

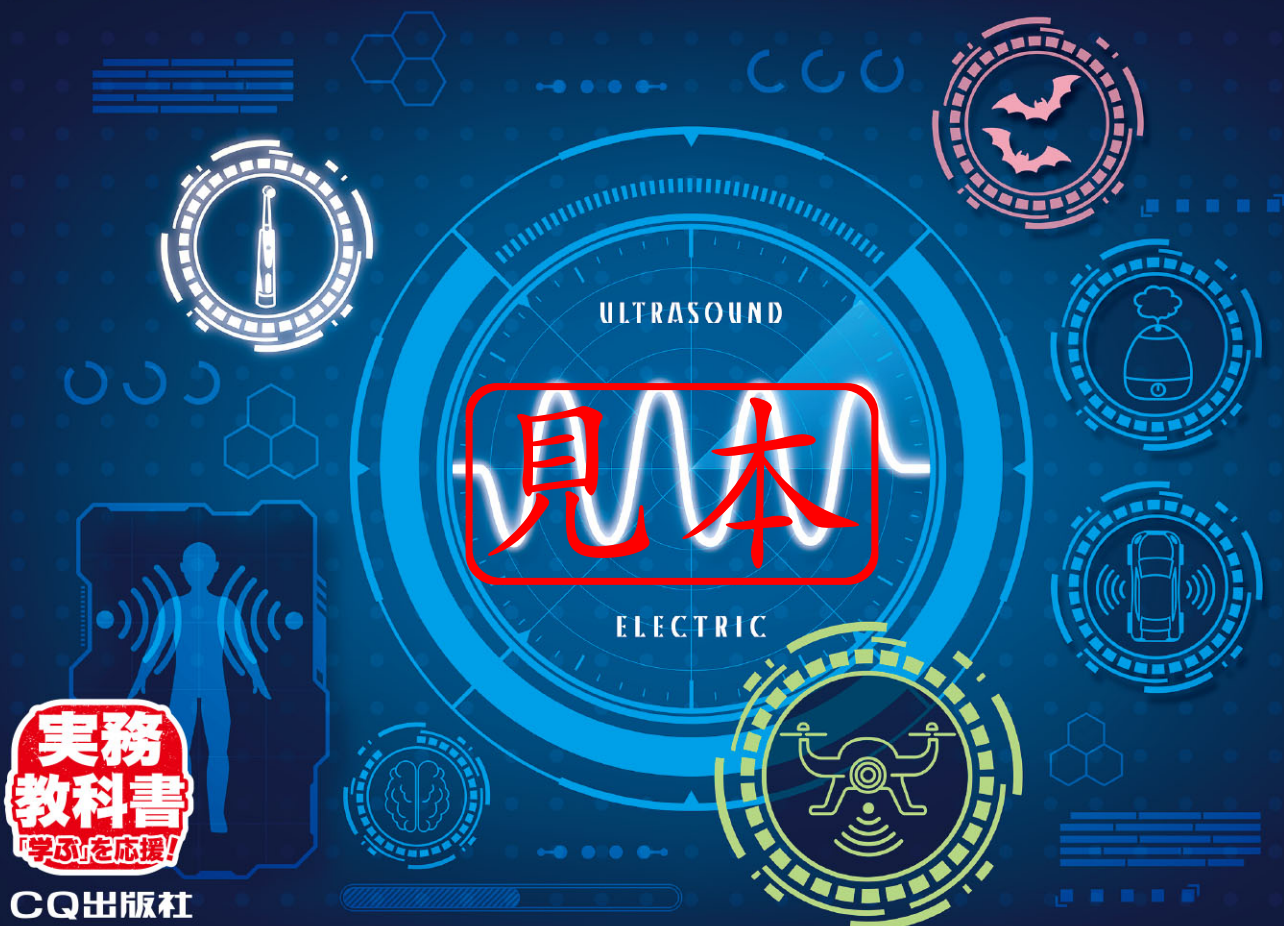
研究や実務に役立つエレクトロニクスの参考書

2023  
Autumn  
No.164

# トランジスタ技術 SPECIAL

発振器や圧電素子が大活躍！電気×力学で広がる回路製作

## 音波・超音波の エレクトロニクス入門



**実務  
教科書**  
「学ぶ」を応援！

CQ出版社

# 電気×振動エネルギーで 広がる世界

中村 健太郎 Kentaro Nakamura / 星 貴之 Takayuki Hoshi

「超音波」と聞いて何を思い浮かべるでしょうか？  
例えば、電子工作で扱われる題材としては、超音波の  
伝搬時間に基づく距離計測があります。

超音波には図1に示すように、とても広い応用先が  
あります。ただ、それらは工場の中や製品の中に隠れ、  
一般の目にはつきにくいところで広がりを見せていま  
す。

最近では、超音波を使ってものを浮かべることが、  
電子工作の範疇はんちゆうに入ってきました。これまで専門家が  
研究室で培ってきた知見が、私たちの目の前で再現で  
きるようになったのです。

