フーリエ音響学入門

キャテック株式会社		天津成美	【監修】
キャテック株式会社	博士(工学)	西留千晶	【共著】
キャテック株式会社		中野武史	
キャテック株式会社	工学博士	角田鎮男	
キャテック株式会社	工学博士	岩原光男	
北海道科学大学准教授	博士(工学)	長松昌男	
キャテック株式会社 東京工業大学名誉教授	工学博士	長松昭男	

発売　コロナ社

ま　え　が　き

音響・振動に関する種々多様な分野におけるコンサルティング・ソフト作成・実験代行を業務の一部とする企業の 1 技術者である筆者は, 常に深い専門性と広い総合性を同時に要求され, 自身の能力不足を痛感しながら苦闘している．その中で筆者が感じる問題の一つは，客先様における音響分野の先端技術者と新入社員･若手社員･他分野技術者との間の技術力の差である．これを埋めるために用いるべき市販の論文・著書の多くは教育・研究者によって著されたものであり，いずれも学術としては見事に体系化され内容が高度に洗練されているが，ものづくりに直接携わる企業技術者から見れば，どこかしっくりとせず，痒いところに手が届かないもどかしさを感じることがある．

そこで筆者は，関連する技術者・研究者のご協力を得て，特定企業の立場を完全に離れた公正無私な観点から，音響を学ぼうとする初心者・若手技術者を主対象とする入門書を自身で著すことを試みる．本書が上記問題の解決への一助となれば，幸いである．

私達は，会話・情報交換・娯楽に日常使う音響の他，超音波・電流・電磁波・熱波・光波・X 線など，あらゆる種類の波動を日々駆使して生きている．産学分野における波動の利用は，機械・電気・制御・医療・建築・土木などで必須であり急増しつつある．

波動は時間と周波数の両領域で表現され，これら両者間の相互変換を担う学術は，上記すべての産業界で重要である．その代表例がフーリエ変換であり，大抵の人は変換の学術・技法への導入口として，フーリエ変換を最初に学ぶ.

本書は，音響工学とフーリエ変換への入門書であり，以下の概要からなる．

第1章　初めての音響学

音響学を初めて学ぶ読者のための章であり，音の定義・特徴・表現方法・種類・性質など，音が有する属性を様々な面から平易・丁寧に紹介している．

第2章　音の物理

音響を物理学の立場から観る章である．2.1 節では，1 自由度系の振動を運動・変形（力学の初点）とエネルギー・対称性（物理学の原点）の両面から説明する．2.2 節では，音を伝搬する振動と捉えてその正体を示す．2.3 節では，弦と棒の振動を解析して波動方程式を導き，解を与える．2.4 節では，音の伝搬媒体である気体の力学的性質を紹介し，それを伝わる音波のからくりと様相を明らかにする．

第3章　フーリエ解析の基礎

まず，三角関数と複素指数関数で表現するフーリエ級数を紹介する．次にそれから導いた連続フーリエ変換の理論を説明し，その基本性質を述べる．続いてフーリエ解析を実用する際に

不可欠な離散フーリエ変換の理論を展開し，基本性質を述べる．その中で，高速フーリエ変換（FFT）の原理と利点を詳しく述べ，現在のフーリエ変換がすべて FFT を用いて実行される理由を述べる．さらに離散フーリエ変換を行う際に発生する種々の誤差の原因を明らかにし，その対処・軽減方法を説明する．

第4章　フーリエ変換の転延

最初に，フーリエ変換の適用例の 1 つとして合成積（畳み込み積分）の理論を紹介し，入力波形と単位インパルス応答の合成積が入出力間の伝達関数に等しいことを説明する．また，2 関数間の関係（類似度）を知るための相関関数とスペクトル密度を紹介し，ある関数と調和関数の相関関数がその関数のフーリエ変換に等しいことを示し，コヒーレンスの概念を導き，誤差を含む入出力関数間の周波数応答関数の推定方法を紹介する．

次に，元来周波数が時間に無関係に一定である波形に用いられるフーリエ変換を音声や自然界の環境音のように変動・変化する波形に転延・適用する手段として有効な，スペクトログラム・ケプストラム解析・ヒルベルト変換を解説し理論展開する．

