

# ま え が き

マイクロホンやイヤホンの歴史は電話機の発明された19世紀末から始まる。スピーカはやや新しいが、やはり100年の歴史をもつといてよい。しかし、こうしたオーディオトランスデューサを構成するための実用技術はここ40年ほどの間に激変した。現在広く供給されている製品は、以前の汎用品とは大幅に異なる技術、産業の産物となっている。

マイクロホンは1970年代のエレクトレットコンデンサマイクロホンの爆発的な普及により従来のマイクロホンとは別の分野の、むしろ電子部品に近い工業製品となった。さらに21世紀初頭に商品化されたシリコン単結晶上にIC技術で創成するMEMSマイクロホンは携帯電話機用として世に受け入れられ、マイクロホンの技術をさらに変革している。

やはり1970年代、民生用イヤホンでは従来の密閉構造から脱却した開放形ヘッドホン（実際には完全開放ではなく、IEC規格ではControlled leakageと呼んでいる）の導入で基本的な技術が変化した。さらに1980年代に電話機へのIC導入とともに実用化されたセラミック圧電イヤホンが新風を吹き込んだ。21世紀になって普及の始まったマイクロホン内蔵のノイズキャンセルヘッドホンも産業界で大きなシェアを占める<sup>すうせい</sup>趨勢である。

スピーカでは20世紀半ばにLPレコード、Hi-fiオーディオシステムの普及に応じた改良があり、その後20世紀最終期の携帯電話機の普及に対応した超小形化のための設計思想の拡張により新しい世界が開けた。これを可能にしたのは高性能のネオジム磁石の導入だった。

こうした変遷を見ると、製品の技術としては改良というより断絶に近い激変が見られる。しかし、トランスデューサに用いられている物理的な基本原理、

いわゆる電気音響変換現象には、真空管から半導体素子への交代などとは異なり大きな変化がない。実際、競争に勝って生き残っているのは、古典的な基本原理に則って合理的に設計された製品であり、物理現象に由来する原理的な設計条件を遵守していないものは、実用品として生き残ることができないのである。

本書ではこうしたオーディオトランスデューサのハードウェアの技術に着目して、下記のような事項を記述する。

- ・ 基本事項を略記した1章に続いて、実際に設計、製作されている現代の種々のオーディオトランスデューサの構成を2章で解説する。
- ・ 次に、製品技術の基盤となる物理現象とそれにより課せられる原理的な設計条件を3章～5章で明らかにする。
- ・ 続いて、トランスデューサに密接に関連する音場、音響現象、およびこれを利用した実際のトランスデューサについて6章～9章で解説する。
- ・ 次に製品設計法の実例を10章で、また特性の測定技術を11章で概観する。最後に12章で数種の応用システムとその産業に言及する。
- ・ 付録では実験データの解釈の手段として、トランスデューサの振動系の種々のモデルの共振周波数を概説する。

本書の記述はトランスデューサの設計者への的確な情報提供のみならず、ユーザとなるオーディオシステム技術者や放送、録音分野の現場技術者にも数ある製品からの的確な選択を行うための知識を提供できるものとする。

本書を著すに当たっては、日本音響学会の担当委員会の<sup>まさきしのぶ</sup>正木信夫博士、<sup>ちさき</sup>菅木<sup>よしふみ</sup>禎史博士、岡本学博士ほか各委員殿に種々のご助言、ご鞭撻をいただいた。厚くお礼を申し上げる次第である。

2013年1月

大賀 寿郎

# 目 次

## 1. オーディオトランスデューサの基礎知識

1.1 物理現象としての音とその定量化	1
1.2 人の耳に聞こえる音	5
1.3 トランスデューサで対象とする音	6
1.4 測定, 分析の周波数	7
1.5 オーディオトランスデューサの種類と機能	8
引用・参考文献	11

## 2. 種々のオーディオトランスデューサ

2.1 磁界を用いるトランスデューサ	12
2.1.1 動電変換器	13
2.1.2 電磁変換器	18
2.2 電界を用いるトランスデューサ	23
2.2.1 コンデンサ変換器	23
2.2.2 圧電変換器	32
2.3 電気抵抗の変化を用いるマイクロホン	44
引用・参考文献	49

## 3. トランスデューサの機械音響振動系と回路

3.1	1自由度の機械振動系	51
3.2	振動系の制御方式	55
3.3	1自由度の音響振動系	57
3.4	機械インピーダンスと音響インピーダンス	59
3.4.1	機械インピーダンス	60
3.4.2	3種の音響インピーダンス	60
3.4.3	断面積の異なる管の接続	63
3.4.4	機械音響回路と電気回路とのアナロジー	65
3.5	機械音響回路の実例	66
	引用・参考文献	72

## 4. 電気音響変換器の理論と定量化

4.1	磁界を用いる変換器	73
4.1.1	基本方程式	74
4.1.2	モーショナルインピーダンス	79
4.1.3	実例：ダイナミックスピーカの電気特性	81
4.2	電界を用いる変換器	84
4.2.1	基本方程式	84
4.2.2	モーショナルアドミタンス	89
4.2.3	実例：セラミック圧電トランスデューサ	92
4.3	基本方程式のまとめ	93
	引用・参考文献	94

