

音響センサ

東京工業大学 科学技術創成研究院

中村 健太郎

1 音とは何か

ヒトに聞こえる音は空気などの振動によるものであり、その振動数（周波数）は1秒間に20から20 000回（20 Hz～20 kHz）である。空気の振動は圧力の変動を伴うので圧力変化が伝わる波と考えることもでき、空気中の代表的な音響センサであるマイクロホンはこの周波数帯の圧力センサであるともいえる。ヒトに聞こえる周波数の範囲を可聴域といい、これよりも低い周波数の圧力変化は超低周波音などと呼ばれ、コンプレッサなどの圧力機器に加え火山などの自然現象でも発生する。一方、可聴域よりも高い周波数の音は超音波と呼ばれ、人には聞こえないがさまざまなものから発生しているし、コウモリのように超音波を使う動物もいる。イヌなどの小動物には人間よりも高い周波数の音を聞くことができるものが多い。距離センサは積極的に超音波を出している。なお、生物の聴覚はどの周波数でも同じ感度を示すわけではなく、ヒトの場合、会話で使われる300 Hz～4 kHzくらいで感度が高くなっている。電話は主にこの周波数帯を伝送できるように設計されている。

音による圧力変化の大きさを音圧と呼び、圧力の単位Paで測定する。ヒトは20 μ Paという小さな圧力変化から100 Pa程度の大きな圧力変化まで、実に6～7桁の音圧範囲を音として聞くことができる。この広い範囲を表すために、最小可聴値の20 μ Paを基準として、対数であるdBで表示することが多い。ヒトの可聴範囲の幅（ダイナミックレンジ）は120～140 dBに及ぶことになり、これはCDなど16ビット

のデジタルオーディオの94 dBよりも大きな値となっている。第1表に身のまわりの音とそのおよその音圧についてまとめた。

第1表 さまざまな可聴音の音圧

	音圧 [Pa]	音圧レベル [dB]
ジェットエンジン等 (距離50 m)	20	120
地下鉄車内	0.5	90
雑踏	0.2	80
会話(距離1 m)	0.02	60
ささやき声(距離1 m)	0.000 2	20
最小可聴音	0.000 02	0

一方、音は液体中や固体中でもよく伝わる。むしろ伝搬減衰は液中や固体中のほうが気体中よりも小さい。これは同じ波動現象である光や電波にはない特徴であり、魚群探知や潜水艦探知に10 kHzから数100 kHzまでの音や超音波が使われるのは周知のとおりである。人体の音響的性質は水に近いので、体の中を見る医用診断に超音波を用いた装置が広く使われている。配管や鉄道の線路や車輪、回転軸などの金属部材の非破壊検査にも超音波が利用されている。医用超音波や非破壊検査では数MHzから10 MHz程度が使われる。材料の微細な評価には波長の短い100 MHz以上の超音波を用いることもある。また、固体中では振動方向が伝搬方向と直交する横波も伝搬するので、横波を用いた非破壊検査も行われている。また、スマートホンなどの無線機器では高周波の振動を利用したフィルタ素子やアンテナ切換器が多用されている。

以上のように、「音響センサ」といった場合、

マイクロホンのように音を検出するデバイスそのものを指す場合と、音や超音波を用いて別の物理量、化学的性質などを測定あるいは検出するセンサシステムを指す場合があり、広範な技術分野を構成している。本稿では、物理現象としての音の性質、音をとらえるデバイスを中心に解説し、一部は音・超音波を用いた測定にも言及する。

2 音の性質

音は前述のように、光や電波が伝わりにくい媒質中でも伝わる性質を有しているが、伝わる速度（音速）が光や電波に比べてずっと遅いことも大きな特徴である。このことから、反射波が戻ってくるまでにかかる時間の計測が容易であり、前述の計測、応用の多くがこの性質を利用している。

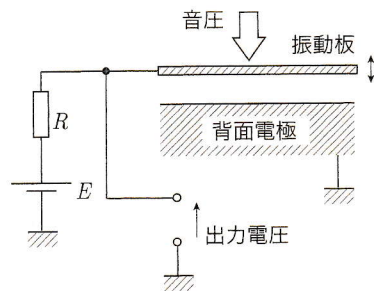
一方、音を含めた波動の伝わり方はその波長により大きく変わる。すなわち波長が短くなるほど直進性が高まり、波長が長いと回折（回り込み）が起きやすくなる。光（波長が $1\mu\text{m}$ 以下）が障害物の裏に影をつくるのに対し、可聴域の音では衝立の裏にも回り込む。周波数と波長の積が音速であるので、音でも周波数が高くなると波長が短くなり、この回り込みは相対的に小さくなる。超音波を用いた計測ではその直進性を利用している。音速は媒質の弾性的性質と質量で決まる。硬いものほど音速が速く、質量の大きい物質ほど音速が遅い。このことから音速