第5章　ラプラス変換

フーリエ変換と親戚関係にあり音響工学のみでなくシステム論・制御理論・電気工学など多分野で利用される変換手段であるラプラス変換の基礎を分かりやすく説明し，よく使う関数のラプラス変換の公式を紹介し，ラプラス変換の基本性質と応用例を述べる．

補章　三角関数・複素指数関数・ベクトル・行列など，関連分野の理解に必要な初歩数学を極めて平易に解説する．数学の準備が乏しいと感じる方々も，この補章を読破すれば，フーリエ音響学への入口を容易に理解できる構成になっている．

筆者の浅学のため，本書には多くの不足・不正確さ・誤記が存在することを恐れ，これらに関し読者の皆様からご指摘・ご指導・ご教示をいただくことを切に希望いたします．

本書を執筆するにあたり，主に音響工学分野の学協界で活躍され，同時に長年にわたり数多くのご指導を賜っている法政大学教授御法川学博士（工学）に対し，心から敬意と感謝の意を表します．

2022 年 4 月　　天津 成美

目　　次

第１章　初めての音響学

１．１　音　と　は　1
１．２　音の特徴　3
１．２．１　音の高さと音色　3
１．２．２　音の強さと大きさ　4
１．３　音の表現　6
１．３．１　波形による表現　7
１．３．２　周波数による表現　7
（１）　機器の周波数特性　7
（２）　パワースペクトルとサウンドスペクトラム　7
１．４　音の分類　11
１．４．１　波形による分類　11
（１）　純　　音　11
（２）　複合音１：調和複合音　11
（３）　複合音２：インパルス　12
（４）　複合音３：白色雑音　12
１．４．２　波面による分類　13
（１）　球　面　波　13
（２）　平　面　波　14
（３）　定　在　波　14
１．５　音の性質　15
１．５．１　波動と伝搬　15
１．５．２　音　　速　15
１．５．３　波長・周期・周波数　16
１．５．４　回　　折　16
１．５．５　屈　　折　16
１．５．６　反　　射　17
１．５．７　干　　渉　19

１．５．８　共　　鳴　19
１．５．９　う　な　り　21
１．５．１０　ドップラー効果　21

第２章　音　の　物　理

２．１　振動の力学　22
２．１．１　運動と変形（力学の始点）から　22
２．１．２　エネルギーと対称性（物理学の原点）から　23
２．１．３　エネルギーから見た力学特性　24
２．１．４　１自由度系の自由振動　25
（１）　エネルギーの閉ループ　25
（２）　力の釣合と運動方程式　26
（３）　自由振動の発生機構　27
（３－１）　力と速度から　27
（３－２）　エネルギーから　28
（４）　減衰する自由振動　29
２．１．５　１自由度系の強制振動　30
２．２　振動から波動へ　31
２．２．１　伝わる振動　31
２．２．２　振動の伝達速度　33
２．３　波動の力学　35
２．３．１　弦 の 振 動　35
（１）　支配方程式　35
（２）　波動方程式の一般解　36
（３）　初 期 条 件　38
（４）　境界条件１　：　一端固定　39
（５）　境界条件２　：　両端固定　40
２．３．２　棒の縦振動　41
２．４　音　　波　42
２．４．１　気体の力学的性質　42
２．４．２　平　面　波　44
２．４．３　音響インピーダンスと音の反射・透過　45
２．４．４　音の伝わり方　49

第３章　フーリエ解析の基礎

３．１　フーリエ級数展開 52
３．１．１　三角関数表現 52
３．１．２　フーリエ級数の例 55
（１）　単位インパルス関数 55
（２）　方　形　波 57
（３）　のこぎり波 58
３．１．３　複素指数関数表現 60
３．２　連続フーリエ変換 63
３．２．１　理　　論 63
３．２．２　基 本 性 質 64
（１）　対　称　性 64
（２）　線　形　性 65
（３）　時 間 移 動 65
（４）　周波数移動 66
（５）エネルギーの等価性 66
３．２．３　方形波と標本化関数 66
３．３　離散フーリエ変換 69
３．３．１　波形の離散化 69
（１）　標　本　化 70
（２）　量子化と２進法 73
３．３．２　離散フーリエ変換 74
（１）　理　　論 74
（２）　基 本 性 質 76
３．３．３　高速フーリエ変換 78
３．４　誤差と時間窓 85
３．４．１　入 力 誤 差 86
３．４．２　折返し誤差 87
３．４．３　量子化誤差 91
３．４．４　分解能誤差 91
３．４．５　漏 れ 誤 差 92
（１）　現　　象 92
（２）　発 生 機 構 93

