

日本音響学会 編

音響学講座

1

基礎音響学

安藤 彰男

編著

鈴木 陽一 古川 茂人

共著



コロナ社

音響学講座編集委員会

編集委員長

安藤彰男（富山大学）

編集委員

秋山いわき（同志社大学）	岩野 公司（東京都市大学）
及川 靖広（早稲田大学）	阪上 公博（神戸大学）
坂本 眞一（滋賀県立大学）	佐藤 史明（千葉工業大学）
滝口 哲也（神戸大学）	荻木 禎史（千葉工業大学）
寺澤 洋子（筑波大学）	古川 茂人（日本電信電話株式会社）
松尾 行雄（東北学院大学）	山田 真司（金沢工業大学）
山本 貢平（小林理学研究所）	渡辺 好章（同志社大学）

（2018 年 12 月現在，五十音順）

「音響学講座」発刊にあたって

音響学は、本来物理学の一分野であり、17世紀にはその最先端の学問分野であった。その後、物理学の主流は量子論や宇宙論などに移り、音響学は、広い裾野を持つ分野に変貌していった。音は人間にとって身近な現象であるため、心理的な側面からも音の研究が行われて、現代の音響学に至っている。さらに、近年の計算機関連技術の進展は、音響学にも多くの影響を及ぼした。日本音響学会は、1977年以来、音響工学講座全8巻を刊行し、わが国の音響学の発展に貢献してきたが、近年の急速な技術革新や分野の拡大に対しては、必ずしも追従できていない。このような状況を鑑み、音響学講座全10巻を新たに刊行するものである。

さて、音響学に関する国際的な学会活動を概観すれば、音響学の物理／心理的な側面で活発な活動を行っているのは、米国音響学会（Acoustical Society of America）であろう。しかしながら、同学会では、信号処理関係の技術ではどちらかという手薄であり、この分野はIEEEが担っている。また、録音再生の分野では、Audio Engineering Societyが活発に活動している。このように、国際的には、複数の学会が分担して音響学を支えている状況である。これに対し、日本音響学会は、単独で音響学全般を扱う特別な学会である。言い換えれば、音響学全体を俯瞰し、これらを体系的に記述する書籍の発行は、日本音響学会ならではの活動ということができよう。

本講座を編集するにあたり、いくつか留意した点がある。前述のとおり本講座は10巻で構成したが、このうち最初の9巻は、教科書として利用できるよう、ある程度学説的に固まった内容を記述することとした。また、時代の流れに追従できるよう、分野ごとの巻の割り当てを見直した。旧音響工学講座では、共通する基礎の部分を除くと、6つの分野、すなわち電気音響、建築音

響，騒音・振動，聴覚と音響心理，音声，超音波から成り立っていたが，そのうち，当時社会問題にもなっていた騒音・振動に2つの巻を割いていた。本講座では，昨今の日本音響学会における研究発表件数などを考慮し，騒音・振動に関する記述を1つの巻にまとめる代わりに，音声に2つの巻を割り当てた。さらに，音響工学講座では扱っていなかった音楽音響を新たに追加すると共に，これからの展開が期待される分野をまとめた第10巻「音響学の展開」を刊行することとし，新しい技術の紹介にも心がけた。

本講座のような音響学を網羅・俯瞰する書籍は，国際的に見ても希有のものと思われる。本講座が，音響学を学ぶ諸氏の一助となり，また音響学の発展にいささかなりとも貢献できることを，心から願う次第である。

2019年1月

安藤彰男

「音響学講座」の全体構成は以下のようにになっている。

第1巻 基礎音響学

第2巻 電気音響

第3巻 建築音響

第4巻 騒音・振動

第5巻 聴覚

第6巻 音声（上）

第7巻 音声（下）

第8巻 超音波

第9巻 音楽音響

第10巻 音響学の展開

ま え が き

音響学は、物理学や心理学を基盤とした広い裾野を持つ学術分野である。また、近年では、音響学に関わる信号処理技術も目覚ましい発展を遂げた。音響学講座の第1巻である本書は、この広範囲にわたる学問を理解するために必要な基礎知識の提供を目的として、執筆されたものである。

