超音波センサー

田村 幸三*

1. はじめに

超音波技術の応用分野を大別すると、計測・通信を目的とした情報の応用と、パワーを利用した動力的応用とに分けることができる。情報の応用は、超音波という波動を利用してなんらかの情報を獲得する応用で、魚群探知、測深などのソナー⁽¹⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽¹³⁾、金属探傷^{(1)~(3)(5)(10)~(13)}、厚さ・流量の測定などの工業計測⁽¹⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾、医学的診断法^{(1)~(4)(9)(13)}などがあげられる。動力的応用は超音波の形となった動力(パワー)を利用して物体または物質になんらかの変化をあたえる応用で、金属等の疲労試験、細菌破壊、超音波加工、振動切削、超音波集塵などがあげられる。超音波の応用技術は比較的新しいものであるが、超音波のもつ特徴が有効に生かされて新しい分野での応用も急速に広がってきている。このように、超音波応用技術が発展してきた背景には、超音波の発生素子である磁歪材料や圧電、電歪材料の新規発見や開発によって効率の良い振動子が実用化されてきたことが大きく寄与している。

そこで、本稿は超音波の定義と、その諸特性の概要を述べたのち、超音波の送・受信に使用されている振動子の材料について簡単に紹介してみる。

2. 超音波の定義

一般に超音波とは“人の耳に聞えないほど高い周波数の音”と理解されている。普通の人間の耳に聞える音の限界は16 kHzから20 kHzといわれており、この定義によれば20 kHz以上の高い周波数の音を超音波ということができる。しかし、超音波技術応用などという場合の超音波の意味は上記の定義に限定されるものでなく、最近では“人間が聞くことを目的としない音波の応用に関する技術”とされている。

3. 超音波の特性

超音波の性質は可聴音波の性質と酷似しているが、周波数が高いことにより異なった特徴があらわれてくる。

超音波の特徴をあげてみると、(1)媒質は空気に限らず、むしろ液体や固体に使用される。(2)周波数が高く、波長が短いことから分解能の高い計測ができる。(3)強度が著しく大きい場合の応用が多い。などである。以下超音波の特性のうちおもなものをあげてみる。

(1) 波の種類と波長

波の種類は媒質内の粒子の運動方向によって、縦波、横波、その他の種類にわけられている。縦波は粒子の運動方向が波動の伝搬方向と同じものをいい、疎密波ともいわれる。横波は粒子の運動方向が波動の伝搬方向と垂直な動きをするものをいう。そのほかに表面波、板波などがある。なお、気体や液体内では縦波しか存在しない。

波長 λ は、周波数 f と音速 c との間には $\lambda=c/f$ の関係がある。音速(音の伝搬速度)は、一般に周波数に無関係な定数であるから、同一媒質では波長は周波数に逆比例する。

超音波の音速は電磁波の速度(3×10^8 m/s)に比して桁違いに小さく、空気中では約330 m/s、水中では約1500 m/s、鋼中では約5800 m/s、(縦波)といわれている。したがって同一周波数における超音波の波長は電磁波に比較して著しく短くなる。この関係を図1に示す。図からわかるように、1 MHzの水中超音波の波長は1.5 mmとなり、相当に鋭い指向性が得られ、また距離分解能がよいことがわかる。

図1 電磁波と超音波の周波数と波長。

* 株式会社東京計器産業事業部技術部次長
Ultrasonic Sensing Element; Kōzō Tamura(Engineering
Dep., Industrial Division, Tokyokeiki Company, Tokyo)
1978年10月6日受理

(2) 伝搬と減衰

一般に振動子から放射された超音波は、媒質が音響的に均一ならば、多少広がりながら直進していく。この伝搬の様子を考えると、波面の面積が広がらない場合を平面波と呼び、また媒質に超音波を吸収する性質がなければ音の強さはどこまで伝搬しても変わらない。しかし実際には音の強さは距離の増大に伴って弱くなる。この原因としては、距離が遠くなるにしたがって波面が広がることによる拡散損失と、超音波が伝搬媒質により吸収、散乱され、それにより波動エネルギーが失われる吸収損失、散乱損失とがある。一般にはこれらの損失全体を減衰と呼んでいるが、媒質の特性を示すものは吸収損失と散乱損失であり、ここではこれらの損失を減衰と呼ぶ。

超音波の減衰は図2に示すように空中では著しい減衰をうけることがわかる。固体中ではアルミニウムや鋼のように多くの金属において MHz(メガヘルツ)近傍でも減衰が少なく、金属の超音波応用として超音波探傷法が成功裡に実用化されていることをうらづけている。

水中、または海中における超音波の減衰も、また、金属と同じように少なく、海水中における超音波の情報的応用に適していることがわかり、金属と共に超音波応用分野の拡張に将来の期待がもてる分野である。

