

# 身近な音と音波

工学博士 崔 博 坤 著

コロナ社

## ま え が き

私たちの日常にはいろいろな音が満ちあふれている。朝、時計やスマホからは目覚ましのベル音が聞こえてくる。テレビ・ラジオは世の中の情報を絶え間なく送ってくる。外に出れば自動車の音が騒がしいし、ラッシュアワーの駅ではいろいろな音が洪水のように押し寄せる。一方、好みの音楽を聴くときは至福のときであるし、鳥の鳴き声や小川のせせらぎの音は心をなごませてくれる。楽しい気分ときは口笛を吹くこともある。ときにはカミナリの鳴音にびっくりして怖い思いもする。人とのコミュニケーションにとって音声が必要なことは言うまでもない。

耳で聞こえる音を一般的に「音」と呼んでいる。例として挙げた音は、音源の振動が空気を振るわせ、その空気振動が波として伝わり、耳に入ってきたものである。しかし、私たちは音を感覚として感じるだけで、途中の波としての段階は意識していない。一方「音波」と言うときには、音の発生原因や途中の波としての過程を問題にしている。例えばペットボトルを吹くとなぜ鳴るのか、音がどこからどのように聞こえてくるのか、などのときである。また、空気ではない媒質を伝わる音波もある。イルカは泳ぎながら音波を出してエサなどを探すし、クジラも音波で仲間と交信している。これらの音波は水中を伝わっている。また、海面を伝わる波は、サーフィンを楽しむこともできるが、ときには大きな津波として襲ってくる。地震の振動は地中を伝わってきて大きな災害をもたらす。母胎内の赤ちゃんの写真をとったり、身体内部の病気を診断したりする超音波もある。強い超音波でガンを治療することもできる。これらは波が伝わる媒質が水であったり、地殻であったり、あるいは母親のお腹だったりする。伝わる媒質が異なっているというだけで、波としての基本的な性質は空気中の音と変わりがない。

音についての知識は高校で少しは学ぶが、大学で学ぶことはあまりない。さらに深く学びたいとき、音に関する専門的テキストは数式を多用して初心者にはとっつきにくいし、一般の読み物は説明が簡単すぎて物足りない。本書では、1章で音の簡単な歴史を述べた後、2、3章で音の伝わり方の基礎を説明する。4~7章では、反射・屈折・干渉・回折・ドップラー効果など波としての基本的な現象を、実験例を織り込みながら解説する。8章で発声や聴覚のしくみに注目し、9章では身近にある興味深い音を波の立場から考察する。10章で超音波について、11章で地震波や水面波について取り上げ、宇宙での波についても触れた。基本的性質を十分に理解してもらうため数式もある程度使っているが、高校数学で理解できる程度に抑えてある。物理という拡大鏡を通して「音」を見ると、「波」の側面がはっきり見えてくる。そのことで、多くの「音」の共通点が見えてきて、より理解が深まるのではないかと期待している。この見方は音だけでなく光や電磁波など波動全般についての理解を助ける。本書は、音に興味がある高校生や大学生、あるいは中学高校の理科教員などには特に参考になるのではないと思う。音に対してより広い見方を身につけてもらえれば幸いである。また、2、3章では高校物理の知識が多少必要であるが、4章以降はどなたでも読めるように書いたつもりである。初めて音を学ぶ方への入門書としても適していると考えている。

本書の内容は明治大学在職中に行った教育・研究の中から得たヒントをもとにしている。また、本書に掲載されたイラストは中学生の小林聖奈さんが描いてくれた。渡辺好章、漢那憲一、城之内悦子の各氏からは内容に関して有益な助言をいただいた。そのほかにも多くの方から直接・間接に貴重な示唆を受けた。ご協力いただいた皆様に心から感謝を申し上げたい。さらに、陰ながら支え温かく応援してくれた家族にも感謝したい。

2026年5月

崔 博 坤

# 目 次

## 1. 音の簡単な歴史

1.1 音はどこを伝わるか .....	1
1.2 音の速さを測る .....	3
1.3 ささやき回廊 .....	5

## 2. 波 と は

2.1 ばね振り子 .....	7
2.2 単振動と円運動 .....	9
2.3 弦を伝わる波 .....	10
2.4 波 の 速 さ .....	15
2.5 波 の 式 .....	17
2.6 特性インピーダンスと波のエネルギー .....	19
2.7 横波と縦波 .....	20
2.8 弦の伝わり方の基本式 .....	21

