

まえがき

本書は、電気電子系、情報系、建築系、機械系などの大学生が音響工学を初めて学習する際のテキストブックとして使えるよう、音響工学の基礎的な原理、現象について平易かつ体系的に述べた。また一方で、音響工学に関わる技術者、研究者が日々の仕事で直面する技術的課題を解決する際に紐解くことができるよう、専門性、実用性、および新規性も兼ね備えた内容とした。

本書の構成は次のようにした。まず第1章「音波とは何か」では、音波の定義を示し、音波の物理的な振舞いと、その記述方法について述べた。

第2章「聴覚器官」では、おもに生理学的な見地からヒトの聴覚器官を概観した。ヒトの聴覚末梢器官を、外耳（耳介、外耳道、鼓膜）、中耳（耳小骨）および内耳（蝸牛、前庭、三半規管）に分け、それぞれの部位の機能について述べた。

第3章「音の知覚」では、音の大きさ、高さ、音色、方向、距離、広がりなどの要素感覚を取り上げて、その知覚現象を詳しく述べた。さらに、それぞれの要素感覚を引き起こす、あるいは対応する音の物理量について概説した。

第4章「室内音響」では、壁などの境界面による音の反射や吸音について説明した後、それらが繰り返されることによって形成される残響について述べた。また、室内における音声の明瞭度や音楽の広がり感などの評価指標について解説し、設計時点でそれらを予測するための手法を紹介した。加えて、騒音の評価方法および遮音方法について述べた。

第5章「電気音響」では、電気音響機器およびそのシステムについて概説した。まず、代表的な電気音響機器であるマイクロホンおよびスピーカについて、その動作原理や特徴を詳しく述べた。加えて、ホールや劇場で用いられているデジタル音響機器を概説した。さらに、臨場感の高い音場を再生する3

次元音響再生システムを紹介した。

第6章「音のデジタル処理」では、音響工学を理解し、その知識を活用するうえで必要となるデジタル信号処理の基礎を概説した。また、学習に役立つサンプルプログラムを掲載した。

なお、各章末には、本書で基礎を学んだ後、より高いレベルに進む読者のために、「さらに理解を深めるための書籍」を掲載した。ぜひ、これらの書籍も読み進めてほしい。

本書を執筆するにあたって、多くの書籍および論文を参考にした。巻末の「参考図書・引用論文」に記して、音響工学に関わる諸先輩に敬意を表したい。(株)小野測器、ブリュエル・ケアー・ジャパン、およびヤマハ(株)には、音響機器の写真を提供いただいた。また、千葉工業大学の石井要次君、三橋茂一君をはじめとする学生諸君からも多くの協力を得た。本書の刊行にご協力いただいた方々に心より感謝する。

本書が、音響工学に関心のある学生諸君の学習に、あるいは音響工学に関わる技術者・研究者の実務に役立つことが、著者の真の希望である。執筆には細心の注意を払ったが、もとより浅学非才の身、お気づきの点については、ご指導、ご叱正いただければ幸いである。

2011年初秋 横浜にて

飯田 一 博

目 次

1. 音波とは何か

1.1 音 の 分 類	1
1.1.1 純 音	1
1.1.2 複 合 音	2
1.2 音 波 の 基 礎	3
1.2.1 音 の 伝 搬	3
1.2.2 音 速	5
1.2.3 音響インピーダンス密度	7
1.3 音圧と音の強さ	7
1.3.1 音 圧	7
1.3.2 音 の 強 さ	8
1.3.3 音 の レ ベ ル	8
1.3.4 音圧レベルの加算と減算	10
1.3.5 スペクトルレベルとオクターブバンドレベル	10
1.4 球 面 波	12
1.5 平 面 波	13
1.6 波 動 方 程 式	14
1.6.1 波動方程式導出の準備	14
1.6.2 波動方程式の導出	16
1.6.3 速度ポテンシャルを用いた表現	17
1.6.4 平面波の波動方程式の一般解	19
1.7 電気・機械・音響系の対応関係	19
1.8 インパルス応答と伝達関数	22