そんなパラダイム・シフトが起こりつつある超音波  
について、基礎知識から応用事例までを幅広く見渡し  
つつ、具体例を交えながら紹介します。

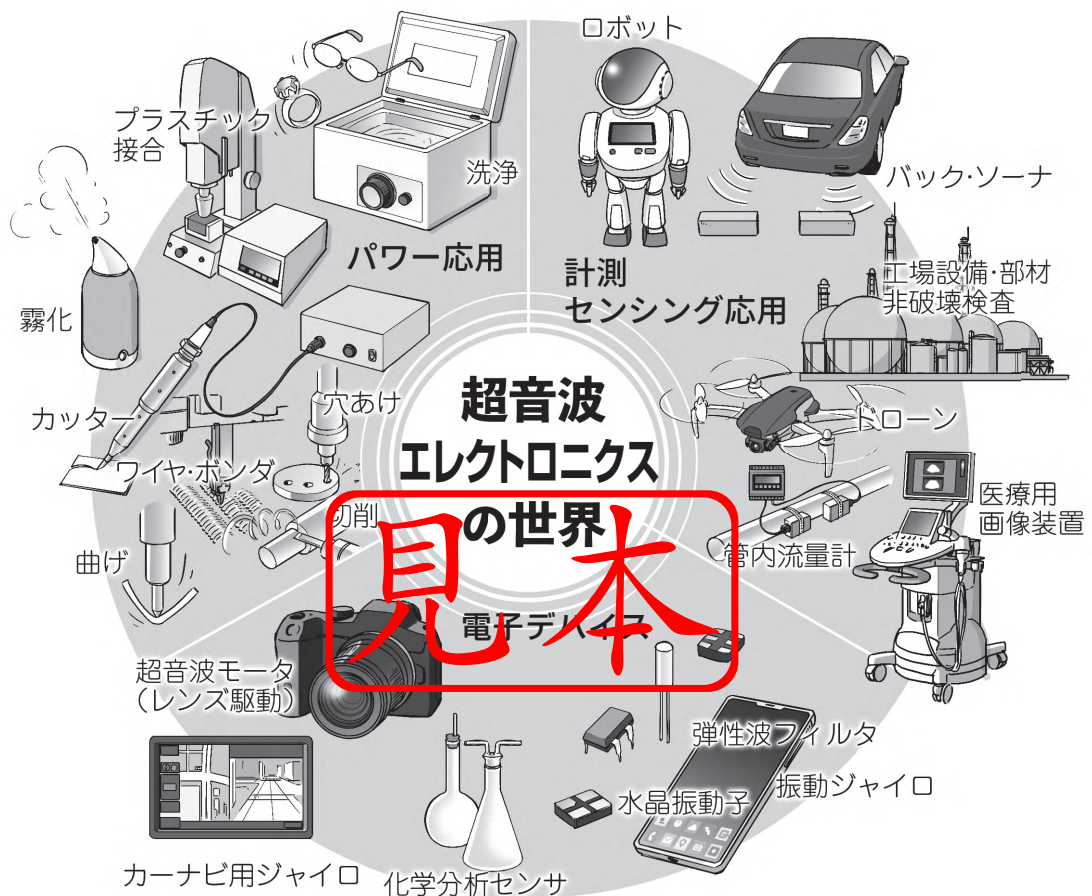


図1 超音波技術の応用はますます広がりを見せる

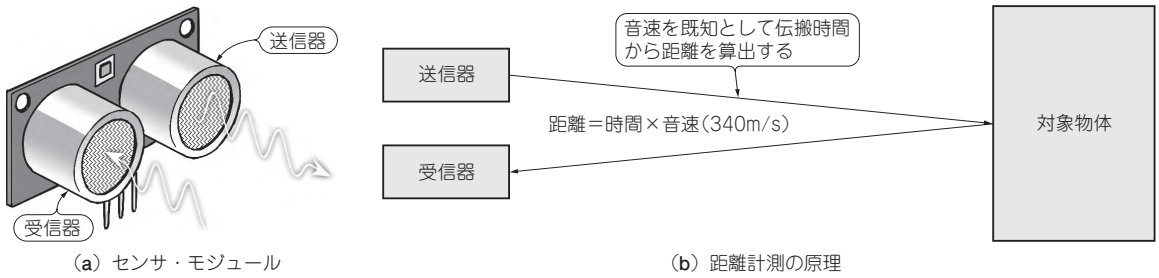


図2 超音波距離センサの原理

直流電源を供給し、I/Oピンを介してトリガ信号を送ると超音波が出力され、伝搬時間を表す信号が返ってくるようになっている

## 一番身近な超音波計測…距離センサ

超音波を利用した距離センサは、センサ・モジュール<sup>(1)</sup>として販売されています。マイコン制御の入門としてちょうどよいこともあり、「超音波」と聞いて真っ先にこれを思い浮かべる方も多いでしょう。

### ● 距離センサの用途

超音波にもとづく距離センサは、自動車やロボット、ドローンが壁や障害物を検出したり、人が通ったら反応したりといった用途に使われます。

ほかの方法でも同様の機能を実現することはできますが、例えば赤外線センサではガラスなど透明なものが検出できないという課題がありますし、カメラでは画像処理が必要だったり暗闇では使えなかったりといった難点があります。これらに対して超音波は、ほぼ何でも検出することができ、また計算処理もマイコンに載る程度で済むという利点があります。

### ● 基本的な原理

図2(a)に超音波を使った距離センサ・モジュールを示します。超音波の送信器と受信器がセットで配置されています。超音波が反射して返ってくるまでの時間に音速を掛けて距離を求めます [図2(b)]。

注意としては、真っ平な表面に超音波が当たると、鏡面反射になってしまい、正確に向きを合わせないと、超音波が受信器に戻ってこない場合があります。また毛布のように音を吸ってしまう素材も、超音波が戻ってこない、もしくは大きく減衰して返ってくるため検出が難しくなります。逆に言えば、過度にデコボコしていて固い表面をもつ物体が検出しやすいです。

## 波エネルギーの力

### ● 超音波で物体を空中に浮かせる「音響浮揚」

強力な音の定在波によって物体が浮くことは古くから知られていました。可聴音を用いた場合には装置が

大型になり、また、うるさくなってしまう。しかし超音波の場合には、波長が短いおかげで狭い範囲にエネルギーを集中させることができるため、コンパクトな装置で浮かせられます。

音響浮揚のためにはそれなりに強力な超音波が必要です。従来は強力振動子(ボルト締めランジュバン型振動子)と金属振動体を組み合わせた、重たく大がかりな装置でした。最近では、音響浮揚が試せるキットなども市販されていて、複数の40 kHz超音波振動子を曲面に並べ、中心に焦点ができるようにしてあります。これにより、低電圧(キットでは9V)で必要な強さの超音波を実現しています。

### ● 基本的な原理

音響浮揚キットのイメージを図3に示します。2つの曲面に超音波振動子を並べ、それぞれの焦点が重なるように向かい合わせに配置しています。

中心付近では、両側から伝わってきた超音波が重なり合って定在波(進まない波)を形成します。この定在波の中に小さい物体が入ると、音圧の節(圧力変動がない場所)がエネルギー的に安定であるため、そこに引き込まれます。超音波が十分に強いとき、節の安定性が重力よりも勝ることによって、物体が浮くのです。

見本

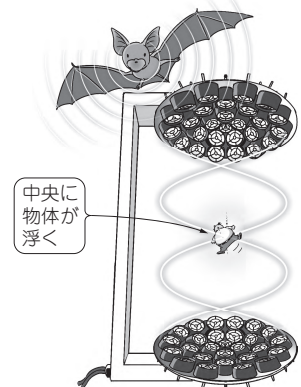


図3 音響浮揚の原理のイメージ

超音波振動子が曲面に並べられ、中央に超音波の焦点ができるようになっていく。中央では定在波が形成され、音圧の節に物体が引き寄せられて浮く

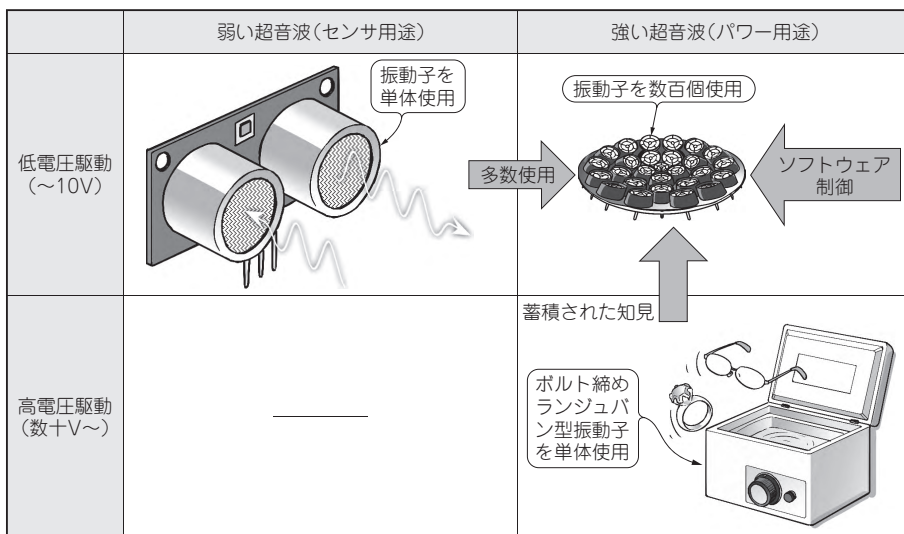


図4 超音波技術のパラダイム・シフト  
多数の振動子を使うことによって低電圧で強力な超音波が扱えるようになり、ハードウェアだけでなくソフトウェアの重要性も増してきた

## ● 浮かせる物体のサイズ

浮かせる物体は節にすっぽり収まる必要があるのですが、波長の半分よりも小さい必要があります。また小さすぎても浮かず、波長の1%より大きい必要があることが報告されています<sup>(3)</sup>。粒は浮くけれど粉は浮かない、というイメージです。

音響浮揚を試してみるには、パウダービーズクッションの中身など、発泡スチロール製の小球がちょうどよいと思います。

## パラダイム・シフトが進行中

従来は単独で用いられていた超音波センサを多数並べることで、強力な超音波を作り出せるようになりました。特殊な振動子を扱うことなく強力な超音波が使えるようになったので、部品の入手や回路的な敷居が下がり、応用の可能性も広がりました。

