U.D.C. 616-073.42:534.232-8

高分解能医用超音波探触子の開発

High Resolving Power Ultrasonic Transducer for Medical Application

片倉景義* *Katakura Kageyoshi*
神田　浩** *Kanda Hiroshi*
石川保夫*** *Ishikawa Yasuo*
鈴木孝二**** *Suzuki Takaji*

医療診断の分野に種々の超音波装置が利用されている。特に，超音波送受波器を身体の表面に接触させながら反復移動させ，生体内部を映像化する接触複合走査超音波断層装置が腹部などの広い視野を観察する領域に多く利用されている。

しかし，この装置によっても病変組織の鑑別診断には映像の分解能がまだ不足し，広い視野を持ち視野内全域で高い分解能を持っている装置の開発が強く要求されている。

ここに報告する送受波器は，このような目的のために開発したものであり，仮想的音源から音波を放射する構成を使用することにより，従来より30～50%細い音波を広い範囲に形成し，目的外方向からの信号混入も$\frac{1}{3}$に抑圧したものであり，装置の分解能を大幅に向上させるものである。

1 緒　言

現在，腹部あるいは産婦人科の領域で体表面に超音波送受波器(探触子)を接触させ，これを手動により移動走査させ内部臓器を映像化する，いわゆる手動接触複合走査超音波断層装置が広く利用されている。しかし，このような領域では対象の多くが大形の臓器であり，またそれらが通常深部にまで存在するため，装置に対しても広い視野とその視野内全域での高い分解能が要求されている。

このような要求に対して，これまでも種々のアプローチが試みられているが，今回この目的のために，

(1)　広い範囲で細い超音波ビームを形成する。
(2)　遠方での感度低下を少なくして，広い視野を描出する。
(3)　副極大を小さくして，軟部組織を忠実に描出する。

以上の特長を持つ探触子を開発した。

ここでは，上記の特長を持つ探触子を開発するに至った背景と探触子構成の概要について述べる。

2 高分解能化の背景

超音波断層装置の分解能を向上させる研究動向と，今回高分解能探触子を開発するに至った基本思想について次に述べる。

2.1 高分解能化に関する動向

これまでも，広い空間全域で分解能を向上させる種々のアプローチが試みられている。それらの手法は探触子の指向特性に注目して分類すると，

(1)　指向特性の鋭い探触子を開発し，採用する。
(2)　信号処理により見掛け上の指向特性を向上する。
(3)　指向特性はそのままで，撮像方式により分解能を向上する。

以上3種類のアプローチに分類される。

ここで，(1)は探触子それ自体の指向特性を向上させる最も基本的なアプローチである。この分野での研究は，リング形探触子[1]，円錐形探触子[2),3)]，あるいはこれらと平面[4),5)]，凹面などとの組合せが行なわれ，光学の分野での点光源像を中心軸上全域に結像させるアクシコン　レンズ[6]と同様の思想に基づくものがほとんどである。この分野では，このように音波放射面形状の検討が基本であるが，このほかにも音波波形による指向特性の変化に着目して，指向特性を向上させるアプローチも考えられる[7]。

(2)のアプローチは探触子を複数放射面に分割し，それらの信号相互の特性を利用した演算処理により鋭い指向特性を得るものである。これまでも，多重リング探触子の移動焦点[8]，分割リング探触子の非線形処理[9]，あるいは級数展開処理[10]などいろいろ提案され実験が行なわれている。主として質の良い受信ビームの形成が目的となっている。

(3)は走査方式を含めて像再生方式全体を検討するアプローチであり，多方向からの音波照射により得られた全反射信号情報により断面像を再現する手法である。この場合には，特に鋭い探触子自体の指向特性は不要となる。この手法による構成例も反射信号の振幅，位相，時間情報をそれぞれ組み合せて利用することにより種々提案検討されている。

以上述べたように，広い空間全域での高分解能化という要求は超音波撮像での最も基本的要求であり，各方面で多くの研究が行なわれている状況である。

2.2 開発方針の決定

高分解能化に対するアプローチは，前述したように種々考えられるが，ここでは，

(1)　装置構成を複雑化しない(製品価格)。
(2)　現用機種にそのまま適用できる(開発期間)。
(3)　血流計などの他分野にも利用可能である(汎用性)。

などの点を考慮し，信号処理あるいは特殊撮像方式は今後の開発に期待することとして，前記(1)のアプローチに属する高分解能探触子の開発を試みた。

3 仮想リング形探触子[1]

