

日本音響学会 編

音響学講座

8

# 超 音 波

渡辺 好章

編著

斎藤	繁実	竹内	正男
酒井	啓司	山中	一司
黒澤	実	崔	博坤
山口	匡	長谷川	英之
梅村	晋一郎	鎌田	弘志
蜂屋	弘之		

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）	菖木 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えることができる。

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

ii 「音響学講座」発刊にあたって

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

われわれが知覚できる音の周波数範囲は、一般には 20 Hz ~ 20 kHz といわれている。しかし、この可聴周波数範囲は個人差が大きく、このため、たとえ物理的には同じ音波を聞いたとしても、知覚される「音」はまったく同じというわけではない。したがって、音を「聞こえ」として客観的に評価することは厳密には難しい。

一方、音を「音波」として捉え、その物理的側面のみを考えると、音の取り扱いには格段に容易となる。この場合、われわれが「音」として聞こえるか否かは問題ではなく、その物理現象が利用できるかどうかが重要となる。このため、超音波技術の立場からは可聴か否かは問題ではなく、「物理的な利用が可能で、人が聞くことを目的としていない音」として超音波を定義している。したがって、可聴域さらには低周波数域における音波の物理現象としての利用も現代では超音波技術として扱われている。

超音波の周波数帯域については、さまざまな議論がある。高周波数域の上限周波数としては、超音波の波長が伝搬媒質の分子間隔程度まで短くなると波長が定義できなくなることを考慮すると、10 THz 程度と考えるのが妥当であろう。現実には、スマートホンなどの身の回りのエレクトロニクス機器群に組み込まれている超音波機能性デバイスにおける 10 GHz 程度が、超音波利用としての最高周波数であろう。一方、低い周波数としては、海面下の海洋構造の断層像作成技術である海洋音響トモグラフィにおいて、数千 km に及ぶ長距離伝搬計測に用いられる 100 Hz 程度の低周波音波も超音波技術として挙げられる。これらの超音波利用周波数範囲は、適用分野における周辺技術の進展とともに拡大する傾向にある。

超音波は、気相、液相、固相を問わず、どのような媒質中も伝搬できるという大きな特長がある。このため、その応用範囲はきわめて広く、それぞれの分

野の発展の端を決定付けるキーテクノロジーとしての役割を担いながら進化してきている。さらに現在では、超音波技術はエレクトロニクスやIT技術と組み合わせられて用いられる場合が多く、これらは超音波エレクトロニクスと総称されている。表に超音波エレクトロニクス発展の歴史の一部を示すが、超音波エレクトロニクスは現代においてもさまざまな技術と融合しながら進化を続けている。超音波の利用技術は大きく分けて、① 動力的（エネルギー的）利用と② 信号の利用に分けられるが、超音波エレクトロニクスにおいてもこの二つの範疇に分けられる。また適用媒体としては、生体や海洋のように光技術では対応が難しい環境における応用が未来技術として特に期待されている。現代の超音波技術の集大成については文献<sup>†</sup>に詳しくまとめられているが、超音波エレクトロニクスの発展を振り返るならば、ここに記載されていないさまざまな分野で展開されている多くの研究の中にも、超音波技術との融合によって未来技術として将来大きく花開く種子が多数包含されていると推察できる。

超音波の物理的特性は基本的には可聴音波と同じである。しかしながら、超音波技術としてその波動現象を利用するときには、その音圧は大きくなる場合が多い。例えば、われわれが音楽や音声として日常利用している音の大きさはそのほとんどが0.1 Pa以下であり、これは大気圧と比較すると1/100万程度のきわめて微弱な音圧である。一方、超音波技術として用いられる音圧は数気圧に及ぶ場合も珍しくなく、一般的には可聴域音波と比べるとはるかに大きな音圧の音波を扱うことになる。このような、周波数が高くて音圧が大きいという超音波技術の一般的な利用環境では、音波の非線形現象の発現が顕著となる点に十分注意しておく必要がある。さらに、より高周波化を指向する次世代の超音波技術においては、このような非線形音響現象に対する取り扱いがより重要となる。音波の非線形現象は、ほかの音響領域における「音波」への対応とは基本的に異なるため、本音響学講座においても、このような非線形現象への言及は本巻の受け持ちとなり、超音波における特有現象として説明する節を設けている。

