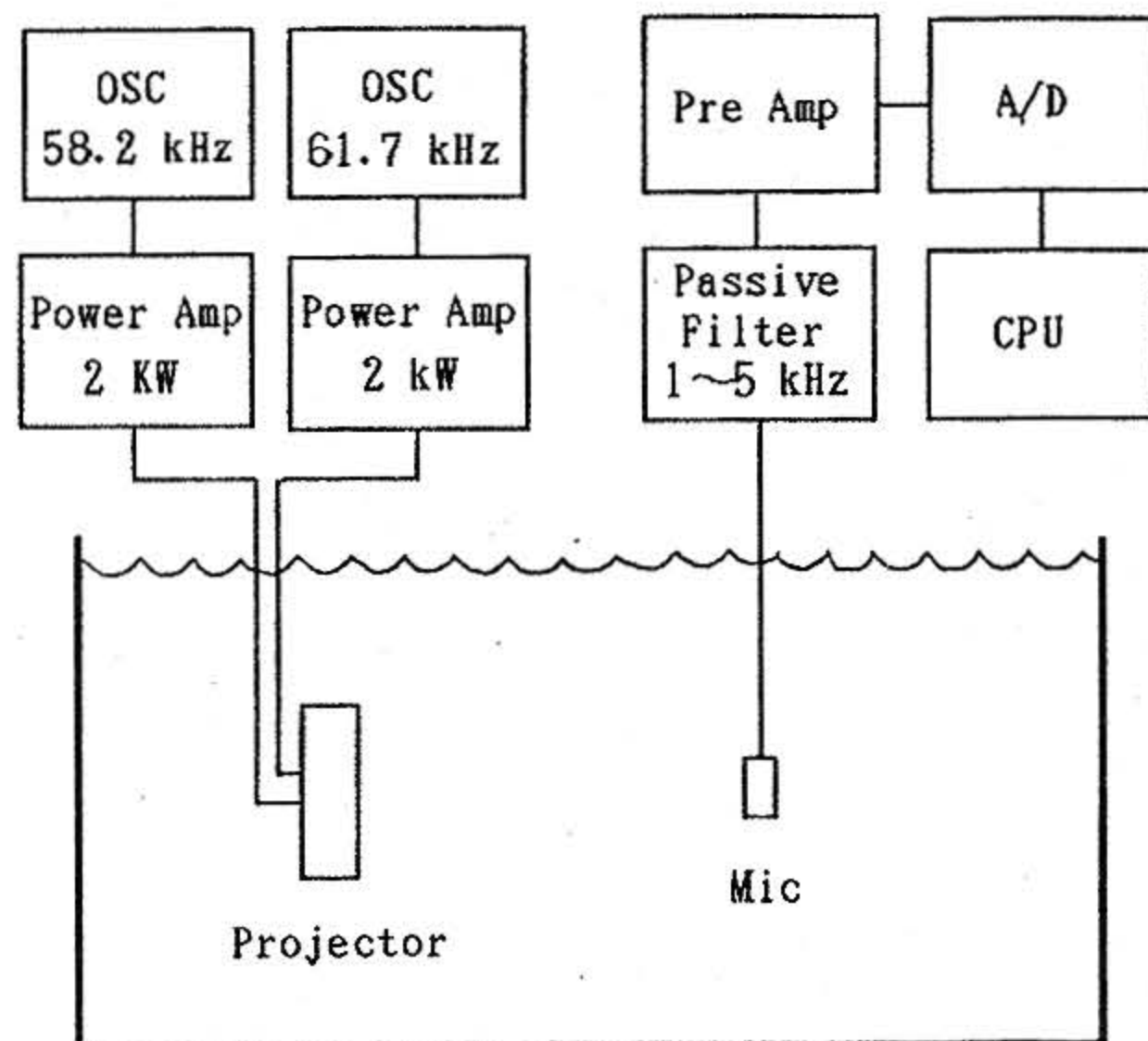


図14 実験装置のブロック図

Fig. 14 Block diagram of the experimental apparatus.