さらに、並べた振動子を個別に駆動することで焦点の位置を動かすこともできます。これはフェーズド・アレイと呼ばれる方式で、従来よりも制御ソフトウェアの重要度が増したものになります。

このように最近の空中超音波技術は、低電圧で扱えるようになり、身近なものになるとともにハードウェア、ソフトウェアの総力戦の様相を呈しています。歴史的に大きな変化を迎えているといえます(図4)。一方で超音波研究には100年以上の歴史があり、ここまで見てきた空中を伝わる超音波はその一部にすぎません。そこで培われてきた知見の積み重ねを知ることが重要です。

## 超音波技術で広がる世界

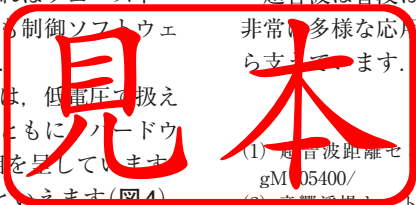
超音波は、空気中はもちろん、電波や光が伝わりにくい液体中や固体中をよく伝わります。そのため、電波や光が届きにくい液体中や固体中の測定に威力を発揮します。また、伝搬速度が電波や光の10万~100万分の1なので、数十kHz~数MHzの低い周波数でマイクロ波やミリ波と同じくらいの波長になります。このことは、周辺電子回路がコスト的にも技術的にも作りやすくと同時に、波形そのものの観測が簡単にでき、位相を使った計測が容易であることを意味します。

一方、機械的な共振によって強い音圧や振動応力を起こし、そのエネルギーを加工や材料処理に使うパワー超音波技術がいろいろな生産現場で活躍しています。また、超音波振動を使った通信用フィルタ素子やセンサ、アクチュエータ技術はスマートフォンやカー・ナビゲーション・システム、カメラに組み込まれています。

超音波は普段は目につかず、耳にも聞こえませんが、非常に多様な応用があり、さまざまな技術を縁の下から支えています。

### ◆参考文献◆

- (1) 超音波距離センサ, <https://akizukidenshi.com/catalog/g/gM-05400/>
- (2) 音響浮揚キット, <https://www.robotshop.com/jp/ja/acoustic-levitator-kit.html>
- (3) D. Foresti, M. Nabavi, and D. Poulikakos ; On the acoustic levitation stability behaviour of spherical and ellipsoidal particles, Journal of Fluid Mechanics, vol.709, pp.581-592, 2012.



# 音波・超音波の物理現象

中村 健太郎 Kentaro Nakamura

## 音波・超音波の基本的な特徴

### ● 液体中や固体中でよく伝わる

人が聞くことができる音の周波数(可聴周波数)は、20 Hz～20 kHzです。この可聴周波数よりも高い20 kHz以上の音や振動を、超音波と呼んでいます。

周波数が違うだけで、聞こえる音と同じ空気振動現象です。空気のような気体のほかにも、水中(液体中)でも、金属などの固体中でも伝わります。気体、液体、固体などの媒質のない真空中では伝わりません。これが同じ波動現象でも電波や光と大きく異なるところです。

電波や光が苦手とする液体中や固体中では空気中よりもよく伝わるのが超音波の特徴であり、応用上のヒントです。

### ● 多様多彩な応用

超音波の応用は表1のように多岐にわたります。身の回りでは自動車のバック・ソナーや眼鏡屋さんの店頭にある超音波洗浄器があります。バック・ソナーは計測応用の、洗浄器はエネルギー応用(パワー応用)の典型です。

### ▶ 計測応用

工場プラント、鉄道などのインフラへの計測応用で重要なのは、配管や機械部品の亀裂を検出する非破壊検査です。また、漁業では、ほとんどの船が魚群探知機(魚探)を積んでいます。これは超音波の水中計測応用です。一方、医用超音波装置は産科、循環器科をはじめ、重要な画像診断手段です。

### ▶ パワー応用

超音波のパワー応用(エネルギー応用)は、接合や加工など製造現場ではさまざまなものがあります。医用では歯石除去から白内障や前立腺がんの治療まで、いくつかの超音波パワー応用があります。

### ▶ 電子部品

超音波振動を用いた電子部品には、高周波フィルタやジャイロ・センサなどがあります。

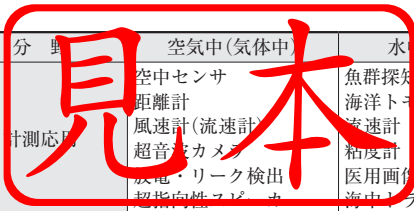
## 音波・超音波の物理現象

電波や光は、磁界と電界の波動現象です。それらの関係を示すものがマクスウェルの波動方程式です。その進む速度である光速は、重要な物理定数です。

超音波は、媒質の機械的な振動であり、媒質の慣性力と弾性によって波動として伝搬します。媒質のない

表1 実はいろいろ使われている…  
超音波の3大応用分野

分野	空気中(気体中)	水中(液中, 人体)	固体
計測応用	空中センサ 距離計 流速計(流速計) 超音波カメラ 漏れ・リーク検出 超音波探傷機	魚群探知機・ソナー 海洋トモグラフィ 流速計 粘度計 医用画像装置 海中ドランシーバ	探傷(非破壊検査) 板厚計 ボルト軸力計 超音波顕微鏡
パワー応用 (エネルギー応用)	微粒子の集合・沈降 食品・薬品の乾燥 浮揚・搬送 力覚提示装置	洗浄 固体粒子の分散・乳化 高分子の破断・解重合 細胞膜の破壊 霧化 医用(メス・がん治療・骨折治療・結石破壊)	金属切削・穴あけ 金属塑性加工 脆性材の加工 金属接合 プラスチック接合
電子部品	クロック用水晶振動子、フィルタ素子(BAW素子・SAW素子)、ジャイロ、圧電トランス、光学変調器、超音波モータ		



column 01 物質の中の音速

中村 健太郎

波長に比べて大きな物体中を伝わる縦波の音速  $c_0$  はヤング率  $Y$  とポアソン比  $\sigma$  によって、

$$c_0 = \sqrt{\frac{(1-\sigma)Y}{(1-2\sigma)(1+\sigma)\rho}} \dots\dots\dots (A)$$

で計算できます。一方、波長に比べて細い棒を伝わる縦波は、これよりも10~20%遅く、その音速  $c_L$  は、

$$c_L = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \dots\dots\dots (B)$$

で求められます。

横波にはいろいろな種類があり、それぞれ速度が異なりますが、物体の表面と平行な振動方向をもつものの音速  $c_T$  は、

$$c_T = \sqrt{\frac{Y}{2(1+\sigma)\rho}} \dots\dots\dots (C)$$

です。これは縦波の速度の半分程度の大きさです。表面波の速度も同じオーダーです。一方、板のたわみ波は厚さや周波数によって速度が異なる性質をもっています。

真空中は伝わりません。

電波や光における磁界と電界に対応するものは、超音波では媒質の粒子速度と音圧です。

● 現象1…粒子速度

超音波を伝える媒質に印を付けることができると仮定します。その印(粒子)が振動する速度を粒子速度といいます。粒子は振動するけれども、その時間平均的な位置はそこにとどまっています。振動のようすだけが伝わっていくところがミソです。

空中や水中では、振動の方向が超音波の伝わる方向と同じである縦波のみが存在します。図1のように媒質が密になった部分と疎になった部分が生じて、この疎密が伝わっていきます。このため、疎密波ともいわれます。固体中では媒質の横ずれ(せん断ひずみ)が伝わる横波も起こすことができます。