音響学に親しむための第一歩は、その歴史を知ることであろう。第1章では、音響学の成り立ちから現在に至る歴史を述べた。この際、わが国の音響学の歴史も紹介することとした。このような歴史から明らかなように、音響学は、物理学の一分野として発展したものであり、音響学を学ぼうえて、音の物理の理解は欠かせない。第2章では、このような学問的背景を考慮し、音に関する物理をなるべくコンパクトに記述した。また、最近の研究動向も考慮し、音の回折理論にも紙面を割いた。音響学のもう1つの特徴は、心理学や生理学の分野とも密接な関係を持つことである。第3章では、聴覚に関する心理、生理について概説した。本章からも十分な基礎的知識は得られるが、この分野に興味を持つ読者は、第5巻「聴覚」に読み進んでいただきたい。第4章では、計算機技術の進展に支えられて発展した信号処理技術を解説した。この章では、旧音響工学講座では触れられていなかったオーディオ符号化に関する技術も記述した。一方、声の分析技術については最小限の記述にとどめ、詳細は第6巻「音声（上）」に委ねた。興味のある読者は、そちらの巻も参照していただきたい。

さて、音の物理や信号処理を理解するためには、様々な数学書に目を通す必要がある。このような読者の苦労を軽減するため、本書では、第5章で音響学に関連する数学を簡潔に紹介した。このような章を持つことも、本書の大きな特徴である。

以上で述べたように，本書の記述内容は広範囲にわたっている。さらに，第2章で記述した音の物理や，第4章で記述した信号処理技術は数理理論に基づく分野であるが，第3章で述べる聴覚は実験的な事実に基づく分野である。本書では，このような分野ごとの特質を重視し，記述スタイルはあえて統一しなかった。読者の寛容を請う次第である。

最後に，本書の活用方法について触れておく。各章は異なる内容を扱っているので，必要となる章のみを読むことでも，本書は読者のお役に立てると信じている。ただし，記述の重複を避けるため，第2章の数式の導出の一部を第5章に委ねた。第2章の該当部分については，書かれている数式を信用して読み進んでいただければ幸いである。

本書は，以下のように分担して執筆した。本書によって読者諸氏の音響学への理解を手助けすることができれば，著者らにとっては望外の喜びである。

安藤彰男 2章, 4章, 5章

鈴木陽一 1章

古川茂人 3章

2019年1月

安藤彰男

目 次

1章 音響学略史

1.1 音響学前史	2
1.2 物理学としての音響学の発展（16世紀～19世紀）	3
1.3 音響工学の誕生（19世紀末～20世紀前期）	7
1.4 日本における音響学の定着と展開 （創始から第2次世界大戦のころまで）	10
1.5 音響学の多面的発展（20世紀中期～後期）	12
引用・参考文献	17

2章 音の物理

2.1 振動の基礎	19
2.1.1 周期振動	19
2.1.2 単振動	20
2.1.3 減衰振動	22
2.1.4 強制振動	24
2.1.5 共振	26
2.2 連続体の振動	28
2.2.1 弦の振動	28
2.2.2 棒の縦振動	32
2.2.3 棒の横振動	33
2.2.4 膜の振動	37
2.3 波動方程式	48
2.3.1 連続方程式	49
2.3.2 オイラーの運動方程式	50

2.3.3 熱力学と状態方程式	52
2.3.4 音波の方程式	54
2.4 音 波	58
2.4.1 膨 張 度	58
2.4.2 速度ポテンシャル	60
2.4.3 音 圧 レ ベ ル	61
2.4.4 平 面 波	62
2.4.5 球 面 波	65
2.4.6 点 音 源	69
2.5 回 折 理 論	70
2.5.1 音波のフーリエ変換	70
2.5.2 ヘルムホルツ方程式	75
2.5.3 ガウスの定理とグリーンの定理	76
2.5.4 キルヒホッフ-ヘルムホルツの積分定理	77
2.5.5 レイリー積分	81
引用・参考文献	84