さらに理解を深めるための書籍	22
----------------	----

2. 聴覚器官

2.1 外耳の機能	24
2.1.1 耳介	24
2.1.2 外耳道	25
2.2 中耳の機能	25
2.3 内耳の機能	27
2.3.1 蝸牛	27
2.3.2 基底膜	28
2.3.3 有毛細胞	29
2.4 聴覚の伝導路	30
2.5 聴覚器官の信号処理モデル	32
さらに理解を深めるための書籍	33

3. 音の知覚

3.1 Weber-Fechner の法則	34
3.2 音の大きさの知覚	36
3.2.1 ラウドネス	36
3.2.2 両耳ラウドネス	38
3.3 マスキング	39
3.3.1 同時マスキング	39
3.3.2 臨界帯域	41
3.3.3 継時マスキング	43
3.4 音の高さの知覚	43
3.4.1 ピッチ感覚	43
3.4.2 メル尺度	44
3.4.3 ピッチの弁別閾	44
3.4.4 ミッシングファンダメンタル	45

3.4.5 音 律	46
3.5 音色の知覚	48
3.6 音の方向の知覚	48
3.6.1 頭部伝達関数の定義	48
3.6.2 水平面および正中面の頭部伝達関数	49
3.6.3 頭部伝達関数と方向知覚	51
3.6.4 頭部伝達関数の個人差と個人適応	53
3.6.5 左右方向の知覚	54
3.6.6 前後・上下方向の知覚	57
3.6.7 方向知覚の弁別限	64
3.6.8 第1波面の法則	64
3.7 音の距離の知覚	67
3.7.1 音源距離と音像距離	67
3.7.2 距離知覚に影響を及ぼす物理的要因	68
3.8 音の広がり	70
3.8.1 広がり感の定義	70
3.8.2 みかけの音源の幅に影響を及ぼす物理的要因	71
3.9 音声の知覚	73
3.9.1 発声の仕組み	73
3.9.2 母音の調音	74
3.9.3 子音の調音	75
さらに理解を深めるための書籍	76

4. 室内音響

4.1 音の反射・吸収・透過	77
4.2 音の屈折	79
4.3 残響	80
4.3.1 拡散音場	80
4.3.2 拡散音場における音エネルギーの成長と減衰	82
4.3.3 残響時間	83

4.3.4	Sabine の残響理論	84
4.3.5	Eyring の残響理論	85
4.3.6	残響時間の測定法	87
4.4	室内音響評価指標	88
4.4.1	音 量 感	88
4.4.2	明 瞭 度	89
4.4.3	残 響 感	91
4.4.4	みかけの音源の幅	92
4.4.5	暗 騒 音	95
4.5	室内音響の予測手法	97
4.5.1	音場のコンピュータシミュレーション	97
4.5.2	縮尺模型実験	99
4.5.3	音場の可聴化	100
4.6	騒 音 の 評 価	100
4.6.1	騒 音 の 分 類	100
4.6.2	騒 音 の 伝 搬	101
4.6.3	騒 音 の 測 定	104
4.6.4	騒音計の周波数補正回路	105
4.6.5	騒音計の時間重み特性	106
4.6.6	騒音の評価量	106
4.6.7	騒音の環境基準	107
4.7	遮 音	108
4.7.1	遮音に関する質量則	108
4.7.2	コインシデンス効果	109
	さらに理解を深めるための書籍	110