（３）　軽減方法１：標本化時間の増加　96
（４）　軽減方法２：ズーム処理　97
３．４．６　時　間　窓　98
３．４．７　フーリエ変換と誤差　101

第４章　フーリエ解析の転延

４．１　合成積（畳み込み演算）　104
４．１．１　インパルス応答　104
４．１．２　合成積の原理　104
（１）　離　散　系　104
（２）　連　続　系　106
４．１．３　合成積のフーリエ変換　107
４．２　相関関数とスペクトル密度　109
４．２．１　相 関 関 数　109
（１）　実　関　数　109
（２）　複 素 関 数　111
４．２．２　スペクトル密度　112
（１）　パワースペクトル密度　112
（２）　クロススペクトル密度　112
４．２．３　周波数応答関数とコヒーレンス　113
４．３　変動・変化するスペクトルの解析　116
４．３．１　短い波形の分析　116
４．３．２　スペクトログラム　118
４．３．３　ケプストラム解析　120
（１）ケプストラム解析とは　120
（２）手法の数式説明　121
（３）音声の声道伝達関数の推定　123
４．３．４　ヒルベルト変換　124

第５章　ラプラス変換

５．１　ラプラス変換とは　130
５．２　よく使われる関数のラプラス変換　131
５．３　ラプラス変換の性質　133

（1）線　形　性　133
（2）相　似　性　134
（3）時間領域移動　134
（4）s 領域移動　135
（5）時間微分 1　135
（6）時間微分 2　136
（7）時 間 積 分　136
（8）時 間 t^n 積　137
（9）合成積に関する性質　137
（10）ガウスの誤差関数に関する性質　138
5．4　微分方程式への応用　140

補章A　関　　数

A 1　三 角 関 数　144
A 1．1　基　　本　144
A 1．2　加 法 定 理　146
A 1．3　微分と積分　148
A 2　複素指数関数　149
A 2．1　複　素　数　149
A 2．2　指数関数と対数関数　152
A 2．3　テーラー展開　153
A 2．4　複素指数関数　155
A 3　三角関数の直交性　158
A 4　積の微分と積分　159
A 5　いろいろな関数　160
A 5．1　双曲線関数　160
A 5．2　誤 差 関 数　161
A 5．3　ガンマ関数　161
A 5．4　ヘヴィサイドの単位関数　163
A 5．5　ディラックの衝撃関数　164
A 5．6　単位ランプ関数　164
A 6　ロピタルの定理　165

補章Ｂ　ベクトルと行列

Ｂ１　定　　義　166
Ｂ２　ベクトルの演算　167
Ｂ３　ベクトルの相関と直交　169
Ｂ４　行列の演算　172
Ｂ５　行　列　式　174
Ｂ６　固有値と固有ベクトル　175
　Ｂ６．１　連立方程式から固有値問題へ　175
　Ｂ６．２　固有値問題とは　177
　Ｂ６．３　一般固有値問題とは　178

補章Ｃ　音響学の萌芽と進展

181

参考文献　183
索　　引　184

第１章　初めての音響学

１．１　音　と　は

人間は空気のない所では生きていけず，空気のある所には必ず音があるので，私達はいつもどこにいても必ず音に囲まれている．鈴虫の競演・小鳥のさえずり・渓谷のせせらぎ・そよ風を受ける木々のざわめきなど，大自然が織りなす音の競演を味わい楽しみながら，また発声・楽器演奏・情報の記録再生変質転送・医療診断・建築設計などで音を利用し，同時に自動車・航空機・工場等が発する騒音に苦しみながら，私達は日々暮らしている．

無響室のように音がほとんど存在しない人工空間中に長時間滞在すると，人は不安になる．画面がなく音だけのラジオ・電話でも自在に情報を交換できるが，音の出ないテレビを見るとよく理解できないことがある．音は，私達とは切り離せない生活の一部である．

音を科学として扱う学術分野を音響学と言う．学生に“音響学は？”と聞くと，大抵“難しいから嫌い”という答えが返ってくる．こんなに身近な音の学問である音響学を難しく感じるのは,“音が見えない”からである．そこで音響学の世界に入るための第 1 歩は，音に対する視覚的イメージを持つことである．