今回開発する探触子に要求される性能を技術目標として要約すると，

(1)　全域で鋭い指向特性(主ビーム)を実現する。
(2)　遠方での感度(軸上感度)の低下が少ない。
(3)　目的方向以外への不要感度(副極大)を抑える。

の3点であり，これらの全部を満足させる探触子はまだ開発

* 日立製作所中央研究所　** 日立製作所中央研究所 工学博士　*** 株式会社日立メディコ大阪工場　**** 株式会社日立メディコ柏工場

されていない。そこで今回，本質的に(1)を満足するアクシコン方式を探触子の基本とし，この方式に付随する問題点をそれぞれ解決することにより(1)～(3)全部を満足する探触子を開発することにした。次に今回開発した探触子の構成とその特性について説明する。

3.1　リング形探触子の変形

前述したように，アクシコンの部類に属する各種探触子が知られている。特に，リング形探触子が直前から無限遠まで最も鋭い指向特性を持っていることが知られている。しかし，この探触子は第1副極大が目的方向に対して－16dBと大きい点，更に軸上感度が距離の2乗に反比例して急速に低下する点の2点に問題を持っている。そこで今回，

(1)　基本的にはこのリング形探触子と同様の動作を行ない，鋭い主ビーム指向特性を持っている。

(2)　音源を見掛け上探触子の後方に配置することにより，遠方での感度低下を補償する。

(3)　等価的に幅の広いリング形音源を形成すること及び超音波波形のインパルス化により副極大を抑圧する。

以上の方針のもとにリング形探触子の変形（仮想リング形探触子）を行なった。

3.2　構成と特性

今回開発した探触子の基本的形状を**図1**に示す。音波放射面はこのようにアサガオの花びらのような形状をしていて，円弧2葉を中心軸に関して回転させた回転面である。このような面から放射された音波は，媒質(生体)中を伝搬し，**図2**に示すように中心軸上の各点で交さする。更に，この放射面が中心軸に関する回転面であることにより，放射面各部からの波面がすべて中心軸上で交さし，軸上に大きな音圧を形成することになる。次にこのような放射面による音波ビームの特性について説明する。

(1)　主ビームの形状

放射面を形成する円弧の曲率半径を，**図3**に示すようにbとすると，放射された音波の波面形状は距離bだけ後方に置かれた仮想的リング音源Bから放射された波面の形状とほぼ一致する。このように考えることにより，この探触子の指向特性Rvはリング形探触子の指向特性をbだけ後方に移動させた特性となる。ここで，リング形探触子の特性は知られている[1]ため，指向特性Rvは簡単にベッセル関数を用いて，

$$Rv = J_0(2\pi Y \sin\theta/\lambda) \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\sin\theta = a/\sqrt{(X+b)^2+a^2}$$

ここに，X：探触子からの距離

Y：中心軸からの距離

a：仮想的リングの半径

b：波面の曲率半径

λ：音波の波長

なる関係で与えられる。この指向特性は，実際の探触子口径と無関係であるため，a及びbの選択により小口径であっても非常に鋭い指向特性を持つ探触子が実現できることを示している。

(2)　中心軸上の感度変化

反射信号強度の距離に対する変化も，このように仮想的音源を考えリング形探触子の解析結果[1]を利用することにより簡単に求まる。中心軸上に置かれた微小物体からの反射信号強度Pvは次のようになる。