超音波の伝搬速度、すなわち疎密やせん断ひずみが伝わっていく速さを音速と呼びますが、粒子速度と混同してはいけません。

● 現象2…音圧

疎密が起こるといえることは、圧力の変化が起きているととらえることもできます。

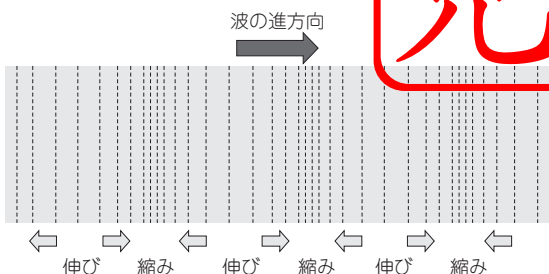


図1 空気中や水中の超音波は縦波  
媒質が密になった部分と疎になった部分が生じて、疎密が伝わっていく

地上では大気圧(約100 kPa)が静圧として常に存在しています。超音波は、図2のように、この静圧からの変動分と考えることができます。この変動分を音圧といいます。単位は圧力と同じ[Pa]です。

可聴周波数の音では実効値をいうことが多く、耳の感度が良い1 kHzで人が聞くことができる一番小さい音圧である  $2 \times 10^{-5}$  Pa を0 dBとしてデシベル表示します。空中超音波ではこの音圧レベル(dB)を使うことが多いです。

そのほかの応用では物理量としてわかりやすいPaで、そのまま示すこともしばしばです。パルス波である応用も多く、0-p(ゼロ・ツー・ピーク)値を使います。

音響的な特性

● 特性1…特性音響インピーダンス

伝搬する超音波の粒子速度  $v$  と音圧  $p$  の間には、

$$p = Zv \dots\dots\dots (1)$$

の関係があります。ここで、 $Z$  を特性音響インピーダンスといいます。そして、特性音響インピーダンスは媒質の密度  $\rho$  と音速  $c$  によって、

$$Z = \rho c \dots\dots\dots (2)$$

と計算することができます。一方で、音速は密度  $\rho$  と弾性定数  $E$  によって、

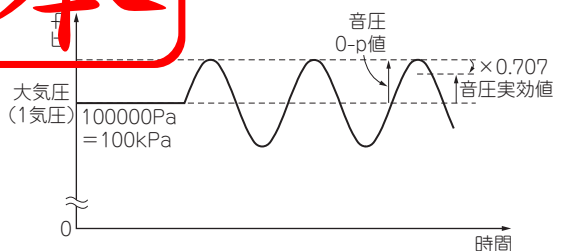
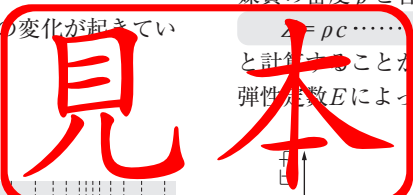


図2 圧力変動としての超音波  
超音波は、静圧からの圧力の変動分と考えられる



## 第2章 圧電セラミックスが大活躍!

音波・超音波の発生&検出…  
デバイスのしくみ

中村 健太郎 Kentaro Nakamura

音にはスピーカとマイク  
超音波にはトランスデューサ

超音波を発生したり検出したりするデバイスを、超音波トランスデューサといいます。可聴周波数のスピーカとマイクロホンに相当するものです。

可聴域のスピーカは、ほぼ100%がダイナミック型です。ボイス・コイルの付いた振動板(コーン紙)を電磁力で動かします。イヤホンの一部には電磁石の吸着力を利用したマグネチック型も使われています。これに対して、超音波では電界によってひずみが発生する圧電素子が広く使われています。

可聴域のマイクロホンは、静電現象によるコンデンサ型が多用されています。超音波では検出にも圧電素子を使うことが多いです。

本章では超音波トランスデューサの概要を述べます。空中用なのか液中用なのか固体用なのか、また、動作周波数によってそれぞれ適した構造があります。固体用では縦波のほか横波が使われることもあり、専用のトランスデューサがあります。一方、計測用かパワー用かによっても考え方が大きく変わります。

音波・超音波デバイスに  
欠かせない「圧電素子」

## ● 圧電とは

図1のように、水晶などの結晶片の両側に電極を付けて力を加えると電極間に電圧が発生します。これは1880年にキュリー兄弟によって発見された現象で、圧電効果と呼ばれます。

逆に、電圧を電極に加えると結晶は変形しようとして力を発生します。これを逆圧電効果と呼びます。

この性質を示す結晶には極性がある、これを分極といいます。分極の方向と電極を付ける面によって電圧をかけた際の変形の仕方が変わります。超音波の発生には逆圧電効果が、検出には圧電効果が使われます。縦波用なのか横波用なのかによって分極方向と電圧の方向を選んでトランスデューサを作ります。

## ● 圧電セラミックス

比較的周波数の低い10 MHz程度までの超音波応用では、圧電セラミックスが主に使われます。圧電セラミックスは圧電性が大きく、自由な形に焼成できる、分極方向を選べるなどの利点があります。

現在の多くの応用で、チタン酸ジルコン酸鉛[PZT、化学式 $Pb(Zr,Ti)O_3$ ]という圧電セラミックスが使われています。同じPZT材料でも少しの添加剤の変更で特性が変化し、用途に応じた材料が製造されています。

数十MHzを超える応用ではニオブ酸リチウム(LN、化学式 $LiNbO_3$ )など、さまざまな結晶が使われます。また、PZTなどの薄膜を使うこともあります。

## ● シンプルな圧電素子…可聴周波数用圧電ブザー

本格的な超音波トランスデューサについて述べる前に、写真1の可聴周波数用の圧電ブザーを見てみましょう。

図2(a)に示すように、0.1 mm程度の厚さの真鍮円板にその6割程度の直径の薄いPZT素子を同心円に貼り合わせたものが圧電ブザーの本体です。これをプラスチックの共鳴ケースに入れたものが、数kHzの発音素子として売られています。

PZT円板の表面には導電性金属が薄く付けられていて、真鍮板とこの金属によってPZT円板に電圧を

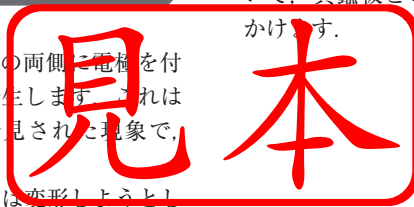
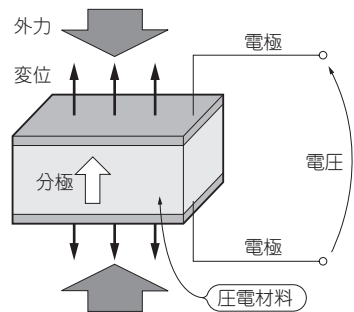


図1 超音波デバイスに欠かせない…圧電効果と逆圧電効果  
水晶などの結晶片の両側に電極を付けて力を加えると電極間に電圧が発生する。逆に電圧を電極に加えると結晶は変形しようとして力を発生する