<sup>†</sup> 超音波便覧編集委員会 編：超音波便覧，丸善（1999）

表 超音波エレクトロニクスの発展経緯

年 代	事 象
1880年頃	水晶の圧電・逆圧電効果の発見 (Curie 兄弟)
1912年	タイタニック号沈没, 水中障害物検知の必要性
1914年	第1次世界大戦, Uボート (ドイツ潜水艦) の探査実現できず
1916年	ランジュバン振動子の発明 (P.Langevin), パルスエコー法の発明, 水中超音波利用の始まり, 超音波エレクトロニクスの始まり
1921年頃	圧電型電子デバイスを利用した発振器の発明 (W.G.Cady や G.W.Pierce の水晶発振器回路)
1922年	超音波による光の散乱現象の理論予測 (L.Brillouin), 光を用いた超音波の計測技術の始まり
1927年頃	強力超音波の実験的検討 (R.W.Wood, A.L.Loomis), 超音波の動力的応用の始まり, キャピテーション, ソノケミストリーの発端
1929年	透過法による超音波探傷装置の原理の発見 (S.T.Sokolov), 超音波非破壊検査の発明 (超音波の信号的応用の進展)
1932年	ゼロ温度係数の水晶振動子 (R1 カット式) の発明 (古賀)
1942年	生体への超音波応用の始まり (K.T.Dussik), 透過法の発明
1943年頃	チタン酸バリウムの発見 (圧電セラミック材料の進展)
1949年	超音波顕微鏡の概念を確立 (S. T. Sokolov)
1949年頃	パルスエコー法による胆石の局在化 (G.D.Ludwig)
1950年頃	生体臓器の超音波撮像 (D.H.Howry), 超音波診断装置研究の始まり
1960年代	圧電型電子デバイス研究の進展・実用化
1963年	パラメトリックアレイの理論を確立 (P.J.Westervert), 非線形音響現象の工学的利用の始まり
1968~69年	Shear Horizontal (SH) 成分のみを持つ BGS (Bleustein-Gulyaev-Shimizu) 波の発見
1970年代	表面波電子デバイス研究の進展・実用化
1974年	超音波顕微鏡の実用化 (R.A.Lemons, C.F.Quate)
1979年	海洋音響トモグラフィの提案 (W.H.Munk), 大洋断層像作成技術の展開
1980年代	圧電型アクチュエータ研究の進展・実用化 カラードプラ法の発明, 超音波診断装置の進化発展の始まり
1982年	超音波モータの実用化 (指田)
1983年	パラメトリックスピーカ (オーディオスポットライト) の発明 (米山), 非線形音響技術の実用化の始まり (R.T.Beyer)
1985年以降	圧電ジャイロ・圧電トランス・HF 超音波デバイス研究の進展・実用化 (超音波機能性デバイス)
1990年	単泡性ソノルミネセンスの発見 (D.Gaitan), 気泡振動と超音波技術の融合の始まり
1995年以降	超音波診断におけるハーモニックイメージング技術の進展
2000年以降	超音波の医療・治療への応用展開, 超音波ドラッグデリバリーシステム, 集束強力超音波治療, 音響索孔 (ソノポレーション技術), 超音波ハイパーサーミアなどの進展 ループ管型熱音響システム (矢崎) の環境技術としての展開

ただし、超音波もその基本はやはり音波の波動現象であることには変わりはない。本巻では、この観点からの理解を進めることを基本指針として、各分野を代表する方々にわかりやすい執筆をお願いした。

• 執筆分担

渡辺 好章 まえがき

斎藤 繁実 1.1～1.3 節

竹内 正男 1.4～1.5 節, 3.3 節

酒井 啓司 2 章

山中 一司 3.1 節

黒澤 実 3.2 節

崔 博坤 3.4 節

山口 匡 4.1 節

長谷川英之 4.2 節

梅村晋一郎 4.3～4.4 節

鎌田 弘志 5.1 節

蜂屋 弘之 5.2 節

2022 年 8 月

渡辺好章



# 目 次

## 1 章 超音波の基礎

1.1	超音波の伝搬	2
1.1.1	支配方程式	2
1.1.2	波動方程式と波のエネルギー	4
1.1.3	音波の反射と透過	6
1.1.4	音波の斜め入射と屈折	10
1.1.5	音波の吸収減衰と散乱	12
1.2	超音波の放射と音場	14
1.2.1	点音源	14
1.2.2	ピストン円板の放射とレイリー積分	17
1.2.3	レイリー積分の近似計算	20
1.2.4	放物近似による解析	23
1.3	超音波の非線形	29
1.3.1	非線形の支配方程式	30
1.3.2	波形ひずみ	31
1.3.3	非線形伝搬の定式化	35
1.3.4	パラメトリックアレイ	39
1.3.5	音響放射圧と音響流	43
1.4	固体中の超音波	46
1.4.1	固体中の弾性波	46
1.4.2	3次元固体中の弾性波	49
1.4.3	3次元等方性固体中の縦波と横波	51
1.4.4	板波	53
1.4.5	弾性表面波	56
1.5	超音波の送波と受波	60

1.5.1 圧電と電歪	60
1.5.2 圧電バルク波トランスデューサ	63
1.5.3 弾性表面波トランスデューサ	69
1.5.4 電磁型トランスデューサ	71
引用・参考文献	72

## 2章 超音波の計測

2.1 振幅・強度・音場の測定	75
2.1.1 ハイドロホンによる測定	75
2.1.2 音響放射圧測定	75
2.1.3 光学的方法	77
2.1.4 超音波の可視化	81
2.2 媒質の音波物性	83
2.2.1 音波緩和現象	83
2.2.2 超音波スペクトロスコーピー技術	86
引用・参考文献	99