3章 聴 覚 の 基 礎

3.1 聴覚理解のための前提知識	86
3.1.1 時間波形とスペクトル	86
3.1.2 線形性とひずみ	89
3.1.3 振 幅 変 調	89
3.2 聴覚の生理学	90
3.2.1 末梢系の概略と構造	90
3.2.2 基底膜の振動	93
3.2.3 有毛細胞～聴神経の信号伝達	95
3.2.4 聴 神 経	96
3.2.5 外有毛細胞の能動機構	98
3.2.6 聴 覚 中 枢 系	99
3.3 聴覚の心理学	104

3.3.1 最小可聴値	104
3.3.2 周波数分解能とマスキング	105
3.3.3 ラウドネス	111
3.3.4 音の強さの弁別, ダイナミックレンジ	119
3.3.5 音の高さ (ピッチ)	122
3.3.6 空間知覚・両耳聴	125
3.3.7 聴覚情景分析	130
3.3.8 音色	132
3.3.9 音声の知覚	133
引用・参考文献	137

4章 音の信号処理

4.1 音のデジタル化	145
4.1.1 標本化と量子化	145
4.1.2 離散時間信号のフーリエ変換	146
4.1.3 標本化の数理	146
4.2 離散時間システムと z 変換	150
4.2.1 離散時間信号と線形シフト不変システム	150
4.2.2 システム応答	152
4.2.3 z 変換	152
4.2.4 伝達関数	156
4.2.5 アップサンプリングとダウンサンプリング	157
4.2.6 離散フーリエ変換と離散コサイン変換	159
4.2.7 窓関数	160
4.2.8 重畳加算法	163
4.3 音声の分析法	165
4.3.1 全極モデルと自己回帰過程	165
4.3.2 線形予測分析	166
4.3.3 Levinson-Durbin アルゴリズム	168
4.4 楽音の分析法	171

4.4.1	2 帯域完全再構成フィルタ	171
4.4.2	直交ミラーフィルタ	173
4.4.3	共役直交フィルタ	174
4.4.4	疑似直交ミラーフィルタ	175
4.4.5	MDCT を用いた完全再構成分析合成系	177
引用・参考文献		186

5 章 音響学のための数学

5.1	線形代数とベクトル解析	189
5.1.1	数ベクトル空間	189
5.1.2	計量ベクトル空間	196
5.1.3	線形写像	201
5.1.4	固有値と固有ベクトル	203
5.1.5	ベクトルの微分	205
5.1.6	ベクトルの積分	208
5.2	微分方程式	209
5.2.1	フーリエ級数	210
5.2.2	常微分方程式	212
5.2.3	2階偏微分方程式	216
5.3	球関数	221
5.3.1	極座標系	221
5.3.2	波動方程式の極座標表現による解	222
5.4	球関数に基づく音場理論	229
5.4.1	グリーンの公式	229
5.4.2	ヘルムホルツ方程式の解	233
5.4.3	球面波の球関数展開	234
5.5	補足	237
引用・参考文献		239

1 章

音響学略史

◆本章のテーマ

学問の成り立ちは、その学問を理解するうえで大きな役割を果たすことが多い。そこで本章では音響学の歴史を概観する。

音を学問することの歴史は紀元前に遡ることができる。そのような長い前史を経て、音響学は、ルネサンス以降、物理学の一分野として発展し、一時期は最先端の学問であった。その後、相対性理論や量子力学に道を譲った後は電気工学と結びつくことにより、今日の音響工学の基礎が築かれた。近年は計算機技術の利用や環境に対する意識の高まりにより様々な応用分野が開拓され、現在では多くの分野で生活に密接に関わる学問、技術として活躍している。

音響学の理論には多くの数式が登場する。一見、近寄りにくく思えるかもしれないが、実際には音響学は身近な技術を支える学問である。本章を学習することにより、音響学に親しみを覚えていただければ幸いである。

