教育講座

医用超音波工学の基礎(1)*

——超音波の発生・検出と音場の制御——

大槻 茂雄**

東京工業大学 精密工学研究所

医用計測に利用されている超音波はどのようなものであり、どのような特徴があるのかを考えていくことにしよう。

1. 超音波とは

超音波とは音を超えた波ということである。ここでいう音とは耳で聞くことができる空気振動である。空気の振動は波となって空気中を伝わり、耳で感じる（検出する）。このとき振動の強さや繰り返し（周波数）の違いからいろいろな情報を得ている。たとえば、小川のせせらぎや虫の声などを聞いて、人は周囲の状況を知ることができる。音の利用はこのような受動的な場合のみでなく、口から音を放射し、すなわち声を出して言葉を話し情報を伝えるという能動的な利用もしている。

しかし、この音も1秒あたりの振動数（周波数）が多くなって、毎秒20,000回（20,000Hz=20kHz）を超えると人の耳では聞こえなくなる。このような高い周波数で振動する波は超音波と呼ばれる。この超音波も、人の耳の代わりをする受波器と口の代わりをする送波器を使うと音と同じように情報を得る手段として利用できる。このような耳で聞こえる音よりも周波数が高い超音波はいろいろな分野で利用されており、医用計測では主に2MHzから20MHzの周波数の超音波が利用されている。ここで2MHzとは2,000,000Hzで、1秒間に200万回の振動である。このように高速な振動も20年近く前から技術的に自由に扱えるようになり、現在のような医用超音波装置が実現

している。医用超音波断層像装置では、超音波パルス（瞬間だけ発生した音響振動）を体内へ送り出し、体内から反射してくるエコーを受波器で捕らえて、体の断層面の情報を得ている。このとき、3MHzというような周波数の超音波が利用されるが、このような周波数を選択する理由は超音波の波長と関係がある。

波長 λ とはFig.1に示すように、1回の振動に対応する波の長さであり、超音波の伝わる速さ（音速 c ）を周波数 f で割ったものとなる。すなわち、

$$\lambda = c / f \quad (1)$$

である。この図では、超音波を水面の波のように表しているが、空気や水のような流体を伝える超音波は、流体の“粒子”が波の伝わる方向で前後に振動する波（縦波）

Fig. 1 波の伝搬 Travelling of wave.

Fig. 2 粗密波（縦波） Longitudinal wave.

*Basic Engineering on Medical Ultrasound.

**Shigeo OHTSUKI: Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsudacho, Midori-ku, Yokohama 227.

Fig. 3 時間幅の狭い超音波パルスの模式図 Simplified ultrasonic short pulse

で、密度が大きくなったり、小さくなったりする状態が伝わる粗密波である。粗密波はFig. 2で表わす法が密度の変化が直感的に分かりやすいが、Fig. 1の縦軸を密度とする表示法のほうが扱いやすい。

ところで、生体の音速は水の音速と同じ程度で、空気中の音速の4倍程度で、 $1,500\text{m/s}$ 付近である。したがって、周波数が 3MHz の超音波の波長は $1,500\text{m/s} \div 3\text{MHz} = 0.5\text{mm}$ となる。超音波の反射波を検出しやすい物体の大きさは、大ざっぱに言って、波長程度以上の大きさである。よって、周波数が 30kHz の超音波が体内を伝わる時は波長が 5cm 程度であるから、体の断層面を調べるには波長が長すぎるのでほとんど状況がつかめない。また、 30MHz というような高い周波数では、波長も 0.3mm 程度に短くなり、小さなものからの反射が強くなる代わりに、体内に放射した超音波が体表の近くで次々と反射されるうえ、伝搬にともなう吸収も大きいので体の奥まで届かなくなってしまう。したがって、体内を 20cm ぐらいの深さまで観測しようとするとき周波数が 3MHz ぐらいの超音波が適している。また、頭の中を頭蓋骨を透して観測しようとするとき、骨により超音波は透過しにくくなるのでより低い周波数（例えば 1MHz ）で利用される。

2. 超音波の発生と検出

それでは、周波数が 3MHz というような激しい振動がどのようにすると発生でき、どのようにして検出できるのであろうか。それには、電歪材料という特別な材料を利用する。よく使われる電歪材料はPZT（チタン酸ジルコン酸鉛）である。この材料を粉末にして、望む形に押し固め、高い温度で焼くと磁器になって硬くなる。したがって、落としたりして衝撃を加えると割れて壊れてしまう。つまり、超音波探触子はPZTの磁器でできた振動子があるので、落とすと割れて動作しなくなるので、取扱に注意しなければならない。ところで、PZTの粉末を焼き固めただけの磁器では超音波を発生させたり、検出したりすることができない。そこで、板状に作った

Fig. 4 理想とする線状超音波ビーム Abstracted ultrasonic beam.