## 3章 超音波応用

3.1 信号としての応用	101
3.1.1 非破壊検査	101
3.1.2 超音波顕微鏡	106
3.1.3 環境計測	114
3.2 動力としての応用	118
3.2.1 強力超音波	118
3.2.2 超音波モータ	126
3.3 機能としての応用	135
3.3.1 バルク波デバイス	136
3.3.2 弾性表面波デバイス	140
3.3.3 その他のデバイス	147

3.4 音響キャビテーション	147
3.4.1 キャビテーション気泡の動力学	148
3.4.2 気泡が受ける力	153
3.4.3 ソノルミネセンス	155
3.4.4 超音波洗浄と音響放射	157
3.4.5 ソノケミストリー応用	159
引用・参考文献	160

## 4章 医用超音波

4.1 生体の超音波特性	165
4.1.1 音速	165
4.1.2 吸収	167
4.1.3 反射	169
4.1.4 散乱	172
4.2 超音波診断装置	180
4.2.1 超音波診断装置とは	180
4.2.2 超音波探触子	180
4.2.3 超音波画像の構築	182
4.2.4 血流計測法	184
4.2.5 生体機能計測法	192
4.3 超音波治療	193
4.3.1 超音波治療の概要	193
4.3.2 超音波のエネルギーを蓄積・凝集するメカニズム	194
4.3.3 集束強力超音波治療	197
4.3.4 結石破碎療法	201
4.3.5 観血的応用	203
4.3.6 超音波による物理療法	203
4.4 ハーモニックイメージング法	204
4.4.1 造影ハーモニックイメージング法	204
4.4.2 ティッシュハーモニックイメージング法	207

引用・参考文献 210

## 5章 海洋音響

5.1 海中の音波伝搬 215

5.1.1 音速と吸収 215

5.1.2 音線理論 219

5.1.3 ソナー方程式 222

5.2 海洋計測と資源 225

5.2.1 水中の位置計測 225

5.2.2 水中の速度計測 230

5.2.3 双方向伝搬による音速と流速の計測 232

5.2.4 海洋音響トモグラフィ 234

5.2.5 船舶直下の計測 236

5.2.6 水産資源の計測 238

5.2.7 マルチナロービームによる海底面・資源の計測 240

5.2.8 サイドスキャンソナーによる海底面・資源の計測 241

引用・参考文献 243

索引 244

# 1 章

## 超音波の基礎

### ◆本章のテーマ

本章では、超音波が媒質中を伝搬するときを生じるさまざまな物理現象を取り扱う。超音波の基礎を与える物理は可聴音波と基本的には同じである。しかし、超音波の場合には取り扱う周波数が高いという特徴に加えて、伝搬媒質が気相のみならず液相や固相と多様となる点にも注意すべき違いがある。また、気相と液相においては、伝搬する波動の種類は縦波のみを考えればほぼ十分であるが、固相においては多様な種類の波動を考える必要がある。

そこで、1.1 節と 1.2 節においては、気相や液相中の縦波の物理を中心に考え、基本となる波動の伝搬現象に加えて、伝搬結果として生じる音場について学ぶ。さらに 1.3 節では、超音波を用いる場合には必ず考慮しなければならない非線形現象についての理解を深める。また、1.4 節では、固体中における超音波の多様な特長を知るとともに、これらの現象を応用した超音波の送波や受波への展開について 1.5 節で学ぶ。これらはすべて以降の章に必要な事項である。

### ◆本章の構成（キーワード）

#### 1.1 超音波の伝搬

波動方程式，速度ポテンシャル，固有音響インピーダンス，音響インテンシティ

#### 1.2 超音波の放射と音場

球面波，ピストン円板，レイリー距離，指向係数，集束音場

#### 1.3 超音波の非線形

非線形パラメータ，波形ひずみ，パラメトリックアレイ

#### 1.4 固体中の超音波

横波，板波，表面波

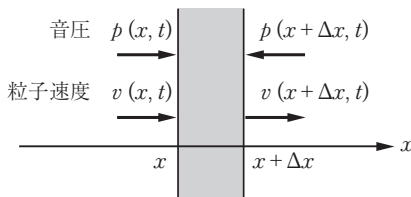
#### 1.5 超音波の送波と受波

圧電効果，トランスデューサ，Mason の等価回路

## 1.1 超音波の伝搬

## 1.1.1 支配方程式

流体中を伝わる音波は、媒質の振動方向と波の伝搬方向が同じ向きの**縦波**であり、その振動速度  $v$  を**粒子速度**という。音波があると、静圧  $p_0$  に微小な**音圧**  $p$  が重畳する。またこのとき、**密度**が静圧時の  $\rho_0$  から  $\rho_0 + \rho$  に変化する。簡単のために、 $x$  軸に沿って進行する**平面波**の場合を考える。図 1.1 のように、 $x$  軸上で微小領域  $[x, x + \Delta x]$  を考えると、音波により左から  $p(x, t)$ 、右から  $p(x + \Delta x, t)$  の力が加わり、差し引き  $p(x, t) - p(x + \Delta x, t) \approx -(\partial p / \partial x)\Delta x$  の力が  $x$  方向に働く。