平らな水面に一滴のしずくをポチャンと落とすと，水面に落下点を中心とする波紋が生じ，それが周辺に円となって広がっていく．これと同じ現象が，水面ではなく空気中で起こるのが音である，と頭の中でイメージすれば，まずはよい．

音響学の専門書を見ると, 音は**「空気の中を伝わる粗密波」**，**「気圧の連続的な微小変化」**，**「空気の振動」** などと書かれている．よく分からないこれらの定義と上記のイメージを結び付けようとするのが，本節の最初の目的である．

図 1.1a は，空気中の（正確には空気と言う粒子で均一に満たされた）空間である．その左端に垂直に立てた板を左から横方向に叩くと，その瞬間に板の右表面に接する空気が右方向に押され，押された部分の空気は突然密に（濃く＝空気粒子が詰まりぎゅっと押し合って圧力が高く）なる．この密になった状態は空気中を右方向に伝わっていく．図 1.1b はその伝搬の様子を示す．一方，板はこの衝撃によって振動し始めるから，板の振動開始から半周期後には，板は初期とは逆方向の左に移動し，その右表面に接する空気を左方向に引き寄せる．引き寄せられた部分の空気は疎に（薄く＝空気粒子間の距離が増加し圧力が低く）なる．この疎になった状

(a) 空気で均一に満たされた空間（左端は板）

(b) 左端に衝撃を与えると粗密波が発生し右方に伝搬

図1.1　空気中の音波の発生と伝搬

態も先の伝搬と同じ速度で，空気中を右方向に伝わっていく．こうして板に隣接する空気は板と同期する粗密振動を始め，その振動は空気中を右方向に伝わって行く．この空気の粗密振動が周辺に広がるのが，音波の正体である．空気が密と疎を繰り返す現象は波動として右方向に伝わっていくが，個々の空気粒子自体は右に移動して飛び去って行くのではなく，同じ場所で左右に往復運動し，それに伴ってその場所の空気が疎と密の状態を繰り返す．

ある時刻（瞬時）のこの様子を図 1.2 に示す．図 1.2 下段の正弦曲線（横軸は 1 次元空間上の位置 x）は，上下方向に振動する空気粒子を示すのではなく，空気の水平方向の疎密の繰返しを圧力（音圧）の変動として示している（上方が密，下方が疎）．

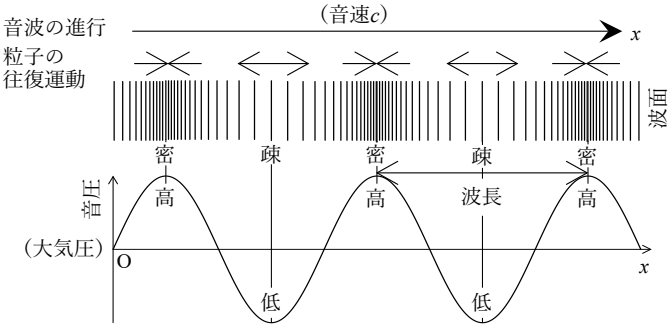

図1.2　調和音波（単一の周波数からなる空気の疎密波）

先述の例で言うと，水面に生じる波は水の上下振動が水平方向に伝搬するので振動方向と伝搬方向が直交しているのに対し，音波は空気など媒体の水平方向の往復運動（振動）が水平方向に伝搬するので振動方向と伝搬方向が一致している，と言う点が異なる．前者を**横波**，後者を**縦波**と言う．粗密波は縦波なのである．

図 1.1 で左端に接する板を叩くと，実際には板に複数の振動数（板の固有振動数と呼ぶ）が混じった振動を生じ，それに伴って隣接する空気も複数の振動数が混じった複雑な波動を生じるが，図 1.2 では板の振動が単一の振動数からなる調和振動であると仮定している．

１．２　音の特徴

音の特徴には，機械によって測定される物理的なものと人間の感覚によって知覚される心理的ものがあり，両者には様々な違いがみられる．通常音の特徴は，**音の大きさ・音の高さ・音色** と言う **音の３要素** で表現されると何気なく言われているが, これらは正確には物理的な特徴を表すものではなく，心理的な音の特性を表す専門用語として定義されている．心理的特性である音の大きさ・音の高さ・音色は，それぞれ，大まかには物理特性である音の強さ（音圧）・基本周波数・周波数特性と対応付けることができるが，これらの関係は必ずしも単純なものではない．