は材料の物性を表すものでもある。第2表に、いくつかの場合について、空中、水中、固体中での音速と波長を電磁波とともにまとめた。

3 代表的な音響センサ

これまで述べたように、一口に音や超音波といっても、周波数や応用によってさまざまであり、検出にもいくつかの方式が存在する。

空中の可聴音の検出を行うセンサはいわゆるマイクロホンである。1台のスマートホンで複数のマイクロホンを備えている場合が多いので、身の回りには多数のマイクロホンが存在する。ノートパソコンにもマイクロホンは内蔵されており、インターネット通話などに使われている。これらのマイクロホンはその100%がコンデンサ型のマイクロホンである。コンデンサ型マイクロホンは、第1図のように、コンデンサ（キャパシタ）の平行電極の片方を振動板としたもので、音圧に応じて振動板が変位すると電気容量が変化することを利用して、容量変化を電

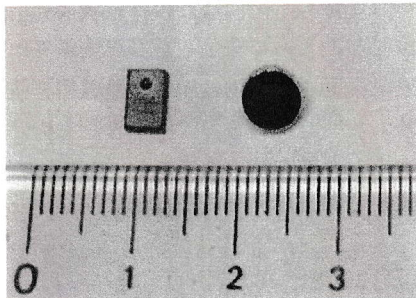


第1図 コンデンサ型マイクロホンの基本構造

第2表 音・超音波と電磁波の伝搬速度と波長

波の種類	振動方向	伝搬速度 [m/s]	波長
可視光・近赤外線	横波	3×10^8	$0.4 \sim 2.0 \mu\text{m}$
マイクロ波 (3~30 GHz)	横波	3×10^8	$10 \sim 100 \text{ mm}$
可聴音 (空中 20 Hz ~ 20 kHz)	縦波	340	$17 \text{ mm} \sim 17 \text{ m}$
可聴音 (水中 7 kHz)	縦波	1 500	210 mm
超音波 (空中 40 kHz)	縦波	340	8.5 mm
超音波 (水中・人体 5 MHz)	縦波	1 500	0.3 mm
超音波 (鉄 2 MHz)	縦波	5 800	2.9 mm
超音波 (鉄 2 MHz)	横波	3 000	1.5 mm
超音波 (水晶 100 MHz)	縦波	6 000	$60 \mu\text{m}$

圧変化として取り出すには直流バイアス電圧を常に加えておく必要がある。このために、常に帯電したエレクトレット膜を用いたエレクトレット・コンデンサ型マイクロホンが小形機器には広く使われていた。しかし、最近では、半導体製造技術に基づくMEMS（微小電気機械システム）マイクロホンに置き換えられるようになってきた（第2図）。MEMSマイクロホン（シリコンマイクとも呼ばれる）は、集積回路技術と組み合わせて、バイアス電圧の発生回路やバッファアンプを内蔵したものでも数mm角のパッケージに収まっている。さらに、アナログ・デジタル変換回路も内蔵したデジタル出力のMEMSマイクロホンも普通になってきた。これは表面実装型のパッケージにより、機器への組み込みを自動機に任せられるのと、デジタル出力になったため実装場所の自由度が増し、後続回路を省略できるためである。MEMSマイクロホンは音響センサの代表例となっている。



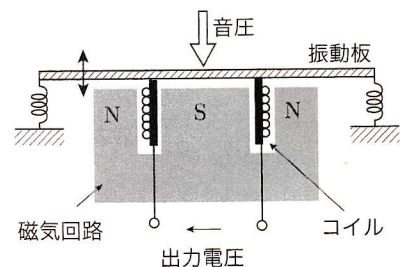
第2図 MEMSマイクロホン（左）とエレクトレット・コンデンサ型マイクロホン（右）

精密計測用のマイクロホンや騒音計のマイクロホンにもコンデンサ型が用いられる。この方式では、音圧に対する出力電圧（音圧感度）が、振動膜の共振周波数を上限として、それよりも低い周波数域では平坦な周波数特性を示すためである。この方式によると静圧にも応答するため、音響用途では、背室と周囲が通気するようにして、可聴域以下の周波数には応答しない構造としていることが多い。計測用マイクロホンでは、1/2インチ型、1/4インチ型といったように、その口径で区分している。口径が小