5. 電 気 音 響

5.1	マイクロホン	111
5.1.1	動電型マイクロホン	111
5.1.2	静電型マイクロホン	113
5.1.3	マイクロホンの感度	115

5.1.4	マイクロホンの指向性	115
5.1.5	マイクロホンアレイ	116
5.1.6	ダミーヘッドマイクロホン	117
5.2	スピーカ	117
5.2.1	動電直接放射型スピーカ	118
5.2.2	エンクロージャの影響	120
5.2.3	ホーン型スピーカ	122
5.2.4	ラインアレイスピーカ	124
5.3	ホールの電気音響システム	124
5.4	臨場感再生システム	127
5.4.1	ヘッドホンによる3次元音響再生	127
5.4.2	2個のスピーカによる3次元音響再生	136
	さらに理解を深めるための書籍	142

6. 音のデジタル処理

6.1	標本化・量子化	143
6.2	音源信号の作成	145
6.2.1	純音の作成	145
6.2.2	ホワイトノイズの作成	146
6.2.3	swept-sine 信号の作成	147
6.3	フーリエ変換	149
6.3.1	離散フーリエ変換	149
6.3.2	高速フーリエ変換	150
6.4	畳込み積分	154
6.4.1	時間軸上での処理	154
6.4.2	周波数軸上での処理	159
6.4.3	オーバーラップ加算法	161
6.5	時間窓	163
6.5.1	矩形窓	163
6.5.2	ハニング窓	164

6.5.3	ハミング窓	164
6.5.4	ブラックマン窓	165
6.5.5	ブラックマン-ハリス窓	165
6.6	サンプリング周波数変換	169
6.6.1	ダウンサンプリング	169
6.6.2	アップサンプリング	171
6.6.3	サンプリング変換	173
	さらに理解を深めるための書籍	174

付 表

1	頭部伝達関数データベースの URL	175
2	建築材料の吸音率	175
3	建築材料の透過損失	183
4	残響時間	187
5	騒音計の周波数重み特性	188

参考図書・引用論文	189
-----------	-----

索引	194
----	-----



1. 音波とは何か

音には2種類の定義がある。その1つは「弾性体を伝搬する振動」、すなわち音波である。そしてもう1つは「音波により引き起こされる聴覚的感覚」であり、これは、いうまでもなく知覚的な定義である。第1章では、音波の物理的な振舞いと、その記述方法について詳しく述べる。

1.1 音 の 分 類

音波 (sound wave) を物理的に記述する前に、まず音を類別してみよう。われわれが普段接している様々な音は以下のように分類できる。

1.1.1 純 音

純音 (pure tone) とは、ただ1つの周波数の正弦波からなる音である。したがって、その時間波形は図 1.1 (a) のように表される。また、周波数の関

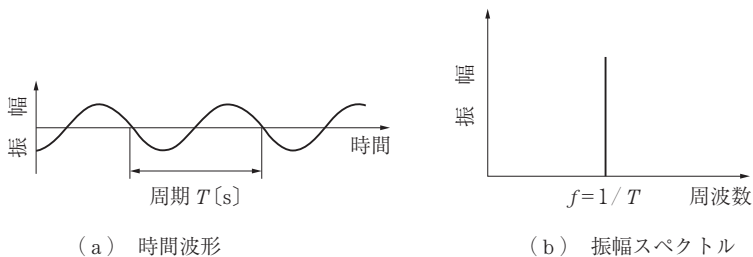


図 1.1 純音の時間波形と振幅スペクトル

2 1. 音波とは何か

数として表すと、図 (b) のように $f = 1/T$ となる周波数 f においてのみ成分を有する。純音の身近な例としては、^{おんさ}音叉の発する音があげられる。

1.1.2 複 合 音

純音以外の音、つまり周波数の異なる複数の純音で構成された音を**複合音** (complex tone) という。複合音を構成する周波数のうち、最も低い周波数成分を**基音** (fundamental tone)、基音以外の周波数成分を**上音** (over tone) という。

複合音のうち、楽器の音や歌声などを**楽音** (musical sound) とよぶ。楽音は、**図 1.2** に示すように、上音の周波数が基音の周波数 (基本周波数) の整数倍になっている。このような上音を**倍音** (harmonics) とよぶ。