$$Pv \propto \frac{1}{(X+b)^2+a^2} \quad \cdots\cdots(2)$$

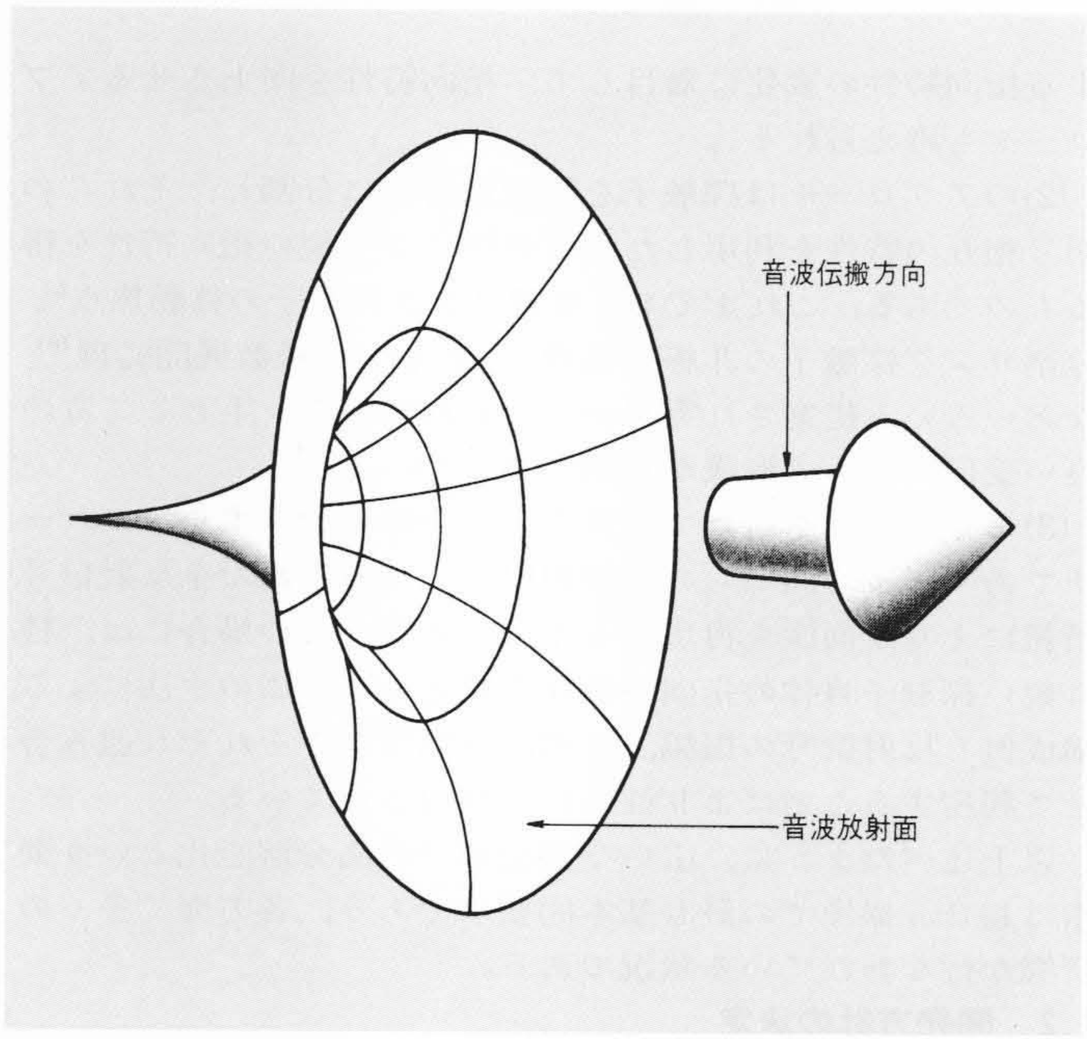

図1　音波放射面の形状　円弧2葉から成る回転面である。

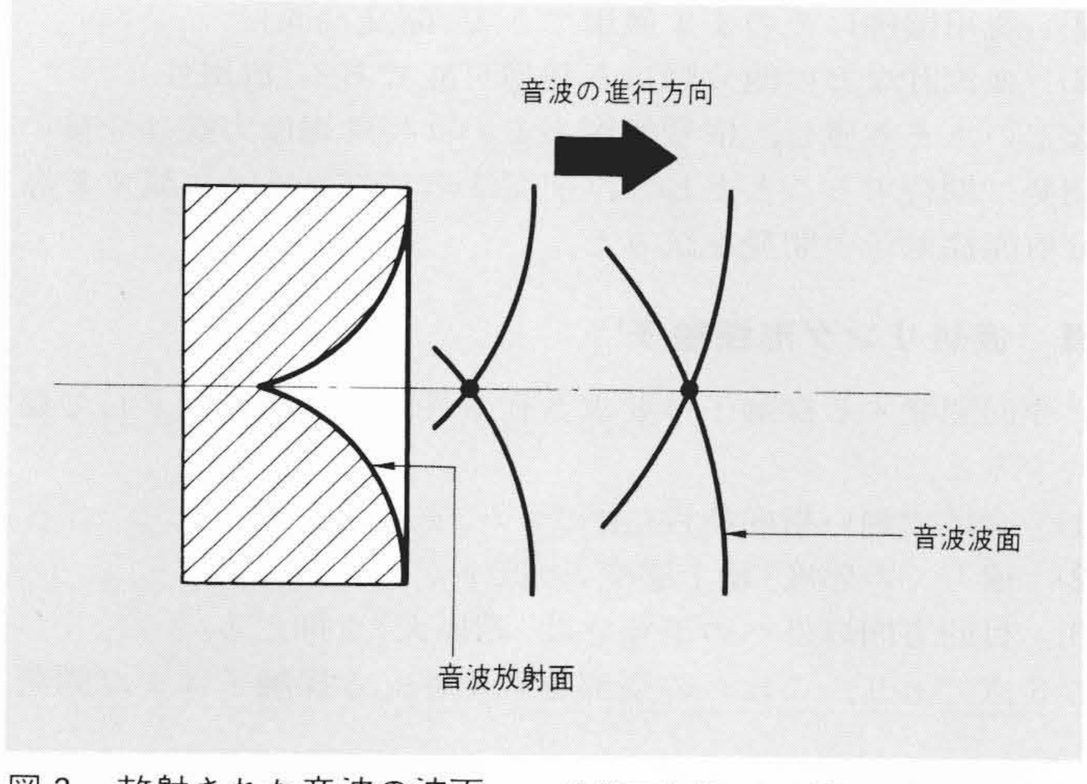

図2　放射された音波の波面　放射面各部からの波面が中心軸上にて交さし，大きな音圧を生ずる。

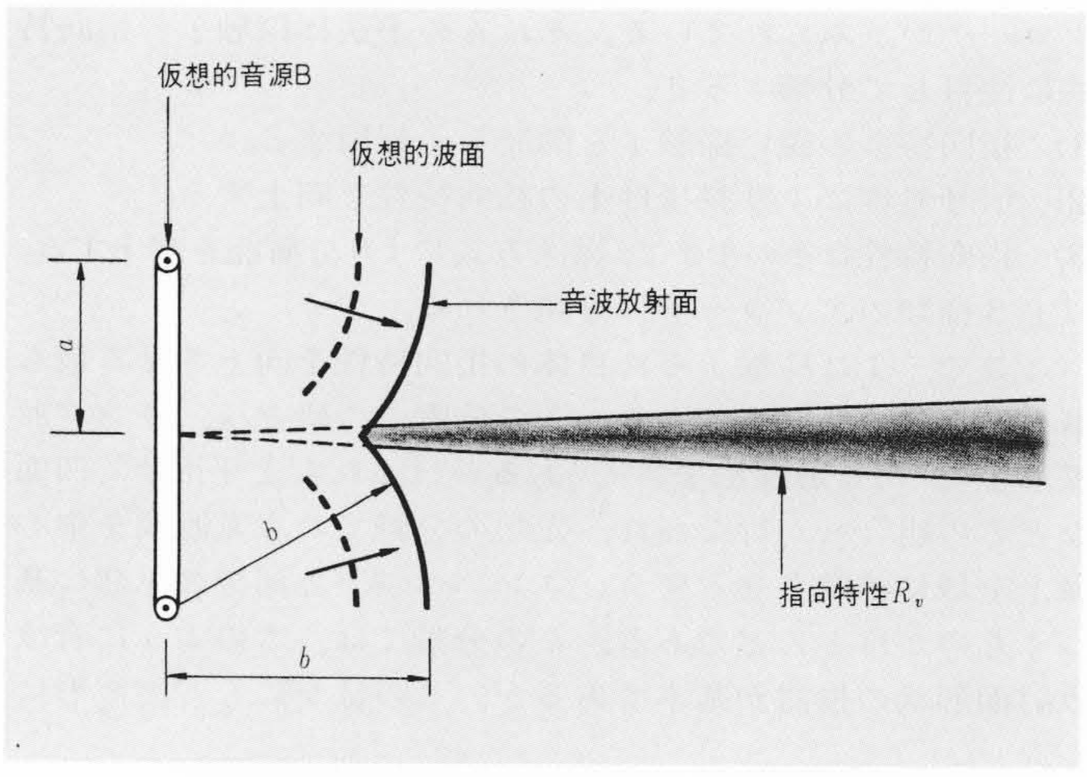

図3　放射面形状と指向特性　音源Bからの指向特性の一部分で近似される。

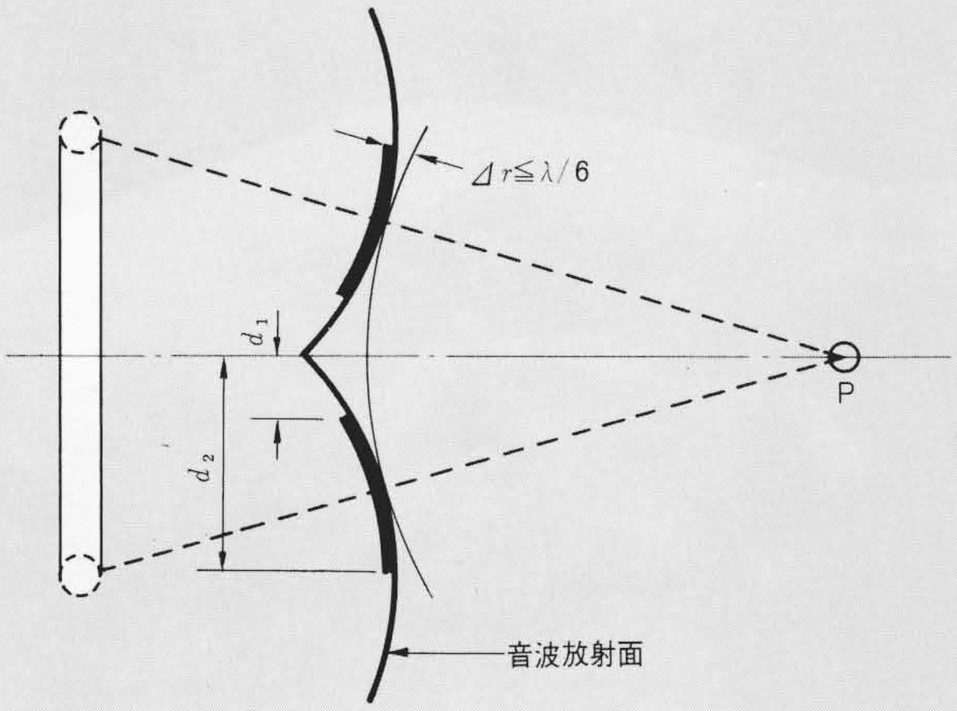

図4　実効的放射面　放射面の一部分が，P点の音圧形成に寄与する。

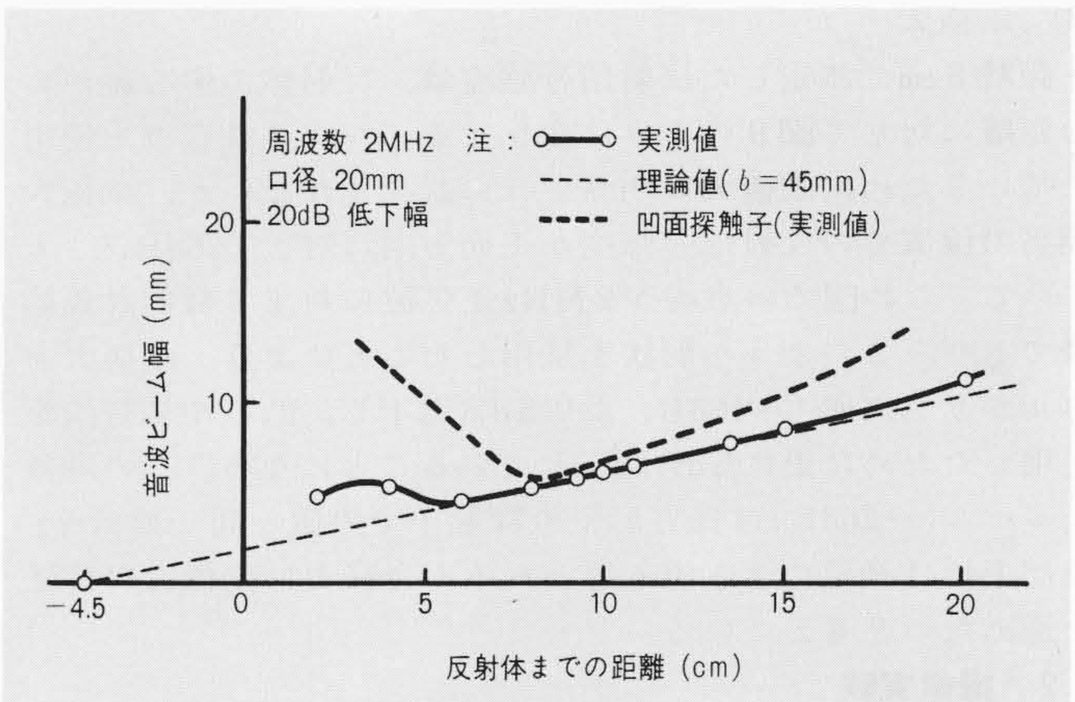

図6　主ビームの幅　反射音圧が20dB低下するまでのビーム幅は，理論値とよく一致し，広い範囲で凹面振動子よりも狭くなっている。

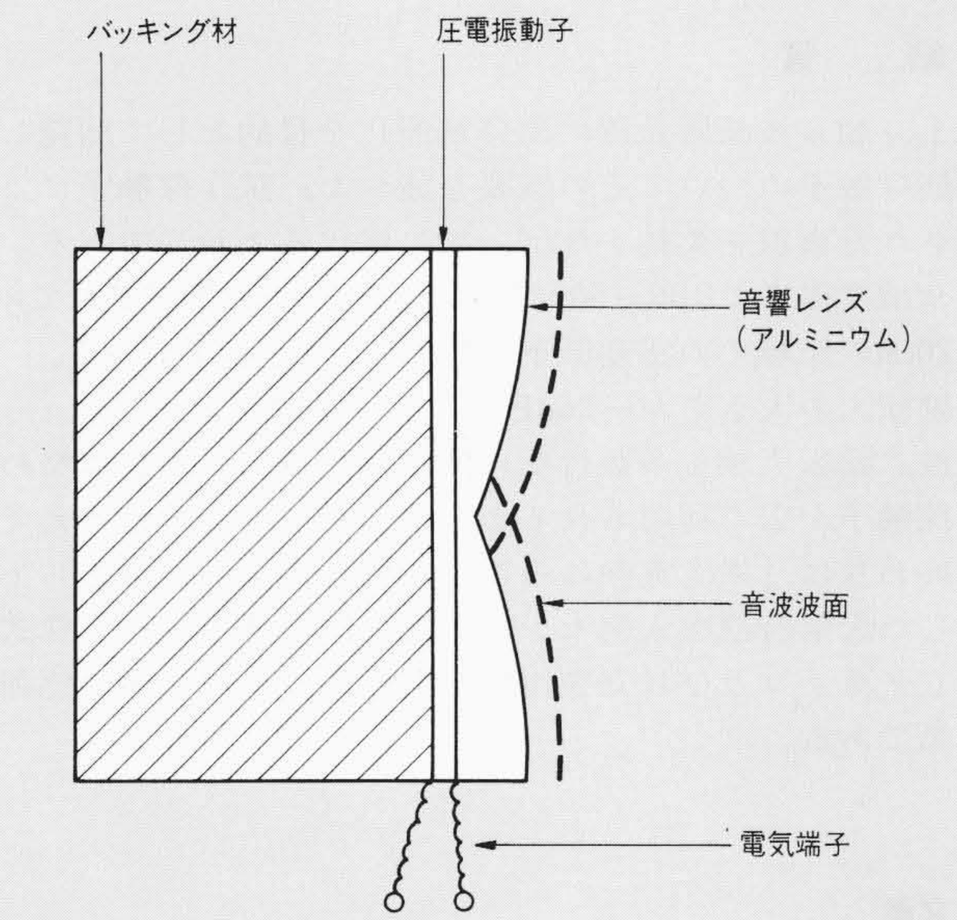