さく振動板が小さくなると振動板の共振周波数が上がるため、口径の小さいマイクロホンのほうが、上限周波数が高くなっている。一方、同じ音圧に対する振動膜の変位量は小口径のものでは小さくなるので、感度が低下する。超音波用では1/8インチのもので200 kHzまでカバーしているものもある。マイクロホンの感度は1 Paの音圧が印加されたときに何Vの電圧を出力するのかで表す。さらに、1 Paで1 Vの電圧を出力するときを0 dBとしてdBで感度表示する場合が多い。製品組み込み用の小形のコンデンサ型マイクロホンで、-40 dB程度か、ポストアンプ内蔵のもので-20 dB程度であり、マイクロホン出力は数mVかそれ以下になる。

感度以外に指向性もマイクロホンの重要な特性である。波長に比べて口径が十分小さければ無指向性になる。このことは、高周波に対しては指向性をもつことを意味する。

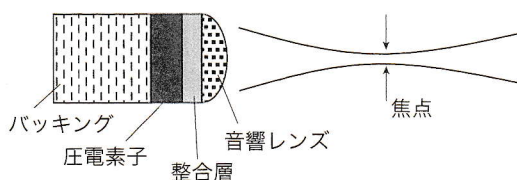
一方、振動板にコイルを取り付け、永久磁石と組み合わせて誘導起電力を利用するマイクロホンがダイナミック型マイクロホンである（第3図）。コイル巻線が永久磁石のギャップに差し込まれており、振動板の動きに応じて巻線が磁界を切る方向に動くので電圧が発生する。これはダイナミックスピーカと逆の動作であり、基本構造は同じである。この方式のマイクロホンでは、振動板の振動速度に比例した出力電圧が生じるので、コンデンサ型とは違い、振動板の機械共振周波数を使用周波数帯域の下限に設定している。ダイナミック型は頑健な構造であるが、磁気回路のためにマイクユニットはコン



第3図 ダイナミック型マイクロホンの基本構造

デンサ型に比べて大きくなりやすい。ボコーラマイクなどとして使われることが多く、小形機器組み込み用としてはほとんど例をみない。

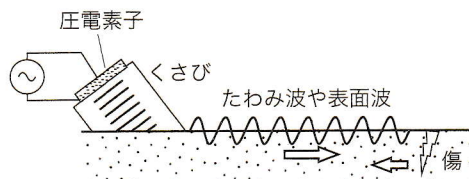
水中や固体中を伝わる超音波の検出には圧電型が利用されることが多い。高周波で利用する圧電型音響センサは、振動膜を用いずに圧電素子の固体振動を利用する。圧電現象によると圧力を電圧に変換できる。水晶などの結晶は顕著な圧電性を示すが、セラミクス材料であるチタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) はより強い圧電性能を有する。非破壊検査用や医用診断のための数MHzから20MHzまでの超音波トランスデューサにはPZTがよく使われている。また、ポリフッ化ビニリデン (PVDF) やその誘導体の圧電高分子材料も数MHzから数10MHzの超音波を測定するために利用されている。PVDFなどの高分子材料は音響インピーダンスがPZTなどの圧電セラミクスよりも水に近いので、水中で超音波を測定する用途に使われる。セラミクス材料の場合には、第4図のように、水との間での反射を防ぐための音響整合層を設けることが多い。また、素子背面での反射を防ぐために、バッキングと呼ばれる吸収体を置き、パルス長が長くならないようにすることもよく行われる。焦点を結ぶように音響レンズを使うこともある。音響レンズも光学レンズと同様に周囲媒質とレンズ材料の伝搬速度の違いを利用しているが、超音波の場合、多くのレンズ材料の音速は周囲媒質である水よりも速いことが多く、その場合は凸レンズと凹レンズの役割が光学レンズと逆になることに注意する必要がある。また、超音波の場合、レンズや放射面が波長に比べて光学レンズの場合のように



第4図 圧電超音波トランスデューサの構造

大きくないので、波動効果が顕著に現れ、幾何学的な焦点と実際の集束点がずれることがある。

板状のものやパイプなどの非破壊検査で、板やパイプのたわみ波や表面波を起こして、トランスデューサから離れた位置の傷などを検出する方法がある。これには第5図のようなくさび形トランスデューサが用いられる。くさびの音速と板やパイプのたわみ波などの音速が異なるので、くさびを傾けることで接触面上において波長が合うようなくさびの角度が設定されると励振効率がよくなる。この条件が満たされるようなくさびの材料を選ぶ必要がある。