ンプの歪による疑似的な二次波信号が発生する可能性がある。このような現象を防ぐため、二次波の測定に際しては、バンド幅1~5 kHz、一次波抑圧比90dBのパッシブフィルターを用いて一次波をカットしたのち、増幅され、記録される。これからの構成で、軸上音圧特性および指向特性を測定した。

5.2 実験結果

図15に、一次波および二次波波形を示す。パルス幅は2 msである。二次波が遅れて記録されるのは、フィルターの遅延特性による。

次に、一次波と二次波の軸上音圧特性を図16に

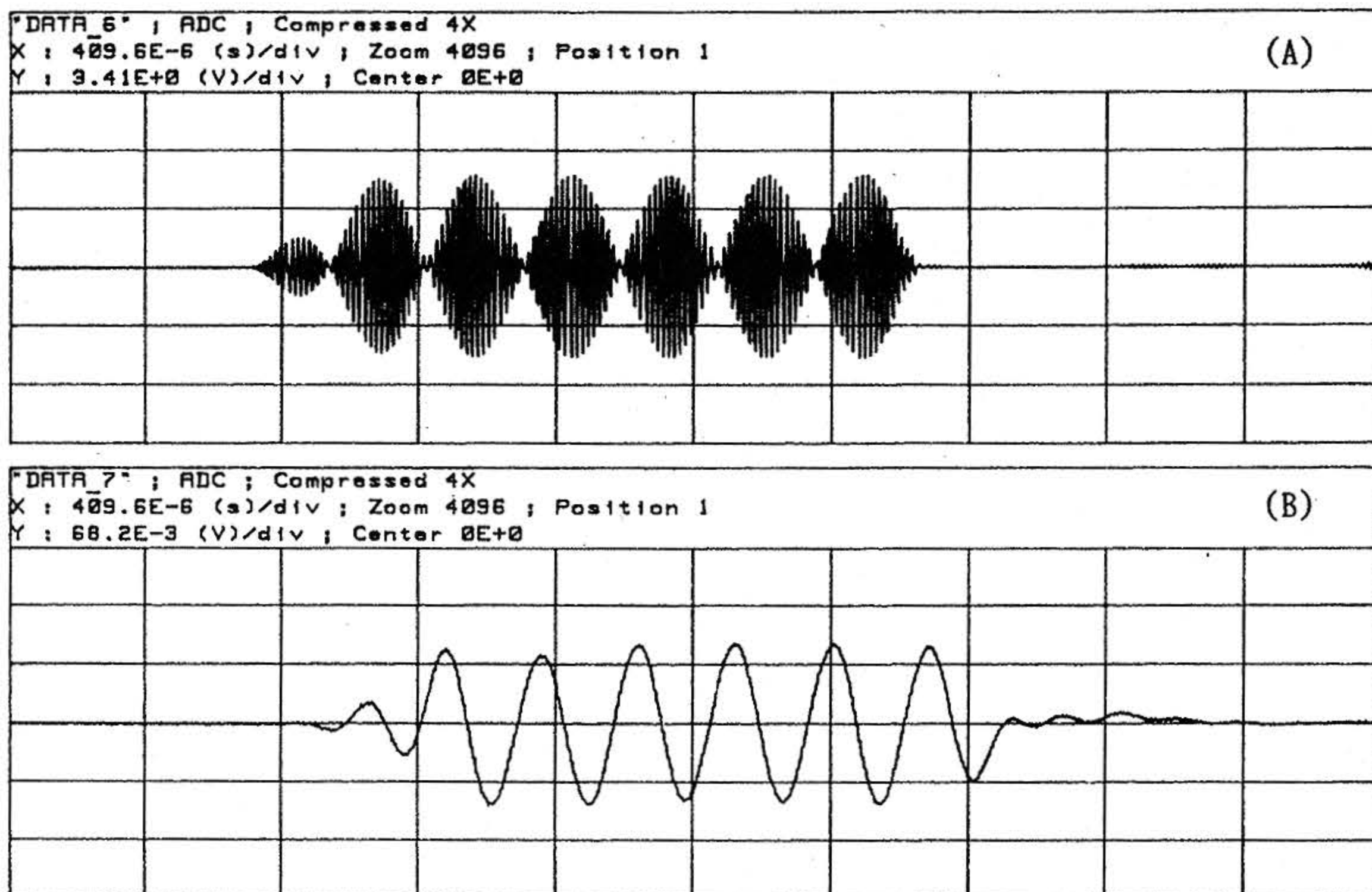


図15 一次波 (A) 二次波 (B) の受波波形

Fig. 15 Observed waveforms of the primary (A) and the secondary (B) wave.