１．２．１　音の高さと音色

図 1.2 下段の正弦曲線は単一の周波数（1 秒[s]間に疎・密を何回繰り返すかと言う反復の数であり，その単位は Hz（**ヘルツ**（Hz＝1/s）：電磁波が波動伝搬であることを発見した物理学者ヘルツの名前に由来 ← 補章 C 参照））を有する時間の関数であり，これを**調和関数**と言う．周波数は，大きい（速く繰り返す）ことを高い・小さい（ゆっくり繰り返す）ことを低い，と呼ぶことが多い．

周波数が単一である調和関数からなる音を**純音**と言い，その波形は例えば図 1.2 下図のように単純で滑らかに変化している．純音は，聴覚検査や報知音などに使うために人工的に作られる音であり，自然界には存在しない．人の声・小鳥のさえずり・風の音・物が衝突する音など，私達の周囲に存在する音はすべて，多くの周波数成分が混ざり合って生じている音である．これらを**複合音**と言う．図 1.3 は，ある周波数の純音とその 2 倍の周波数の純音が混ざりあった最も単純な複合音の 1 例であるが, それでもその波形は複雑な形をしていることが見て取れる．自然界の音はすべて多数の周波数成分が複雑に混ざり合って構成されている．音がどのような周波数成分から構成されているかを明らかにする手段が，本書の題名であり第 3 章以下に詳しく説明する**フーリエ解析**である．

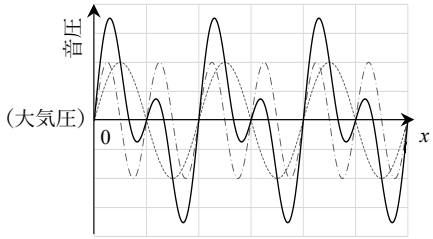

図1.3　複合音の波形例
純音（破線）と純音（一点鎖線）が
合わさると複合音（実線）になる．

音の“高い・低い”を決める主役は, 構成する多数の周波数成分のうち最も低い成分である．この周波数を**基本周波数**[Hz]，最も長い周期（基本周波数の逆数に等しい）の成分を**基本周期**[s]と呼ぶ．例えば,“ハ長調のラ”のピアノ音とギター音が同じ高さであることは，一聞して明

らかである．これは，両者の基本周波数が共に 440Hz だからである．

同時に，ピアノ音とギター音は目を閉じて聞いても区別できる．これは，両者の**音色**が異なるからである．音色は主に，基本周波数より高い高次周波数成分の数と混合の仕方，すなわちどのあたりの高さの周波数成分が優勢（多く・強く）に含まれているかによって決まる．例えば，自動車の急ブレーキ時の音には高い周波数成分が，ライオンの唸り声には低い周波数成分が大きく含まれる．

しかし，音色の中身はそれだけの単純な特性ではない．日本工業規格（JIS）では，音色は次のように定義されている．「聴覚に関する音の属性の 1 つで，物理的に異なる 2 つの音が，例え同じ音の大きさおよび高さであっても異なった感じに聞こえるとき，その相違に対応する属性」．この定義は，上記のことを忠実に表現している．しかしこの定義では，音の大きさや高さが異なっても音色が同じ（例えば同一のバイオリンでは強音でも弱音でもまた低音でも高音でも音色は同じ）になるような場合を表現していないなど，制約が大きい．そこで新しく，次のような定義が提案されている．「音源が何であるかを認知するための手掛かりとなる特性であり，音を聞いた主体が音から受ける印象の諸側面の総称」．