◆本章の構成（キーワード）

1.1 音響学前史

ピタゴラス、音律

1.2 物理学としての音響学の発展（16世紀～19世紀）

ガリレイ、音速、振動・波動、ホイヘンス・フレネルの原理

1.3 音響工学の誕生（19世紀末～20世紀前期）

レイリー卿、電話、電気音響変換、建築音響、磁気記録、聴覚科学

1.4 日本における音響学の定着と展開（創始から第2次世界大戦のころまで）

日本音響学会、音響科学、母音論

1.5 音響学の多面的発展（20世紀中期～後期）

音響ホログラフィ、デジタル技術、超音波工学、音声情報処理

1.1 音 響 学 前 史

音は昔から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きた。古くから音が人々の興味を引き、学問の対象となってきたのも自然なことで理解できる。ピタゴラス（前 580 ころ～前 497）は、弦の張りを一定に保ったまま、弦の長さの $1/2$ や $2/3$, $3/4$ など簡単な分数の長さにすると、元の音とよく響き合うことを解き明かしている。また、建築に関する書物には反射音の重要性や逆に音声の聞き取りを困難にする要因であることも記されている。しかし古代では現代でいう物理学の概念が形作られておらず、**音響学**（acoustics）は他の様々な科学分野と同様に、まとめて哲学と見なされていた。その中で、音は音声、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。また、この時代、プラトン（前 430 ころ～前 347）の著作でも示唆されているように空気が音を伝えるものであることを主張する者もいた。しかし、逆に空気の関与を否定する者もあり、最終的に決着がついたのは後に述べるボイルの実験によってである。

中世においても現代に比べると学問ははるかに未分化であった。その中で、中世の大学の上級課程では算術、幾何、天文とならび音楽が必須の 4 科目を構成していた。しかし、音楽を学ぶ中で音そのものを学ぶ音響学が意識されていたとは言えないように思われる。ピタゴラスによる音律が多声音楽には向かないことから、純正律と呼ばれる音律が作られたのは 15 世紀末のスペインにおいてである。しかしこれは西欧におけるピタゴラス以来の音律に関する科学があったためではなく、ピタゴラス音律が当時西欧よりも高い文明を持っていたアラブ世界に伝わり、それが中世のスペインに伝えられたことの流れの中にあるものと思われる。

1.2

物理学としての音響学の発展（16 世紀～ 19 世紀）

現在、音とは、運動エネルギーと位置エネルギーの相互作用である**機械波**（mechanical wave）のうち、運動エネルギーと弾性エネルギーの相互作用による波動であると理解されている。したがって、音の物理学的解明には、振動や弾性の理解も不可欠である。17 世紀は、音を含む様々な現象について、実験と、それを説明しようとする理論的研究が、^{あや}綾なす糸のように進められた時代であった。そのような営みを背景に物理学が発展し、音への理解が進んでいく。

そのような流れは、長い中世の終わりとともに始まったルネサンスが作りだしたものと考えられる。ルネサンスがイタリアからヨーロッパへと波及しつつあったころ、レオナルド（1452～1519）は、音声には空気の動きか衝撃が常に伴うこと、水面上を伝搬する波と音は同じ現象であることなどの考察を残している。また、あるリュートの弦を鳴らすと近くにある別のリュートの同じ弦が震えて音を出すことなど音に関して多くの観察結果を記している。しかし、これらは体系化された科学というよりは観察と直感の記録と呼ぶべきものであろう。なお、レオナルドの記した水面の波は運動エネルギーと重力による位置エネルギーの相互作用によるもので、機械波の一種ではあるが**重力波**（gravity wave）と呼ばれるものであり、物理学では音と区別されるものである。

ガリレイ（1564～1642）は、弦の長さと言の高さ（ピッチ）との関係を調べ、単位時間当りの振動数が音の高さと関係することを示した。彼が振り子の等時性を明らかにしたことはよく知られている。音も一種の振動であることを考えれば、近代的な音響学の原点はガリレイにあるといっていよう。