## 3. 音 波 と は

3.1 音波の伝わり方 .....	25
3.2 音波が伝わると熱くなる？ .....	28
3.3 音圧の大きさ .....	30
3.4 音 の 速 さ .....	33
3.5 平面波と球面波 .....	35

コラム：大気圧の 1013 hPa とは	36
----------------------	----

## 4. 反射と定在波

4.1 波の反射	38
4.2 弦の定在波	40
4.3 固有周波数と固有モード	41
4.4 閉管での音の共鳴	43
4.5 音色とスペクトル	47
ピアノとバイオリンの音色	50
4.6 気柱共鳴のスペクトル	52

## 5. 屈折と透過

5.1 波の屈折（スネルの法則）	55
5.2 最も早く到達するには（フェルマーの原理）	56
溺れそうな波子さんを早く助けるには	57
全反射	59
5.3 大気中での音波の屈折	59
5.4 海岸に打ち寄せる波	61
5.5 音の反射率と透過率	62
コラム：蟹気楼（光の屈折）	66

## 6. 干渉と回折

6.1 波の干渉	67
ノイズキャンセリングヘッドホン	69
コラム：川岸での水面波の干渉	71
6.2 うなり	71
情報としてのうなり	73

6.3 回折	74
ホイヘンスの原理	75
水面波の回折	76
回折角	78
音の指向性	80
コラム：競馬八百長事件	81

## 7. ドップラー効果

7.1 音源が動くとき	83
7.2 観測者が動くとき	85
7.3 動く物体の速さを測る	87
7.4 衝撃波	89
水面の衝撃波	91
光の衝撃波	92
コラム：ドップラーの生涯	92

## 8. 音の発生と検出

8.1 発声のしくみ	94
母音の波形とスペクトル	96
8.2 聴覚のしくみ	99
8.3 スピーカー	102
バスレフ型スピーカー	103
8.4 マイクロホン	104
コラム：アヒル声	106

## 9. いろいろな身近な音

9.1 音階	107
--------	-----

9.2	ペットボトルの音 (ヘルムホルツ共鳴) .....	109
9.3	ワイングラスの共鳴音 .....	113
	コラム：声でワイングラスを割る .....	115
9.4	鳴き籠 (反響現象) .....	116
9.5	空気の流れから生まれる音 .....	119
	リコーダーの音 .....	121
9.6	水滴が落ちる音 .....	122
	気泡から出る音 .....	124
9.7	シャンパン泡の音 .....	125

## 10. 超 音 波

10.1	超音波とは何か .....	128
10.2	身体の中を映す超音波 .....	129
10.3	集束超音波でガン治療 .....	132
10.4	超音波洗浄器からの騒音 .....	132
	コラム：クジラも歌をうたう？ .....	135

## 11. いろいろな波

11.1	水 面 波 .....	137
11.2	地 震 波 .....	140
11.3	宇宙では音波は存在しないのか .....	144

引用・参考文献 .....	146
索 引 .....	149

# 音の簡単な歴史

## 第1章

人が日常的に接している音がどんなものであるか、古くから研究の対象であった。音の高さとは何か、音がどこを伝わるか、音の速さはどれほどか、などが調べられてきた歴史から始めることにしよう。

### 1.1 音はどこを伝わるか

弦楽器や太鼓などの楽器は古くから身近にあったので、その音の高さの違いについて疑問をもつのは自然なことであろう。古代ギリシャ時代に活躍したピタゴラス（紀元前5世紀ころ）は、音程の法則を初めて見つけたことで知られている。一般的には、直角三角形の三平方の定理を見つけたことでも有名である。弦楽器を例にとってみよう。ある長さの弦とその $\frac{1}{2}$ 倍、あるいは $\frac{1}{3}$ 倍の長さの弦を同時に鳴らすと、心地よく聞こえる和音（協和音という、9.1節参照）が出ることを知った。あるいは2対3など簡単な整数比の長さの弦からも協和音が出る。ピタゴラスは、ある弦の音と $\frac{1}{2}$ 倍の長さのときの音の音程差をオクターブと定義した。現在でも1オクターブ高い音というのは、ある音の2倍の周波数の音のことを言う。また、弦を引っぱる強さを変えたときの音程の変化も詳しく調べていた（図1.1）。ただ当時は音の高さを正確に知る手段がなかったので、協和音についての詳しい理論はわかっていなかった。音の周波数を正確に測れるようになったのは19世紀のヘルムホルツ以降であった（9.2節参照）。