示す。下の実線は距離 6.5m における一次波音圧 (224dB re μ Pa at 1m) を基にして、式(16)を用いて計算したものであり、黒丸の実測値とは約 2 dB の差があるが、マイクの感度等の実験誤差を考えると、妥当な値だと考えられる。一次波が通常の球面拡散である -6 dB/DD (DD: Double Distance) の伝搬減衰を示しているのに対し、二次波の方は、約 -3 dB/DD の傾きである。これは、パラメトリック音源特有の伝搬特性であり、二次波がまだ生成されている領域であることを示している。一次波と二次波のレベル差は、この距離では約 60dB あるが、100m の距離では、両者の傾きの違いにより、レベル差は約 50dB となる。さらに、式(16)からもわかるように、二次波音圧は 2 つの一次波音圧の積に比例するので、2 周波が同じ音圧であれば、一次波の 2 乗に比例することになる。したがって、送波音圧を 1 dB 上げれば、二次波は 2 dB 上昇するので、一次波と二次波のレベル差は上記の値よりも小さくなると予想される。しかしながら、送波音圧を大きくすると、前述したように、衝撃波面による非線形減衰が生じ、かえって効率が悪くなるのでおのずと限界がある。したがって、理想的な場合でも、一次波と二次波

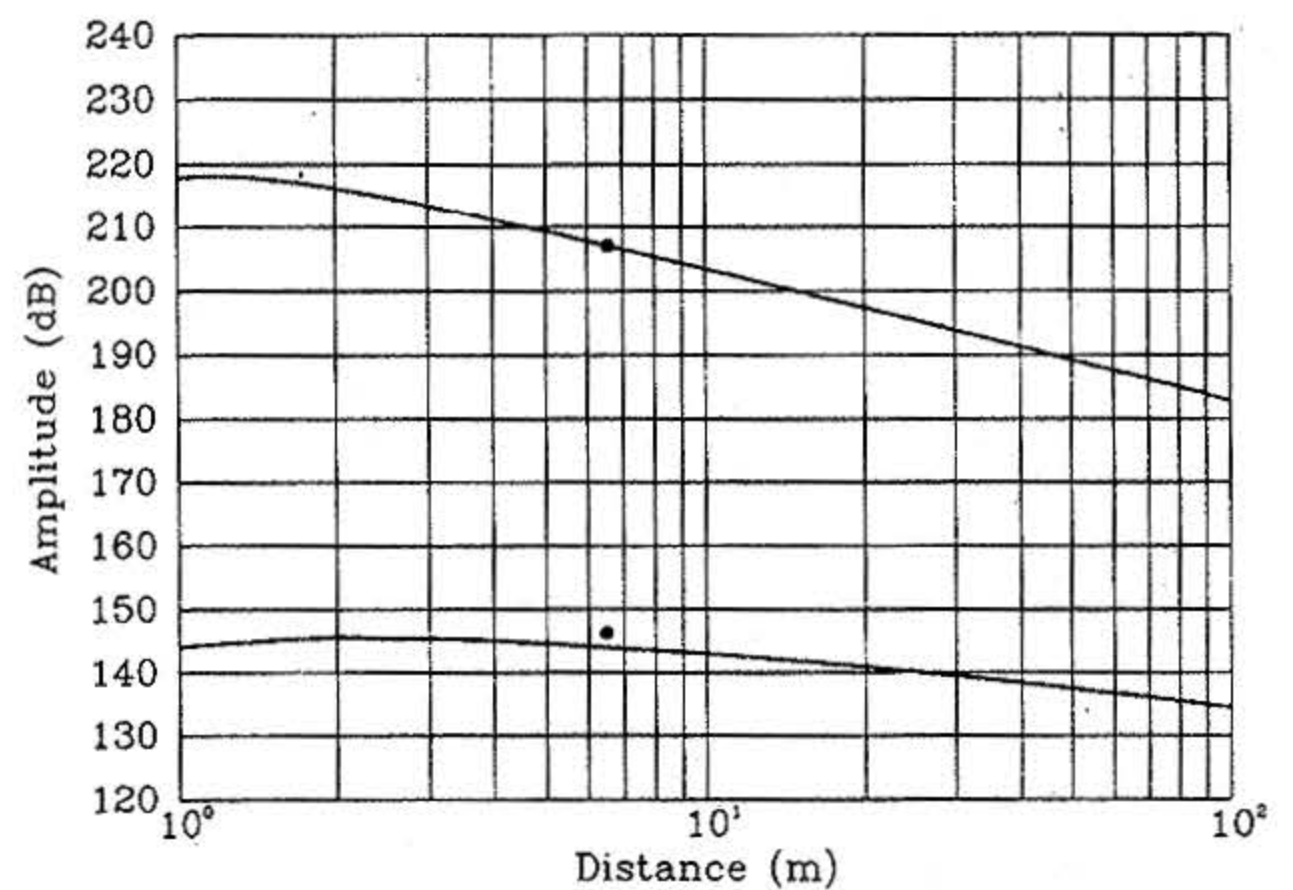


図16 一次波と二次波の軸上音圧特性の計算値 (—) と実測値 (・)

Fig. 16 On-axis pressure levels of the primary and the secondary waves calculated (—) and measured (・).

のレベル差は 40dB 程度であると考えられる。

最後に、6.5m の距離で測定した一次波 (58.2 kHz) および二次波 (3.5kHz) のビームパターンを図17と図18に示す。ビーム幅は約 4° と 5° である。一次波の左右、約 55° 方向にあるサイドローブは、一次波の波長 (約 2.5cm) より大きい

