

まえがき

音響学は、物理学の中では長い歴史を持つ分野であり、その基礎理論は19世紀に書かれたレイリー卿（John William Strutt, Baron Rayleigh）の著書『The Theory of Sound』^{†1}にすでに記述されている。ところが、近年のコンピュータ技術の進展に支えられて、従来の音響理論を活用するための情報処理機器が整備され、新しい音場再現方式の研究開発が可能となってきた。1950年代は2チャンネルのステレオ音響を立体音響と呼び、AM（amplitude modulation）ラジオ2波を使用した立体音楽堂などの番組も放送されていたが、いまやMPEG^{†2}などの標準化機関も3D Audioの標準化を推進しており、真の意味での立体音響の時代を迎えている。本書は、このような状況の中で研究開発された音場再現方式について、その基礎理論からいくつかの実例までを紹介するものである。第6章で述べるとおり、音響再生方式は、心理音響モデルに基づく方式と物理音響モデルに基づく方式に分類することができる。前者は、2チャンネルステレオを基本としてチャンネル数を拡張したマルチチャンネル音響方式であり、録音技術者たちが自らの耳を頼りとして開発してきた方式である。一方後者は、その名のとおり音響理論に基づいて、ある空間の音場の物理量を別空間に再現するものであり、おもに音響研究者が研究開発に取り組んできた。本書では、前者も音場再現方式に含めることとした。心理音響モデルに基づく方式は、音の場を再現していないとの意見もあるかもしれない。しかしながら、心理音響モデルに基づく方式を広義の音場再現方式ととらえ、その裏付けとなる理論も紹介するところが、本書の一つの特徴と考えていただければ幸いである。

†1 J. W. S. Rayleigh : The Theory of Sound, Dover (1945)

†2 国際標準化機構（ISO）と国際電気標準会議（IEC）との第1合同技術委員会（Joint Technical Committee 1）の第29下位委員会（SubCommittee 29）に属する第11ワーキンググループ「ISO/IEC JTC1 SC29 WG11」の通称で、Moving Picture Expert Groupの略。映像やオーディオ信号などの符号化技術の標準化を行う。

音場再現方式は、本来臨場感の高い音を再現するために開発されたものである。では音場再現における臨場感とはどのようなものであろうか。これを考えるために、まず臨場感を分類してみよう。臨場感は、一般にオブジェクト臨場感とフィールド臨場感に分けることができる。オブジェクト臨場感は、その名が示すとおり、明確な対象物がもたらす臨場感である。例えば、屋外における鳥の鳴き声、コンサートにおける各楽器の音、人間の声などによってもたらされる臨場感がこれに対応する。本書では、これらの明確な対象物がもたらす音をオブジェクト音と呼ぶ。一方、フィールド臨場感とは、場の雰囲気によってもたらされる臨場感であり、風が野を渡る音、コンサートホールの響き、場合によっては映画のBGM (background music) などともその要因となる。明確な方向性を持たないこれらの音を、フィールド音と呼ぶ。音場再現における臨場感は、オブジェクト臨場感とフィールド臨場感によってもたらされ、高い臨場感は、適切に再現されたオブジェクト音とフィールド音のバランスの良い組合せにより実現されるものと思われる。

高い臨場感を実現できるかどうかは、音場再現方式だけでは決まらない。いわゆるコンテンツの問題があるからである。心理音響モデルに基づくマルチチャンネル音響の場合には、長年にわたる2チャンネルステレオや5.1チャンネルのコンテンツ制作の歴史があり、コンテンツ制作の手法が確立されている。2チャンネルステレオの場合には、その音場再現能力の制限のため、いわゆるワンポイントマイクで収録してきた音をそのままスピーカで再生しただけでは、十分な臨場感を再現できない場合が多い。このような欠点を補うため、おもにフィールド音を収録するマイクロホンに加えて、オブジェクト音を収録するマイクロホンも利用し、これらの音をミックスすることで、オブジェクト音とフィールド音のバランスを制御する方法が用いられる。マルチチャンネル音響では、ミクシング卓など、このような制御の道具立てが揃っており、また制御するための方法論もある程度確立されている。一方で、物理音響モデルに基づく音場再現方式では、多くの場合コンテンツを制作する道具立てがない。これらの方式は、本来、元の音場をどれだけ精密に再現するかということを目的としており、精密でない部分を演出などで補うという概念とは無縁であったからで