音という現象は、空気分子の振動が空気という媒質中を伝わっていくもの、ということが今ではわかっている。しかし、当初は音の微粒子のようなものが飛



図 1.1 ピタゴラスが使ったと思われる弦音実験器。おもりの重さで音の高さを変えている。中世の大学の「音楽」テキストに載っている図を参考にした。

んでいくという説明もあり、実態はよくわからなかった。ボイル（17世紀、イギリス）は気体の圧力を変えることのできる真空ポンプを作って圧力と体積の関係を調べているうち、興味深い実験を行った。密閉した丸い容器の中に時計を糸でつるしておき、内部の空気を真空ポンプで抜いていくと、時計の音がだんだんと聞こえなくなった（図 1.2）。このことから、音は確かに空気を伝わっていくことがわかった。

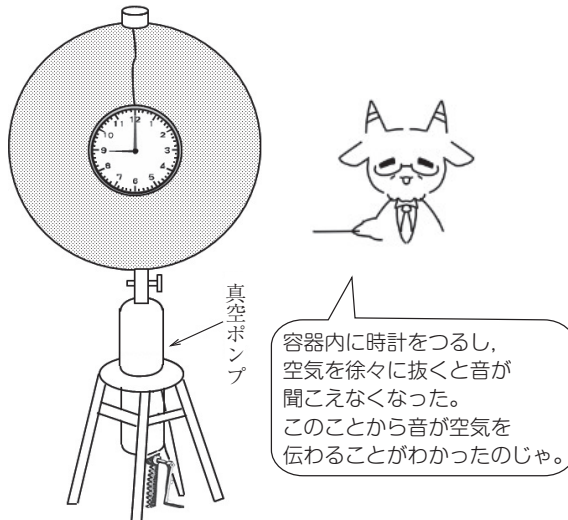


図 1.2 ボイルによる音の媒質を確かめる実験装置

光についても似たような論争が長い間行われてきた。デカルト（17世紀，フランス）、フック（17世紀，イギリス）、ホイヘンス（17世紀，オランダ）らは、音が空気の振動で伝わるのと同じように、光も何らかの媒質が振動して伝わると考えていた。その媒質はエーテルと名づけられ、長い間実在すると信じられていた（化学薬品のエーテルはこの名にちなんで名づけられたというのが、まったくの別物である）。1887年になって、マイケルソンとモーリー（アメリカ）はエーテルの存在を証明しようと実験を行ったが、逆にその存在を否定する結果となってしまった。光は媒質がない真空中でも伝わるのである。このことがアインシュタイン（ドイツ）の特殊相対性理論（1905年）を生み出すことにつながった。

## 1.2 音の速さを測る

音の速さが有限であることはカミナリの光と音のずれからも容易に想像できる。カミナリは、ピカッと光った後にしばらく遅れてからゴロゴロという音が鳴る。光が瞬間的に伝わるのに対し、音の速さはそれよりずっと遅いので、カミナリの落ちる場所が遠いほど音の遅れがより大きくなる。筆者が子供の頃、ピカッと同時にドーンという大きな音がしてびっくりした覚えがある。あとで調べるとわが家の屋根に大きな穴が空いていた。それ以来、ピカッとゴロゴロの間隔に敏感になり、ゴロが聞こえるまでの秒数をいつも数えていた（光速は毎秒  $3 \times 10^8$  m だから毎秒約 340 m の音速よりおよそ 100 万倍速い。したがって、カミナリの光は瞬間的に届くとみなしてよい。これ以降、毎秒  $\bigcirc$  m を m/s と表す。s は second のこと）。