PZT磁器の表と裏の両面に電極として金属（銀）の薄い膜をつけ、この電極の間に高い直流電圧をしばらく加えておく。この分極的作用により、PZT磁器の板が超音波を発生したり、検出できる超音波振動子となる。

3. 音場の制御

医用超音波診断装置では、超音波探触子内の振動子から放射される超音波は生体を伝わり、反射してくる超音波を受信して得られる生体内の情報を利用している。この超音波が生体内を伝わる時の超音波の広がり方が小さいほど臓器などの形状が細かくわかることになる。この超音波の広がり方の小さな程度を空間分解能という量で評価される。この空間分解能は超音波の伝わる方向（距離分解能）とこれと直交する方向（横方向分解能）とに分けられる。超音波探触子から放射される超音波は距離分解能をよくするためにパルス波を用いている。これを模式的に示すとFig. 3のようになる。

この図で、横方向のパルスの広がり方は時間的に一定な連続波を送ったときの超音波ビームの幅に対応する。横方向分解能がよい理想的な超音波ビームはFig. 3に示す線状のビームである。

振動子の形が無限に広い平面のときは放射される超音波は平面波になり、振動子が非常に小さく点状になったときは球面波になる。これらはともによい横方向分解能は得られない。そこで、Fig. 4のような理想的なビームに近づけるように振動子の形状が工夫されている。このように、超音波が放射される空間の状況すなわち音場が制御される。まず、単純な場合として円形平面振動子の放射音場はFig. 5のようになる。これは、無限に広い平面振動子から放射される平面波の大きさに対して最大で2倍になるが、これを基準として半分である -6dB と4分の1の -12dB の等レベル線で表わしてある。この円板振動子は半径が a であり、超音波の波長は λ として、振動子軸方向の距離は図に示すように規格化してある。

このように振動子から放射される超音波は伝搬するに

Fig. 5 円板振動子の放射音場 Sound field from disc transducer.

Fig. 6 円板振動子の超音波放射ビーム Ultrasound beam emitted by disc transducer.

Fig. 7 円形凹面振動子におけるビームの集束 Focused beam of concave transducer.

Fig. 8 ビーム動作による断層像の表示 Beam scan for tomogram.

したがって、集束したり、広がったりする。横方向分解能はこの超音波の広がり方に関係するので、軸付近の大きな値で規格化して表わしたものが超音波ビームということになる。これをFig. 6に示す。

このような円板振動子ではビーム幅は比較的広く、良好な横方向分解能が得られない。そこで、観測しようとする距離付近でビーム幅が狭くなるように円形凹面振動子が使われている。円形凹面振動子の音場の例をFig. 7に示す。ビームは破線で示した。

Fig. 9 アレイ振動子による超音波ビームの集束と走査 Electric focusing and scanning of ultrasonic beam.

この音場の様子は振動子の半径 a 、極率半径 R および超音波の波長 λ で定まる円形振動子常数 $a^2/\lambda R$ が0,0.5,1,2の場合を示した。

このようにビームを集束させられる凹面振動子を用い、超音波パルスを放射し、反射波を受波するとFig. 8(a)のような信号が得られ、振動子の軸方向の反射分布がわかる。この振動子のビームを図(c)のようにセクタ走査をし、それぞれの方向で得られる受波信号の大きさにしたがって図(b)のように輝度で表わすとたとえば心臓の断層面が表示できる。振動子のビーム方向はこのように機械式に変えることもできるが、電子式に変えると自由度が高くなる。電子式の場合には、小さな振動子を並べた

アレイ振動子を用い放射されるビームが集束するようにFig. 9(a)のように電気信号の遅延素子を用いる。ビームを走査するには、このフォーカス用遅延素子に加えてステアリング用遅延素子を用いて図(b)のように超音波パルスを放射する。

4. まとめ

ここでは、超音波が弾性振動を伝える波であることと、その発生と音場の制御について概略を示した。このような超音波の特性を念頭においておくことが、超音波診断装置で得られる情報を十分に活用するのに不可欠であろう。