図2 超音波の減衰定数。

(3) 反射と透過

超音波が性質の異なる媒質の境界面につきあたると、その一部は反射し、残りは透過していく。そして反射や透過の強さは2つの媒質の音響的性質の差によって決まる。ここでいう音響的性質とは専門語では固有音響インピーダンス(z)であり、媒質の密度(ρ)と音速(c)の積で表わされる。いま、固有音響インピーダンスの異なる媒質の境界面に垂直に超音波が入射したとすれば、音圧の反射率 r は $r = z_2 - z_1 / z_2 + z_1$ で表わされる。したがって両媒質の固有音響インピーダンスの差が大きい程反射率が大きくなる。次に図3に示すように境界面に超音波が

図3 超音波の反射と屈折。

斜めに入射すると、入射角 θ_i 、反射角 θ_r 、屈折角 θ_t の間に $\theta_r = \theta_i$ 、 $\sin \theta_t / \sin \theta_i = c_2 / c_1$ の関係が成り立つ。

(4) その他の特性

2つの媒質の境界面が球面であるところに平面波が入射すると超音波は固有音響インピーダンスの差によって集束し、または拡散する。写真1に2 MHzの振動子の前面にプラスチックレンズを取り付けた場合の水中への超音波ビームの集束の様子を示す。

写真1 プラスチックのレンズにより集束する超音波。

4. 超音波発生素子

超音波の応用分野には、計測・通信を目的とした情報的应用と、パワーを利用する動力的应用の2つの分野があることを前に述べたが、この両者の産業界における比重は前者が後者にまさっているようであるが、両者ともに部品、材料の進歩を背景に順調な進歩をとげている。超音波応用技術の原動力となるものは、まず第1に、電気・音響変換効率の優れた超音波発生素子の出現であり、第2には従来の真空管にかわって、信頼性の高い半導体素子が実用化されたことであろう。すなわち、半導体材料工学の進歩にささえられて超音波技術の応用面の進歩がみられたといっても過言ではあるまい。超音波の発生素子として代表的なものをあげてみると、低い周波数帯では磁歪振動子が使用され、高い周波数帯においては圧電振動子が使用されている。これらの振動子は超音波技術に重要な役割をなすものであり、現在使用されている振動子の構造とその材料は次の通りである。

(1) 磁歪材料を用いた振動子

一般に磁性物質を磁化すると、その寸法がごく僅かではあるが変化する。これを物質の磁歪現象といい、この現象を利用したものが磁歪振動子である。すなわち、図 4 に示すように磁性体に巻線を施し、この電気端子に電気信号を印加すると磁性体の振動面は電気信号に対応して振動し、超音波を発生する。磁性材料として一般に広く用いられているものは純ニッケルであるが、わが国では、このほかに AF 合金が広く用いられている。これらの材料は金属であるから渦流電流による損失を少なくするために、できるだけ薄い板に造り、成層磁歪振動子にして用いるのが普通である。近年では、新しく開発された磁性材料にフェライトがあるが、これは、鉄を含む二、三の金属酸化物の粉末を固めて焼結させたものであり、ほとんど絶縁物であるから、薄板にして成層する必要がない。また、材質的にみると磁歪振動子用フェライトは、一般のコア用フェライトが導磁率特性に重点をおいて発達したものに反し、これは磁歪活性度の特性に重点をおいて研究されたもので、化学的成分も、また製品の機械的強度も異なるものである。

磁歪振動用材料として要求される特性としては

- (i) 磁歪活性度の大きいこと、
 - (ii) 渦流損失が小さいこと、
 - (iii) 最適直流偏倚磁場が小さいこと、
- などがあげられる。

図 4 磁歪振動子の構造図。

(2) 圧電、電歪材料を用いた振動子

結晶体に歪または応力を与えると電気分極の起る現象を圧電気直接効果といい、逆に、結晶に電界を与えたとき歪または応力の生ずる現象を圧電気逆効果という。そしてこれら2つの効果を総称して圧電現象と呼んでいる。

また、誘電体において電気変位の二乗に比例した歪を発生する現象を電歪現象という。この現象は普通の誘電体においては、ごく微弱にしか起らないが、ロッシェル塩やチタン酸バリウムのような強誘電体ではかなり大きく発生する。したがって、これらの材料を図 5 に示すように材料の両面に電極を施し、この両電極に電気変位を与えれば、材料には電気信号に対応した振動が生じ、超音波を発生する。また、逆に材料に振動を与えれば電気信号を得ることができる。

なお、圧電現象は、加えた応力の方向と同方向に分極を生じるもの、または印加した電気信号の方向に応力が発生するものを縦効果といい、応力と発生分極の方向が直角となるものを横効果という。したがって、同じように電気信号を印加しても、圧電材料の縦あるいは横効果を選ぶことによって縦（縦波）あるいは横（横波）方向の振動モードを得ることができる。

圧電、電歪現象を利用した振動子として現在用いられている材料は、天然結晶および人工結晶では、水晶、ロッシェル塩、第一燐酸アンモン(ADP)酒石酸エチレンジアミン(EDT)、硫酸リチウム(LH)などがあり、また、強誘電体磁器材料ではチタン酸バリウム系磁器、ジルコン酸鉛系磁器、ニオブ酸鉛系磁器などがある。