図 1.1 平面波の音圧  $p$  と粒子速度  $v$ 

微小領域の単位面積当りの質量は  $\rho_0 \Delta x$  なので、(質量)  $\times$  (加速度) = (力) の関係から

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.1)$$

が得られる。式 (1.1) は**運動方程式**である。さらに図で、厚さ  $\Delta x$  の領域に、単位時間に単位面積当り左から  $v(x, t)$  だけの量の流体が流れ込み、右から  $v(x + \Delta x, t)$  だけの量の流体が流れ出る。したがって、差し引き  $v(x, t) - v(x + \Delta x, t) \approx -(\partial v / \partial x)\Delta x$  だけの量が増加するので、これに密度  $\rho_0$  を乗じた分だけ、領域内の質量が増加する。これは質量保存則であり

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \frac{\partial v}{\partial x} \quad (1.2)$$

という式になる。式 (1.2) を**連続方程式**という。一方、音圧  $p$  と、それに伴う

密度増加量  $\rho$  とは近似的に比例関係にある。それを

$$p = A \frac{\rho}{\rho_0} \quad (1.3)$$

と書き、**状態方程式**という。 $A$ は体積弾性率である。気体の断熱変化では、(圧力)/(密度) $^\gamma$ がつねに一定となる性質がある。 $\gamma$ は比熱比(定圧比熱  $c_p$  と定積比熱  $c_v$  の比、 $c_p/c_v$ )である。 $(p_0+p)/(\rho_0+\rho)^\gamma = p_0/\rho_0^\gamma$  だから、 $p = p_0(1+\rho/\rho_0)^\gamma - p_0 \approx \gamma p_0(\rho/\rho_0)$  ( $\rho/\rho_0 \ll 1$ ) により  $A = \gamma p_0$  となる。液体では、 $A$ は媒質ごとに異なる物質定数である。

ここで、式(1.1)の両辺を  $x$  で偏微分する。また、式(1.2)の左辺の  $\rho$  に式(1.3)を代入した後、両辺を  $t$  で偏微分する。その2式を連立して、共通項  $\partial^2 v / \partial t \partial x$  を消去すると、次式が得られる。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1.4)$$

ただし、 $c_0 = \sqrt{A/\rho_0}$  であり、後述のように音速を表す。式(1.4)を1次元の**ダランベール (d'Alembert) 波動方程式**という。角周波数  $\omega$  で正弦波振動する音を想定して、音圧を  $p = P(x)(\cos \omega t + j \sin \omega t) = P(x) \exp(j\omega t)$  と複素表示し、 $p$  の実部  $\text{Re}(p)$  が実質の意味を持つことにする。ここで、 $P(x)$  は距離  $x$  に依存する複素関数である。フーリエ解析によれば、正弦波でない振動も複数の正弦波振動の重ね合わせとして考えることができるので、議論の一般性は失われぬ。この  $p$  を式(1.4)に代入し、両辺に共通な  $\exp(j\omega t)$  で割ると、1次元の**ヘルムホルツ (Helmholtz) 方程式**

$$\frac{d^2 P(x)}{dx^2} + k^2 P(x) = 0 \quad (1.5)$$

が得られる。ただし、 $k = \omega/c_0$  である。式(1.5)の一般解は  $P(x) = C_1 \exp(-jkx) + C_2 \exp(jkx)$  だから

$$\begin{aligned} p &= C_1 \exp[j(\omega t - kx)] + C_2 \exp[j(\omega t + kx)] \\ &= C_1 \exp\left[j\omega\left(t - \frac{x}{c_0}\right)\right] + C_2 \exp\left[j\omega\left(t + \frac{x}{c_0}\right)\right] \end{aligned} \quad (1.6)$$

#### 4 1. 超音波の基礎

となる。第1項は  $t-x/c_0$  に依存し、 $t$  が 1, 2, 3, ... と増加する（時刻が1秒, 2秒, 3秒, ... と経過する）につれて、 $x$  が  $c_0, 2c_0, 3c_0, \dots$  と増加する方向に移動した観測点では同じ値になる。したがって、第1項は、速度  $c_0$  で  $x$  の正方向に伝わる前進波を表す。同様な議論により、第2項は  $x$  の負方向に速度  $c_0$  で伝わる後退波を表す。 $c_0$  は音速であることがわかる。

式 (1.6) から、ある距離  $x$  での単位時間（1秒）当りの位相変化が  $\omega$  [rad] であるのに対し、ある時刻  $t$  での単位距離（1m）当りの位相変化が  $k$  [rad] である。角周波数  $\omega$  が位相の時間変化を表す重要なパラメータであると同様に、 $k$  は位相の距離変化を表す重要なパラメータである。 $k$  を**波数**と呼ぶ。ある時刻で、波長  $\lambda$  だけ離れた場所では、位相が  $2\pi$  異なるから、 $k=2\pi/\lambda$  となることがわかる。 $c_0=\sqrt{A/\rho_0}$  を用いて、式 (1.3) は次式にも書き換えられる。

$$\frac{\dot{p}}{\rho} = c_0^2 \quad (\text{一定値}) \quad \text{すなわち} \quad \frac{dp}{d\rho} = c_0^2 \quad (1.7)$$