## 5. 感度と周波数特性


5.1 感度の定義	97
5.1.1 マイクロホンの感度	98
5.1.2 スピーカ, イヤホン, ヘッドホンの感度	100
5.2 磁界を用いるトランスデューサの感度の解析	101
5.2.1 直接放射形動電スピーカ	101
5.2.2 動電および電磁イヤホン	103
5.2.3 動電および電磁マイクロホン	105
5.3 電界を用いるトランスデューサの感度の解析	106
5.3.1 コンデンサマイクロホン	106
5.3.2 圧電イヤホンと圧電スピーカ	108
5.4 電気抵抗変化マイクロホンの感度の解析	110
5.5 トランスデューサの振動系の制御方式と共振周波数 — その1	111
引用・参考文献	112

## 6. トランスデューサの音場と音響放射

6.1 自由音場	113
6.1.1 平面波	113
6.1.2 球面波	117
6.2 呼吸球と点音源	119
6.3 無限大バフル上の音源	123
6.4 室内音場と拡散音場	127
6.4.1 音波の反射と吸収	127
6.4.2 波動音響学的な解析と残響時間	130
6.4.3 幾何音響学的な解析	133
6.4.4 定常状態	135
引用・参考文献	137

 **7.** 音波の伝送 

7.1 一様断面の管の中の音場	138
7.1.1 振動板による駆動	138
7.1.2 空気中の音圧による駆動	143
7.2 特別な条件の管	146
7.2.1 波長より短い音響管	146
7.2.2 波長に比べ太い管	147
7.3 ホーン	149
引用・参考文献	153

 **8.** 音波の反射と回折 

8.1 球形のエンクロージャ	154
8.2 円筒の端面	157
8.3 直方体の箱	161
引用・参考文献	162

 **9.** 多点送受音と指向性の制御 

9.1 二つのマイクロホンの出力電圧の加減算	163
9.2 音圧傾度マイクロホン	166
9.3 指向性マイクロホンの構成	170
9.4 騒音抑圧マイクロホン	172
引用・参考文献	174

## 10. オーディオトランスデューサの設計技術

10.1	指向性マイクロホンの周波数特性の制御	175
10.2	音楽用ヘッドホンのバラエティ	177
10.3	トランスデューサの振動系の制御方式と共振周波数 — その2	184
10.3.1	選択すべき制御方式のまとめ	184
10.3.2	使いやすい制御方式は何か	185
10.4	事例1: コーンスピーカとそのエンクロージャ	187
10.5	事例2: 電電公社の電子化電話機用トランスデューサ	195
	引用・参考文献	202

## 11. オーディオトランスデューサの測定

11.1	測定のための音響環境	204
11.1.1	自由音場を得るための無響室	204
11.1.2	拡散音場を得る方法	206
11.2	測定のためのデバイス	208
11.2.1	マイクロホンと人工耳	208
11.2.2	スピーカの音響負荷と人工口	212
11.2.3	ヘッドアンドトルソシミュレータ	215
11.3	感度と周波数レスポンスの古典的な測定	216
11.3.1	スピーカの測定システム	218
11.3.2	マイクロホンの測定システム	222
11.3.3	ヘッドホン, イヤホンの測定システム	223
11.4	周波数レスポンス測定のための信号	225
11.4.1	正弦波の周波数掃引	225
11.4.2	ランダムノイズ信号	227
11.4.3	ランダムノイズの周波数補正測定	229
11.5	伝達関数またはインパルスレスポンスの測定	231

11.5.1	正弦波のゆっくりした周波数掃引	232
11.5.2	インパルス信号の繰り返し	233
11.5.3	ランダムノイズ信号	233
11.5.4	TSP 信号 (スウェプトサイン信号)	235
11.6	コーンスピーカの振動部の定数の測定	239
11.7	可逆変換器の相互校正	241
	引用・参考文献	243

## 12. オーディオトランスデューサを用いる音響システム

12.1	オーディオ再生システム	245
12.2	アナログ電話機	251
12.3	ノイズキャンセルヘッドホン	255
12.4	労働集約産業から設備産業へ	257
12.4.1	マイクロホン産業の変容：一つの例	257
12.4.2	産業界と研究の世界との乖離	259
	引用・参考文献	261

## 付 録

A.1	弦の振動	262
A.2	膜の振動	265
A.3	まっすぐな棒のたわみ振動	268
A.4	円形の板のたわみ振動	271
A.5	中心に剛体部をもつ環状円形板の対称たわみ振動	274
A.6	薄く浅い球殻のたわみ振動の最低共振周波数	276
	引用・参考文献	278