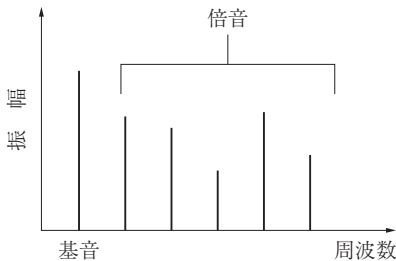


図 1.2 楽音の振幅スペクトル

一方、複合音のうち、周波数や音圧が不規則に変動する音を**雑音** (noise) という。**図 1.3** に雑音の一例として、街の雑踏の振幅スペクトルを示す。楽音と異なり、連続的なスペクトル構造をもっている。また、雑音のうち周波数全域にわたって振幅が等しいものを**ホワイトノイズ** (white noise) という (**図 1.4**)。

このように、雑音は物理的に定義された音であるが、**騒音** (noise : 英語表記では雑音と同じである) は、その定義が雑音とはまったく異なるので注意が必要である。騒音とは、聴き手にとって望ましくない音のことである。いかに美しい音楽であっても、聴き手にとって勉強や研究の妨げになる音と受け取られれば、それは騒音である。

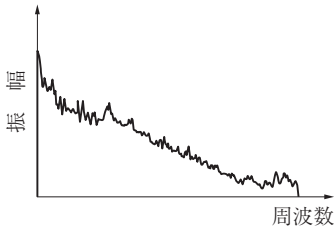


図 1.3 街の雑踏の振幅スペクトルの一例

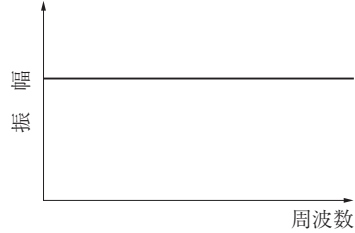


図 1.4 ホワイトノイズの振幅スペクトル

1.2 音波の基礎

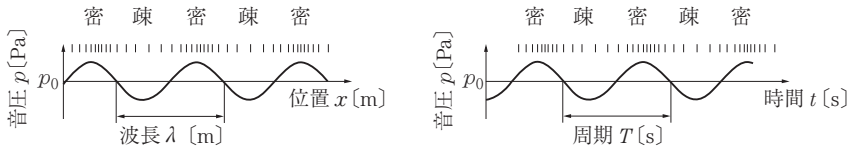
音波は、**弾性体**の媒質を伝わる振動である。弾性体とは、力を加えたときの形や大きさの歪が、力を緩めると元に戻る性質をもった物質である。まず、音波が空気、水、鉄などの弾性体媒質を伝搬する様子を見てみよう。

1.2.1 音の伝搬

音波は、空気などの媒質の微小な部分（**媒質粒子**）が振動し、その振動が隣接する媒質粒子に次々に伝わることによって媒質中を伝搬する。媒質粒子は、それが存在する位置のごく近傍で振動しているだけで、媒質粒子そのものが移動して音波を伝搬しているわけではない。音波が伝搬している空間を**音場**（sound field）という。

一般に、媒質粒子の振動方向と波動の伝搬方向が同じものを**縦波**（longitudinal wave）、媒質粒子の振動方向と波動の伝搬方向が直交するものを**横波**（transverse wave）という。音波は気体あるいは液体では縦波で伝搬し、固体では縦波と横波の両方で伝搬する。液体の表面（水面）では横波が進行するが、これは水面では表面張力が働くためであって、液体中（水中）では縦波で伝搬する。固体には横ずれを元に戻す性質、すなわち**剛性**（ずり弾性）があるため、横波が生じる。