ある。仮に元の音場が別の場所でそのまま再現されたとしても、本来の臨場感が得られない可能性があることも留意しておく必要がある。例えば、コンサートホールで演奏会を聴く場合、われわれは音の情報（聴覚情報）のほかに、視覚情報や嗅覚情報なども利用して臨場感を感じる。音以外の情報が欠落した場合、本来の臨場感をもたらすためには音情報の忠実な再現だけでは不十分であり、そこに何らかの演出が必要となってくる可能性は否定できない。

以上のように考えてみると、音場の臨場感を再現するためには、忠実に再現された物理量をベースとして、コンテンツ制作技術を用いた絶妙な味付けが必要になってくるように思われる。本書は、このような演出も容認する立場から、現状の音場再現技術の解説を試みるものである。

本書の執筆にあたっては、第1章から第5章までの各章の冒頭部分に記述した解説を読んだ後に第6章を斜め読みしていただければ、数式を真剣に追わなくても一応の知識は得られるように配慮した。一方で数学が得意な読者のために、必要に応じて章末に補足の節を設けるとともに、第4章などで必要な物理数学の解説を第7章に記述した。執筆には細心の注意を払ったが、浅学非才ゆえ少なからず誤りが残されているものと思われる。読者からのご叱責を賜ることができれば幸いである。

本書は、東北大学電気通信研究所の鈴木陽一教授から声を掛けていただいで書き始めたものである。本来、第6章の内容を詳しく記述する書物として計画していたが、その理論背景に拘泥するあまり、当初の趣旨から逸脱した書物となってしまった。この責は著者のみが負うものである。また、執筆中に著者が日本放送協会（NHK）放送技術研究所から大学に転出したこともあって、締切りを大幅に過ぎてしまい、日本音響学会の出版委員会や出版社の方々に多大なご迷惑をおかけした。本書の執筆の機会を与えてくださった鈴木教授、我慢強く遅筆を待ってくださった日本音響学会担当編集委員の岡本 学 博士（当時）、そしていままでお世話になったNHK放送技術研究所の関係者に深く感謝する次第である。

2014年初夏 富山にて

安藤 彰男

目 次

第1章 音響物理の基礎

1.1 解 説	1
1.2 流体力学の基礎	4
1.2.1 連続方程式	5
1.2.2 オイラーの運動方程式	6
1.2.3 熱力学の第一法則と比熱	8
1.2.4 状態方程式	11
1.3 音波の理論	14
1.3.1 波動方程式	14
1.3.2 膨張度と圧縮度	18
1.3.3 音のエネルギー密度と音響インテンシティ	19
1.3.4 速度ポテンシャル	21
1.3.5 音圧レベル	23
1.4 平面波と球面波	24
1.4.1 平面波	24
1.4.2 球面波	27
1.4.3 点音源	31
1.5 補 足	33
引用・参考文献	33

第2章 フーリエ変換

2.1 解 説	34
2.2 フーリエ変換の定義	36
2.3 ヘルムホルツの方程式	37
2.4 平面波のフーリエ表現	38
2.4.1 平面波音圧のフーリエ変換	38

2.4.2 エバネッセント波	41
2.4.3 波数空間	41
2.4.4 角度スペクトル	42
2.5 球面波のフーリエ表現	43
2.5.1 球面波音圧のフーリエ変換	43
2.5.2 多重極	44
2.6 補 足	48
引用・参考文献	48

第3章 回折理論

3.1 解 説	49
3.2 グリーンの定理	52
3.3 キルヒホッフ-ヘルムホルツの積分定理	54
3.4 レイリー積分	59
3.4.1 レイリー積分の導出	59
3.4.2 モノポール仮想音源	62
3.4.3 線積分近似	63
3.5 補 足	67
引用・参考文献	70

第4章 球関数展開

4.1 解 説	71
4.2 音の到来方向の直交関数展開	74
4.3 球面調和関数	76
4.4 波動方程式の極座標表現	81
引用・参考文献	87

第5章 ステレオ音響理論

5.1 解 説	88
5.2 ステレオ音響の基礎	90
5.2.1 実音源からの音の伝搬モデル	90
5.2.2 スピーカ再生における両耳間位相差の生成	91
5.2.3 ブルムラインの特許	94
5.2.4 頭部における回折の影響	96
5.3 振幅パンニング	98
5.3.1 サ イ ン 則	99
5.3.2 タンゼント則	102
5.4 波面合成に基づく音像定位	106
5.4.1 基 礎 理 論	107
5.4.2 受聴位置が両スピーカから等距離の場合	111
5.4.3 振幅パンニングとの関係	115
5.5 補 足	116
引用・参考文献	120