索 引		279
-----	--	-----



# 1 オーディオトランス デューサの基礎知識

本書で対象とするのはマイクロホン，スピーカ，ヘッドホンなど，人の耳に聞こえる周波数（高さ），音量（大きさ）の音の信号と電気信号との仲立ちをするデバイスである。こうした信号を**オーディオ信号**（audio signal），**可聴信号**（audible signal）などと呼ぶ。また，こうした用途のデバイスを**変換器**（transducer），**トランスデューサ**（transducer）<sup>†1</sup>，または**電気音響変換器**（electroacoustical transducer）と総称する。

この章では，まず本書で取り扱うオーディオ信号の性質を概観し，また必要な物理量とその尺度の知識も列記する。

次に本論の入り口として，変換器を基本機能で分類し，その定義と名称を整理する。

## 1.1 物理現象としての音とその定量化

### 〔1〕音とは何か

音は空気中のほか水中などいろいろの環境で存在する。本書では音楽，音声，環境音といった人に聞かれる音を対象とする変換器を述べるので，考慮する音も空気中の音に限ることとする<sup>1), 2) †2</sup>。

---

†1 変換器とトランスデューサとは本来同義語だが，わが国の技術の世界では多少区別して用いられているようである。本書ではデバイスそのものを指すときはトランスデューサ，抽象概念を表すときは変換器と呼ぶことにする。

†2 肩付番号は各章末の引用・参考文献を示す。

## 2 1. オーディオトランスデューサの基礎知識

音波は媒質（空気）の粒子が音波の進行方向に平行に運動することにより生じる空気の粗密，すなわち縦波（longitudinal wave）として伝わると理解される。密の部分では圧力が高く，疎の部分では低くなる。一定の高さの音波ではこうした変化の基本要素が一定の時間長ごとに繰り返される。これを**周期**（period）と呼ぶ。単位は s [秒] である。また，1 周期の伝搬距離を**波長**（wave length）と呼ぶ。単位は m である<sup>†1,†2</sup>。

音波は大気圧を中心とする圧力の増減として伝わるので，音の大きさは Pa で表され，**音圧**（sound pressure）と呼ばれる。波形が交流なので通常は実効値（正弦波の場合は振幅の  $1/\sqrt{2}$ ）で表す。人がやや大きめの声で話しているとき，口元から 3 cm くらいの箇所での音圧はおおむね約 1 Pa，すなわち大気圧の約 10 万分の 1 とされている。電話機のマイクロホンはその程度の大きさの音を受けていることになる。

音が伝わるときの空気の粒子の往復運動の速度を**粒子速度**（particle velocity）と呼ぶ。単位は m/s である。やはり通常は実効値で表す。実際には個々の空気分子の運動は高速で方向がランダムであり，その平均値を粒子速度と定義する。

圧力は方向によらないのでスカラ量だが，粒子速度は大きさのほか粒子の動く向きも表示しなければならないのでベクトル量となる。

音の伝わる速度を**音速**（sound velocity）と呼び，次式の  $c$  で与えられる。単位は m/s である。

$$c = 331.5 + 0.61T \quad (1.1)$$

ここで  $T$  は空気の温度（摂氏）である。概算には摂氏 15℃での値 340 m/s がよく用いられる。なお， $c$  は大気圧にはほとんど無関係である<sup>†3</sup>。

---

†1 実際は，空気の個々の分子はそれぞれ高い速度で種々の方向に飛び交っている。ここではそのすべての運動を加算すると相殺し，平均的には上記のように運動している状態とみなしてよいと仮定している。

†2 空気のマクロな流れは風である。風がなくても音波は伝わる。流れの速度（風速）は音の伝わる速度よりずっと小さいので，強くない風は音波の伝搬には大きな影響がない。

†3 当然ながら音速，粒子速度，風速はまったく別の現象を表す量である。

上述のように音波は1sの間に $c$  [m]進む。これを波長で割ると空間の特定の点を1秒間に通り抜ける波の基本要素の数になる。これを**周波数** (frequency) と呼ぶ。単位はHzである。

伝わる音波によって進行方向に垂直な単位面積の面を通過するパワー（すなわち単位時間に通過するエネルギー）を音の強さまたは**音響インテンシティ** (acoustic intensity) と呼ぶ。単位は $W/m^2$ である。音圧と粒子速度の積（の時間平均）で与えられる。粒子速度がベクトル量なので音響インテンシティも大きさと向きとで表されるベクトル量である。

なお、トランスデューサは音と電気の仲立ちをするデバイスなので、交流の電気現象も定量化しなければならない。注目するのは電圧 [V]、電流 [A] および電力 [W] である。いずれも大きさを実効値で表す。このとき基本要素の長さが周期 [秒] を表し、その逆数が周波数 [Hz] になる。

## 〔2〕 デシベル尺度とレベル

耳をはじめとする人の感覚は物理量の大小を差ではなく比で感じている。また、空気中の音波、光などの減衰や電話線での信号の減衰は比で表すのが適当である。このため、音響、電子、通信の分野では音圧、電圧といった物理量をそのまま定量化せず、基準の量との比の絶対値の対数を用いて表すのが一般的である。本書もそれに従う<sup>3)</sup>。