音が空気を介して伝わるものであることが明確に示されたのも 17 世紀になってである。ボイル（1627～1691）はベルの入った瓶のなかの空気をポンプで抜いていくにつれて音が小さくなり、ついには聞こえなくなることを示した。この時代、空気そのものの性質と、圧力や弾性、波動に関する研究も進んでいく。トリチェリ（1608～1647）は水銀柱を用いて真空の存在を示し、パ

スカル（1623～1662）は空気の重さを測定し大気圧という概念を示した。また、フック（1635～1703）は、ばねの伸びと力が正比例すること（フックの法則）を導いている。同じころ、ホイヘンス（1629～1695）は波動の伝搬を説明する**ホイヘンスの原理**（Huygens' principle）を示した。

音速の測定が行われたのも17世紀であった。1630年代になるとガッサンディ（1592～1655）とメルセンヌ（1588～1648）が銃を使った同じような実験により音速を測定した。銃を発砲した時の閃光と音の時間差から、それぞれ478 m/s, 450 m/sという結果を導いた。また、ガッサンディは音速がピッチ（音楽的な音の高さ）によらず一定であること、メルセンヌは音速が音の強度によらず一定であることや、音の周波数とピッチの関係を示している。1650年代には、ボレリ（1608～1679）とビピアニ（1622～1703）が350 m/sと、現在われわれが知っている値に近い測定結果を得ている。なお、ほぼ正確な音速が得られたのは18世紀も後期になってからであった。1783年、パリアカデミーの研究者らは337 m/sとの測定値を得、音速は気温が高いほど速くなることも示した。

音速を例に、理論的な音の理解の進歩をみてみよう。音速の理論式として記録に残る最初の例はニュートン（1642～1727）によるものである。彼は有名な著書プリンキピアの中で弾性力が密度に比例すると仮定し、音速は大気圧と空気の密度の平方根として与えられるとした。しかし、この式で計算する音速値は約280 m/sとなり、当時の実測値や現在私たちが知る音速（摂氏15度で約340 m/s）を下回るものであった。18世紀の後半、ラグランジュ（1736～1813）は弾性力が密度に比例するとの仮定が誤りであり、弾性力が密度の4/3乗に比例するなら測定値に一致すると予測した。19世紀に入りラプラス（1749～1827）は、この考えを推し進め、ニュートンの与えた式の問題が空気の圧力の変化があっても温度の変化がない（等温過程）と見なしたことにあるとした。正しくは、音の空気振動による熱の変化が周囲に伝わる速度より、音速のほうがはるかに速いため局所的な温度が変化すると考えるべき（断熱過程）として、今でも音速の理論式として用いられている式（式（2.86））を与えた。

弾性力は密度の約 1.4 乗に比例するのである。なお、ニュートンの考えた弾性力を体積弾性率と読み替えれば、彼が与えた式は現代のわれわれが液体の音速を計算するのに用いている式そのものである。このようにして、音の様々な性質や、音が空中の波動現象であることが明らかになっていった。物理学としての音響学（現代の音響学では**物理音響学**と呼ばれる分野）の一番基礎的な部分は 17 世紀末までに確立したといってよい。言い換えると、かつて哲学の一部だった音響学は、自然科学（物理学）の一部として発展していった。

18～19 世紀には、数学の進歩ともあいまって、音のみならず、振動、波動一般について運動法則、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さらに確立されていった。ニュートンがプリンキピアで示した運動の法則は、そのおよそ 50 年後の 1736 年、オイラー（1707～1783）によって実用的な定式化が行われ、音響学の進歩にもつながった。また、上記のラグランジュやラプラスもこの時代の貢献者である。他にも、流体力学の基礎を築いた科学者として知られているベルヌーイ（1700～1782）は弦の振動解析の先駆者である。また、ダランベール（1717～1783）は弦を伝搬する波動について、両方向の波動を用いた一般解を与えた。ナビエ（1785～1836）は後年の**ナビエ-ストークス方程式**（Navier-Stokes equation）につながる流体理論を確立、コーシー（1789～1857）は応力の概念を確立して弾性理論を体系化し、ハミルトン（1805～1865）は一般振動体の運動法則を導出するなどの貢献を行っている。数学領域では、フーリエ（1768～1830）が、音信号だけではなく様々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。