第6章 高臨場感音場再現

6.1 音場再現方式の分類	122
6.2 心理音響モデルに基づく方式	124
6.2.1 マルチチャンネル音響	124
6.2.2 バイノーラル音響	130
6.3 物理音響モデルに基づく方式	132
6.3.1 回折理論に基づく方式	132
6.3.2 球関数展開に基づく方式	136
6.3.3 逆フィルタに基づく方式	142
6.4 今 後 の 展 望	151
6.5 補 足	151
6.5.1 三角関数に関する補題	151
6.5.2 2次元アンビソニックスの展開式	153

引用・参考文献	157
---------------	-----

第7章 音場再現のための物理数学

7.1 ガウスの定理	160
7.2 停留位相定理	163
7.3 微分幾何の基礎	170
7.4 Γ 関数	179
7.5 球関数	183
7.6 円柱関数と球ベッセル関数	196
7.7 平面波の直交関数展開	201
引用・参考文献	209

索引	210
----------	-----

第1章

音響物理の基礎

音響学は、流体力学などの理論に基づいて構築された物理学の一部門である。本章では、まず流体力学や熱力学のうち音響学で必要な理論について述べたうえで、音波の波動方程式を導出するとともに、平面波や球面波など本書で必要な概念を紹介する。なお、本書では空気中を伝搬する音のみを扱い、固体や水中を伝搬する音は対象外とする。

1.1 解説

波を伝える物質を媒質 (medium) と呼ぶ。本書では媒質を空気に限定する。空気は、圧縮や伸張などにより体積を変化させると元の体積に戻ろうとする性質がある。このような性質を弾性 (elasticity) と呼び、弾性を持つ物質を弾性体 (elastic body) と呼ぶ。音波 (sound wave) は、空気の弾性を利用して伝搬する弾性波 (elastic wave) である。

弾性波のイメージをつかむために、スピーカ (loudspeaker) で音を出す場合を考えてみよう。スピーカは振動板を前後に振動させて、空気を押したり引いたりする。空気は押されることでその体積が圧縮されるが、弾性によって元の体積に戻ろうとするため、スピーカとは反対方向の隣接した空気を押すことになる。一方、引かれた場合には弾性によって元の体積に縮もうとするため隣接した空気を引き寄せる。このような空気の伸び縮みの結果、スピーカに起因する空気振動がつつぎと伝搬していく。これが音波である。音波が到来しない空気中でも、大気圧 (atmospheric pressure) が存在する。大気圧も含め、音波が存在しないときの媒質内の圧力を静圧 (static pressure) と呼ぶ。音波が到

2 1. 音響物理の基礎

来することで、媒質内の圧力が微小に変動する。この圧力の微小変動を音圧 (sound pressure) という。標準気圧が 10 万 Pa (パスカル) あるいは 1000 hPa (ヘクトパスカル) 程度であるのに対して^{†1}、人間が聞き取ることのできる最小の音圧は 0.00002 Pa、音として感じるることのできる最大の音圧は 2 Pa 程度であり、音圧がいかに静圧に比べて微小かがわかるであろう。

音響学は、流体力学 (fluid dynamics) などの理論に基づいて構築された学問である。流体とは、液体や気体のように自由に変形する媒質のことを指す。流体の運動を、分子や原子のような微細なレベルで観測すると、その物理的性質はきわめて複雑に変化する。ところが、ある観測点における物理的性質を、この点を含む微小であるが多数の分子を包含するような体積内での平均値で扱うことにすれば、物理的性質の複雑な変動は平滑化され、流体の物理的な性質は空間的にも時間的にも連続する量として扱うことができる。例えば、微小部分を一辺の長さが $1\ \mu\text{m}$ の立方体とすると、標準気圧の空気 $1\ \text{cm}^3$ の立方体の中には約 2.69×10^{19} 個という多数の分子を含む。このような微小部分のことを、流体粒子 (fluid particle)、あるいは単に粒子と呼ぶ^{†2}。流体力学は、粒子レベルの構造を扱うことによって流体を連続的な物理的性質を持つ仮想的物体と見なしたうえで、その動きを扱う学問である。本章では、空気を粘性のない流体、すなわち完全流体 (perfect fluid) と仮定し、完全流体に対する流体力学のみを述べる。また、本書で扱う物理量は、原則として空間的にも時間的にも十分滑らかな関数とする^{†3}。

ところで、媒質が場所や方向によって異なる性質を持つ場合には、同一の波でも、その振る舞いは場所や伝搬方向によって異なる。波の伝搬速度が場所によらない媒質は均質 (homogeneous)、方向によらない媒質は等方 (isotropic) であると呼ばれる。本書で扱う空気は、均質で等方であると仮定する。

流体の運動は、粒子の運動速度である粒子速度 (particle velocity)、媒質の密

†1 正確には 101356 Pa.