このように音色は，多くの物理的要因との関係を背景として，美しさ・迫力・明るさ・伸び・派手さ・温かさ・優しさなど，多くの知覚的な要因を持つ，複雑な特性である．

１．２．２　音の強さと大きさ

音の強さは，音圧の強さ（音の波形振幅の大きさ）として定義される物理的に明解な量であり，その単位は Pa（**パスカル**：空気の重さを測定し大気圧と言う概念を提示した 16 世紀の学者パスカルの名前に由来←補章 C 参照）である．「台風の中心気圧は 960 ヘクトパスカルです」のようなテレビ放送を聞いたことがあるが，1hPa（ヘクトパスカル）＝100Pa であるから，大気圧は約 10 万 Pa の世界である．一方，人（正常な若者）が聞くことができる最小音圧変化は約 20μPa（マイクロパスカル）であり，大気圧の 1／50 億程度である．また人が聞こえる最大音圧は 20 億 μPa 弱であり，最小可聴音圧の約 1 億倍にも達する．これらはとてつもなく広い範囲であり，μPa はそのままでは音圧の単位として使いにくい．そこで音圧の世界ではまず，音圧（yPa＝100 万×yμPa）を人が聞こえる最小音圧（20μPa）で除した比率（100 万×y／20）で考える．これで上記の範囲は 1/20 に縮小できるが，これでも差が大きすぎるという上記の難点はほとんど解決されない．さらに，「人間は音圧（物理量）が倍になってもそれを倍に感じるわけではない」と言う，もう 1 つの問題がある．

対数（補章 A 2.2 参照）を用いれば，これら 2 つの問題を同時に解決できる．対数では，例えば 1 万倍を 4 倍として表示するから，対数は差が大きい量同士を比較するのに都合が良い．また，音に限らず一般に人間が感じる刺激値の大きさは物理量の対数値に近いことが分かっている（これを，その発見者にちなんで**フェフナーの法則**と呼ぶ）．そこで，上記比率の対数（常用対数：底を10にとった対数）に，扱いやすく見やすいように 20 を乗じた次の値を，**音圧レ**

ベルとして定義する．

$$20\log_{10}(\frac{y}{20}) \qquad \text{(dB)} \tag{1.1}$$

この音圧レベルの単位 dB（**デシベル**）のうち B（ベル）は，1876 年に電話の特許を取得したアメリカの発明家ベルの名前に由来する（←補章 C 参照）．また，d（デシ）は体積の単位 dL（デシリットル）の d と全く同じで 1／10 を意味し，B の単位は大きすぎるからその 1／10 を単位量 1dB として採用・表示している．これに関しては，気圧が 2 倍になれば音圧レベルは＋6dB 増加し（$20\log_{10}(2) \cong 20\times 0.3 = 6$），気圧が 10 倍になれば音圧レベルは＋20dB 増加する（$20\log_{10}(10) = 20\times 1 = 20$），と覚えておくと便利である．

なお**レベル**とは，ある量のパワー（エネルギーの瞬時値）P をその基準となるパワー P_0 で除した比の常用対数を取ったものの呼称である．

図 1.4 は，典型的な生活音場における平均的な音の強さである．私達は日常，この程度の強さの音に囲まれて生活している．

音の強さ	音圧レベル	自然音	暮らし音	音 楽
[Pa]	[dB]			
200	140	落雷（至近）		
	130		離陸時ジェット機	ドラム
20	120	落雷（近所）	飛行機	トランペット
	110			オーケストラ
2	100		カラオケ	
	90	犬の吠声（至近）		ステレオ(大)
0.2	80		地下鉄車内	弦楽器・管楽器
	70	セミの声（至近）		テレビ・ラジオ(大)
20m	60		目覚まし	テレビ・ラジオ(中)
	50	小鳥のさえずり	静かな事務室	
2m	40	小雨		
	30	木の葉のそよぎ	郊外住宅地深夜	
200μ	20	雪の降る音	無響室	
	10			
20μ	0	最小可聴値		

強い ↑ ↓ 弱い

図1.4 典型的な生活音場における平均的な音の強さ

次に**音の大きさ**について述べる．音の大きさは，物理的な指標である音の強さとは異なり，人が聞こえる音に対する心理的な指標である．日本語では“強さ”と“大きさ”を同じ意味で使う場合が多いので，言葉の混同を避けるために，音の大きさを**ラウドネス**と呼ぶ場合がある．

図 1.5 は，このラウドネスの**等感曲線**（国際標準規格 ISO）であり，**等ラウドネス曲線**と呼ばれている．この図は，人間が周波数の異なる音を聞いて，“周波数は違うけれど大きさは同じ”と“感じる“ 音圧レベルを線でつないだものである．図 1.5 中の縦軸は音の強さ（音圧レベル[dB]），横軸は周波数[Hz]，図中の数値はラウドネス[dB]を表す．この図の曲線が等ラウドネス