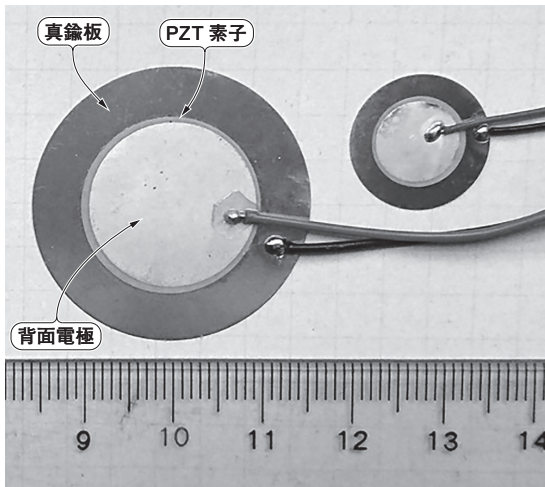


写真1 シンプルな圧電素子...可聴周波数用圧電ブザー

● 圧電横効果によるたわみ振動

この素子に電圧を加えると、逆圧電効果によってPZT円板が直径方向に伸びます。しかし真鍮円板には圧電性がないので伸びません。その結果、図2(b)のようにたわむ変形を起こします。数kHzの交流電圧を加えれば、その周波数でたわみ振動して鳴るわけです。特にたわみ振動の共振周波数でよく振動し大きな音を出します。

これは熱膨張係数が違う金属を貼り合わせて、温度上昇により反って接点が離れるバイメタル・スイッチに似た動作です。この圧電ブザーの場合には、片方が金属で自ら変形しようとしないのでモノモルフ構造といえます。

ここで、PZT素子の分極方向は厚さ方向ですが、直径方向に変形しています。これを圧電横効果といいます。

● 共振周波数と動作

これに対して図1のように、電圧印加方向と同じ方向(分極方向も同じ)に変形するのを圧電縦効果と呼びます。

図1の場合、実は横方向にも変形しています。固体を縦方向に押し縮めたり伸ばしたりすると、それと直

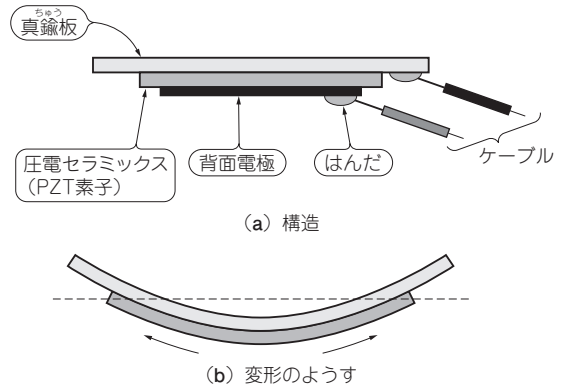


図2 圧電ブザーに見る圧電素子の構造と動作  
0.1mm程度の厚さの真鍮円板に、その6割程度の直径の薄いPZT素子を同心円に貼り合わせたもの。電圧を加えると、逆圧電効果によってPZT円板が直径方向に伸びてたわむ。繰り返したわむ振動により音が鳴る

交する横方向に膨れたり細ったりすると思います。これが固体の変形の性質です。消しゴムをつぶしてみればそのことが理解できます。

どの周波数の電圧をかけるかによって、同じ素子でも振動の起こり方がかわります。圧電ブザーでは、たわみ振動が起こる低い周波数の電圧を加えるため、横効果による変形が顕著に現れているわけです。

● 空中超音波センサ素子

写真2のような直径10mmほどの40kHz空中超音波トランスデューサは入手が容易です。これは図3のように、モノモルフ振動子の上面にアルミニウム・コーンが付いた構造をしており、このコーンの振動で超音波を放射します。また、受信も行います。

超音波デバイス①...  
計測用トランスデューサ

● MHz帯の超音波を使う

非破壊検査でも医用診断装置でもMHz帯の超音波パルスを送信し、目標物からの反射波を受信します。これをパルス・エコー法といいます。圧電縦効果を使って連続超音波の送受信を行うのが一般的です。ここで注意するのは、いかに時間的に短い単パル

見本

写真2 40kHz空中超音波センサ素子

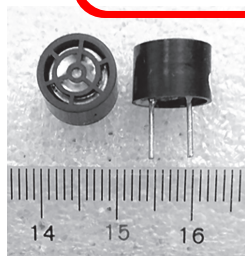
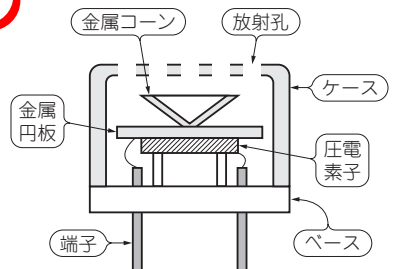


図3 空中超音波センサ素子の構造  
モノモルフ振動子の上面にアルミニウム・コーンが付いている。コーンの振動で超音波を放射する





# 主な利用①… 流体・固体中の計測や診断

中村 健太郎 Kentaro Nakamura

超音波は気体中、液体中、固体中のいずれも伝わるので、それぞれに多彩な計測応用があります。気体や液体といった流体中では、物体の検出、物体の速度の測定、流体の流速測定に超音波が用いられます。固体中では、部材の肉厚測定、傷の検出などが重要な応用です。

## その1：物体検出

● やまびこの原理！パルス・エコー法による距離測定  
超音波計測の基礎は、気体中、液体中、固体中のいずれも、伝搬時間による距離測定です。

図1のように、パルス波やバースト波を目標物に向かって送信し、反射波が戻ってくるまでの時間 $t$ を計測します。既知の音速 $c$ から距離 $L$ は、

$$L = \frac{ct}{2} \dots\dots\dots (1)$$

と求められます。往復するので分母に2があります。

### ▶ 空気中の音速

この測定では、音速が既知であることが必要ですが、空気中の音速は温度によって少し変化します。常温付近ではセ氏 [°C] で測った温度を  $T$  として、空気中の音速は、

$$c = 331.5 + 0.6T [\text{m/s}] \dots\dots\dots (2)$$

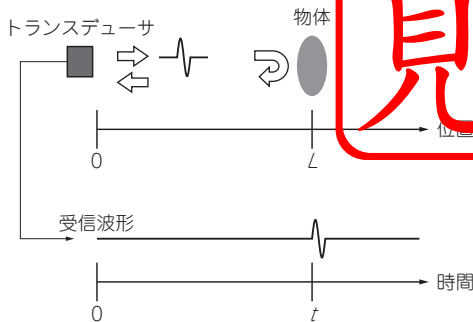


図1 パルス・エコー法による距離測定  
パルス波やバースト波を目標物に向かって送信し、反射波が戻ってくるまでの時間を計測する

と近似的に表せます。すなわち、10℃のときで337 m/s、40℃のときで355 m/sとなります。冬と夏で5%ほど差が出ることになります。音速は風による影響も受けますので、誤差の想定が必要です。

### ▶ 液体中の音速

水中の音速は、常温常圧で1480 m/sです。この値は温度や水圧によって変化します。通常の測定ではそれほど問題になりませんが、温度や圧力が大きく変化する海洋の長距離測定や、高圧高温の工業計測などでは音速の値に留意します。

液体の種類、混合物によっても音速は異なります。

### ▶ 固体中の音速

表1のように、固体は材料によって異なった音速を示します。硬くて軽いものは速くなります。

パルス・エコー法による板厚測定は音速がわからないと行えません。同じ鉄でも精錬法などでわずかに音速が異なりますし、同じプラスチックでも射出方向などの影響があります。逆に、音速測定から細かい物性の差を知ることができます。

### ● 拡散減衰と吸収減衰

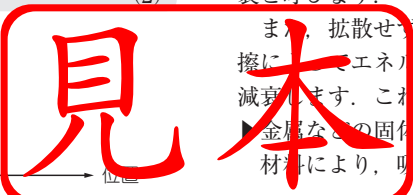
超音波を送信すると、伝搬するに従って広がるために強度が距離に応じて小さくなります。これを拡散減衰と呼びます。