4 1. 音波とは何か



(a) ある時間における音圧と位置の関係 (b) ある位置における音圧と時間の関係

図 1.5 音波の伝搬

縦波には、ある時間についてみると、媒質粒子が互いに近づいて密度が高くなる点（密）と互いに離れて密度が低くなる点（疎）が存在する〔図 1.5 (a)〕。また、ある点についてみると、密になる時間と疎になる時間が繰り返される〔図 (b)〕。このような縦波は**疎密波** (dilatational wave) とよばれる。密になる場合は媒質の圧力が高くなり、疎になる場合は低くなる。

空气中を伝搬する音は、大気圧 p_0 を基準として圧力が高くなったり低くなったりする。この圧力の変化分を**音圧** (sound pressure) といい、媒質粒子の運動速度を**粒子速度** (particle velocity) という。図 1.5 に示す正弦波では、音圧 p は時間 t および位置 x において式 (1.1) のように表される。

$$p = P \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) = P \cos (\omega t - kx) \quad (1.1)$$

ここで、 P [Pa] は音圧の最大振幅で、 $\omega(t - x/c)$ や $(\omega t - kx)$ を**位相** (phase) という。

ω [rad/s] は**角周波数** (angular frequency) であり、 ω と**周波数** (frequency) f [Hz] には次の関係がある。

$$\omega = 2\pi f \quad (1.2)$$

さらに、 f と**周期** (period) T [s] には式 (1.3) の関係がある。

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.3)$$

c [m/s] は**音速** (sound speed) であり、 k [rad/m] は**波長定数** (wave number) とよばれる

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.4)$$

である。ここで、 λ [m] は**波長** (wave length) である。これらの間には式 (1.5) の関係がある。

$$c = f\lambda \quad (1.5)$$

また、式 (1.1) は正弦波の音圧の瞬時値を表しており、このままでは1つの値に定まらない。そこで、式 (1.6) で定義する実効値、すなわち“変動する瞬時値の2乗平均の平方根”により音圧の大きさを表すこととする。粒子速度の大きさについても同様である。

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{P \cos(\omega t - kx)\}^2 dt} = \frac{P}{\sqrt{2}} \cong 0.707P \quad (1.6)$$

1.2.2 音 速

音速は媒質によって異なる。空気の音速に比べて、水の音速は4～5倍、鉄の音速は15～20倍である。このような媒質中の音の伝搬速度は、媒質の弾性率と密度で決まる。媒質が気体および液体の場合、伝搬速度は体積弾性率 κ 、密度 ρ を用いた式 (1.7) で求められる。

$$c = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}} \quad (1.7)$$

ここで、気体の場合は、定圧比熱と定積比熱の比熱比 γ と大気圧 p_0 を用いて式 (1.8) のように表される。

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho}} \quad (1.8)$$

また、 R を気体定数、 T を気体のケルビン温度、 M を気体の平均分子量として

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1.9)$$

とも表される。これより、気体中を伝搬する速度は温度によって変化すること

6 1. 音波とは何か

がわかる。空気の場合、温度 t [°C] と音速 c の関係は式 (1.10) で表される。

$$c = 331.5 + \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \cong 331.5 + 0.61t \quad (1.10)$$