索　　引

【あ，い】

アナログ信号　69
一般固有値問題　179
移動平均　86
因果信号　130
インパルス　12
インパルス応答　104

【う】

ウイナー・ヒンチンの定理　112，113
うなり　21
運動エネルギー　24
運動の法則　23
運動方程式　26

【え】

エネルギー　23
エネルギーの閉ループ　25
円関数　145

【お】

オイラーの公式　60，156
大きさ　150
音の大きさ　3，5
音の３要素　3
音の高さ　3
音の強さ　4，13，46
折返し誤差　73，87，90
音圧　45
音圧傾度　47
音圧レベル　4
音響インテンシティー　46
音響エネルギー　13
音色　3，4
音速　15，35

【か】

回折　16
ガウス関数　161
ガウスの誤差関数　161
拡散減衰　14
加振力　30
加速度　23
偏り誤差　86
加法定理　147
ガリレイ　22
干渉　19
慣性　23
慣性の法則　23
慣性力　23
完全流体　42
ガンマ関数　161
気体定数　42
ギブス現象　60

【き】

基本角周波数　53
基本周期　3，53，70
基本周波数　3，11，53
基本調波　53
基本波　12，53
吸音率　48
吸収減衰　14，50
球面波　13，50
凝縮率　42
共振　14，19，31
共振周波数　14，19
強制振動　14，19，31
狭帯域スペクトログラム　119
行ベクトル　167
共鳴　14，19
共鳴周波数　61，151
共役複素数　30
行列　166
行列式　174
虚数　149
距離減衰　50

【く】

偶然誤差　86
屈折　16
クロススペクトル密度　113

【け】

ケプストラム　120
ケプストラム解析　120
ケフレンシー　120
減衰比　30

【こ】

コインシデンス効果 50
剛性 23
合成積 104
高速フーリエ変換 78
広帯域スペクトログラム 119
後退波 37，47
高調波 12
喉頭原音 9
剛壁 47
弧度法 144
コヒーレンス 114
固有角振動数 26
固有周期 26
固有振動数 26
固有値 178
固有値問題 178
固有ベクトル 175，178
コレスキー分解 179

【さ】

最大サイドローブレベル 99
サウンドインテンシティ 13
三角関数 144
残響音 18
サンプリング 69
散乱減衰 50

【し】

指向性 15，51
自己相関関数 110
仕事率 24
指数 152
指数オーダーの関数 130
指数関数 152
自然対数 153
実効音圧 7
実効値 7
質量 23
質量の静機能 24
質量の動機能 24
周期 16
自由振動 26
周波数応答関数 104
周波数スペクトル 52
周波数特性 7
純音 3，11，57
瞬時位相 55
瞬時音圧 7
衝撃関数 104
常用対数 153
初期位相 55
信号処理 69
進行波 37，46
振動 23
振動インテンシティー 47
振幅スペクトル 55

【す】

スカラー積 167
スネルの法則 49
スペクトログラム 119
ズーミング 97
ズーム処理 97

【せ】

正割関数 144
正規化 109，168
正規ベクトル 168
正弦関数 144
正接関数 144
声帯音 9，123
声道 123
正方行列 166
声門 9
積の公式 148
積の積分 159
積の微分 159
節 15
絶対値 168
零交点 68
線スペクトル 52
全反射角 49

【そ】

疎 32
相関 171
相関関数 110，171
双曲線関数 160
相互相関関数 110
粗密波 32

【た】

第 1 法則 23
第 2 法則 23
対角行列 166
対称行列 166
対称性 23
対数 153
対数関数 153
体積弾性率 43
ダイナミックレンジ 73
畳み込み演算 104
縦波 2，32

ダランベールの解 37
ダランベールの原理 26
たわみ波 50
単位インパルス 104
単位インパルス関数 55，164
単位円 144
単位行列 166
単位虚数 149
単位ステップ関数 163
単位ベクトル 168
単位ランプ関数 164
弾性 24
弾性エネルギー 24
弾性の静機能 24
弾性の動機能 25
断熱変化 42