粒子速度を3次元に一般化し、ベクトル  $\boldsymbol{v}$  で表すと、式 (1.1), (1.2) は以下のようになる。

$$\rho_0 \frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} = -\nabla p \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \nabla \cdot \boldsymbol{v} \quad (1.9)$$

##### 1.1.2 波動方程式と波のエネルギー

式 (1.8) の両辺の発散 ( $\nabla \cdot$ ) をとる。また、式 (1.9) の  $\rho$  に式 (1.3) を代入した式の両辺を  $t$  で偏微分する。その2式を連立して、共通項  $\nabla \cdot (\partial \boldsymbol{v} / \partial t)$  を消去し、さらにベクトル公式  $\nabla \cdot \nabla p = \nabla^2 p$  を用いると、3次元のダランベール波動方程式

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1.10)$$



が得られる。正弦波振動を仮定し、 $p = P \exp(j\omega t)$  とすると、3次元のヘルムホルツ方程式が得られる。

$$\nabla^2 P + k^2 P = 0 \quad (1.11)$$

流体中の音波を取り扱うとき、 $p$ ,  $v$ ,  $\rho$  以外の変動量として、次式で速度ポテンシャル  $\phi$  を定義する。

$$v = -\nabla\phi \quad (1.12)$$

式 (1.12) を式 (1.8) に代入し、両辺の  $\nabla$  の引数が相等しいとして

$$p = \rho_0 \frac{\partial\phi}{\partial t} \quad (1.13)$$

を得る。これを式 (1.10) に代入すると、同じ形の波動方程式になる。

$$\nabla^2\phi - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} = 0 \quad (1.14)$$

速度ポテンシャル  $\phi$  が求まれば、 $v$ ,  $p$ ,  $\rho$  のすべてが式 (1.12), (1.13), (1.3) により容易に計算できるので、音波の解析には式 (1.14) を用いることも多い。

音波の性質について調べる。式 (1.6) を式 (1.1) に代入、 $v = V \exp(j\omega t)$  とすると

$$V = \frac{C_1}{\rho_0 c_0} \exp(-jkx) - \frac{C_2}{\rho_0 c_0} \exp(jkx) \quad (1.15)$$

となり、前進波と後退波ともに、粒子速度振幅が音圧振幅を  $\rho_0 c_0$  で割った値になる。後退波では正の圧力に対する粒子速度が負値をとる。これは波が負方向に伝搬しているからである。平面波の場合、その音圧はつねに、粒子速度の伝搬方向成分の  $\rho_0 c_0$  倍となる。 $\rho_0 c_0$  を固有音響インピーダンス (specific acoustic impedance)、あるいは特性インピーダンス (characteristic impedance) という。これを単に「ローシー」と呼ぶこともある。

ここで、音響パワー、すなわち音波が運搬するエネルギーの単位時間当たりの量を求めてみよう。エネルギーを求める計算では、物理量との対応を考慮し、

# 索引

## 【あ】

アクティブソナー	222
アコースティック エミッション	105
圧電	60
圧電応力定数	62
圧電基板の SAW	58
圧電効果	60
圧電構成関係式	62
圧電材料	61
圧電振動ジャイロ	138
圧電すべり効果	63
圧電性	46
圧電セラミックス	61
圧電素子	75
圧電トランス	139
圧電トランスデューサ	136
圧電薄膜共振子	61, 139, 140
圧電ひずみ定数	62
圧電表面すべり波	58
厚み共振	120
厚みすべり振動	115
圧力連続	7

## 【い・う】

位相速度	48
一方向性変換器	140
移動体	127
異方性	46
浮き電極形一方向性 変換器	141
運動方程式	2

## 【え】

エイリアシング	191, 192
エクスポネンシャルホーン	123

エラストグラフィ	167, 192
遠距離音場	20
塩分濃度	215

## 【お】

オイラーの運動方程式	30
応力	47
音弾性法	104
音の強さ	6
音圧	2
音圧振幅透過係数	8
音圧振幅反射係数	7
音響インテンシティ	6
音響エネルギー	6
音響化学発光	154
音響化学療法	195
音響キャピテーション	148
音響測位	225
音響測深機	236
音響バブル	148
音響非線形係数	32
音響非線形パラメータ	31
音響放射圧	45, 75
音響流	45
音響レンズ	106
音響 SN 比	204
音線追跡法	219
音線理論	219
音速	165, 215
音速勾配	217, 220
音速プロファイル	217
音波緩和現象	83

## 【か】

回折	20
回転子	127, 128
海洋音響トモグラフィ	234
カオス振動	158
加湿器	126

ガスセンサ	118
仮想音源	36
加熱作用	195
カラー Doppler 法	190
緩和強度	84
緩和時間	84
緩和周波数	85

## 【き】

機械作用	195
機械パワー	118
キャピテーション	148, 194
吸収	218
吸収減衰	167
球面波	15
キュリー点	122
共振子	56
共振尖鋭度 $Q$	136
共鳴法	86
強力超音波用 トランスデューサ	119
魚群探知機	238
近距離音場	20, 124
近接場音響顕微鏡	114