また、拡散せざるも、超音波を伝える媒質の内部摩擦によってエネルギーを消費し、強度が距離に応じて減衰します。これを吸収減衰といいます。

▶ 金属などの固体中が最も減衰が小さい材料により、吸収減衰の度合いは大きく異なります。

表1 さまざまな材料の縦波音速の代表値

材料	縦波音速[m/s]	材料	縦波音速[m/s]
鋼鉄	5900	ガラス	5700
鋳鉄	4600	アクリル	2700
チタン	6100	ナイロン	2600
アルミニウム	6200	ポリスチレン	2300
真ちゆう	4400		



# シンプル超音波の測定器&等価回路

中村 健太郎 Kentaro Nakamura

超音波を扱うにはどの測定器が必要でしょうか。

本格的な実験を行うには、信号源のファンクション・ジェネレータ、パワー・アンプ、振動子の電流を測定する電流プローブ、超音波を測定するのに、空中なら計測用コンデンサ・マイクロホン、液体の中ならハイドロホン、固体振動ならレーザ・ドップラー振動計が必要です。トランスデューサの評価のためのインピーダンス・アナライザも欲しくなります。空中なら適当な吸音材、水中なら水槽も必要です。

しかし、これらプロの装備はなくても、身近なものでそこそこの実験ができるのが超音波の良いところです。本章では、なるべく手軽に準備できる方法を目的ごとにまとめます。また、電気等価回路の考え方と回路シミュレータの利用についても述べます。

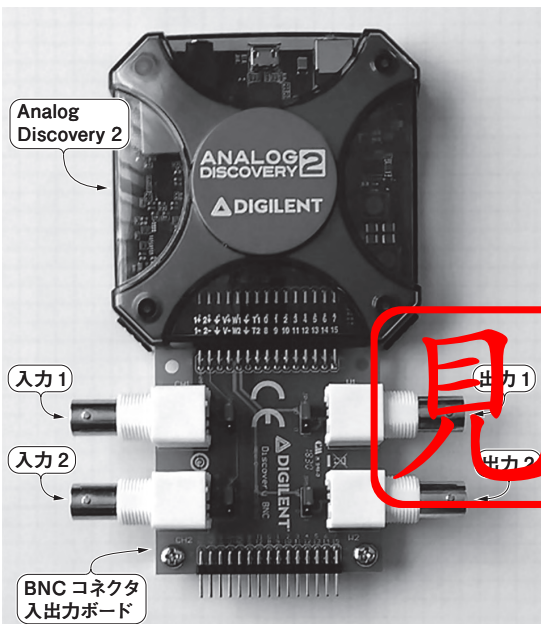


写真1 超音波はUSB接続の測定ツールAnalog Discoveryを使えば測れる

Analog Discovery 2 (Digilent) にBNCコネクタ入出力のボードを装着したもの。USBでパソコンに接続して使う。ファンクション・ジェネレータの機能もあるので、これだけで信号発生と観測ができる

## 基本の測定器…オシロスコープ

### ● 波形を見たい

空中超音波のユニットを買って、マイコンにつなげれば、すぐに距離を測定できます。しかし、これって超音波の実験でしょうか。

超音波の部分はブラックボックスになっているので、マイコンの練習問題です。超音波そのものを見るという前提では、やはり波形を観測するオシロスコープが欲しいところです。

### ● USB接続のオシロスコープで十分

超音波の実験のためのオシロスコープは、USBでパソコンに接続するような安価なもので十分です。

通常の超音波の実験では、空中で数百kHz程度まで、液体の中や固体の中の測定で10MHz、固体のパワー応用で100kHzまでが測ればよいので、数十MHzのアナログ帯域があればまずは十分です。パルス・エコー法の距離測定では、時間分解能やメモリ長が欲しくなることがあるかもしれませんが、初めは手元にあるもので進められます。

例えば、写真1に示すAnalog Discovery 2 (Digilent) ならば、ファンクション・ジェネレータの機能もあるので、これだけで信号発生と観測ができます。

もちろん、デスクトップのデジタル・オシロスコープでも、古いアナログ・オシロスコープでもかまいません。

## 空中の超音波の測定

### ● 計測用マイクは1/4インチか1/8インチを使う

各社から販売されている計測用コンデンサ・マイクロホンは、1/2インチとか1/4インチとか直径によってラインナップされています。

コンデンサ・マイクロホンの感度が一定となる上限周波数は、振動膜の共振周波数で決まります。直径が

# 測距センサを使った イチゴの吸液量測定

星 岳彦 Takehiko Hoshi

## 農業で距離を測りたくなる理由

植物の草丈、葉長、葉幅、莖や果実の直径などの長さ計測は、生育状態を把握するために大切です。ノギス、定規、メジャーなどで簡単に測ることができるので、昔から植物計測の項目として非常によく使われています。これらは人手の計測が主流で、方法としては簡単なのですが手間がかかり、連続して自動計測するのは意外と難しいのです。

本章では、ワンコインで買える超音波測距センサを使って、イチゴ栽培の養液の排水量計測に挑戦してみました(写真1)。

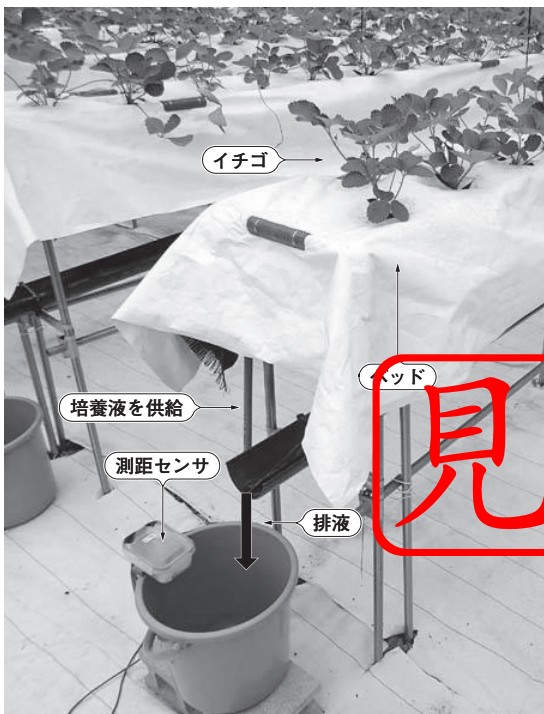


写真1 超音波測距センサを使ってイチゴ高設養液栽培の排水量計測に挑戦!

培養液の供給量と排水の差から、イチゴの吸液量を求める

## 農業で使える測距センサあれこれ

### ● その1: ビデオ・カメラ

ビデオ・カメラの画像を使って計測する方法が研究ではよく使われます。ただ、植物の茂みの中から目標とする点を抽出するのが難しく、昼間の直射日光による影や反射などの影響から夜間の暗視撮影まで環境が激変し、植物の栽培条件下で連続計測に適した画像を常に得るのは難しいです。また、安くなったとはいえ、それなりのコストがかかります。

### ● その2: 赤外線レーザー測距センサ

レーザー光を使った測距センサは0.01 mm程度の分解能で精密な計測が可能です。やはり数万円の投資が必要です。また、赤外線を使用するので、毛があるものを測定するとそこに結露した部分を含めて計測されてしまうなどといった課題もあります。

### ● その3: 超音波測距センサ

最近、簡単に使用できる超音波測距センサのモジュールが市販されるようになりました。HC-SR04(図1)は、1個300円程度から購入でき、2 cm~4 mの距離を測定することができます。40 kHzの超音波を使用していますので、半波長単位で反射波を検出できるとすれば、約2.1 mmの分解能で理論的に距離を計測可能です。この価格対性能は、農業で使用する低コストのセンサとしてかなり魅力的です。