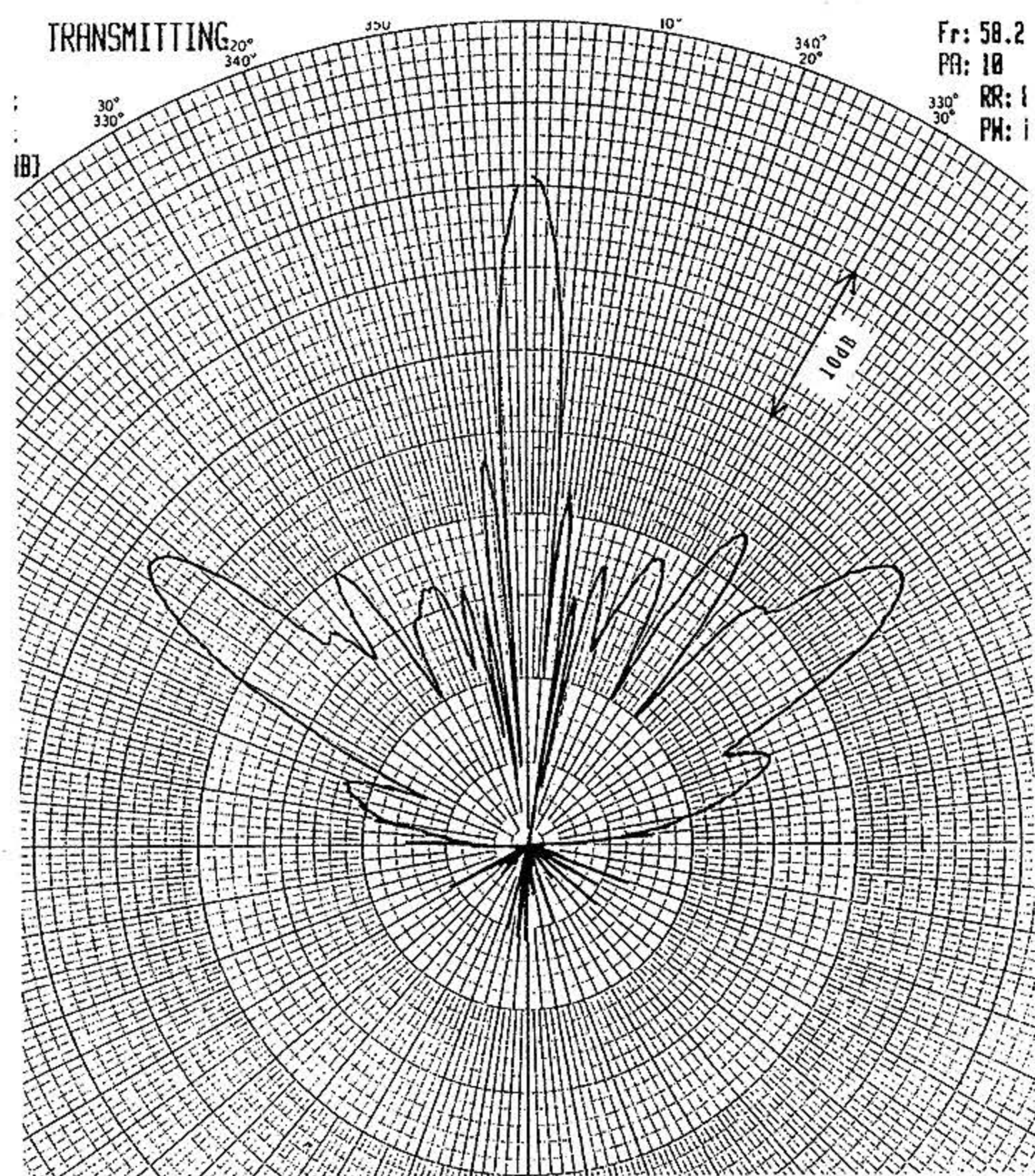


図17 一次波(58.2kHz)指向特性の実測値

Fig. 17 Observed beam pattern of the primary wave (58.2kHz)