## 【く】

空間分解能	106
屈曲振動	139
屈折	11
屈折角	11
クラッタフィルタ	188
グレージング角	220
グレーティング反射器	143
クロスファンビーム	240

## 【け】

血液	165
血液灌流率	199
結石破砕療法	201

減衰係数 12  
 減衰定数 167

**【こ】**

高調波成分 207  
 高分解能ブラッグ反射法 90  
 剛壁 16  
 後方散乱 173  
 固体ホーン 122  
 固定子 128  
 固有音響インピーダンス 5, 49, 166  
 コリオリ力 138  
 混合層 216  
 混合層深 216  
 コンベックス走査 181  
 コンボルバ 56, 145

**【さ】**

サイドスキャンソナー 241  
 サイドロープ・  
   グレーティングロープ 184  
 サーマルインデックス 169  
 散逸 87  
 サンプリング 189  
 サンプリング定理 191  
 散乱 13, 172  
 散乱エコー強度 188  
 散乱減衰 167

**【し】**

指向係数 22  
 指向性感度 75  
 斜角探傷法 101  
 集束音場 27  
 集束強力超音波 197  
 集束ビーム 108  
 周波数特性 75  
 主極 22  
 縮退 52  
 主水温躍層 217  
 受波器アレイ 229  
 シュリーレン法 81

衝撃波形成距離 33  
 状態方程式 3  
 ショックパラメータ 33  
 深海サウンドチャンネル 218, 221  
 深海層 217  
 シングルバブルソノ  
   ルミネセンス 155  
 進行波型超音波回転モータ 127  
 進行波型超音波モータ 127  
 進行波型超音波リニア  
   モータ 131  
 深 度 215  
 振動子 136  
 振動速度変成 122  
 振動伝送系 122

**【す】**

水 温 215  
 水温躍層 216  
 水 晶 61  
 水晶振動子マイクロ  
   バランス 115, 137  
 垂直探傷法 101  
 スキャニングソナー 237  
 すだれ状電極トランス  
   デューサ 69  
 ステータ 128  
 スネルの法則 11, 220  
 スプリットビーム法 239  
 スペクトル拡散通信 145  
 スライダ 127  
 ずり弾性率 83  
 ずり粘性率 168

**【せ・そ】**

生体熱輸送方程式 198  
 セクタ走査 181  
 造影強調 204  
 造影ハーモニック  
   イメージング法 206

送受波トランスデューサ  
   間の等価回路表示 67  
 層 深 217  
 送波用トランスデューサ  
   の2端子対等価回路 66  
 速度ポテンシャル 5  
 速度連続 7  
 組織ドプラ法 192  
 ソナー 222  
 ソナー方程式 222  
 ソノケミストリー 157  
 ソノレーション 195  
 ソノルミネセンス 148  
 損失要因 144

**【た】**

体積弾性率 83  
 ターゲットストレングス 239  
 縦 波 2, 46  
 ダランベール波動方程式 3  
 たわみ振動 123  
 弾性定数 48  
 弾性波 46  
 弾性表面波 46, 56  
 弾性表面波モータ 132  
 単相形一方向性変換器 140  
 断層像 180  
 タンタル酸リチウム 61  
 段付きホーン 122

**【ち】**

遅延時間 32  
 遅延線 145  
 チャンネル 221  
 超音波エネルギー 147  
 超音波カッター 125  
 超音波顕微鏡 106  
   —の  $V(z)$  曲線 105  
 超音波コントラスト剤 197  
 超音波診断 165  
 超音波診断装置 180

超音波スペクトロスコープ	85
超音波接合	125
超音波洗浄	124, 147
超音波造影剤	204
超音波探触子	180
超音波ハイパーサーミア	199
超音波メス	203
超音波モータ	126
直線位相特性	142
直線集束ビーム	109

## 【て】

定在波	9
定在波型超音波回転モータ	132
定在波型超音波モータ	127
定在波型超音波リニアモータ	133
ティッシュハーモニックイメージング法	208
デフォーカス距離	107
点音源	16
電気機械結合係数	58
電気機械変換素子	119
電磁型トランスデューサ	71
電子走査映像法	105
伝搬アノマリー	215
伝搬定数	48
電 歪	60

## 【と】

特性インピーダンス	5
ドブラ効果	184, 185, 230
ドブラシフト周波数	186
ドブラ診断	167
ドブラスペクトル	187
ドブラソナー	231
トランスデューサ	75
トランスバーサルフィルタ	142
トランスポンダ	226

## 【な・に・ね】

軟部組織	165
ニオブ酸リチウム	61
二重音源	16
入射角	10
ねじり振動子	120
熱拡散率	199
ネプライザ	126

## 【は】

配列型探触子	180
波 数	4
パッシブソナー	222
ばね定数	83
ハーモニックイメージング法	204
パラメトリックアレイ	40
パラメトリック音源	40
バルク波	47
バルク波デバイス	137
パルスインバージョン法	207
パルスエコー法	180, 182
パルスドブラ法	184, 189
パルス法	88
パワードブラ法	191
ハンケル変換	25
反 射	169
反射角	10