ここまでは空気を伝搬する音を考えてきた。音は空気（気体）以外にも、水中（液体）や固体の中も伝搬する。水中の音速を本格的に測定したのは 1826 年のコラドン（1802～1893）による実験と考えられる。湖の水中に吊^{つる}した鐘と閃光を用いて、約 1440 m/s とほぼ正確な値を得ている。固体については 1800 年前後ころから本格的な測定が行われたようである。ビオ-サバルの法則に名を残すビオ（1774～1862）は長さ 1000 m の鑄鉄パイプを用いて空気中の音速と比較し、鉄の音速を与えている。これはその少し前に測定されたク

【あ】

圧縮度	55
圧電効果	8
圧力	48
アンビソニックス	14

【い】

位相	19, 86
位相固定	97
位相スペクトル	87
一次結合	191
一次従属	191
一次独立	191
一般解	212
インパルス応答	152

【う】

ウェーバー比	119
渦度	60

【え】

エコーロケーション	8
円形膜	37
遠心性	100
円柱座標系	42

【お】

オイラーの運動方程式	50
音の大きさ	111
音の高さ	122
音の強さ	12, 16
音圧	54
音圧レベル	62
音響インテンシティ	12
音響学	2
音響ホログラフィ	12
音源定位	125
音源-フィルタモデル	134

音質	133
音声知覚の運動理論	137
音素	16, 136
音像定位	126
音速	4
音素修復	135
音場	6
音脈分凝	130

【か】

カイザー-ベッセル派生窓	165
カイザー-ベッセル窓	162
回転	207
外有毛細胞	16, 92, 95, 98
ガウスの定理	49, 51, 76, 208
蝸牛	91
下丘外側核	102
蝸牛神経核	101
下丘中心核	102
角周波数	19
カクテルパーティ効果	132
過減衰	23
下行性	100
過渡音	86
感覚レベル	105
完備	198
ガンマチャープ	107
ガンマトーン	107

【き】

機械波	3
疑似直交ミラーフィルタ	176
気体定数	52
基底	192
基底膜	92
基本周波数	86
求心性	100
球ノイマン関数	225

球ハンケル関数	227
球ベッセル関数	225
球面調和関数	225
球面波	65
境界条件	217
境界要素法	14
強制振動	24
共分散法	168
共鳴曲線	27
共役直交フィルタ	175
行列	203
極	154
極座標系	221
距離	198
キルヒホッフの積分定理	6
キルヒホッフ-ヘルムホルツ 積分方程式	6, 14
キルヒホッフ-ヘルムホルツ の積分定理	80, 232

【く】

クアドラポール音源	74
空間的マスクング解除	129
空間マップ	103
矩形膜	37
グリーンの第1定理	77
グリーンの第2定理	77, 230

【け】

結合音	89
検出閾値	104
減衰振動	22
建築音響学	9
弦の振動	28

【こ】

コア経路	100
高域通過フィルタ	88
高速フーリエ変換	15

勾配	206
興奮パターン	97, 110, 117
交流バイアス方式	9
コーシーの収束条件	198
鼓膜	91
固有音響抵抗	65
固有関数	42, 220
固有振動	42, 24
固有値	42, 203, 220
固有ベクトル	203
固有方程式	204
コルチ器	92

【さ】

最小可聴音圧	104
最小可聴音場	104
最小可聴値	104
サイバネティクス	17
雑音	86
雑音駆動音声	135
残響時間	9

【し】

子音	135
ジェフレスモデル	101
耳音響放射	16, 98
耳介	91, 128
時間情報	97, 123, 124
時間表現	88
時間領域差分法	14
磁気記録	9
自己回帰過程	165
自己相関法	167
耳小骨	91
自発発火頻度	97
シフト不変システム	151
遮断周波数	88
周期	19, 86
周期音	86
修正離散コサイン変換	177
周波数	19, 86
周波数局在	100
重力波	3