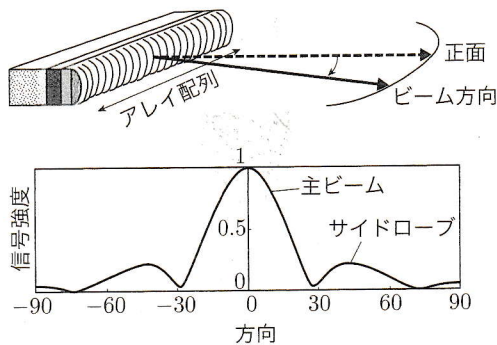


第5図 くさび形トランスデューサ

このほかにも、金属などの非破壊検査用途では、コイルによって発生した高周波磁界によって超音波振動を対象物に起こす電磁超音波という方法も使われている。コイルを対象物に接触させなくとも超音波の送受信ができるという特徴を有している。

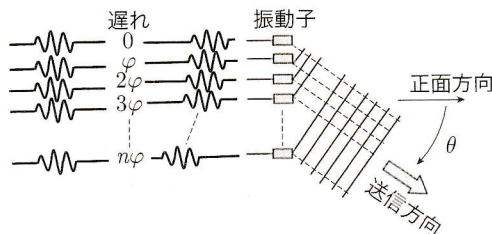
4 アレイセンサ

超音波を用いた非破壊検査や医用診断では、パルス波を送波し、反射波が戻ってくるまでの時間を位置に読み替えている。反射波は音響インピーダンスに差がある部分で発生するので、その部分が可視化される。超音波医用診断装置では100~200以上の微小な圧電素子からなるアレイトランスデューサを用いることで2次元的な画像を得ている。第4図のトランスデューサを第6図のように直線状に配列させたものが使われている。たくさん並べた素子を同時に駆動すると超音波の指向性は鋭くなる。また、連続駆動すると図中のように正面方向以外にも小さなピーク (サイドローブ) が出るようになる



第6図 アレイ振動子構成

素子ごとやグループごとに送受信を行う方式や、素子間に位相差を設けて送受信することで視野方向を切り換えるフェーズドアレイ方式(第7図)が活用されている。



第7図 アレイ振動子による位相制御によるビームステアリング(フェーズドアレイ)

最近では非破壊検査にもフェーズドアレイ方式が使われるようになってきた。また、半導体微細加工技術を用いたCMUT(静電容量型MEMS超音波トランスデューサ)や、さらに圧電薄膜技術も組み合わせたPMUTと呼ばれるトランスデューサの開発も医用応用を中心に進められている。

5 まとめ

本文でも述べたように、音や超音波の利用範囲は多岐にわたっており、周波数や用途によっていくつかの異なった原理の音響センサ(音を検出するセンサ素子)が開発されてきた。今回、紹介しなかった方式に、リボンの振動を利用したベロシティマイクロホンや、かつての黒電話にも使われていたカーボンマイクロホンが

ある。古いマイクロホンについてはNHK放送博物館のwebサイト⁽¹⁾が参考になる。

一方、音や超音波を用いて距離や速度、風速などを測定する手法、音以外の物理量や化学量をセンシングするシステムはさまざまなものが開発されているが、これについてはほとんど紹介できなかった。材料表面の微細構造を観察する超音波顕微鏡から大気の状態や海洋の温度分布を測定するトモグラフィ技術など、 μm レベルから1000 kmのオーダの用途まで計測の応用が広がっている。自動車のバンパーに付けられている超音波センサは、数十kHzの超音波を送受信して周囲を監視している。また、カーナビゲーション、カメラの手振れ防止、ロボットなどに超音波振動を使ったジャイロデバイスが使われている。振動子や表面波素子を用いた化学センサ、においセンサなど測定する量のバリエーションも多岐にわたる。

音響現象、音響センサに興味をもたれた読者のために入門のための文献として^{(2), (3)}を示す。

[参考文献]

- (1) <http://www.nhk.or.jp/museum/book/kiki100sen01.html>
- (2) 鈴木他:「音響入門シリーズ音響学入門」, コロナ社, 2011.
- (3) 日本音響学会編:「音響キーワードブック」, コロナ社, 2016.



ホームセキュリティ

セキュリティのABCから導入実践まで

竹中新策 著

B6判 302ページ

定価=本体2,000円+税

ISBN:978-4-485-57500-0

「ホームセキュリティ」のニーズに対応して、防犯・防災・救急システムを中心にまとめてあります。理解しやすく、それでいて実際に導入するにあたっての実務書としてお読みいただけるよう、学術的な専門用語はできるだけ避け、イラスト・表・応用図・写真などを多く取り入れてあります。