図5　探触子の構造　平板振動子と音響レンズにより，等価な波面を形成している。

ここでa=10mm，b=50mmとすると，10cmで−20dBとなり，この式で$b=0$に対応するリング形探触子の低下量が40dBであるため，10cmの距離にて10倍の感度が期待されることになる。

(3)　副極大の大きさ

このような探触子の中心軸上の点Pには，**図4**に示す音波放射面上の各部分から音波が到達するが，同図の太線で示された$\Delta r \leqq \lambda/6$なる部分からの音波がほぼ同相でP点に到達する。それ以外の部分からの音波は，このΔrに対応して位相回転しているため，相互に打ち消し合い音圧形成には寄与しないと考えられる。このようなドーナツ状の面から同位相で音波が入射する点P近傍での音圧分布は，内径d_1外径d_2なるPを焦点とする中央部の欠けた凹面の音圧分布で近似され，凹面の指向特性を多少変更することによりこの探触子の指向特性は形状だけに着目してR'とすると，

$$R' = \left\{ \frac{J_1(Z_1)}{Z_1} - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \frac{J_1(Z_2)}{Z_2} \right\}$$

で表わされる。ここで，d_1 d_2は**図4**から幾何学的に決定され，変数Z_1　Z_2は，

$$Z_1 = 2\pi d_1 \sin\gamma/\lambda$$
$$Z_2 = 2\pi d_2 \sin\gamma/\lambda$$
$$\sin\gamma = Y/X$$

である。音圧分布は，このようにd_2/d_1により変化してこの値が小さくなるに従い副極大は単調に低下する。実際の探触子形状におけるd_2/d_1の値は0.4〜0.6であり，数値計算によると副極大がリング形に比較して5dB程度低下することになる。

以上は，放射面形状により副極大が低下する程度であるが，副極大の位置が周波数により変化することを利用し，信号帯域幅の広い短パルス音波を使用することにより副極大を更に低下させることができる。ここでは，振動子(PZT)と同程度の音響インピーダンスを持つタングステン粉末と塩化ビニル混合物をバッキング材として使用し，送波音波を短パルス化している。

4　結果と検討

4.1　試作探触子の特性

試作した探触子の構造は**図5**のようになっている。すなわち，圧電振動子前面に**図1**と等価な波面を形成するように設計されたアルミニウム音響レンズが接着されている。探触子口径は20mmであり，仮想的音源が後方45mmに生ずるように構成されている。次に各測定結果について説明する。

(1)　主ビーム分解能

20dB低下するまでの主ビームの幅を測定した。測定結果は**図6**に示すようになり，同一口径市販凹面探触子に比較して近傍で50%，遠方で30%それぞれ狭いビーム幅を示している。また，この図に示されているように測定値は(1)式によるビーム幅とよく一致している。

(2)　軸上感度

中心軸上に置かれた反射体からの信号強度を測定すると，**図7**に示すようになる。反射信号の強度はこのように3cmから20cmの距離で17dBの変化に抑えられ，リング形探触子の感度低下に対する問題点はほぼ完全に解決している。しかし，この特性に見られるように3cm以内の近距離での感度低下が大きいため，極めて浅い部位を観察する場合には問題が残り，診断領域によっては今後近距離を重視する設計が要求されるものと思われる。