基本となるのは観測されたパワー  $W$  [W] と基準のパワー  $W_0$  との比であり、単位には電話の発明者の名 (A. G. Bell) よりとったベル [bel] を用いる。しかし、通常は単位の大きさを1/10として

$$b = 10 \log_{10} \left| \frac{W}{W_0} \right| \quad (1.2)$$

のように表す。単位の大きさを1/10とすると同じ量の数値は10倍になる。

単位名には1/10を表す接頭語 deci をつけてデシベル (decibel [dB]) と呼ぶ。例えば  $W$  が  $W_0$  の10倍なら dB 値は10 dB である。

同じようにして電圧や電流の大きさも dB で表すが、パワーの比は電圧、電流の比の2乗となる（例えば、電気抵抗に加える電圧を2倍にすると電流も2

倍になるので電気抵抗で消費されるパワーは $2 \times 2$ 、すなわち4倍になる)ので、電圧、電流のdB値は下記のように2乗の比で定義する習慣となっている。

$$b = 10 \log_{10} \left| \frac{E}{E_0} \right|^2, \quad b = 10 \log_{10} \left| \frac{I}{I_0} \right|^2 \quad (1.3)$$

ここで $E_0$ および $I_0$ は電圧および電流の基準値である。実際には下記のような式を数値計算すればよい。

$$b = 20 \log_{10} \left| \frac{E}{E_0} \right|, \quad b = 20 \log_{10} \left| \frac{I}{I_0} \right| \quad (1.4)$$

こうしておけば、上記の( )の例のような変化は電圧、電流、電力いずれで見ても6dBの変化ということになる。一つの物理現象が一つの共通の数値で表されるためわかりやすい。

音波の場合も同様で、上記のパワーを音響インテンシティ(単位面積当りのパワー、音圧と粒子速度との比)、電圧を音圧、電流を粒子速度に置き換えると同じ式を用いてdB値が定義、計算できる。例えば音圧のdB値は

$$b = 20 \log_{10} \left| \frac{p}{p_0} \right| \quad (1.5)$$

となる。ここで $p$ は音圧 [Pa]、 $p_0$ は音圧の基準値である。

ここで、本書で用いる物理量を列挙し、またよく使われる基準値をあげておこう。前述のように取り扱う波形は交流なので、数値にはその実効値を用いる。

- ・ **電 圧** 基準値との比の常用対数の20倍を電圧レベル (voltage level) と呼ぶ。1Vを基準値とすることが多いが、0.775V (600Ωの電気抵抗が1mWを消費しているときの電圧)を基準とすることもある。
- ・ **電 流** 基準値との比の常用対数の20倍を電流レベル (current level) と呼ぶ。あまり使われないので基準値はまちまちである。
- ・ **電 力 (パワー)** 基準値との比の常用対数の10倍を電力レベルまたはパワーレベル (power level) と呼ぶ。1Wまたは1mWを基準値とすることが多い。

- ・ **音圧** 基準値との比の常用対数の 20 倍を **音圧レベル** (sound pressure level) と呼ぶ。特別な場合を除き 0.000 02 Pa (20  $\mu$ Pa, 後述のように正常な聴力をもつ人が聞き取れる 1 000 Hz 正弦波の最小の音の値に近い) を基準値とする。SPL と略記されることがある。
- ・ **音響インテンシティ** (音の強さ) 基準値との比の常用対数の 10 倍を **音響インテンシティレベル** (sound intensity level) と呼ぶ。10<sup>-12</sup> W/m<sup>2</sup> を基準値とする。この数値は常温常圧の空気中では数パーセントの偏差で音圧レベルの値に一致するので「XX dB の音」といわれたらどちらと解釈しても問題が起こらない。

いずれの場合も dB 値を「\*\*レベル」と呼ぶこと、dB の本来の定義はパワーの比であり、パワーレベル、インテンシティレベルには常用対数の 10 倍 (10 log) を用いること、また音圧レベル、電圧レベルは便宜上常用対数の 20 倍 (20 log) を用いて計算することが原則となっている。

## 1.2 人の耳に聞こえる音

本書で述べるトランスデューサは音楽、音声など人の耳で聴くことを前提とする音を扱うものとし、超音波用機器などは対象外としている。ここで人の耳の感覚 (聴覚) の性質を概観しよう。

人の耳の感度は周波数により異なる。正弦波音に対する耳の標準的な特性を表す**聴感曲線**<sup>†</sup> (equal loudness level contours, ISO 226 による<sup>4)</sup>) を図 1.1 に示す<sup>2)</sup>。縦軸は音圧レベルで、純粹の物理量である。それぞれの曲線は人の耳で同じ大きさ (ラウドネス, loudness) に感じる音圧レベルを表す。例えば周波数 1 000 Hz, 音圧レベル 40 dB の正弦波音と 125 Hz, 63 dB の正弦波音は同じ曲線にのっているので、人の耳には同じ大きさに聞こえることになる。この大きさを 1 000 Hz での音圧レベル値で代表させ、フォン [phon] で表す。例