図 5 圧電振動子の構造図。

表 1 圧電、電歪材料の諸特性。

特 性	材 料	水 晶 SiO ₂	硫酸リチウム Li ₂ SO ₄ ・H ₂ O	チタン酸バリウム系磁器 BaTiO ₃	ジルコンチタン酸鉛系磁器 PZT-5	ニオブ酸鉛系磁器 PbNb ₂ O ₆
		単結晶 X軸, 0°	人工単結晶 Y軸, 0°	磁器材料	磁器材料	磁器材料
種 類						
切 断 方 向						
誘 電 率	(10 ³ kg・m ⁻³)	2.65	2.06	5.7	7.5	6.0
音 響 イ ン ピ ー ダ ン ス	(10 ⁶ kg・m ⁻² ・s ⁻¹)	4.5	10.3	1700	1500	280
周 波 数 定 数	(10 ³ Hz・m)	15.2	11.2	30	28	16
圧 電 率	(10 ⁻¹² m・V ⁻¹)	2.870	2.730	2.6	1.89	1.4
圧 電 ひ ず み 定 数	(10 ⁻³ V・m・N ⁻¹)	2.0	16	190	320	74~80
電 気 機 械 結 合 係 数 (%)		50	175	13	24.4	32
機 械 的 Q (概数)		10	38	50	67.5	42
最 高 使 用 温 度 (K)		10 ⁶	400	373	75	11
		848	348		573	773

表1に代表的な圧電電歪材料とその特性を示す。

各材料の主な特性を記すと

水晶は

- (i) 電氣的、機械的に最も安定である。
- (ii) キュリー点は約 850 K で高温まで使用できる。
- (iii) 変換効率が悪い。

硫酸リチウムは

- (i) 受信特性が最も優れている。
- (ii) 音響インピーダンスが低い。
- (iii) 振動様式の異なる音波の発生量が小さい。

チタン酸バリウム系磁器は

- (i) 送信特性がきわめて良い。
- (ii) 音響インピーダンスが高い。
- (iii) 損失の点で高い周波数に使える。

ジルコンチタン酸鉛系磁器は

- (i) キュリー点が約 570 K で高温まで使用できる。
- (ii) 圧電効果が大きい。
- (iii) 鉛イオンを含む焼結が困難である。

ニオブ酸鉛系磁器は

- (i) キュリー点が約 770 K で高温まで使用できる。
- (ii) 機械的 Q が小さい。

などがあげられる。

圧電振動子としては、当初、水晶がもっぱら使用されていたが、人工圧電結晶が発見され、また、チタン酸バリウムを主体とした圧電磁器の発見、開発によって効率の良い振動子が実用化されるようになったことから、超音波技術は基礎、応用の両面において大きな進展をみた。

このように、振動子の性能向上は超音波技術応用の発展に重要な役割をせめており、最近ではさらにタンタル酸リチウム (LiTaO_3) などの溶融点の高い単結晶群、高分子圧電体であるポリフッ化ビニリデン (PVDF)、圧電高分子中にセラミックの微粒子を混合した高分子複合圧電体などの実用化研究も急速に進められている。圧電現象を有する物質は多種多様であり、なお未開拓の分野も多く、特に結晶の育成技術が進歩している今日において

は高性能の圧電材料の発見の機会が多くあるものと考えられる。

5. む す び

以上、超音波の諸特性、および超音波振動子に使用されている材料などについてごく簡単に紹介したが、超音波の技術応用は比較的新しい分野であり、今後、より広い分野への応用が期待される技術である。特に超音波の変換素子に必要な圧電材料の研究や電子技術の進歩がめざましい昨今においては、高い経済価値を持ち得る新しい材料や応用面がおもわぬ分野から浮かび出てくることも予想され、それが大きく成長することを期待するものである。

文 献

- (1) 実吉純一、菊池喜充、能本乙彦監修：超音波技術便覧、日刊工業新聞社、(1968)。
- (2) 日本学術振興会編：超音波探傷法、日刊工業新聞社、(1974)。
- (3) 非破壊検査協会：非破壊検査便覧、日刊工業新聞社、(1967)。
- (4) 日本超音波医学会編：超音波医学、医学書院、(1966)。
- (5) R. Goldman : *Ultrasonic Technology*, Reinold Publishing, (1962)。
- (6) E.E. Turner, B.J. Thompson : *Navigation*, **13**(1966), No.3, 210。
- (7) 山本美明：日本音響学会誌、**23**(1972), No.3, 139。
- (8) 田村幸三：新しいセンサの技術開発、経営開発センター出版部、(1978), 188, 356。
- (9) 奥山大太郎：電子通信学会誌、**55**(1972), 1535。
- (10) 尾上守夫、磯野英二：圧力技術 **13**(1977), No.3, 1。
- (11) 羽田野 甫：応用物理、**44**(1975), 564。
- (12) 小島 正：非破壊検査協会、第二分委会資料、(1978), 7。
- (13) 定期発刊誌：日本音響学会誌：日本音響学会；非破壊検査：日本非破壊検査協会；超音波医学：日本超音波医学会；*Materials Evaluations*；American Society for Nondestruction Testing；*Nondestructive Testing*：IPC Science and Technology Press。