## 【ひ】

光弾性効果	79
光ファイバー	75
光偏向	77
非観血的	193
微小気泡	194
非侵襲	180
ヒストトリプシ	195
ピストン円板	17
ひずみ	47
非線形エコー	207
非線形吸収	35
非線形性	205

非線形ばね	205
非破壊検査	101
ビームフォーミング	184
ビャークネス力	153
標本化	189
表面層	216
微量質量計測	140

## 【ふ】

ファブリペロー干渉計	96
フィルタ	56, 137
フェーズドアレイ	105, 180
フォノン	93
副 極	22
複屈折効果	104
複素弾性率	83
フックの法則	47
物理療法	203
ブラッグ回折	146
ブラッグ反射	81, 89
ブリュアン散乱法	93
プローブ	180
分散方程式	54

## 【へ】

平面弾性波発生用圧電トランスデューサ	63
平面波	2
ヘルムホルツ方程式	3
変成比	122

## 【ほ】

放射インピーダンス	15
放射器	123
ホットスポット説	151
骨	165
ポリフッ化ビニリデン	61
ボルト締めランジバン形振動子	119

## 【ま】

マイクロ気泡	194
マッケンジーの式	216

マッハ数	30
マルチナロービーム	240
マルチバブルソノ ルミネセンス	156
<b>【み・む・め・も】</b>	
密度	2
霧化器	125
メカニカルインデックス	169
メカニカルフィルタ	137
モノリシックフィルタ	138
<b>【ゆ・よ】</b>	
有限インパルス応答 横波	46

<b>【ら】</b>	
ラグランジアン	37
ラブ波	57, 58
ラブラス圧	149
ラマン・ナス回折	78
ラマン・ナスパラメータ	78
ラム波	46
<b>【り・れ】</b>	
リニア走査	181
リブロン光散乱	97
粒子速度	2
レイノルズ応力	45
レイリー距離	20

レイリー散乱	94, 173
レイリー積分	17
レイリー長	20
レイリー波	56, 57
レイリー・プレセット 方程式	150, 195
レイリー分布	179
レイリーモード	117
連続波ドブラ法	186
連続方程式	2
<b>【ろ・わ】</b>	
漏洩弾性表面波	58
ロータ	127, 128
ワイヤボンダ	125

<b>【A】</b>	
A モード	182
AE	105
AIN 膜	61
<b>【B】</b>	
B モード	183
BGS 波	58
BLT	119
<b>【E・F】</b>	
EMAT	71
FBAR	61, 140
FEUDT	141
FIR	142
FOM	224
<b>【H・I・K】</b>	
HIFU	197
IDT	69
KZK 方程式	38

<b>【L】</b>	
LBL 方式	226
LFB	109
LIPUS	203
<b>【M】</b>	
M モード	183
Mason の等価回路	66
MBSL	156
MI	169
Minnaert の式	150
MLD	216
<b>【P・Q】</b>	
PVDF	61, 75
PZT	75
QCM	115, 137
<b>【S】</b>	
SAW 共振子	143
SAW センサ	116

SAW モータ	132
SBL 方式	227
SBSL	155
SH 板波	46
SH 波	53
SLD	217
SOFAR チャネル	221
SPUDT	140
SSBL 方式	229
SV 波	53
<b>【T】</b>	
TI	169
TOFD 法	103
<b>【V・Z】</b>	
v-shape motor	133
V(z) 曲線	109
VSM	134
ZnO 膜	61

—— 編著者・著者略歴 ——

**渡辺 好章**（わたなべ よしあき）

- 1972年 同志社大学工学部電子工学科卒業
- 1974年 同志社大学大学院工学研究科修士課程修了（電気工学専攻）
- 1980年 同志社大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学（電気工学専攻）
- 1981年 同志社大学助手
- 1981年 工学博士（同志社大学）
- 1984年 同志社大学専任講師
- 1987年 同志社大学助教授
- 1992年 同志社大学教授
- 2020年 同志社大学名誉教授

**斎藤 繁実**（さいとう しげみ）

- 1970年 東北大学工学部通信工学科卒業
- 1972年 東北大学大学院工学研究科修士課程修了（電気及通信工学専攻）
- 1975年 東北大学助手
- 1976年 東北大学大学院工学研究科博士課程修了（電気及通信工学専攻）  
工学博士
- 1979年 東海大学専任講師
- 1982年 東海大学助教授
- 1982～ テキサス大学訪問研究員（兼任）
- 1983年
- 1990年 東海大学教授
- 2013年 東海大学退職
- 2014年 東海大学名誉教授

**竹内 正男**（たけうち まさお）

- 1969年 神奈川大学第2工学部電気工学科卒業
- 1973年 東北大学大学院工学研究科修士課程修了（電気及通信工学専攻）
- 1976年 東北大学大学院工学研究科博士課程修了（電気及通信工学専攻）  
工学博士
- 1976年 東北大学助手
- 1985年 東北大学助教授
- 1997年 玉川大学教授
- 2010年 玉川大学名誉教授