(3)　副極大

距離8cmで測定した反射信号強度は，反射体の中心軸からの距離に対して**図8**のように変化する。パルス性音波を使用しているために副極大は明りょうに観測されないが，副極大相当の位置での反射信号強度が正面方向に対して26dB低下している。この図での点線が2MHz正弦波に対する数値計算結果であり，このような形状を採用したことにより，副極大レベルがリング形（−16dB）より5dB低下し，低パルス音波を使用したために更に5dB低下していることになる。この副極大レベル(−26dB)は長方形平板探触子での値と同一であり，実用上ほぼ満足できる値と思われるが今後更に副極大の抑圧を進めたいと考えている。

4.2　撮像実験

実用に耐えると考えられる特性が得られたため，腹部の撮像実験を行なった。実験は位置精度2mmの高精度スキャナを持つ株式会社日立メディコ製の接触複合走査超音波断層装置EUB-3を使用し，これに試作探触子を付加する構成により行なった。結果の一例として肝臓近傍での断層像を**図9**に示す。ここに見られるように，肝臓内部の構造及び肝臓近傍右下に膵臓の断面像が明りょうに描出されている。

図9　腹部断層像　肝臓近傍の断層像であり，内部構造が描出されている。左の黒い部分は心臓で，右方向は脚部になる。

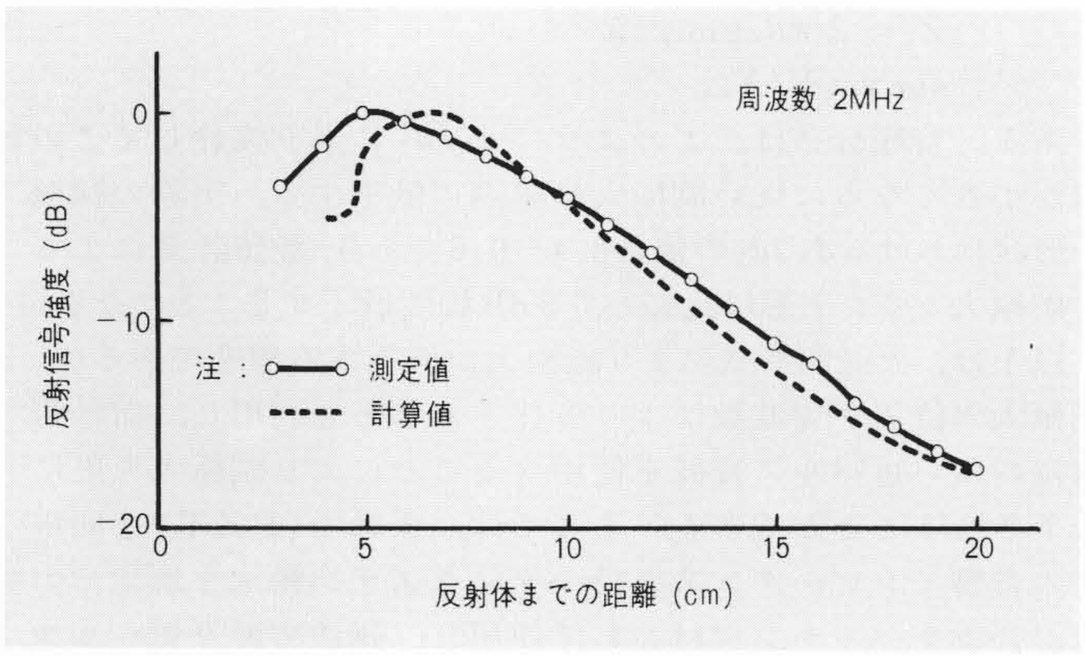

図7　反射信号強度　距離に対する反射信号強度の変化を示し，20cmで17dBの低下に抑えられている。

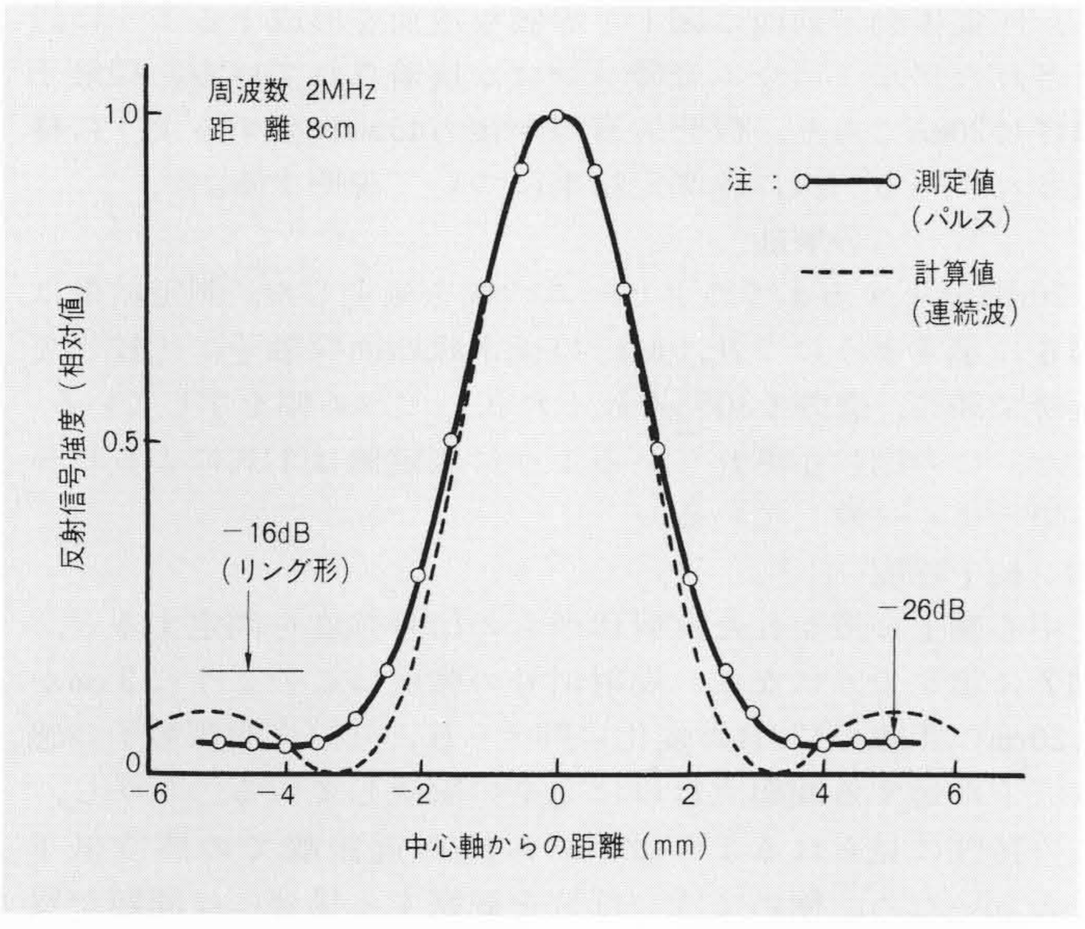

図8　副極大のレベル　副極大レベルが−26dBとなり，リング形探触子の$\frac{1}{3}$まで抑圧されている。

5　結　　言

以上，超音波断層装置の高分解能化を目的として開発した高性能探触子についてその概要を述べた。試作探触子により確認された事項を要約すれば，次に述べるとおりである。

(1)　全域で従来より30～50%細い音波ビームが形成されている。
(2)　20cmの距離での感度低下が17dBに抑えられている。