シュミットの直交化法	195
純音	86
準静的過程	52
上オリープ外側核	101
上オリープ内側核	101
上オリープ複合体	101
上丘	103
上行性	100
状態方程式	52
常微分方程式	209
初期条件	217
信号音	105
人工耳	105
振動	19
振幅	19
振幅変調	89

【す】

数ベクトル空間	190
スツルム-リウヴィル型	
微分方程式	210, 217
ステープンスのべき乗則	114
ステレオ音響	13
スペクトル拡散	87
スペクトル表現	88
スペシフィッククラウドネス	116

【せ】

正規直交関数系	198
正規直交系	193, 198
正規方程式	167
絶対閾値	104
全極モデル	156
線形空間	196
線形システム	151
線形シフト不変システム	151
線形写像	201
線形予測	16, 166
選択の注意	132

【そ】

騒音レベル	113
双曲型	216
側帯波	90
速度ポテンシャル	60
ゾンマーフェルトの放射条件	232

【た】

帯域遮断フィルタ	88
帯域通過フィルタ	88
帯域幅	88
第1種レイリー積分	83
体積速度	69
体積弾性率	5, 56
第2種レイリー積分	84
ダイポール音源	74
楕円型	216
たたみ込み和	152
単位サンプル数列	150
単位ステップ数列	150
単振動	19
弾性定数	21
断熱過程	4, 53

【ち】

中心周波数	88
チューニングカーブ	94
調音結合	136
超音波	8
聴覚閾値	104
聴覚閾値レベル	105
聴覚情景分析	16, 130
聴覚的オブジェクト	130
聴覚フィルタ	10, 94, 105
聴覚野	103
重畳加算法	163
聴神経	96
丁度可知差異	119
調波構造	86
調波複合音	6, 86
聴力レベル	105

直交曲線系 221
直交補空間 195
直交ミラーフィルタ 174

【つ・て】

通過帯域 88
低域通過フィルタ 88
抵抗力 22
定常状態 26
テスト音 105
テープレコーダ 13
点音源 69
電気音響変換 8
電気蓄音機 8
伝達関数 156
伝搬速度 56

【と】

等価矩形帯域幅 107
同 次 212
同時グルーピング 130
頭部伝達関数 16, 128
等ラウドネス特性 10
等ラウドネスレベル曲線 112
特 解 212
トノトピー 88, 100
トーン 86
トーンクロマ 122
トーンハイト 122
トーンバースト 87
トーンパルス 87
トーンビップ 87

【な・に】

内 積 192, 197
内側膝状体 103
内有毛細胞 92, 95
ナビエ-ストークス方程式 5
二重理論 127

【ね】

音 色 132
熱容量 53

熱力学的平衡 52

【の】

ノイマン関数 45, 226
ノッチ雑音法 106
ノルム 193

【は】

倍音成分 86
白色雑音 86
場所情報 97, 110, 123, 124
波 数 44
発 散 206
波動方程式 29
バートレット窓 160
ハニング窓 161
ハミング窓 161
パワースペクトルモデル 106
搬送波 89

【ひ】

ピッチ 3, 122
比 熱 53
比熱比 53
標準基底 189
標本化 145
標本化周期 145
標本化周波数 145
表面弾性波 7, 12
ヒルベルト空間 198

【ふ】

フォルマント 134
フックの法則 59
物理音響学 5
部分空間 191
不変的特徴量の欠如 136
フーリエ級数 210
フーリエ係数 210
フーリエ変換 5, 70
プローブ 105
分散経路 100
分 裂 131

【へ】

平面波 62
ベクトル空間 196
ベクトル積 207
ベッセル関数 45, 226
ベッセルの微分方程式 226
ベルト経路 100
ヘルムホルツ共鳴器 6
ヘルムホルツ方程式 75, 230
変数分離法 37
偏相関係数 170
変調周波数 90
変調度 90
変調の深さ 90
変調波 89
偏微分方程式 209