†2 肩付き数字は、各章末の引用・参考文献の番号を表す。

†3 時間的にも空間的にも必要な回数だけ偏微分可能な関数とする。

度 (density), そして媒質内の圧力 (pressure) によって記述できる¹⁾. 流体力学は, これらの変量間の関係を表す方程式を求め, これを解くことにより流体の運動を解析する. 完全流体の場合には, 粒子速度と密度の関係を表す連続方程式 (equation of continuity), 粒子速度, 密度, 圧力の三者の関係を表すオイラー (Euler) の運動方程式 (Euler's equation of motion), そして密度と圧力との関係を表す状態方程式 (characteristic equation) が得られる. ここに, 状態方程式は, 熱力学第一法則から導かれる. これらの方程式を連立させて解くことで, 各変量の動きを表す式が得られる.

音響学でも, これらの三つの方程式を連立させて解く. この際に, 圧力は静圧と音圧の和とする. 音圧が静圧に比べて微小な量であることを利用すると, 音圧によって生じる空気の密度の変化なども微小量として扱うことができ, 微小量と微小量の積などの二次の微小量を無視することができる. 例えば, 日常生活での音圧を 0.02 Pa とすると, この 2 乗は 0.0004 Pa であり, 静圧の 10 万 Pa と比べると無視しても差し支えない量である. このように微小量を無視することによって, 前述の三つの方程式は線形化され簡易な式に変形される. 得られた式を連立させて音圧について解くと, 波動方程式と呼ばれる微分方程式を導くことができる. つまり, 音は波動であるという結果が得られる. 本章では, 音波が平面波および球面波である場合について, 波動方程式の一般解を求める. 球面波は, 波長が音源の寸法より十分長い場合において, 音源近くでの音波を表すのに適している. 一方, 平面波は音源から十分離れた場所での音波を表すのに用いられる.

最後に, 音の伝搬速度 (音速) と粒子速度との違いについて述べる. いま, 池に石を投げ込んだとしよう. その結果, 投げ込まれた点から波が周囲に伝わっていく. このように水平方向に波が伝わる速度が伝搬速度である. 一方, 水も流体であり, この場合には粒子は上下に振動する. この垂直方向の振動速度が粒子速度である. この例は, 媒質の振動が波の進行方向に対して垂直である横波 (transverse wave) の例であった. 音の場合には, 媒質の振動が波の進行方向に対して平行である縦波 (longitudinal wave) であるため, 粒子速度の

方向は上述の例とは異なるが、概念的には同じように理解できる。すなわち、粒子の振動速度が粒子速度であり、この粒子の振動が媒質の弾性によって音波として伝わっていく速度が音の伝搬速度である。また、音の伝搬速度は1方向に向かう速度であるが、音の粒子速度は音の伝搬方向とその逆方向に粒子が振動する速度である。

1.2 流体力学の基礎¹⁾

流体力学では、前述のように分子、原子のような微細構造は扱わず、流体を連続体として扱い、この連続体を無数の微小部分に分けて、各微小部分を粒子と呼ぶ。粒子は、多数の分子を含む程度の大きさを想定し、粒子に関する量は、これらの分子に関する量の平均値とする。繰返しになるが、一辺の長さが 10^{-3} mm の立方体には、1気圧において、約 2.69×10^{27} 個の空気分子が含まれているため、粒子の大きさをこの程度に設定した場合でも、精度よく平均値を推定することができる。

一般に、流体を表す変量として、粒子速度 v 、密度 ρ 、圧力 P 、温度 T 、エントロピー S 、内部エネルギー U などがある。このうち、運動学的な量としての粒子速度を除くと、物理量として独立しているのは二つだけである。そこで、本書では、流体を粒子速度、密度、圧力によって表す。粒子速度は3次元の物理量であるため、流体を表す変量の総数は5となる。したがって、流体の振る舞いを記述するためには、五つの方程式を立てる必要がある。これに対して、流体の質量保存則から、連続方程式と呼ばれる方程式が得られる。流体に対する力の釣合いから、オイラーの運動方程式が得られる。さらに、熱力学の第一法則（エネルギー保存則）より、状態方程式が得られる。運動方程式は3次元の方程式で、連続方程式、状態方程式と合わせると、五つの方程式が得られるため、流体を記述する五つの変量を解くことが可能となる。以下、これらの方程式を導出する。なお、粒子速度、密度、圧力ともに空間座標 x, y, z と時間 t の関数であるが、本書では、誤解の恐れのない限り変数名の記載を省略する。