(3)　副極大の大きさが−26dBまで抑圧されている。

今後，臨床実験を多数行ない問題点の抽出と改良に努め，この探触子が広く利用されるようにしていきたいと考えている。終わりに，撮像実験に当たって御指導，御鞭撻をちょうだいした大阪府立成人病センター北村医学博士ほか，株式会社日立メディコ及び日立製作所の関係各位に対し深く感謝する次第である。

参考文献

1)　奥島：「方位分解能を向上させるためのリング形超音波振動子」日本超音波医学会講演論文集（昭42-5）
2)　田中：「笠付円筒送波器の指向性」日本音響学会誌(昭18-8)
3)　C.B.Burckhardt, H.Hoffmann and P.A.Grandchamp：“Ultrasound Axicon” J.A.S.A, Vol. 54, No. 6 (1973)
4)　奥島，片倉：「リング形探触子による種々の受像例」日本超音波医学会講演論文集（昭43-10）
5)　大槻，奥島：「同心配置探触子の近距離音場特性」日本超音波医学会講演論文集（昭48-11）
6)　J.H.McLeod：“The Axicon” J.O.S.A, Vol. 44, No. 8 (Aug. 1954)
7)　菊池，奥山，河西：「短い超音波パルス放射の音場特性」日本超音波医学会講演論文集（昭46-5）
8)　M.Hubelbank, O.J.Tretiak：“Focused Ultrasonic Transducer Design” Q.P.R.No. 98, Res. Lab. M.I.T. (1970)
9)　奥島，片倉：「リング形探触子の指向特性改善」日本超音波医学会講演論文集（昭42-11）
10)　C.B.Burckhardt：“Methods for Increasing the Lateral Resolution of B-scan” Acoustical Holography, Vol. 5 (1975)
11)　神田，片倉，鈴木：「高分解能超音波探触子の開発」日本超音波医学会講演論文集（昭50-11）