**酒井 啓司**（さかい けいじ）

1984年 東京大学工学部物理工学科卒業  
1988年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了（物理工学専攻）  
1989年 東京大学大学院工学系研究科博士課程中退（物理工学専攻）  
1989年 東京大学助手  
1991年 工学博士（東京大学）  
1995年 東京大学講師  
1996年 東京大学助教授  
2009年 東京大学教授  
2021年 東京大学大学院特任教授（兼任）  
現在に至る

**山中 一司**（やまなか かずし）

1975年 東京大学工学部物理工学科卒業  
1977年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了（物理工学専攻）  
1978年 通商産業省工業技術院機械技術研究所研究員  
1987年 工学博士（東北大学）  
1987～ カナダ NRC 工業技術研究所訪問研究員（兼任）  
1988年  
1997年 東北大学教授  
2015年 ボールウェーブ株式会社取締役  
2015年 東北大学名誉教授

**黒澤 実**（くろさわ みのる）

1982年 東京工業大学工学部電気電子工学科卒業  
1984年 東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了（電子システム専攻）  
1984年 東京工業大学助手  
1990年 工学博士（東京工業大学）  
1991年 ヌーシャテル大学博士研究員（兼任）  
1992年 東京大学助教授  
1998年 エコール・ノーマル・スーペリアル・カシヤン客員教授（兼任）  
1999年 東京工業大学助教授  
1999～ 広島大学助教授（兼任）  
2000年  
2006年 スイス連邦工科大学ローザンヌ校客員教授（兼任）  
2007年 東京工業大学准教授  
現在に至る

**崔 博坤** (さい ひろし)

- 1974 年 東京大学工学部物理工学科卒業
- 1976 年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了 (物理工学専攻)
- 1979 年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了 (物理工学専攻)  
工学博士
- 1981 年 東京大学生産技術研究所助手
- 1989 年 明治大学助手
- 1999 年 明治大学教授
- 2021 年 明治大学名誉教授

**山口 匡** (やまぐち ただし)

- 1996 年 千葉大学工学部情報工学科卒業
- 1998 年 千葉大学大学院自然科学研究科修士課程修了 (知能情報工学専攻)
- 2001 年 千葉大学大学院自然科学研究科博士課程修了 (情報科学専攻)  
博士 (工学)
- 2001 年 千葉大学助教
- 2008 年 千葉大学准教授
- 2013 年 千葉大学教授
- 現在に至る

**長谷川 英之** (はせがわ ひでゆき)

- 1996 年 東北大学工学部電気工学科卒業
- 1998 年 日本学術振興会特別研究員 (DC1)
- 1998 年 東北大学大学院工学研究科博士前期 2 年の課程修了 (電気・通信工学専攻)
- 2001 年 東北大学大学院工学研究科博士後期 3 年の課程修了 (電子工学専攻)  
博士 (工学)
- 2001 年 日本学術振興会特別研究員 (PD)
- 2002 年 東北大学助手
- 2005 年 東北大学講師
- 2007 年 東北大学准教授
- 2015 年 富山大学教授
- 2019 年 スウェーデン・ルンド大学客員教授 (兼任)
- 現在に至る



**梅村 晋一郎**（うめむら しんいちろう）

1975年 東京大学工学部物理工学科卒業  
1977年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了（物理工学専攻）  
1980年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了（物理工学専攻）  
工学博士  
1980年 株式会社日立製作所中央研究所研究員  
1986～ イリノイ大学客員准教授（兼任）  
1987年  
2005年 京都大学教授  
2007年 東北大学教授  
2018年 東北大学名誉教授

**鎌田 弘志**（かまた ひろし）

1970年 東北大学工学部通信工学科卒業  
1972年 東北大学大学院工学研究科修士課程修了（電気及通信工学専攻）  
1972年 沖電気工業株式会社勤務  
1991年 博士（工学）（東北大学）  
1998年 沖電気工業株式会社電子通信システム研究所所長  
2001～ 沖電気工業株式会社技師長  
2007年  
2001年 社団法人防衛装備工業会水中音響機器試験法規格調査委員会委員長  
2005年 特定非営利活動法人海洋音響学会会長  
2008年 東海大学非常勤講師  
2012年 特定非営利活動法人海洋音響学会名誉会員

**蜂屋 弘之**（はちや ひろゆき）

1980年 東京工業大学工学部電気電子工学科卒業  
1982年 東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了（電子システム専攻）  
1982年 東京工業大学助手  
1990年 工学博士（東京工業大学）  
1994年 博士（医学）（東北大学）  
1994年 千葉大学助教授  
1999年 千葉大学教授  
2007年 東京工業大学教授  
現在に至る

# 超音波

Ultrasonics

© 一般社団法人 日本音響学会 2022

2022年10月7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 新日本印刷株式会社  
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 <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01368-9 C3355 Printed in Japan

(谷口)



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。