【ち】

力の釣合式 26
力の釣合の法則 26
長方行列 166
調和関数 3，57，156
調和構造 11
調和複合音 11
直交 110
直交性 158，171

【て】

定圧比熱 42
低域通過フィルタ 73
定在波 14，20，47
定常波 47
定積比熱 42
ディラックの衝撃関数 55，164
デジタル信号 69
デシベル 5
テーラー展開 154
デルタ関数 55，104，164
点音源 13，50
伝達関数 104
転置 166

【と】

等温変化 42
透過率 48
等感曲線 5
同期平均 87
等ラウドネス曲線 5
特性音響インピーダンス 46
度数法 144
ドップラー効果 21

【な行】

ナイキスト周波数 71
ナイキストの標本化定理 71
入射波 47
ニュートン 22
粘性 23
粘性抵抗力 23
のこぎり波 58
ノルム 168

【は】

倍角の公式 147
媒質 16
白色雑音 12，56
波数 38
パスカル 4
パーセバルの等式 66
波長 16，33
波動方程式 36，46
ハニング窓 99
腹 15
パワー 24
パワースペクトル 55
パワースペクトル密度 112
半角の公式 147
反射 17
反射率 48

【ひ】

比音響インピーダンス 46
比体積 42
ビット 73
比熱 42
比熱比 42
標準偏差 109
標本化 69
標本化間隔 70
標本化関数 67
標本化時間 70
標本化周期 70
標本化周波数 70
標本化点数 70
ヒルベルト逆変換の公式 128
ヒルベルト変換 124，127
ヒルベルト変換対 128

【ふ】

フェフナーの法則 4
フォルマント 123
不確定性原理 73，119
復元力 23

複合音　3，11
複素指数関数　60，155
複素指数関数波　60
複素振幅　64
複素数　60
複素数の四則演算　150
複素平面　60，150
符号関数　125
フック　22
フックの法則　23
負の回転　60
負の周波数　60
部分積分　159
フーリエ　52
フーリエ解析　3，53
フーリエ逆変換　64
フーリエ級数展開　52
フーリエ係数　52
フーリエ変換　64
フーリエ変換対　64
分解能誤差　92
分解能周波数　70

【へ】

平面波　14
ヘヴィサイドの単位関数　163
ヘルツ　3
変位　23
偏角　150

【ほ】

ポインティング　46
ポインティングベクトル　46
方形波　57
膨張率　42
保存則　23
ホン　6

【ま行】

マクローリン展開　154
窓関数　99
マトリクス　166
密　32
モード変換　50
漏れ誤差　93
漏れ誤差の発生機構　95

【ゆ，よ】

有声音　9
余割関数　144
余弦関数　144
横波　2，32
余接関数　144

【ら】

ラウドネス　5
ラプラス逆変換　139
ラプラス変換　130
ラプラス変換対　139

【り】

力学エネルギー　23
力学エネルギー保存則　24
力学特性　22
力学の始点　22
離散化　69
離散フーリエ逆変換　76
離散フーリエ変換　74，76
離散フーリエ変換対　76
理想流体　42
粒子速度　45
量子化　69，73
量子化誤差　91
臨界減衰係数　30

【れ】

レイリー角　50
レイリー波　50
列ベクトル　166
レベル　5
連続スペクトル　53，63
連続フーリエ逆変換　64
連続フーリエ変換　64
連続フーリエ変換対　64

【ろ】

ローパスフィルタ　73
ロピタルの定理　165
ロールオフ特性　99

【記号・欧字】

-3dB 帯域幅　99
AD 変換　69
DFT　74，75
FFT　78
H_1 推定　114
H_2 推定　115
i 次高調波　53
sinc 関数　67
SN 比　73

―― 監修者略歴 ――

1986 年　早稲田大学卒業
1986 年　商社系国産モード解析システムを開発する会社に勤務
1990 年　キャテック株式会社に勤務して振動騒音解析システム全般の開発に従事
　　現在に至る

フーリエ音響学入門
Introduction to Fourier Acoustics
© CATEC Inc. 2022

2022 年 6 月 20 日　初版第 1 刷発行

検印省略

監修者　天津成美
著　者　西留千晶
　　中野武史
　　角田鎮男
　　岩原光男
　　長松昌男
　　長松昭男
発行者　キャテック株式会社
印刷所　壮光舎印刷株式会社
製本所　株式会社グリーン

112-0011　東京都文京区千石 4-46-10
発売元　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　https://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-08229-6　C3055　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いません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。