## 今回の超音波測距回路

### ● ワンコイン超音波測距センサ HC-SR04

超音波測距センサHC-SR04の仕様を図1(b)に示します。5Vの単一電源で動作し、トリガとエコーのデジタル入出力信号線を使って計測できます。

タイミング・チャートを図2に示します。Trigピンを“H”→“L”にしたときに8波の超音波が送出されま

# 超音波×ラズパイ Pico! ミスト加湿器の製作

田口 海詩 Uta Taguchi

乾燥しやすい季節に便利なのが加湿器です。最近では超音波を用いて水分を霧状にする装置が安く入手できるようになってきました。そこで、火山が噴火するイメージを思い浮かべながら超音波加湿器を製作してみました。題して「大噴火ミスト・メカ」です。

## ラズパイ Pico 制御加湿器 「大噴火ミスト・メカ」

写真1に大噴火ミスト・メカの全体像を示します。難しそうなアプリケーションを製作する場合、簡単な要素に分解して技術の個別検討をしてから、それぞれの要素を組み合わせると、意外と簡単に実現できます。

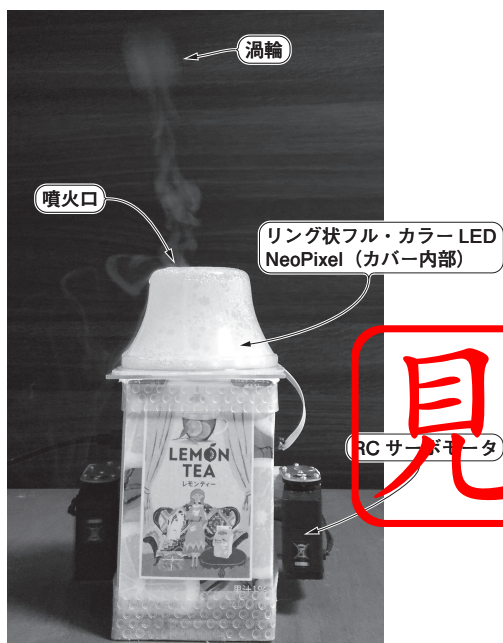


写真1 製作した超音波アトマイザ使用の加湿器「大噴火ミスト・メカ」  
一定の間隔で大噴火ミスト・メカの噴火口から空気砲を用いて渦状の霧(渦輪)を発生させる。条件が良ければ20 cmぐらいまで渦輪が継続するのが楽しい。ラズパイ Pico で制御

今回の製作は、

- 霧を発生させる「超音波を用いた噴霧器」
- 噴火を演出する「空気砲発生装置」
- 霧に光を当てて雰囲気を出す「NeoPixel(フル・カラー LED)制御」

の3要素に分解できます。

ここでは、それぞれの要素を個別に検討し、大噴火ミスト・メカを実現していきます。制御にはラズベリー・パイ Pico を使いました。図1に回路を示します。

## 製作1：超音波を用いた噴霧器

### ● 超音波で霧を発生させる超音波アトマイザ

超音波で霧を発生させるには、写真2に示す超音波アトマイザ(Ultrasonic Atomizer)と呼ばれる部品を使用します。ピエゾ振動子で水分を10  $\mu\text{m}$ 程度の水滴に分解するものです。ピエゾ振動子の中心部分には、細かな無数の穴が開いており、裏面から水を吸い取り、表面で10  $\mu\text{m}$ 程度の水滴に変換して放出します。

超音波アトマイザから写真3(a)のように霧を発生させるためには、いくつかの条件を満たさなければなりません。

#### ▶霧発生条件1

超音波アトマイザの裏面は常に水分に接触させておく必要があります。写真3(b)に示すようなフェルト

見本

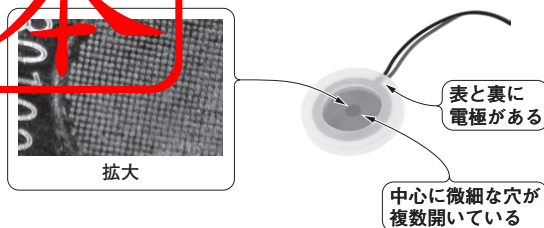


写真2 キー部品…水分を10  $\mu\text{m}$ 程度の水滴に分解する超音波アトマイザ  
ピエゾ振動子でできており、表面と裏面の電極の間に共振周波数の電圧を加えることで、水分を細かい水滴に変換できる

# 音響で空気中/水中/固体中を調べるメカニズム

小木曾 泰治 Yasuharu Ogiso

超音波の利用方法はさまざまです。音が反射する性質を利用して、内部構造など直接目視することができない部分も分析できるため、魚群探知機、超音波流量計、医療診断装置などの、さまざまな分野で

応用されています。

本章では、超音波計測の原理に触れたあと、超音波の反射を利用した機器のしくみを紹介します。

## 超音波計測の基本メカニズム

### その1：反射時間を利用する

● すべての基本…反射時間を利用して距離を知る

空気中では可聴音が空気の振動で伝わったり、壁などで反射したりするのと同じように、超音波も媒質の振動により伝搬したり、境界面で反射したりします。

可聴音が反射する現象といえばやまびこが有名です(図1)。やまびこが返ってくる時間を測ることで山までの距離がわかります。

例えば、2秒後にやまびこが返ってきたとすると、音の伝わる速度は空気中では約340 m/sなので、次式より山までの距離が求められます。

$$\frac{340[\text{m/s}] \times 2[\text{s}]}{2} = 340[\text{m}] \dots\dots\dots (1)$$

この340 mが山までの距離になります。2秒は往復の距離なので、片道の距離を出すために2で割っています。このように、音が反射する性質を利用することで、距離が測れます。

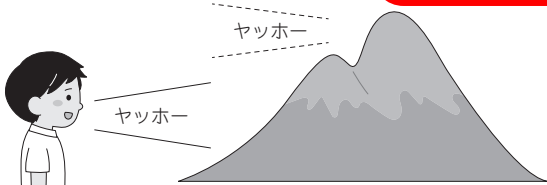


図1 やまびこが返ってくる時間を測ることで山までの距離がわかる

超音波でも同様の計算で距離が求められます。超音波振動子から発信した超音波は、観測物で反射され、再び振動子で受信します。超音波の発信から受信までの往復時間を距離に換算し、深度(深さ)として表示します。

また、水中での音速は約1500 m/sになります。0.02秒後に反射の応答があった場合は、次式で距離が求められます。

$$\frac{1500[\text{m/s}] \times 0.02[\text{s}]}{2} = 15[\text{m}] \dots\dots\dots (2)$$

観測物まで約15 m離れていることになります。

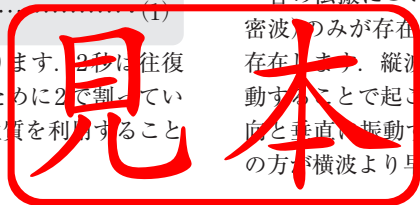
● 音の縦波と横波と伝搬速度

音の伝搬については、気体中と液体中では縦波(疎密波)のみが存在し、固体中では縦波と横波の両方が存在します。縦波とは媒質が波の進行方向と平行に振動することで起こる波で、横波とは媒質が波の進行方向と垂直に振動することで起こる波です(図2)。縦波の方が横波より早く伝搬します。

● 屈折と反射

図3に示すように、音速が違う固体の2層構造内に斜めに超音波(縦波)を伝搬させる場合、境界面で屈折して横波が発生します。入射角と屈折角、音速との関係は、次式のように表されます。

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \dots\dots\dots (3)$$



# 力学振動と電気をつなぐ大黒柱 圧電セラミックス入門

稲葉 克文 Katsufumi Inaba

超音波は、自動車や医療、民生分野、工業分野に至るまで多くの分野で使用されています。具体的には、自動車のバック・ソナー、超音波加湿器、超音波洗浄機、超音波診断装置、超音波加工機、魚群探知機、液体流量計など、書ききれないほど多くの製品で利用されています。