† 等ラウドネス曲線としては Robinson-Dadson 曲線が 40 年にわたり用いられてきたが、2003 年の国際規格 (ISO 226) 改正にあたり鈴木と竹島の曲線に置き換えられた。

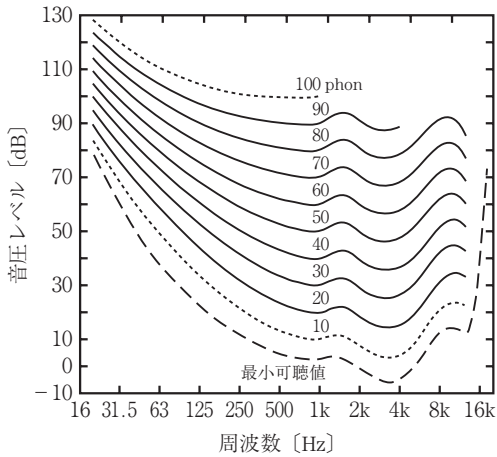


図 1.1 人の聴覚の聴感曲線<sup>4)</sup>

例えば、125 Hz、63 dB の正弦波音の大きさは約 40 phon である。

この図より、人の耳は  $10^3$  倍にわたる比周波数範囲の音を、 $10^{14}$  倍にわたる強さの範囲で聞いていることがわかる。また、感度は 3 ~ 4 kHz で最も高い。これは外耳道内の空気の共振によるといわれている。

耳に聞こえる最小の音は図の破線で表され、**最小可聴値** (threshold of hearing) と呼ばれる。一方、100 dB 以上の領域で人の耳に痛みを与え始めるラウドネスを**最大可聴限** (upper limit of hearing) と呼ぶことがある。

人の耳の性質には聴覚マスキングと臨界帯域幅、先行音定位効果、ステレオ受聴における定位や広がりなど興味深いものが多く、また多くのトランスデューサの設計にこれらがかかわっている。ここでは詳述しないが他書を参照されることをお勧めしたい<sup>2), 5)</sup>。

### 1.3 トランスデューサで対象とする音

耳で聴かれる音は音楽、人の声、騒音など多種多様だが、トランスデューサが対象とする音としては音楽信号 (musical signal) が重要である。音楽信号の周波数、振幅の変化範囲は人の声に比べて非常に広く、また豊かな高調波成分

が含まれるので, その上下限は可聴限界を超える例も多い<sup>5)</sup>。

また, 音楽信号は大きさの分布も幅広く, 室内騒音に近い小さな音から最大可聴限以上の大きな音まで存在する。したがって, 音楽信号を対象とするデバイスやシステムは原則として, 人の耳に聞こえるすべての周波数, 振幅の音を対象としなければならない。通常の特徴評価は 20 Hz ~ 20 kHz の周波数範囲で, 50 dB 程度の信号レベル範囲を対象として行われることが多い。

一方, 人の話声 (voice, speech)<sup>†</sup> の基本周波数は成人男性で 90 ~ 130 Hz, 成人女性で 250 ~ 330 Hz であり, また大きな周波数スペクトルの存在する上限周波数は母音では 4 kHz 程度, 子音のうち高周波数成分に富む摩擦音では 7 kHz 程度である。しかし, 通話を明瞭に伝送する目的のみであれば, この周波数範囲すべてをカバーする必要はない。聴覚では基本周波数の成分は中周波数領域のスペクトルの周期性から再現され, また 5 kHz 以上の成分は乏しくとも音声通話の了解度は確保されるといわれている。実際, 電話の伝送周波数帯域の規格は 300 ~ 3400 Hz であり, 携帯電話など実質的にこれより狭い例もあるが, 通話では男女の声の区別もでき, 了解度も実用的なものとなっている。

## 1.4 測定, 分析の周波数

1.3 節で述べた人の聴覚特性に対応して, 広い周波数範囲で動作するオーディオトランスデューサでは測定や信号解析のための周波数の系列が規格で決められている<sup>6)</sup>。よく使われる 2 種を図 1.2 に示す。周波数点の選択は人の聴覚の特性を考慮したものとなっている。例えば数値が等差系列 (1, 2, 3, 4, …) ではなく等比系列 (1, 2, 4, 8, …) となっているのは人が音の高さを周波数の比で感じているからに他ならない。

図 (a) のオクターブ系列は 2 倍の等比系列となっている。これは人の聴覚

---

† 人の話声の名称としては声 (voice) と音声 (speech) とを区別して用いるのが通例である。前者は物理的な音としての声を表すとき, 後者は声に含まれる情報を問題にするときに用いられる。

16	31.5	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	16 000
----	------	----	-----	-----	-----	-------	-------	-------	-------	--------

(a) オクターブ系列

・	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	・
---	----	------	----	----	----	------	----	----	----	----	-----	---

(b) 1/3 オクターブ系列

図 1.2 推奨される測定、分析周波数  
(ISO 266 による<sup>6)</sup>)