気温 15°C での音速は約 340 m/s となり、この値を空気の音速の代表値として使うことが多い。

媒質が固体の場合の音速は、縦波では式 (1.11)、横波では式 (1.12) で求められる。

$$c = \sqrt{\frac{\kappa + (3/4)G}{\rho}} \quad (1.11)$$

$$c = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.12)$$

ここで、 G は剛性率（ずり弾性率）である。ただし、弦などのような波長に比べて十分に細い固体の場合は、縦波の音速は式 (1.13) になる。

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.13)$$

ここで、 E はヤング率である。

表 1.1 に様々な媒質の密度、音速および特性インピーダンスを示す。気体に比べて、液体、固体の音速が大きいことがわかる。また、固体では、縦波の

表 1.1 様々な媒質の密度、音速および特性インピーダンス

媒質	密度 ρ [kg/m ³]	音速 c [m/s]	特性インピーダンス ρc [Ns/m ³]
空気 (20 °C)	1.205	343.5	415
ヘリウム (0 °C)	0.1785	970	173
水 (23 ~ 27 °C)	1.00×10^3	1500	1.50×10^6
鉄 (縦波)	7.86×10^3	5950	46.4×10^6
鉄 (弦の縦波)	7.86×10^3	5120	40.2×10^6
鉄 (横波)	7.86×10^3	3240	25.3×10^6
コンクリート (縦波)	$2.00 \times 10^3 \sim 2.60 \times 10^3$	4250 ~ 5250	$8.50 \times 10^6 \sim 13.7 \times 10^6$
ゴム (縦波)	0.97×10^3	1500	1.46×10^6
ゴム (弦の縦波)	0.97×10^3	210	0.204×10^6
ゴム (横波)	0.97×10^3	120	0.116×10^6

索 引

<p style="text-align: center;">あ</p> <hr/> <p>アップサンプリング 171 鑑 骨 25</p> <p style="text-align: center;">い</p> <hr/> <p>位 相 4 1 オクターブバンドレベル 11 1 次聴覚野 31 位置説 29 一致モデル 32 因果律 129 インパルス 22 インパルス応答 22 インパルス応答積分法 87 インパルス発火 29 インピーダンス 7 インピーダンス変換 26</p> <p style="text-align: center;">う</p> <hr/> <p>ヴァーチャルピッチ 45 うなずき 63 運動の第 2 法則 15 運動方程式 16, 20</p> <p style="text-align: center;">え</p> <hr/> <p>エコー 65 エコー検知限 65 エコーディスターバンス 66 エネルギー加算 10 エフェクタ 125 エリアシング 144 エレクトロレットコンデンサ マイクロホン 115 エンクロージャ 120</p>	<p style="text-align: center;">お</p> <hr/> <p>オクターブ数 11 音に包まれた感じ 70 音の空気吸収 100 音の強さ 8 音の強さのレベル 9 音 圧 4 音圧透過係数 79 音圧反射係数 79 音圧レベル 9 音響インテンシティ 8 音響インピーダンス 7 音響インピーダンス密度 7 音響エネルギー密度 8 音響パワーレベル 9 音 又 2 音 節 74 音節明瞭度 89 音線法 98 音 素 74 音 像 34 ——の分離の割合 66 音像距離 67 音 速 4 音 波 1 音 場 3 音 律 46</p> <p style="text-align: center;">か</p> <hr/> <p>外 耳 24 外耳道 24 外耳道共振 25 外側毛体核 31 回 転 63 蓋 膜 29 外有毛細胞 29 回路方程式 20</p>	<p>下 丘 31 蝸 牛 25, 27 蝸牛神経核 30 楽 音 2 拡散音場 80 学 習 53, 61 角周波数 4 拡 声 115 かしげ 63 可聴化 100 カーディオイド特性 116 感 度 115 ガンマトーンフィルタ群 32</p> <p style="text-align: center;">き</p> <hr/> <p>基 音 2 機械インピーダンス 112, 118 機械振動系 19 幾何音響シミュレーション 97 聴き取りにくにさ 89 基底膜 27 砧 骨 25 基本周波数 2 逆行マスキング 43 逆 2 乗則 102 逆フーリエ変換 150 吸音率 78 吸音力 84 吸 収 77 球面波 12 橋 30 境界要素法 99 共振周波数 19, 119 協和音程 46 虚音源 97 虚 像 97</p>
--	---	---

虚像法	97				
距離減衰	13	し		スペクトルレベル	10
く		子音	74	ずり弾性率	6
空間インパルス応答	48	耳介	24	せ	
空気の減衰係数	104	時間重心	90	絶対不応期	32
矩形窓	163	時間窓	163	線音源	102
屈曲波	109	時間領域有限差分法	99	先行音効果	65
屈折角	79	耳甲介	24	前後誤判定	57
グラフィックイコライザ	127	指向性	115	前庭階	27, 28
け		耳小骨	25	前庭窓	25, 28
継時マスキング	39	実効値	5	そ	
こ		質量制御	113, 120	騒音	2
コインシデンス限界周波数		質量成分	21	騒音計	104
	109	質量則	109	騒音レベル	106
コインシデンス効果	109	シナプス結合	29	双指向性	113
コインシデンス周波数	109	尺度構成法	37	双指向性マイクロホン	116
剛性	3	周期	4	速度ポテンシャル	18
合成音圧レベル	10	周波数	4	疎密波	4
合成音像	57	周波数選択性	29	ソ ン	38
剛性率	6	周波数補正回路	105	た	
高速フーリエ変換	151	受音領域	99	ダイアフラム	111
鼓室階	27	縮尺模型	99	帯域	11
鼓室窓	28	純音	1	帯域フィルタ群	29
個人差	53	順行マスキング	43	第1波面の法則	65
個人適応	53	瞬時値	5	体積速度	7
鼓膜	24	順序尺度	37	体積弾性率	5
コルチ器	27	純正音程	46	大全音	47
コーン	118	純正律	47	ダイナミックマイクロホン	111
コーン状の混同	57	上オリーブ外側核	31	ダウンサンプリング	169
コンデンサマイクロホン	113	上オリーブ内側核	31	畳込み積分	22, 100, 154
コンプレッサ / リミッタ	126	上オリーブ複合体	30	縦波	3
さ		上音	2	ダミーヘッド	93, 117, 127
最小可聴音圧	8	小全音	47	単一指向性マイクロホン	116
最小可聴値	37	初期減衰時間	92	単語	74
最大可聴音圧	8	初期側方エネルギー率	72, 92	単語了解度	89
サイドロープ	163	進行波	28	弾性制御	114
雑音	2	進行波説	29	弾性成分	21
残響時間	83	振動板	111, 118	弾性体	3
サンプリング周波数	144	す		単発騒音暴露レベル	107
サンプリング定理	144	ストレングス	88	ち	
1/3 オクターブバンドレベル		スネルの法則	79	遅延和アレイ法	116
	11	スペクトラルキュー		力係数	118
		スペクトル分布	25, 58, 61, 132		
			48		

中央階	27			複合音	2
中 耳	25			不動毛	29
調 音	74		な行	ブラックマン-ハリス窓	
調音位置	74	ナイキスト周波数	144		165
聴覚中枢	29	内側膝状体	31	ブラックマン窓	165
聴神経線維	29	内有毛細胞	29	フーリエ変換	149
丁度可知差	35	音 色	48	フーリエ変換対	22
		ノイズ遮断法	87	文章了解度	89
		ノッチ	50		
		ノッチ周波数	58		
つ				へ	
槌 骨	25		は	閉 管	25
				平均吸音率	82, 84
て				平均自由行路	85
抵抗制御	112	倍 音	2	平均律	47
抵抗成分	21	倍音構造	48	平面波	13
定常状態	82	倍音列	45	ベ ル	9
ディレイマシソ	126	媒質粒子	3	ヘルムホルツの共鳴器	20
てこの原理	27	破擦音	75	ベロシティマイクロホン	113
デシベル	9	ハース効果	66	変位置	14
点音源	101	波 長	5	弁別閾	35
伝達関数	22	波長定数	4		
		バッフル板	121	ほ	
と		波動音響シミュレーション	97	ボイスコイル	111, 118
透 過	77	波動方程式	14	母 音	74
等価回路	19	ハニング窓	164	方向決定帯域	62
透過吸音面積	84	ハミング窓	164	方向知覚の弁別限	64
等価矩形帯域幅	41	波 面	12	ホワイトノイズ	2, 146
等価騒音レベル	106	パラメトリックイコライザ	127	ホーン型スピーカ	123
透過損失	78, 109	パラメトリック頭部伝達関数	58		
透過率	78	破裂音	75	ま	
同時マスキソ	39	反 射	77	マイクロホンアレイ	116
動電型スピーカ	118	反射角	79	曲げ波	109
動特性回路	106	半波整流	32	摩擦音	75
等パーセントディスター		半母音	75	マスク	39
バンス曲線	66			マスキソ	39
頭部インパルス応答	49, 100	ひ		み	
頭部伝達関数	25, 48	鼻 音	75	みかけの音源の幅	70, 92
頭部伝達関数データベース	134	ピッチ	43	ミキソソグコンソール	125
頭部モーションセンサ	135	標準化	143	ミキソソグファンダメンタル	45
等ラウドネス曲線	36	比例尺度	37	密 度	5
特性インピーダソ	7	ピンクノイズ	146		
トノトビシテ	31			む	
トランスオーラルシステム	51, 136	ふ		無指向性マイクロホン	115
トーンゾイレ	124	フォルマソ	74	無音音	76
		フォルマソ周波数	74		

め	ラインアレイスピーカ	124	
	ラウドネス	36	
メインローブ	163	ラウドネスレベル	37
メสบパウエル法	29	乱入射質量則	109
メル尺度	44		
や行			
ヤング率	6	リアルヘッド	93
有限要素法	99	離散フーリエ変換	150
有声音	75	リバーブレータ	126
要素感覚	34, 132	リファレンス情報	60
横波	3	粒子速度	4
		量子化	144
ら		両耳間距離	56
ライスネル膜	27	両耳間差キュー	132
		両耳間差情報	54

両耳間時間差	54, 55
両耳間相関度	72, 93
——の弁別限	95
両耳間相互相関関数	72
両耳間レベル差	54, 56
両耳入力信号の包絡線	55
両耳マスキング	39
両耳ラウドネス	38, 71
臨界帯域	41
れ	
レベル	8
連続の式	15

A	
ASW	70, 92
A 特性	105
B	
Bark 尺度	41
BEM	99
BSPL	38, 71, 94
C	
clarity	90
concha	60
C 特性	105
C 値	90
D	
definition	90
Deutlichkeit	90
DFT	150
DICC	93
Dirac のデルタ関数	22
D 値	90
E	
EDT	91
ERB _N 番号	43
Eyring の残響式	87

F, G	
fast	106
FDTD	99
FEC	131
FEM	99
FFT	151
fossa	60
G	88
H	
HRIR	49
HRTF	25, 48
I	
IACC _E	94
ICC	72, 93
ILD	54
ITD	54
L	
LE	93
LEV	70
LF	72, 92
M, N	
MTF	91
NC 曲線	96

NC の推奨値	96
NFD	54
P, R	
PDR	131
RASTI	91
S	
Sabine の残響式	87
scapha	60
SD	54
slow	106
STI	91
swept-sine 信号	147
T	
TL	78
ts	90
W, Z	
Weber-Fechner の法則	35
Weber の法則	35, 95
Weber 比	95
Z 特性	106

—— 著者略歴 ——

- 1984年 神戸大学工学部環境計画学科卒業
1986年 神戸大学大学院工学研究科博士前期課程修了（環境科学専攻）
1986年 松下電器産業株式会社（現パナソニック株式会社）勤務
1993年 神戸大学大学院工学研究科博士後期課程修了（環境科学専攻）
博士（工学）
2007年 千葉工業大学教授
現在に至る

音響工学基礎論

Fundamentals of Engineering Acoustics

© Kazuhiro Iida 2012

2012年3月21日 初版第1刷発行

★

検印省略

著者 飯田かずひろ
一博
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 萩原印刷株式会社

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 978-4-339-00830-2 (新宅) (製本：愛千製本所)

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います。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す