1.2.1 連続方程式

流体中に、閉曲面 S で囲まれた領域 V を考える (図 1.1). \mathbf{n} を曲面における法線方向の単位ベクトルとし, v_n を粒子速度 \mathbf{v} の法線方向成分とする. すなわち

$$v_n = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}$$

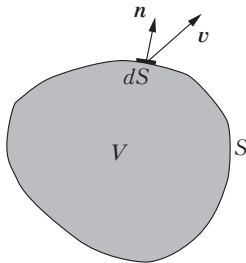
である. ここに, 「 \cdot 」はベクトルの内積を表す. V に含まれる流体の総質量が Δt 時間の経過によって減少した量は

$$-\left\{ \iiint_V \rho(t + \Delta t) dV - \iiint_V \rho(t) dV \right\} \cong - \iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \times \Delta t$$

で表される. ここに, $\iiint_V dV$ は領域 V 上での体積積分を表す. 上式左辺は, 時刻 $t + \Delta t$ における密度を領域 V 上で積分した値, すなわち時刻 $t + \Delta t$ における領域 V の質量 (= 密度 \times 体積) から, 時刻 t における同じ領域の質量を引いた値に, 減少量を表すための負号を付したものである. 一方, 微小面積 dS を通って Δt の間に外部に流出する質量は $\rho v_n dS \times \Delta t$ であるから, Δt の間に領域 V から流出する質量は

$$\iint_S \rho v_n dS \times \Delta t = - \iint_S \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS \times \Delta t$$

である. ここに, $\iint_S dS$ は境界面 S 上での面積積分を表す. 質量の保存則より質量の減少量と流出量は等しいはずであるから



V : 体積
 S : 表面積

図 1.1 流体中の閉曲面からの質量流出

$$\iint_S \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = - \iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (1.1)$$

が成り立つ。ガウス (Gauss) の定理[†]

$$\iiint_V \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) dV = \iint_S \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS$$

を用いて式 (1.1) の左辺を体積積分で表すことにより

$$\iiint_V \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) \right\} dV = 0$$

が成り立つが、領域 V の選び方は任意であったから

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1.2)$$

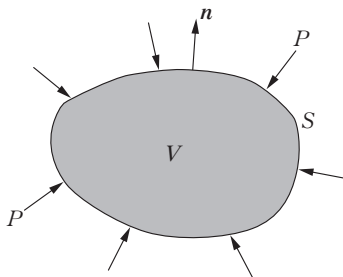
を得る。この式を連続方程式と呼ぶ。式 (1.2) の div は、ベクトル $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)^T$ に対して

$$\operatorname{div}(\mathbf{a}) \triangleq \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z} \quad (1.3)$$

で定義されるスカラー量である。また、 T は行列やベクトルの転置を表す。

1.2.2 オイラーの運動方程式

図 1.2 に示す流体中の領域を考える。この領域に働く力は、外部の流体からの圧力の合力と、外力 (重力) との和である。圧力 P は方向によらないいわゆるスカラー量であり、摩擦を考えなければそれは境界面 S に対してつねに垂直