では周波数比で 2 倍 (1 オクターブ) ごとに共通するような印象が知覚されることによる<sup>2)</sup>。図の 11 点は人の可聴周波数範囲をおおむね網羅している。

図 (b) の **1/3 オクターブ系列** は  $2^{1/3}$  倍ごとの等比系列で、オクターブ系列の間に 2 点を挿入したものとなっている。図は 10 ~ 100 の範囲を示しているが、これを 1/10 倍、10 倍、100 倍して並べると可聴周波数範囲を網羅することができる。この系列はオクターブ系列との親和性がよいのみならず、10 倍の範囲に 10 点が並ぶため 10 倍系列 (1, 10, 100, ...) との親和性もよい。また、800 Hz 以上の周波数領域では、点の間隔が人の聴覚における臨界帯域幅におおむね対応している<sup>5)</sup>ので、信号の周波数成分の分析に適している<sup>5)</sup>。

## 1.5 オーディオトランスデューサの種類と機能

### 〔1〕 トランスデューサの種類

日常使われているマイクロホン、スピーカのような名称は、IEC 規格などにその用語と意味とが規定されている<sup>7), 8)</sup>。規定の内容を表 1.1 に示す。

**マイクロホン** (microphone) は音から電気へのトランスデューサである。電話に代表される電気通信の分野ではこれを**送話器** (transmitter) と呼んでいたが、英語名が電子装置の送信機と紛らわしいなどの理由で使われなくなった。

電気から音へのトランスデューサはさらに細分類される。広い空間に音を放



表 1.1 オーディオトランスデューサの種類

		狭い空間（耳孔内） の音を対象	広い空間（室内，屋外） の音を対象
音→電気		マイクロホン [IEC 60268-4]	
電気→音	音声，音楽を対象	イヤホン，ヘッドホン [IEC 60268-7]	スピーカ [IEC 60268-5]
	合図音を対象	—	サウンダ [IEC 61842]

射するものが**スピーカ** (loudspeaker) である。一方，人の耳の中，またはその近くの狭い範囲に音を送るものを**イヤホン** (earphone) または**ヘッドホン** (headphone) と呼ぶ。これらの区別については 10 章で述べる。なお，電気通信分野ではイヤホンを**受話器** (receiver) と呼んでいたが，やはり英語名が電子装置の受信機と紛らわしいなどの理由で使われなくなった。

スピーカと同じ用途で，音声や音楽などの広帯域信号ではなく合図音のような狭帯域信号の放射に特化したトランスデューサがあり，IEC 規格では**サウンダ** (sounder) と呼ぶ。機械，音響的な共振現象を積極的に利用してスピーカに比べ小形で大きな出力を得ているもので，再生音には入力信号の波形は必ずしも保存されないが周波数は保存される。

表 1.1 には挙げていないが，アナログレコードの音溝の刻み込み，読出しにもトランスデューサが用いられる。特に後者はマイクロホンと類似の動作を行うもので**ピックアップカートリッジ** (pickup cartridge) と呼ばれ，コンパクトディスク (CD) などの光記録媒体が普及するまではオーディオ再生装置の重要な構成要素であった。

特殊なデバイスとして，サウンダに発振回路を内蔵させ，直流入力により信号音を放射するようにしたものがあり，**ブザー** (buzzer) と呼ばれる。衝突振動を用いる特殊な構造のブザーも使用されている。小さいながらトランスデューサと電子回路とを組み合わせた音響システムである。出力音は一般に連続音で，その周波数は振動部などの機械特性で決められる。

なお、超音波、水中音響の分野ではマイクロホンに相当するものを受波器 (receiver)、スピーカに相当するものを送波器 (transmitter) と呼ぶが、兼用することが多いので一般にトランスデューサと総称している。

本書では、人の耳と口を対象とする可聴周波数の信号、いわゆるオーディオ信号を扱う電気音響変換器のうち、マイクロホン、イヤホン (ヘッドホン)、スピーカおよびサウンダについて述べる。

多くのトランスデューサは原理的に音から電気、および電気から音の双方向の変換ができる。こうした双方向に動作する変換器を**可逆変換器** (reversible transducer) と呼ぶ。

例えば市販のスピーカの電気入力端子をオシロスコープに接続してそばで声を出すとスピーカはマイクロホンとして動作し、オシロスコープに声の波形が現れる。

これに対して、原理的に一方向のみしか変換できない変換器も用いられる。これを**非可逆変換器** (irreversible transducer) と呼ぶ。その代表とされる炭素粉粒マイクロホンは、電話機のマイクロホンとして 20 世紀末まで製造されたが、これ以外の非可逆変換器は量産には至らなかった。