超音波を発生する素子には、圧電セラミックスやフェライト(磁性セラミックス)、光音響素子などがあります。ここでは、多くの製品で使用されている圧電セラミックスについて説明します。

## 圧電セラミックスの基礎知識

- **機械エネルギーと電気エネルギーを相互に変換する**  
圧電セラミックスは、機械エネルギーを電気エネルギーに変換したり(図1)、電気エネルギーを機械エネルギーに変換したり(図2)する素子で、圧電体とも呼ばれます。

圧電体に圧力や振動を加えると電気が発生し(圧電効果)、逆に電気を加えると圧電体が伸び縮みます(逆圧電効果)。このエネルギー変換を利用して、超音

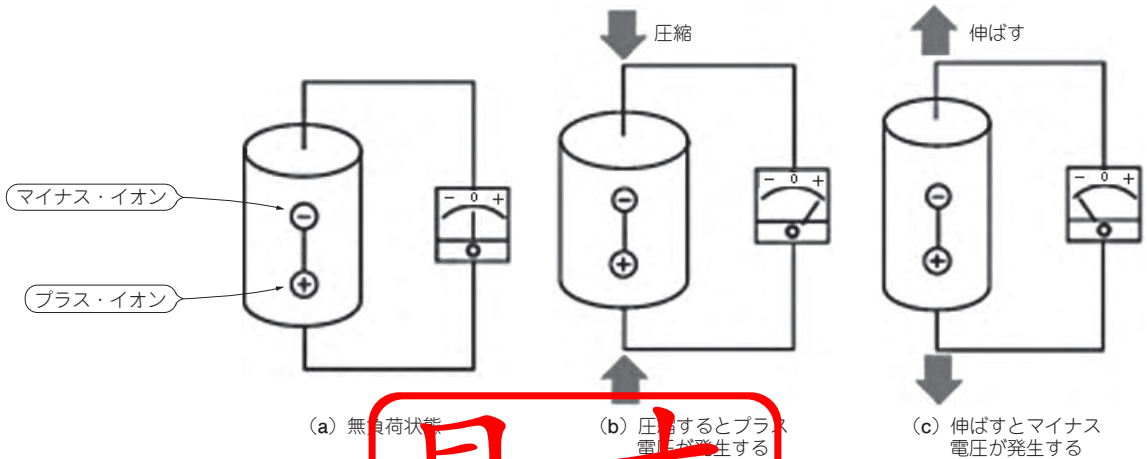


図1 機械エネルギーから電気エネルギーへの変換

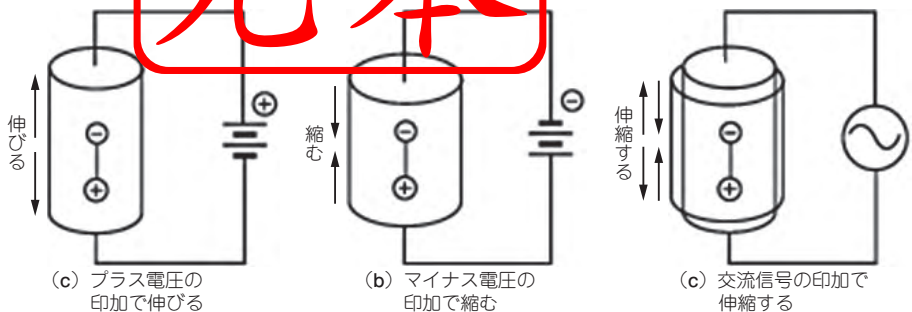


図2 電気エネルギーから機械エネルギーへの変換

見本

# 非破壊検査を 非接触で高速に

大隅 歩 Ayumu Osumi

非破壊検査は社会の安全性から品質の評価までを行う非常に重要な検査です。非破壊検査の対象は、非常に幅広く、工場プラント・橋梁・トンネルなどの大型構造物、航空機部品や電車車両・自動車など、書ききれないほどあります。

一般的な非破壊検査では、超音波振動子と被検体の間に接触媒質を塗布することで効率良く超音波が透過します。一方、非接触方式の空中超音波(空气中を伝わる超音波)では、空気と被検体の音響インピーダンスの差が非常に大きいため、ほとんど被検体で反射してしまいます。しかし、非常に大きな音圧の空中超音波を放射して、発生したわずかな透過波を調べることで、欠陥の有無がわかるようになりました。

従来不可能とされていた空中超音波による非破壊検査は、実用可能な技術になりました。一方で、高速化については、まだまだ改良の余地があります。

本章では、筆者が提案する空中超音波による高速非接触非破壊検査と、それを実現するデバイスである空中超音波フェーズド・アレイおよび駆動システムの概略について紹介します。

## 超音波検査の各手法

非破壊検査にはさまざまな手法がありますが、可搬性の良さは超音波検査に一日の長があります<sup>(1)</sup>。また、超音波検査は医療でもおなじみだと思います。

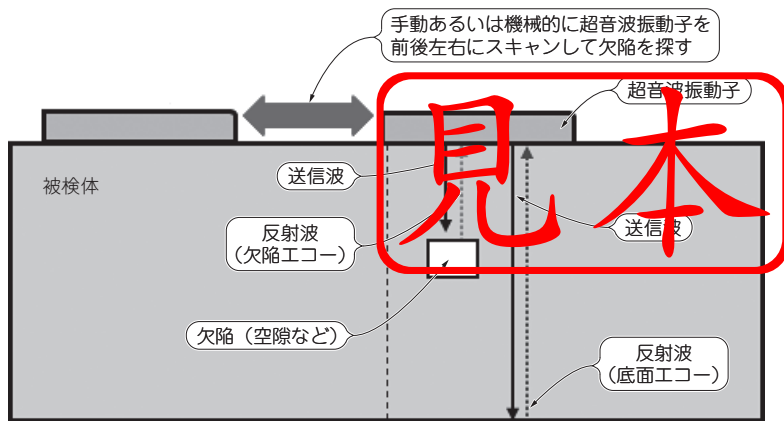
### ● 一般的な超音波検査

最も一般的な超音波検査の手法を図1に示します。この方法は超音波振動子から超音波を被検体に送信し、欠陥部からのエコーを受信することで欠陥の有無と深さを判断する方法です<sup>(2)</sup>。パルス・エコー法とも呼ばれます。

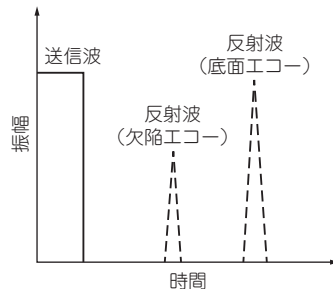
被検体の欠陥を探るときは、手動あるいは自動ステージなどで超音波振動子を機械的に走査して行います。この方法はシンプルで良いのですが、視覚的に欠陥の広がりが見えにくいデメリットがあります。

### ● フェーズド・アレイを利用した超音波検査

視覚的に欠陥の広がりが見えにくい、という一般的な超音波検査のデメリットを解決したのが、図2に示



(a) 被検体の中にある欠陥を超音波振動子で探る



(b) 超音波振動子の送受信波形

図1 一般的な超音波検査のしくみ

超音波振動子から超音波を被検体に送信し、欠陥部からのエコーを受信することで欠陥の有無と深さがわかる

このPDFは、CQ出版社発売の「トランジスタ技術SPECIAL No.164」の一部見本です。

内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧ください。

内容 <http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MSP/MSP202310.html>

購入方法 <https://www.cqpub.co.jp/order.htm>

**CQ出版社**

見本