V : 体積
 S : 表面積

図 1.2 流体中の閉曲面における力の釣合い

[†] この式の証明は 7.1 節で与える。

索引

<u>あ～え</u>		<u>き</u>		<u>し</u>	
圧縮度	15	疑似逆行列	143	時間差	88
アンビソニックス		逆フィルタ	142	指向性	35
	122, 136, 153	球関数	138	質量加速度	32
位相差	88, 94, 96	球ノイマン関数	72, 85, 199	準静的過程	9
一般化逆行列	143	球ベッセル関数		状態方程式	3, 4, 14
渦なし	21		71, 85, 86, 199	振幅バンニング	89, 115, 128
打切り特異値分解	145	球面調和関数		シーンベース	123
運動方程式	14		72, 76, 81, 140	<u>す～そ</u>	
エネルギー密度	19	球面波	3, 24, 28, 43	随伴行列	143
エバネッセント波	35, 41	境界音場制御法	147	静圧	1
<u>お</u>		仰角	71	正則化法	143
オイラーの運動方程式	3, 4, 8	強度差	88	全指向性	35
音		キルヒホッフ-ヘルムホルツ		全指向性マイクロホン	
——の運動エネルギー密度		の積分定理	49, 57, 132		74, 133
	21	キルヒホッフの補助関数		速度ポテンシャル	21, 108
——のエネルギー密度	21		55, 60	ゾンマーフェルトの放射	
——の伝搬速度	3, 15	<u>く</u>		条件	60
——のポテンシャルエネルギー密度	21	クアドラポール	35, 47	<u>た</u>	
オブジェクトベース	123	グリーンの第1定理	54	第1種円柱関数	75
オブジェクト臨場感	iv, 130	グリーンの第2定理	54	第1種ルジャンドル陪関数	
音圧	2, 133	クロストーク	146		80, 140
音圧勾配	133	<u>こ</u>		第1種レイリー積分	
音圧レベル	23	5.1チャンネル	124		51, 61, 63, 133
音響インテンシティ	19	固有音響抵抗	26	大気圧	1
音速	3, 15	<u>さ</u>		体球関数	76
音波	1	最小可聴音圧	23	体積速度	31
<u>か</u>		最小二乗逆行列	143	体積弾性率	15, 26
回折理論	132	最小二乗最小ノルム逆行列		体積流量	31
ガウスの積分定理	160		143	第2種ルジャンドル陪関数	
ガウスの定理	6, 53, 162	最小二乗法	143		80
角度スペクトル	35, 42	サイン則	89, 99	第2種レイリー積分	
関数行列式	175	<u>し</u>			51, 62, 133
完全流体	2	時間差	88	ダイポール	35, 45
		指向性	35	多重極	35, 44
		質量加速度	32		
		準静的過程	9		
		状態方程式	3, 4, 14		
		振幅バンニング	89, 115, 128		
		シーンベース	123		

縦波 3	音色 88	膨張度 19, 25
ダミーヘッド 130	熱容量 9	
単一指向性マイクロホン 112, 114	熱力学の第一法則 8	<u>ま, も</u>
弾性 1		牧田の理論 89, 106
弾性体 1	<u>は, ひ</u>	マルチチャンネル音響 124
弾性波 1	バイノーラル 122, 130	モノポール 31, 35, 45
タンゼント則 89, 102, 116	波数空間 41	モノポール関数 55, 149
断熱過程 12	波数ベクトル 35, 40	<u>ゆ, よ</u>
	波長定数 27, 84, 111	優決定 143
<u>ち</u>	波動方程式 17, 28, 81	横波 3
チャンネルベース 123	波面 24, 110	<u>ら, り</u>
調和関数 76	比熱 10	ラグランジュ微分 7, 8
	比熱比 13	理想気体 11
<u>て</u>	<u>ふ</u>	粒子 2
定圧比熱 10	フィールド臨場感 iv, 130	粒子速度 2, 3, 14
定位 88, 98, 106	物質微分 7	両指向性 35
定積比熱 10	フーリエ変換 36	両指向性マイクロホン 74, 133
停留位相近似 64	ブルムラインの特許 88, 94	臨場感 iv, 130
停留位相定理 65, 163, 166		<u>る~ろ</u>
点音源 109	<u>へ</u>	ルジャンドル多項式 183, 193
電気音響変換係数 109	平面波 3, 24, 74, 86, 138	ルジャンドルの微分方程式 183
天頂角 71	ベッセル関数 75, 85, 197, 199	ルジャンドル陪関数 72
点波源 31	ベッセルの微分方程式 75, 197	レイリー積分 59, 132
<u>と</u>	ヘルムホルツの方程式 38, 67	劣決定 143, 149
等位相曲線 110	<u>ほ</u>	レベル差 88, 94, 96
同軸マイクロホン 112	ホイヘンス-フレネルの原理 49	連続方程式 3, 4, 6, 14
頭部インパルス応答 131	方位角 71	ロドリゲスの公式 187
頭部伝達関数 131	方向性パターン 74	ローラン級数 75, 201
特異値分解 144	方向余弦 170	
<u>に~の</u>	◇	
二重音源 45	LFE 124	X-Y方式 113
22.2チャンネル 127	off-center position 89	WFS 122, 134
	◇	
B関数 181	VBAP法 128	Γ関数 179
Camrasの方法 133		
CARROUSOプロジェクト 123		

— 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 日本放送協会入局

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

音 場 再 現

Sound Field Reproduction

© 一般社団法人 日本音響学会 2014

2014年12月10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 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 978-4-339-01330-6 (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