現在製造されているトランスデューサはすべて可逆変換器であるといつてよい。ただし、増幅器などの内蔵部品があるために外部からは非可逆に見えるものが数多く存在する。

## 〔2〕 トランスデューサの構造の概念

しかし、こうした種々のトランスデューサは大雑把に見るとほぼ同じ構造をもっていることがわかる。トランスデューサの大部分は音波を伝える媒質 (空気) と相対する**振動板** (diaphragm) または**振動膜** (membrane)、その機械的な動きと電気信号との仲立ちをする**変換部** (transducer element) およびこれらを受容する**ケース** (case) からなる図 1.3 のような構造になっている。

ケースは一般にほぼ密閉されている<sup>†</sup>。外部から音波が振動板に入射すると

---

<sup>†</sup> ケースを積極的に開放して目的を達しているデバイスもある (10 章参照)。

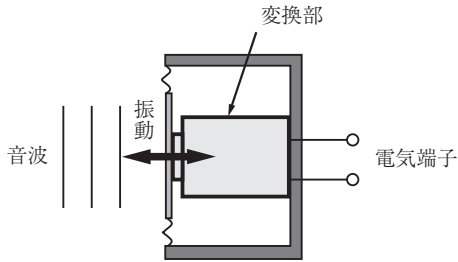


図 1.3 後部に室をもつ振動板と変換部

ケースの内外の気圧の差による振動板が運動する。これを変換部で電気信号に変換するのがマイクロホンの基本動作である。一方、与えられた電気信号により変換部が力を発生して振動板を運動させると音波が外部に放出される。これがスピーカ、ヘッドホンなどの基本動作である。

振動板または振動膜の機械振動を仲介として電気信号と音響信号とを結びつける。これが通常のオーディオトランスデューサの基本構成である。

## 引用・参考文献

- 1) 日本音響学会編：新版 音響用語辞典，コロナ社（2003）
- 2) 鈴木陽一，赤木正人，伊藤彰則，佐藤洋，荻木禎史，中村健太郎：音響学入門，音響入門シリーズ A-1，コロナ社（2011）
- 3) 大賀寿郎，梶川嘉延：電気の回路と音の回路，音響入門シリーズ B-3，コロナ社（2011）
- 4) ISO 226 “Acoustics -- Normal equal-loudness-level contours”
- 5) 大賀寿郎：マルチメディアシステム工学，コロナ社（2004）
- 6) JEITA 規格 RC-8100B 「音響機器通則」
- 7) IEC 60050-801 “International electrotechnical vocabulary, Chap. 801 : Acoustics and electroacoustics”
- 8) JIS Z 8106 「音響用語」

# 索 引

**【あ】**

アクティブ騒音制御 255  
 圧電イヤホン 34, 70  
 圧電サウンダ 35  
 圧電スピーカ 38  
 圧電セラミック 32  
 圧電プザー 35  
 圧電変換器 23  
 アーマチュア 18  
 安定度 (電磁変換器の) 77

**【い】**

位相反転形エンクロージャ 68, 83, 194  
 イヤスピーカ 177  
 イヤホン 9  
 イントラコンカ形 178, 179  
 インパルスレスポンス 217

**【う】**

ウーファ 246

**【え】**

エクスポネンシャルホーン 149  
 エレクトレット 26  
 エレクトレットコンデンサ  
 マイクロホン 26  
 エンクロージャ 67

**【お】**

オクターブ系列 7  
 オーディオ信号 1  
 音圧感度 99  
 音 圧 2, 113  
 音圧傾度マイクロホン 166  
 音圧レベル 5  
 音響インテンシティ 3  
 音響管 138

音響質量 61  
 音響ステフネス 61  
 音響抵抗 57, 61  
 音 速 2, 115

**【か】**

回 折 154  
 開放形 181  
 開放形ヘッドホン 177  
 可逆変換器 10  
 拡散音場 98, 133  
 拡散音場感度 99  
 拡散波 118  
 カージオイド 169  
 可聴信号 1  
 可動コイルトランスデューサ 14  
 可動磁石トランスデューサ 21  
 可動鉄片トランスデューサ 18  
 カーボン粉粒マイクロホン 45

感 度 96  
 感度レベル 97

**【き】**

機械インピーダンス 60, 62  
 機械抵抗 52  
 逆自乗特性 206  
 キャビネット 67  
 吸音くさび 204  
 吸音率 129  
 球面波 117  
 共振周波数 54, 141, 143, 144, 146  
 キルヒホフ・ホイヘンス  
 積分式 157

**【く】**

クロススペクトル 234

**【け】**

研究室標準マイクロホン 209

**【こ】**

後退波 116  
 コンデンサスピーカ 31  
 コンデンサマイクロホン 23  
 コントロールアンプ 248  
 コンプリメンタリプッシュ  
 プル回路 248

**【さ】**

最小可聴値 6  
 最大可聴限 6  
 サウンダ 9  
 差動マイクロホン 166  
 残響時間 131  
 残響室 207

**【し】**

死 角 167  
 指向係数 170  
 指向指数 170  
 指向性 163  
 指向性パターン 167  
 指向性マイクロホン 165  
 指向特性 169  
 実用標準マイクロホン 210  
 質 量 51  
 質量制御 57  
 自由インピーダンス 80  
 自由音場 98  
 自由音場感度 99  
 周 期 2  
 集束波 118  
 周波数 3