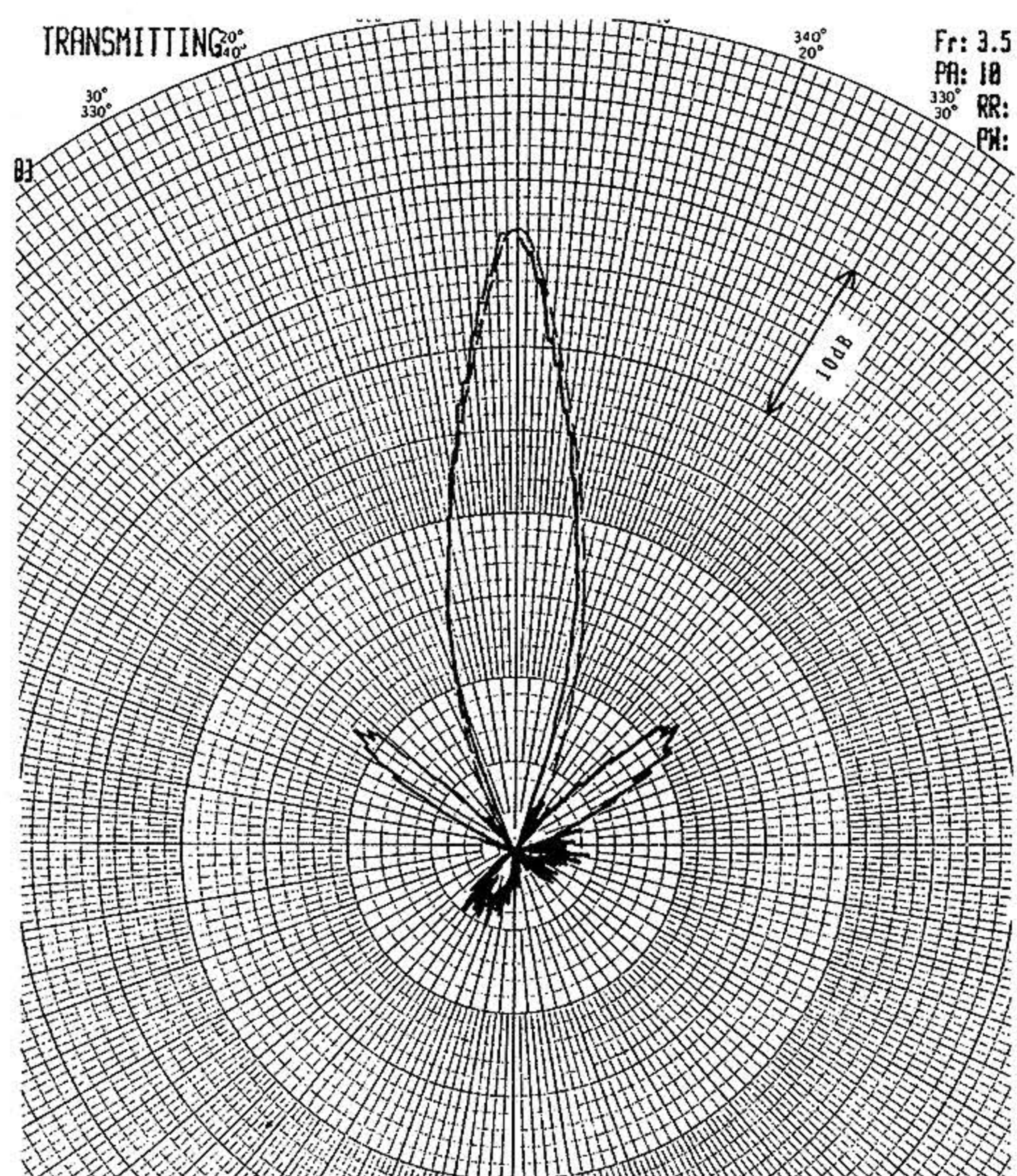


図18 二次波(3.5kHz) 指向特性の実測値(—) と計算値(---)

Fig. 18 Beam patterns of the secondary wave (3.5kHz) observed (—) and calculated (---).

素子を配列したために生じたグレーティングローブである。レベルが大きいため、二次波のビームパターンにも影響を与えていることがわかる。なお、もう一方の一次波 (61.7kHz) のビームパターンは、図17とあまり変わらないので省略する。また図18の破線は式(10)を用いて計算したものであり、実測値とはグレーティングローブの部分を除いて、良く一致する結果が得られた。グレーティングローブは素子を小さくし、 $1/2$ 波長以下のピッチで配列することで除去することができる。

6 まとめ

まず海水の各種パラメータの実測データをもとに、パラメトリック音源の二次波音圧の深度依存性を検討した。その結果、水深 6000m の深海では、吸収係数の減少による効率の上昇が、音速の増加による効率の低下を僅かながら上回り、深海での使用の見通しが得られた。

次に、常圧下実験用のパラメトリック音源を試作し、基本特性を測定した結果、ほぼ理論に合うデータが得られた。今後はこのデータを基に、深海用耐圧構造の音源の設計に反映させる予定である。

参考文献

- 1) Westervelt, P. J. : Parametric acoustic array, J. Acoust. Soc. Am., vol. 35, pp. 535-537. (1963)
- 2) Turner, K. L. ed. : SITE 579, Initial reports of the sea drilling project, vol. 86, pp. 175-187., (1982)
- 3) Clay, C. S. et al. : Acoustical oceanography, John Willey, pp. 258., (1977)
- 4) 同上, pp. 260.
- 5) Garrett, G. S. et al. : Nearfield of a large acoustic transducer, Part II : Parametric radiator, J. Acoust. Soc. Am., vol. 74, pp. 1013-1020., (1983)
- 6) Moffett, M. B. et al. : Model for parametric acoustic sources, J. Acoust. Soc. Am., vol. 61, pp. 325-337., (1977)
- 7) Knauss, J. A. : Introduction to Physical Oceanography, Prentice-Hall, pp. 13. (1978)

- 8) 竹内俱佳他 : 海水の断熱状態方程式と有限振幅音波伝搬, 海洋音響研究会報, vol. 10, pp. 166-178., (1983)
- 9) Chen, C. T. et al. : The specific volume of seawater at high pressures, Deep-sea research, vol. 23, pp. 595-612., (1976)
- 10) Francois, R. E. et al. : Sound absorption based on ocean measurements, Part II : Boric acid contribution and equation for total absorption, J. Acoust. Soc. Am., vol. 72, pp. 1879-1890., (1982)
- 11) 許 正憲他 : 海中における鉛直方向の音波の減衰について, JAMSTEC R 23, pp. 31-41., (1990)

(原稿受理 : 1990年11月22日)