【ほ】

ホイヘンスの原理 4, 14
ホイヘンス-フレネルの原理 6
母 音 6, 134
方形窓 160
放射的 232
放射的な解 233
膨張度 59
棒の縦振動 32
棒の横振動 33
放物型 216
ボコーダ 10

【ま】

マグニチュード産出法 113
マグニチュード推定法 113
曲げモーメント 35
マスキアー 105
マスキアー 105
マスキング 10, 105
マスキング量 105
マスキングパターン 10
窓関数 160

【み】		予測誤差	166	量子化	145
ミッシングファンダ		【ら】		両耳間位相差	16, 126
メンタル音	124	ラウドネス	111	両耳間時間差	16, 101, 126
密度	48	——の成長関数	114	両耳間レベル差	16, 102, 126
【め】		ラウドネス積分	116	両耳マスキングレベル差	129
明瞭度指数	16	ラウドネス補充現象	116	臨界制動	23
【も】		ラウドネス密度	116	臨界帯域	9, 10, 109
モノポール音源	69	ラウドネスレベル	112	臨界比	10
モノポール関数	230, 234	ラブラシアン	58, 207, 222	【る】	
【ゆ】		ラプラスの方程式	216	ルジャンドル同伴関数	224
有限長インパルス応答	174	【り】		ルジャンドルの同伴微分	
有限要素法	14	リクルートメント現象	116	方程式	224
融合	131	離散コサイン変換	159	【れ】	
【よ】		離散スペクトル	146	零点	154
横振動	28	離散フーリエ変換	159	レイリー波	7, 12
		理想気体	52	レイリー板	7
		粒子	48	連続スペクトル	147
		粒子速度	7, 12, 48	連続方程式	49

【A ~ C】		【H ~ J】		LSO	101
AM	89	HRTF	128	mel 尺度	93, 109
A 特性騒音レベル	113	ICc	102	MGB	103
Bark 尺度	9, 109	ILD	126	MSO	101
BMLD	129	IPD	127	【S ~ Z】	
CN	101	ITD	126	SOC	101
【E】		JND	119	z 変換	152
ERB	107	【L ~ M】		【数字】	
ERB _N 番号	93, 108	Levinson-Durbin アルゴリズム	170	1 次元波動方程式	29

——編著者・著者略歴——

安藤 彰男（あんどう あきお）

1978 年 九州芸術工科大学芸術工学部音響設計学科卒業
1980 年 九州芸術工科大学大学院芸術工学研究科修士課程修了（情報伝達専攻）
1980 年 日本放送協会勤務
2001 年 博士（工学）（豊橋技術科学大学）
2013 年 富山大学教授
現在に至る

鈴木 陽一（すずき よういち）

1976 年 東北大学工学部電気工学科卒業
1978 年 東北大学大学院工学研究科博士課程前期修了（電気及通信工学専攻）
1981 年 東北大学大学院工学研究科博士課程後期修了（電気及通信工学専攻）
工学博士
1981 年 東北大学助手
1987 年 東北大学助教授
1991 年 ミュンヘン工科大学（ドイツ）客員研究員
～92 年
1999 年 東北大学教授
現在に至る

古川 茂人（ふるかわ しげと）

1991 年 京都大学工学部衛生工学科卒業
1993 年 京都大学大学院工学研究科修士課程修了（衛生工学専攻）
1996 年 ケンブリッジ大学（英国）実験心理学科 Ph.D 課程修了
Ph. D. (auditory perception)
1996 年 ミシガン大学（米国）研究員（PD）
2001 年 日本電信電話株式会社勤務
2017 年 日本電信電話株式会社コミュニケーション科学基礎研究所人間情報研究部部長
現在に至る

基礎音響学

Fundamentals of Acoustics

© 一般社団法人 日本音響学会 2019

2019年3月28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
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
製 本 所	有限会社 愛千製本所

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 978-4-339-01361-0 C3355 Printed in Japan

(新宅)



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いません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。