周波数掃引	225
周波数特性補正	230
周波数レスポンス	218
出力音圧レベル	219, 223
受話器	9
人工口	215
進行波	116
人工耳	211
振動板	10
振動膜	10

## 【す】

スイッチングパワーアンプ	249
スウェプトサイン信号	235
スコカ	247
スピーカ	9
スーブラコンカ形	179

## 【せ】

静電変換器	23
制動インピーダンス	80
接話感度	99
全指向性	163

## 【そ】

双指向性	167
挿入形	179
送話器	8
側音防止回路	253
速度ポテンシャル	115
ソホメトリック特性	230

## 【た】

体積速度	61
体積弾性率	114
ダイナミックスピーカ	13
ダイナミックマイクロホン	17

単一指向性	168
弾性制御	56

## 【ち】

力係数	75, 79, 86, 89
聴感曲線	5

## 【つ】

ツイータ	246
------	-----

## 【て】

抵抗制御	56
定在波	131
電圧感度	100
電気音響変換器	1
電磁イヤホン	18
電子化電話機	196
電磁変換器	13
電流感度	101
電力感度	101

## 【と】

動インピーダンス	80
動電変換器	13
動電マイクロホン	17
トランスデューサ	1

## 【は】

ハイパボリックホーン	152
背面開放形	181
背面密閉形	181
バイモルフ	38
バスレフ	68
波長	2
バックエレクトレット形コンデンサマイクロホン	28
波定数	116
波動方程式	115
ばね定数	51
バフル	123
パワーアンプ	247
パワースペクトル	234
反射係数	129
反射波	128
半導体マイクロホン	48
ハンドセット	252

## 【ひ】

比音響インピーダンス	61
非可逆変換器	10
ピストン振動板	123
ピックアップカートリッジ	9, 21
標準測定用密閉箱	161, 213
標準バフル	214
ピンク TSP 信号	238
ピンクノイズ	227

## 【ふ】

フィードバック制御	255
フィードフォワード制御	255
ブザー	9
プログラム模擬信号	229

## 【へ】

平衡アーマチュアトランスデューサ	20
平面波	113
ヘッドアンドトルソシミュレータ	183, 215, 224
ヘッドアンプ	24
ヘッドセット	252
ヘッドホン	9
ヘルムホルツの共鳴器	58
変換器	1
変調形トランスデューサ	45

## 【ほ】

放射インピーダンス	121
ポリフッ化ビニリデン (PVDF)	40
ホワイト TSP 信号	238
ホワイトノイズ	227
ホーンスピーカ	16

## 【ま】

マイクロホン	8
--------	---

## 【み】

密閉形	181
密閉箱	67, 83, 189
耳覆い形	179
耳載せ形	179

## 【む】

無響室	204
無指向性	163

## 【ゆ】

ユニット (トランスデューサの)	13
ユニモルフ	33

## 【よ】

横方向モード	147
--------	-----

<p><b>【ら】</b> ランダムノイズ 227</p>	<p><b>【り】</b> リボンマイクロホン 17</p>	<p>粒子速度 2, 113</p>
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>		
<p>A 特性 230</p> <p><b>【A】</b></p> <p>HATS 183, 215</p> <p><b>【H】</b></p>	<p>MEMS コンデンサマイクロホン 29</p> <p><b>【M】</b></p> <p>PB 信号 252</p> <p><b>【P】</b></p>	<p>TSP 信号 235</p> <p><b>【T】</b></p> <p><b>【数字】</b></p> <p>1/3 オクターブ系列 8, 231</p> <p>1 自由度系 52</p> <p>2 チャンネルステレオシステム 245</p>

— 著者略歴 —

大賀 寿郎 (おおが じゅろう)

- 1964年 電気通信大学通信機械工学科卒業
- 1964年 日本電信電話公社電気通信研究所勤務
- 1985年 工学博士 (名古屋大学)
- 1985年 富士通株式会社勤務
- 1986年 株式会社富士通研究所勤務
- 2000年 芝浦工業大学教授
- 2008年 芝浦工業大学名誉教授

IEEE Fellow  
電子情報通信学会フェロー  
日本音響学会評議員  
日本音響学会功績賞受賞

オーディオトランスデューサ工学

—マイクロホン、スピーカ、イヤホンの基本と現代技術—

Audio Transducers Engineering

—Fundamentals and Modern Technology of Microphones, Loudspeakers and Earphones—

© 一般社団法人 日本音響学会 2013

2013年3月18日 初版第1刷発行

検印省略

編者 一般社団法人 日本音響学会  
東京都千代田区外神田2-18-20  
ナカウラ第5ビル2階  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 新日本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石4-46-10  
発行所 株式会社 コロナ社  
CORONA PUBLISHING CO., LTD.  
Tokyo Japan  
振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)  
ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01118-0 (吉原) (製本: 牧製本印刷)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたしません