

まえがき

音。私たちの暮らしになくてはならない大切なもの。そして音響学。その音の性質や役割をさまざまな観点から調べ、暮らしへの応用を考えて聞く学問。

私たち著者は、その「音」と「音響学」に強い愛着と興味をもち、研究と教育を進めている者たちである。その魅力をできるだけたくさんの人々に伝えたい。この本は、そんな私たちの思いのもとに書かれている。

音響学は近代まで物理学の一部として発展してきたが、現在では、たいへん広い領域に発展している。例えば、通信や電気・電子、機械、建築などのさまざまな工学、情報学、医学、生理学、脳科学、心理学、音楽学など、さまざまな分野で研究されている。また、これらの分野を横断した形の音響学の研究も盛んである。現代の音響学は実に学際的であるといえる。

そこで、この本の執筆にあたっては、理工系には限らず、文系や音楽系、メディア系など、さまざまな分野の、大学1、2年生、高専の3、4年生、専門学校生でも無理なく読めることを目標とした。そのため、この本は、高校1年生程度の数学の知識さえあれば、物理学などは学んでいなくても読めるように注意して書いてある。少しでも補足が必要と思われる、数学や物理学、単位の知識については付録で補ってある。

第I部（縦糸編）の1章から7章では、音響学を6分野に分け、極力数式を使わずに、しかし、現代の音響学のおもしろさと奥深さが伝わるように書いてある。まず1章では、音響学の基本中の基本を学ぶ。2章は音の聞こえを支える聴覚について、3章はスピーカやマイクロフォンなどの音響機器について、4章は音声の性質やコンピュータと音声の関わりについて、5章は音楽に関連した音響学について、6章は室内の音響や騒音など暮らしとの関わりについて、7章は生活のさまざまな場面で役立っている超音波について記してある。

iv ま え が き

これら7章は、音響学の縦糸といえよう。また、音響学が身近なものと感じてもらえるよう、われわれの生活に不可欠なものともいえる携帯電話との関連に努めて触れるようにした。2章から7章は、順番に読んでいく必要はない。まずは、おもしろそうと感じた章を拾い読みしてもらおうのもよいだろう。

また、第II部（横糸編）の8章と9章では、音に関する物理学と、現代の音響学の発展を支えるデジタル信号処理について、それぞれの基本をわかりやすく記した。いずれも音響学の全分野に関係した、横糸的な内容となっている。これらの章では、説明上ある程度の数式を用いているが、もし、数式が苦手であれば、数式を飛ばして文字のところだけでも読んでみても筋道がわかるように書いてある。音響学をもう少し深く学びたい人はもちろん、すべての読者に、ぜひ、読んでみてほしい。

また、本文の理解を助けるために、さまざまな音や映像が含まれたCD-ROMが付属している。ぜひ、有効に活用してほしい。

この本は、音響入門シリーズの最も基礎的な本として、音響学の全分野を網羅するように企画された。本書を読み終えれば、音響学を専門的に学ぶ力や、音響学のさまざまな本が読める力がついてはいるはずである。

音響学の現代的な全体像を簡単にわかりやすく書こうとして、私たちが目次案の打ち合わせをもったのは、もう5年も前のことである。それから、だいぶ時間がたってしまった。この間、何度も執筆合宿を繰り返して、文章案を練りあげた。そのかいあって、ねらいに近い本ができあがったように思う。

この間、日本音響学会の編集委員会の委員のみなさん、コロナ社、私たちの職場の仲間たち、そして何よりも家族の応援は心強いものだった。また、鈴木萌さんの挿絵は、すてきなアクセントとなった。CD-ROMがこのように充実したのも多くの方々の協力のたまものである。この本がこうして発行できるのも、これら皆さんのおかげであり、著者一同、心から感謝している。この本が、音響学に興味を寄せる人の一助となり、また、読者の中から次の世代の音響学を支える人が出てくることを心から念じている。

2010年錦秋

著者一同

目 次

第 I 部—縦糸編— (1 章～7 章)

1. ピタゴラスから携帯電話までの音響学

1.1 私たちの暮らしと音	2
1.2 音響学の変遷と展開	3
1.3 現代の音響学	7
1.4 音響学, その基礎の基礎	8
1.4.1 音 と 音 波	8
1.4.2 音の伝搬によって生じる現象	10
1.4.3 音の強さのレベルと音圧レベル	13
1.4.4 音とその周波数スペクトル	15
1.4.5 聴覚の感度特性を考慮した音のレベルの表現法	19

2. 音を聞く仕組み

2.1 音源方向の知覚	23
2.1.1 音源の方向と左右耳の強度差	23
2.1.2 音源の方向と左右耳の時間差	24
2.1.3 音の到来方向と頭部での反射	24
2.1.4 ヒトの方向定位能力	26
2.2 聴覚を支える聴器	26
2.2.1 外 耳	27
2.2.2 中 耳	28
2.2.3 内 耳	29
2.2.4 脳 幹	31
2.2.5 中脳および聴覚野	36
2.3 聴覚による知覚	36
2.3.1 ラウドネスの知覚	37
2.3.2 マスキング	37

vi	目次	
2.3.3	聴覚フィルタと臨界帯域	38
2.3.4	音の高さ知覚のらせん構造とピッチ	39
2.3.5	音色	41
2.4	音の選択的聴取	42
2.4.1	カクテルパーティ効果	42
2.4.2	時間軸上の現象（イベント）の取得	42
2.4.3	音脈の形成	43
2.5	難聴	44

3. 音の収録と再生

3.1	音から電気信号への変換—マイクロフォン—	47
3.1.1	マイクロフォンの仕組み	47
3.1.2	マイクロフォンの電気特性	53
3.1.3	指向特性	54
3.2	電気信号から音への変換	57
3.2.1	スピーカの動作原理	57
3.2.2	スピーカの再生周波数帯域とマルチウェイスピーカ	60
3.2.3	スピーカエンクロージャ	62
3.2.4	ヘッドフォン	63
3.3	音を楽しむためのシステムと信号処理方式	65
3.3.1	音の方向感の制御に基づく技術	66
3.3.2	聴取点における音圧の制御に基づく技術	67
3.3.3	空間的な音場の制御に基づく技術	68
3.4	音を分離する技術	70

4. 音声の発話と認識

4.1	音声の発話	75
4.1.1	声帯と声道	75
4.1.2	音声の波形とフォルマント	77
4.1.3	音韻と音素	80
4.2	音声の符号化	81
4.2.1	音声の符号化とは	82
4.2.2	PCMとADPCM	82
4.2.3	線形予測による符号化	85

4.3 音声合成・認識・対話	88
4.3.1 音声の合成	88
4.3.2 音声の認識	90
4.3.3 音声の理解と応用システム	93
4.4 音声の知覚	94
4.4.1 言語, パラ言語, 非言語	95
4.4.2 音声の「聞こえ」を測る	95
4.4.3 音韻の知覚	95
4.4.4 単語と文の知覚	97
4.4.5 音声のパラ言語情報の知覚	99
4.4.6 音声の非言語情報の知覚	99

5. 音楽と音響

5.1 音階と和音	103
5.1.1 響きあう音の条件	103
5.1.2 音階	104
5.2 楽器の音	108
5.2.1 楽器が音を出す仕組み	108
5.2.2 楽器から出る音の特徴	110
5.3 音楽の情報処理	113
5.3.1 音を作る	114
5.3.2 音を聞き分ける	115
5.4 音楽の符号化と伝送	116
5.4.1 CDの音	117
5.4.2 高効率音楽符号化	117
5.4.3 CDを超える音	119

6. 暮らしの中の音

6.1 音の伝搬と室内音響	122
6.1.1 直接音と反射音	122
6.1.2 壁による反射と吸音	122
6.1.3 残響音と残響時間	123
6.1.4 インパルス応答の測定	125
6.2 室内音響の評価と設計	126

viii	目 次	
6.2.1	室内音響の評価	126
6.2.2	壁面の形と反射音	126
6.2.3	壁面の凹凸と反射音	127
6.2.4	室形と響き	127
6.2.5	響きのコントロールと音響設計	128
6.3	騒音	131
6.3.1	騒音とは	131
6.3.2	騒音の分類	133
6.3.3	騒音の測定	133
6.3.4	騒音のオクターブバンド分析	136
6.4	騒音の伝搬と遮音	137
6.4.1	壁の遮音性能	137
6.4.2	隣空間の音の伝搬	138
6.4.3	固体音の伝搬	139
6.4.4	床衝撃音	139
6.5	屋外における騒音	140
6.5.1	屋外における騒音の伝搬	140
6.5.2	屋外騒音の評価と規制基準	140
6.6	よりよい音環境をめざして	141
6.6.1	静けさの確保	141
6.6.2	シグナルとしての「騒音」	142
6.6.3	子育て、教育と音空間	143
6.6.4	高齢者および障害者のための音環境	143

7. 超 音 波

7.1	超音波の特徴	146
7.1.1	超音波の定義	146
7.1.2	縦波超音波と横波超音波	146
7.1.3	直進性と高強度の利用	148
7.2	超音波の発生と検出	148
7.2.1	発生方法・超音波トランスデューサ	148
7.2.2	検出方法	153
7.3	超音波の計測応用	154
7.4	超音波のパワー応用	160
7.4.1	超音波キャピテーション	160

7.4.2	音響放射力と音響流	160
7.4.3	非線形現象とパラメトリックスピーカ	162
7.4.4	大きな振動加速度と振動応力の効果	163
7.5	超音波応用デバイス	165
7.5.1	高周波フィルタ, 弾性表面波フィルタ	165
7.5.2	振動ジャイロ, センサ技術	166
7.5.3	圧電トランス	166
7.5.4	超音波モータ	167
7.5.5	光学素子	169

第Ⅱ部—横糸編— (8章, 9章)

8. 音の物理

8.1	ばねとおもりの振動	171
8.2	共振	175
8.3	伝わる振動	178
8.4	音速	180
8.5	空気中の音波	181
8.6	音波の波動方程式とその解	185
8.7	音響インピーダンスと音の反射・透過	188
8.8	音の伝わり方の性質	191
8.9	固体中の振動	197
8.10	共振と固有モード	202

9. 音のデジタル信号処理

9.1	アナログ・デジタル変換とデジタル・アナログ変換	206
9.2	離散フーリエ変換	210
9.2.1	フーリエ級数	211
9.2.2	フーリエ級数の離散化	215
9.2.3	高速フーリエ変換	217
9.3	窓関数	219
9.4	インパルス応答とたたみ込み演算	223
9.4.1	インパルス応答	223

x	目次	
9.4.2	たたみ込み演算	224
9.5	デジタルフィルタ	227
9.5.1	非再帰型デジタルフィルタ	227
9.5.2	非再帰型デジタルフィルタの実例	228
付	録	230
索	引	239

付録の CD-ROM について

この CD-ROM には、「音響学入門」を読んで学習するうえで役に立つ画像、音、ビデオなどが収録されています。本文を読み進めながら、ぜひ本 CD-ROM を使っていろいろな音を実際に体験してみてください。本文に関連するマルチメディアコンテンツがある場合には、本文中にのマークを用いてそのコンテンツへの参照があります。また、すべてのマルチメディアコンテンツには、本文中で対応する箇所が明記されています。

- * コンテンツの再生には JavaScript が必須です。ブラウザの設定で、JavaScript の実行を許可してください。
- * 音やビデオを再生させるために、QuickTime プラグインを必要とすることがあります。必要に応じてダウンロード・インストールしてください。
- * ブラウザやセキュリティソフトの設定によっては、音やビデオの再生がブロックされることがあります。JavaScript 実行およびプラグインによるメディア再生を許可する設定をしたうえで再生してください。Internet Explorer の場合、画面上に警告メッセージが表示されることがありますので、メッセージをクリックして「ブロックされているコンテンツを許可」を選択してください。
- * 本 CD-ROM に収録したすべてのコンテンツの著作権は日本音響学会および著者に帰属し、著作権法によって保護され、この利用は個人の範囲に限られます。また、ネットワークへのアップロードや他人への譲渡、販売、コピー、改変などを行うことは一切禁じます。
- * 本 CD-ROM に収録したデータなどを使った結果に対して、コロナ社、製作者は一切の責任を負いません。また本 CD-ROM に収録のデータの使い方に対する問い合わせには、コロナ社に対応しません。

第 I 部 — 縦糸編 —

1

ピタゴラスから 携帯電話までの音響学

おや、携帯電話の着信メロディが鳴り始めた。電話のようだ。

が、ちょっとうるさい。やかましい音はないほうがよいけれど、さりとて音が無いのも困る。音声は人と人とのコミュニケーションの基本なのだから。それに、音楽のない世界は寂しそう。この携帯電話も、音楽機能が充実しているのが、選んだ一つの理由だった。でも、逆に、うるさい騒音は困る。電話の声や音楽も雑踏の中だと聞こえにくくなる。これも耳の中の仕組みと関係がある。

携帯電話は、少し古風ないい方だと無線機的一种。必要な電波だけを選び出すのに超音波が使われている。つまり音はそんなところでも役立っている。

声、音楽、騒音、超音波、これらはみんな音。そう考えると、音は不思議だ。それに、よきにつけ、あしきにつけ、大事なものでもある。そんな音が学問の対象になったのは何千年も前にさかのぼる。そして、近代の物理学の発展とともに発展した。それが音響学。

この本では、9章にわたって音響学のおもしろさをひもといていく。この章では、その第一歩として、音響学の発展を簡単にではあれ調べてみよう。その後で、この本を読み進めていくのに必要な音響学の基礎の基礎を説明していくことにしたい。



1.1 私たちの暮らしと音

音が、私たちの暮らしのいたるところで、とても大切な役割を果たしていることは、だれしも認めるところだろう。音は、音楽の形で私たちの生活を豊かにし、音声の形で私たちのコミュニケーションを支え、とても大切な存在である。その一方、騒音として、ときに私たちのやっかいものになることもある。騒音は、古来から社会の環境問題となってきた。このように音は、暮らしと密接に結びついていることもあって、古くから科学者の好奇心を引き寄せてきた。この、音を科学として取り扱う学術分野を**音響学 (acoustics)**という。音響学が、私たちの暮らしと深く結び付いている身近な学問であることは、今や私たちの生活を支える機器といえる携帯電話を例にとるとよく理解できる。これを使って、例えば離れた人どうしが快適に通話できる影には、音響学が随所に生きているのだ。

携帯電話の原点である「電話」としての機能には、音を電気信号に変えるマイクroフォン、逆に電気信号を音に変えるスピーカあるいはレシーバが重要な役割を果たしている。これらの装置（デバイス）は**電気音響変換器**と呼ばれ、音響学の成果が随所に生かされている。また、電気信号に変換された音声をなるべく効率よく（つまり、少ない情報量で）伝送する符号化方式の開発には、音声の生成の仕組みや知覚、認知の仕組みの研究と、それを生かすデジタル信号処理の研究が欠かせない。携帯電話は電波を使って音声信号を送受信する。電波を混信なく取り出すために、弾性表面波（レイリー波）と呼ばれる超音波を利用した部品（弾性表面波フィルタ）が広く使われている。

また、騒音がうるさくて電話がとても聞き取りにくいときがある。騒音があるとなぜ聞き取りにくくなるのだろうか。それを理解するには聴覚の仕組みの研究が欠かせない。聴覚の仕組みと音の性質をよく知って信号処理を施すことによって、邪魔な騒音を取り除いたり、逆に、音声を強めたりして明瞭に音声聞き取れるようにする技術の開発も進んでおり、このような機能が載っている

携帯電話も多くなってきた。

携帯電話で音楽を楽しんでいる人も多いだろう。ピタゴラスの時代から、音階の決定などには音響学の知識が用いられてきた。楽器の音の研究はもちろん音響学の一分野である。携帯電話の音楽機能には、音楽を効率的に、しかし元の音質をなるべく損なわないようにデジタル符号化する技術や音質のよいヘッドフォンなど、最新の音楽音響や聴覚科学、デジタル信号処理、電気音響学などの研究成果が生かされている。

携帯電話一つとってみても、音が、会話や音楽を支える大事なメディア（情報を伝達する媒体）であることが理解できる。映画やテレビ放送などのように、一見すると映像が主たる役割を果たしているようにみえる場合でも、音のないテレビを想像すればすぐ理解できるように、音はきわめて重要な役割を果たしている。これらのシステム作りにあたって、音響学の役割は大きい。オーディオ機器はもちろんのこと、外国語を効率よく学ぶ方法の研究や、補聴器、コンサートホールをはじめとする公共空間の音環境作りなどにも、音響学は大事な役割を担っている。

また、このように直接音を聞き取る使いみちだけではなく、聞くことを目的としない音（超音波）も、例えば、ビデオカメラの手ぶれ防止機能を支える超音波ジャイロや、カメラの自動焦点調節用の超音波モータ、医療用の超音波診断装置、魚群探知機など、暮らしのそちこちで活躍している。

それでは、これらを支える学問である音響学は、いつごろどのような形で生まれ発展してきたのだろうか。次に、それを見てみることにしよう。

1.2 音響学の変遷と展開

1.1節で述べたように、音が暮らしの身近にあり、コミュニケーションや娯楽に大切な役割を果たしていることから、音は昔から、人々の興味、そして学問の対象となってきた。例えば、ピタゴラスなどは、弦の張りを一定に保ったまま、元の長さの $1/2$ や $2/3$ 、 $3/4$ など簡単な分数の長さになると、元の音

4 1. ビタゴラスから携帯電話までの音響学

とよく響きあうことを解き明かしている。しかし、古代の人は、音を物理現象と理解してはならず、音声、音楽、信号、警報などの伝送手段と考えていたと思われる。これは、音を現代のように、情報を運ぶ媒体（メディア）と見なしていたことになり、とても興味深いことである。この時代、音響学は、他のさまざまな科学分野と同様に、哲学と見なされていた。音は空気中を伝わる波動であるが、そのようなことは当時知られておらず、17世紀になって、このことが明らかになっていった。

その後、17世紀の物理学の発展とともに、音への理解が進んでゆく。図1.1は、この音響学の確立に大事な役割を果たした科学者たちの年代と貢献を示した年表である。

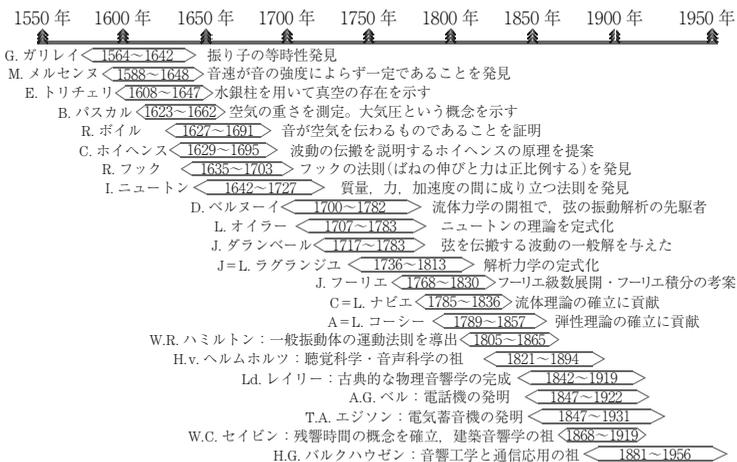


図1.1 音響学の確立に貢献した科学者たち

ガリレイが振り子の等時性を明らかにしたとき、振動が科学の対象になったとってよいだろう、音が空気中の振動の伝搬であることを考えると、近代的な音響学の原点はガリレイにあるとってよいと思われる。

その後、図にあるように、メルセンヌ、トリチェリ、パスカル、ボイル、

フック等の努力によって、空気というものの存在と性質が明らかになり、圧力や弾性の理解が進んでいった。また、ホイヘンスが波動の性質を明らかにし、ニュートンによって古典的な力学が完成した。このようにして、音は空中の波動現象であることが明らかになっていき、物理学としての音響学（物理音響学という）の一番基礎的な部分は17世紀末までに確立したといつてよい。ここで、かつて哲学だった音響学は、自然科学（物理学）の一部として発展することになった。

さらに、18~19世紀になると数学の進歩ともあいまって、弦を伝搬する波動、振動体の運動法則、弾性体の理論などが体系化され、物理学としての音響学が次第に確立されていった。また、フーリエは、音信号だけではなくさまざまな信号の解析に用いられているフーリエ変換の基礎となる数学を考案した。

現在、音響学は、物理学や工学のみならず、医学、生理学、心理学などさまざまな学問と関わりをもつ学際的な学問として発展している。その祖はヘルムホルツに求められるであろう。ヘルムホルツは、ヘルムホルツ共鳴器として物理学としての音響学に名を残しているのみならず、聴覚系が音を分析する仕組みを始めとした聴覚生理学に関する研究や、母音合成法の開発などさまざまな研究を行った。

物理学の一翼としての音響学は、このような先達の努力によって19世紀末ころまでに基本的な完成を見たといえよう。その象徴的なでき事が、レイリー卿が病氣療養中に執筆し1877年から78年にかけて発行された **The Theory of Sound** である。この本によって古典的な物理音響学はある意味完全に記述されたといわれている。

この年、1877年と1878年は、音響学が別の意味で大きな変化を遂げた年である。1877年にはベルにより電話が発明され、1878年にはエジソンにより電気蓄音機が発明されている。くしくも、物理音響学がThe Theory of Soundという形でまとめられた年に、音響学は物理学から工学へと分野を広げたといえるであろう。通信工学やメディア工学における音響学の研究は、20世紀初頭からドレスデン工科大学で弱電工学（Schwachstromtechnik、現代的には通信

6 1. ビタゴラスから携帯電話までの音響学

工学、電子工学とでもいうべき学問領域)の研究を主唱したバルクハウゼン[†]によりさらに進歩を遂げた。また、通信応用の研究は、超音波振動子の研究へと発展し、これは、さらに、水中音響応用や医用応用など、音響学の新しい分野を切りひらいた。また、セイピンは、自らが所属するハーバード大学の講堂の音響特性の改善を考える中で、残響時間という概念を作り上げ、**建築音響学**と呼ばれる音響学の一分野の創始者となった。これは、19世紀が20世紀に変わりゆく頃のことである。

その後、物理学的な現象としての音のみならず、音や音声伝える意味内容という観点からの研究も、ベル研究所のフレッチャーなどを主導者として発展していった。20世紀も半ばになると、ウィーナーによって、通信や制御を機械と生物に共通の原理で解き明かそうとする**サイバネティクス**が提唱され、これが契機となって、情報学が確固たる学術分野として確立した。その中で、音が情報を伝える媒体(メディア)であるということが改めて意識され、音響学は、工学と情報学の融合領域としてさらに発展した。その結果、音声の知覚や生成、さらには工学的な自動音声認識や音声合成などの技術が音響学の重要な分野を占めるようになった。

1960年代以降、音信号をデジタル化して取り扱う技術が急速に発展した。その大きなきっかけとなったのは、1965年にクーリーとテューキーが、音のみならずさまざまな信号の解析の基盤となっているフーリエ変換をきわめて効率的に(したがって速く)計算できるアルゴリズムである、**高速フーリエ変換(FFT: fast Fourier transform)**を発表したことである。音に関する**デジタル信号処理**の研究は、デジタル信号処理の研究自体を先導する形で大きく発展した。現在では、音のデジタル信号処理は、音響学のあらゆる分野に欠かせない基盤技術となっている。

日本における音響学の源流は、田中館愛橘により始められた、東京帝国大学(現在の東京大学)理学部における音響学であるといえよう。田中館は、東大

[†] 聴覚における臨界帯域の単位 Bark (バルクあるいはパーク)としても名を残している。

索 引

<p style="text-align: center;">〔あ〕</p> <p>アクティブノイズ コントロール 69, 142</p> <p>圧電 151</p> <p> —効果 51, 149</p> <p> —スピーカ 59</p> <p> —素子 51, 59, 153, 156, 166, 168, 169</p> <p> —マイクロフォン 51</p> <p>厚み振動 149, 153</p> <p>アナログ</p> <p> —・デジタル変換 206</p> <p>アノイアンス 131</p> <p>アポダイズ 165</p> <p>アレイ 71, 157</p> <p>アンビソニックス 65</p> <p style="text-align: center;">〔い〕</p> <p>異音 80</p> <p>位相 172, 176, 234</p> <p> —固定 31, 33</p> <p> —反転型エンクロージャ 63</p> <p>位置エネルギー 173</p> <p>インパルス 222</p> <p> —応答 125, 129, 131, 222</p> <p>韻律 80, 99</p> <p style="text-align: center;">〔う〕</p> <p>渦 109, 196</p> <p>ウーファ 62</p> <p>運動エネルギー 173</p> <p style="text-align: center;">〔え〕</p> <p>エイリアシング 208</p> <p>エレクトレット 50</p>	<p style="text-align: center;">〔お〕</p> <p>オイラーの公式 213, 235</p> <p>オクターブ 18, 39, 40, 105, 106, 107</p> <p>オクターブバンド 129</p> <p> —フィルタ 18, 19</p> <p> —分析 134, 136</p> <p>音の大きさ 19, 36, 131</p> <p>音の高さ 34, 36, 39</p> <p>音の強さ 10, 189, 194</p> <p>音の強さのレベル 13</p> <p>折り返し歪み 208</p> <p>音圧 9, 182, 188, 203</p> <p> —レベル 14, 21, 131, 133, 232</p> <p>音韻 80, 95, 97</p> <p> —修復 98</p> <p>音階 104</p> <p>音楽音響 7, 102</p> <p>音楽情報処理 113</p> <p>音楽の符号化 117</p> <p>音響インテンシティ 189</p> <p>音響インピーダンス 188</p> <p>音響化学 160</p> <p>音響学 2</p> <p>音響管 79</p> <p>音響管モデル 76</p> <p>音響光学変調器 169</p> <p>音響障害 127, 128</p> <p>音響放射力 160</p> <p>音響流 161</p> <p>音源 9</p> <p>音声 7, 75</p> <p> —合成 88, 115</p> <p> —対話システム 93</p> <p> —知覚 94</p> <p> —認識 90, 115</p> <p> —翻訳 94</p> <p>音節 81</p>	<p>音素 81</p> <p>音像定位 26, 66, 67</p> <p>音速 10, 147, 155, 180, 183, 186, 188</p> <p>音波 9, 181, 185</p> <p>音脈 43</p> <p style="text-align: center;">〔か〕</p> <p>開音節 81</p> <p>外耳 27</p> <p>回折 12, 196</p> <p>外有毛細胞 29, 45, 64</p> <p>海洋音響 154</p> <p> —トモグラフィ 154</p> <p>蝸牛 29</p> <p> —神経核 27, 31, 34</p> <p>下丘 27, 36</p> <p>拡散 124, 127</p> <p>カクテルパーティ効果 42</p> <p>隠れマルコフモデル 91, 92</p> <p>加速度 235</p> <p>可聴周波数 15, 61, 119</p> <p>楽器 108</p> <p>角周波数 234</p> <p>感性性難聴 31, 44</p> <p>管楽器 76, 108, 109</p> <p style="text-align: center;">〔き〕</p> <p>基音 103</p> <p>基底膜 29</p> <p>基本周波数 16, 77, 103, 115</p> <p>基本波 16, 103, 212</p> <p>逆2乗則 12</p> <p>キャビテーション 160</p> <p>吸音 12, 123, 130</p> <p> —材 129, 130</p> <p> —率 12, 123, 130, 191</p> <p> —力 124, 131</p> <p>吸収減衰 193</p> <p>球面波 12, 193</p>
--	---	---

境界音場制御法	65, 68		
共振	27, 63, 78, 109, 113, 148, 149, 175, 202		
共振周波数	175, 181		
共鳴	27, 202		
協和度	103		
距離減衰	12, 193		
		[く]	
屈折	191		
		[け]	
ケプストラム	91, 97, 116		
弦	201		
弦楽器	108, 109		
言語情報	95		
減衰	11		
—振動	172, 176		
建築音響	8, 143		
		[こ]	
5.1チャンネルサラウンド	66, 119		
コインシデンス効果	137, 193		
高速フーリエ変換	6, 218		
高調波	16, 113, 148, 211		
高能率符号化	118		
固体音	139		
固体の振動	203		
弧度法	172, 234		
コーパス	90, 94		
固有周波数	128, 175		
固有モード	128, 203		
混合性難聴	44		
コンデンサスピーカ	58		
コンデンサマイクroフォン	50		
		[さ]	
最小可聴値	14, 37		
サイドローブ	73, 221		
三角関数	233		
残響	123		
—時間	123, 125, 130		
—室	130		
サンプリング	82, 117, 206		
—周波数	119, 206		
散乱	159		
		[し]	
子音	76, 80, 95		
時間領域	215		
刺激後時間	32		
指向性	54, 195		
指向特性	54		
耳小骨	28		
質量則	137		
時定数	134, 178		
自動採譜	115		
遮音	137		
自由音場	130		
周期	15, 171, 178		
—音	16, 110		
周波数	10, 15, 147, 157, 170, 181, 207, 235		
—成分	16, 212		
—領域	216, 223, 227		
純音	15		
純正律	106		
上オリーブ複合体	27, 31, 35		
初期反射音	129		
進行波	32, 167, 187		
シンセサイザ	87, 109, 114		
振動子	149, 176		
振動モード	149		
		[す]	
スコーカ	62		
ステレオ	66, 117, 119		
スピーカ	57, 177		
スピーカエンクロージャ	62		
スペクトル	16, 214		
周波数—	16, 19, 25, 79, 97, 101, 110, 116, 208, 215		
—パワー—	16, 214		
ずれ変形	149, 198		
		[せ]	
正弦波	15, 172, 211		
声帯	75, 99, 100		
—音源波	75, 100		
声調	80		
声道	76, 79, 100		
積分	237		
全音	105		
線形予測	86		
線形量子化	83, 117		
先行音効果	129		
セント	107		
		[そ]	
騒音	7, 20, 131		
—計	133		
—性難聴	64, 141		
—の分類	133		
—レベル	21, 132, 134, 233		
速度	235		
ソーナ	154		
素片接続合成	89		
疎密波	10, 179, 182		
		[た]	
対数	230		
—量子化	83		
ダイナミックスピーカ	57		
ダイナミックマイクroフォン	48		
ダイナミックレンジ	54, 120		
打楽器	109		
たたみ込み演算	166, 224		
縦波	146, 157, 179, 193, 197, 199		
ダミーヘッド	67		
たわみ振動	150, 167, 200		
たわみ波	157, 193, 200, 201		
単位円	217, 233		
単音節明瞭度	95		
弾性	171		
—波	146		
—表面波	2, 146, 147, 151, 194		
—表面波フィルタ	165		
		[ち]	
中耳	26, 28		
調音	76		
—器官	97		
超音波	3, 7, 119, 146, 177, 184, 194		
—トランスデューサ	148		
—モータ	167		
聴覚	7, 22		
—域値	14, 37		
—フィルタ	38		

—野	27, 36	トランスオーラル	68	歪み	58
聴神経	31	トランスデューサ		ピタゴラス律	105
調波構造	16, 110, 116		148, 153, 156	ピッチ	15, 34, 36, 39, 41
調波複合音	103, 110	[な]		響き	104, 122, 129
張力	104, 201	ナイキスト周波数	208	微分	185, 235
直接音	122, 125, 129	内耳	27, 28	標本化	206
[つ]		内側膝状体	27, 36	—周波数	206
ツイータ	62	内有毛細胞	29	—定理	208
[て]		難聴	44	表面波	151, 157
定在波	113, 168, 190, 201	[ね]		ピンクノイズ	19
デジタル	206	音色	36, 41, 112	[ふ]	
—アナログ変換	210	[の]		フィルタ	18
—信号処理	206	ノイジネス	131	笛	109, 196
—フィルタ	227	脳幹	31	フェーズドアレイ	157
定常状態	124	能動騒音制御	69, 142	フォルマント	79, 96, 97, 100
定常波	190	のど	60	—合成	89
適応フィルタ	69	[は]		—周波数	79
デコーダ	90	倍音	16, 103, 113	複素数	213, 235
デシベル	13, 231	媒質	9, 146, 171, 178, 181	符号化	82, 117
デルタ・シグマ変調	119, 209	バイノーラル	68	フーリエ級数	211
点音源	11, 194	波数	186, 188	フーリエ係数	212
伝音性難聴	29, 44	パスレフ型エンクロージャ		フーリエ変換	5, 6, 17, 211, 223, 233
電気音響	7		63	[へ]	
—変換	47, 57	波長	10, 179	閉音節	81
電子楽器	109, 114	波動方程式	162, 185, 186	平均律	107
伝達関数	223, 227	波面合成法	65, 68	平面波	10, 12, 192
[と]		パラ言語情報	95, 99	ヘッドフォン	63
透過	137, 190	パラメトリックスピーカ	162	偏微分	186, 237
—係数	190	半音	106, 107	[ほ]	
等価矩形帯域幅	38	反射	12, 122, 129	ボイスコイル	48
等価騒音レベル	135, 141	—音	12, 122, 126, 129	ホイヘンスの原理	70
透過損失	137	—係数	190	母音	76, 80, 95
透過率	137, 191	—波	189	方向定位	26, 35
動電型マイクロフォン	48	—率	12, 190	ボコーダ	87, 115
頭部伝達関数	24, 26, 68	半母音	80, 95	補聴器	45, 144
等ラウドネスレベル曲線		[ひ]		ホワイトノイズ	19
	19, 37	ビェゾ効果	51, 149	ホン	21
特性音響インピーダンス	10, 188	比音響インピーダンス	10, 187	ホーンスピーカ	60
特徴周波数	31	光マイクロフォン	52	[ま]	
特徴量	40, 91, 97	非協和度	103	マイクロフォン	47, 177, 182
ドップラ効果		非言語情報	95, 99	—アレイ技術	71
	153, 156, 158	非線形	148, 162, 166, 184	マザーク効果	98
トノトピー	29, 32, 34	非線形量子化	83	マグネティックスピーカ	58
ドラッグデリバリー	164			膜の振動	202

マスキング	37, 118	モーラ	81	粒子速度	9, 182, 188, 189
窓掛け処理	220	[ゆ]		了解度	83, 95, 99
窓関数	219	有声子音	76	量子化	82, 118, 206
マルチウェイスピーカ	61	有毛細胞	30, 64	——誤差	85, 207
[む]		床衝撃音	133, 136, 139, 141	——雑音	207
無響室	130	[よ]		両耳間強度差	23
無声子音	76	横波	146, 157, 193, 197, 198	両耳間時間差	24, 25
[め]		[ら]		臨界帯域	38
明瞭度	95	ラウドネス	19, 36, 41, 45, 131	[れ]	
メインロープ	73, 221	——レベル	20	レイリー波	2, 193, 201
メル	40, 91	ラジアン	234	レベル	13, 231
[も]		[り]		[ろ]	
モード	113, 128, 147, 149, 203	離散フーリエ変換	210, 216	録音合成	89
——変換	147, 193			[わ]	
モノラル	65, 119			和音	106, 116



[A]		[E]		[M]	
AAC	118	ERB	38	mel	40
acoustics	2	[F]		MEMS	51, 152, 166
ADPCM	84	FFT	6, 218	MFCC	91
A-D 変換	206	FIR	227	MP3	38, 118
ANC	69, 142	[H]		[P]	
A 周波数重み付け	21	HIFU	164	PCM	82, 206
A 特性	21, 134	HMM	90, 91, 92	P 波	199
——音圧レベル	21, 132, 134, 233	——音声合成	90	[Q]	
[B]		HRTF	24, 67	Q (Q 値)	32, 165, 176
BoSC 法	65, 68	[I]		[S]	
[C]		IDT	151, 164	SAW	147
CD	116	IR	228	——フィルタ	165
[D]		ILD	23	S 波	199
D-A 変換	209	ITD	24	[W]	
dB	13, 231			WFS 法	65, 68

— 著者略歴 —

鈴木 陽一（すずき よういち）

東北大学教授 工博 聴覚過程とそれに基づく音信号処理の研究に従事。日本音響学会会長、編集委員長等を歴任。著書に「聴覚モデル」（コロナ社、共著）など。

伊藤 彰則（いとう あきのり）

東北大学教授 工博 音声言語処理、音楽情報処理などの研究に従事。著書に「音声認識システム」（オーム社、共著）など。日本音響学会理事・編集委員会主査。

菅木 禎史（ちさき よしふみ）

熊本大学准教授 博士（工学）音信号処理に従事。日本音響学会評議員、電気音響研究会副委員長、編集委員会電気音響分野幹事。

赤木 正人（あかぎ まさと）

北陸先端科学技術大学院大学教授 工博 音声・聴覚の研究に従事。日本音響学会編集委員長、副会長等を歴任。著書に「音のなんでも小辞典」（講談社、共著）など。

佐藤 洋（さとう ひろし）

産業技術総合研究所主任研究員 博士（工学）建築音響、騒音制御、福祉音響の研究に従事。日本音響学会理事。

中村 健太郎（なかむら けんたろう）

東京工業大学教授 博士（工学）超音波工学の研究に従事。日本音響学会副会長。著書に「音のなんでも小辞典」（講談社、共著）など。

音響学入門

Introduction to Acoustics

©（社）日本音響学会 2011

2011年3月23日 初版第1刷発行

検印省略

編 者 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 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 978-4-339-01301-6

（吉原）

（製本：グリーン）

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す