音の速さを測ることは17世紀頃から行われていた。1636年にメルセンヌ（フランス）は、カミナリでなく大砲から出る光と音を使って音の速さを実測した。大砲は発射音と同時に光るので、光ってから音が聞こえるまでの時間のある距離離れた場所で測る。離れた場所までの距離は歩数で測っていたし、当時の時計の精度はよくなかった。測定した値は 448 m/s で、現在知られている 340 m/s

#### 4 1. 音の簡単な歴史

(15°C)とはだいぶずれている。メルセンヌは弦楽器や音階の平均律(9.1節参照)についても重要な業績を残した。

1657年頃にホイヘンスが振り子時計を発明し、時間測定の精度が上がった。デラム(18世紀, イギリス)は1708年に348 m/sというかなり正確な音速の値を報告している。この頃には振り子時計は1日に10秒程度の正確さをもつようになっていた。神父だったデラムは、教会の高いところから銃を撃ち、その発光と音を20 kmも離れた遠方から天体観測用の望遠鏡で観測したという(図1.3)。この距離だと音が到達するまで1分近くかかるので、振り子時計で十分な精度が得られたのであろう。また、デラムは風によって音速が影響されることも正しくわかっていた<sup>1)</sup>。

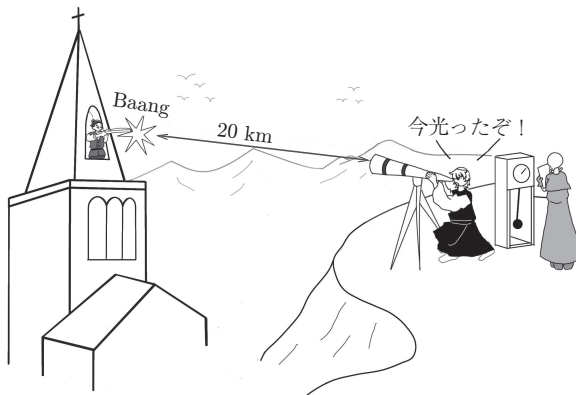


図1.3 光と音の時間差を測り、音速を測定した。

音の伝搬が空気の膨張と圧縮のくり返しによって起こると考えたのは、ニュートン(17~18世紀, イギリス)である。1687年に著した有名な『プリンキピア』の中で論じている。それによると、音速 $v$ は空気の弾性率を密度 $\rho$ (ロー)で割ったものの平方根、すなわち

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (1.1)$$

で与えられる。空気の弾性とは、一定の圧力で空気を押し縮めたときにどれだけ体積が変化するかを表す量で、 $K$  で表されている（式 (2.29), (3.6) を参照）。 $K$  を求める際にボイルの法則（圧力と体積の積が一定）を用いたため、音速の計算値は 298 m/s となってしまう、実測値と比べて 20% も小さい値であった。音速の正しい導き方は 3.4 節で述べるが、ニュートンは圧力が加わって体積が変化するとき温度が変わらない（等温変化）と考えた。しかし、温度が変わる（断熱変化, 3.2 節参照）としなければならなかった。ラプラス（18~19 世紀, フランス）がそれを正したのはおよそ 100 年後であった。

その後、フーリエ（18~19 世紀, フランス）、ヘルムホルツ（19 世紀, ドイツ）、レイリー卿（19~20 世紀, イギリス）らにより音の伝搬について理論的な基礎が固められた。1877 年のベル（イギリス）による電話機の発明以降、物理、電気、音声、聴覚、建築など多くの分野で音の解明・応用が急速に進んでいくことになる。

### 1.3 ささやき回廊

不思議な音の現象として昔から知られているものを紹介しよう。イギリスの首都ロンドンに、1710 年に建てられたセント・ポール大聖堂がある。有名人の冠婚葬祭などが行われるのでテレビ等でも紹介されたことがある。大聖堂の中心には大きな丸いドームが載っていて、そのドームの内側にグルッと回廊がついている。回廊の壁に向かって話をすると、長い回廊の反対側にいる人にはすぐそばで誰かがささやいているように聞こえるという不思議な場所である。「ささやき回廊」(ウイスパリング・ギャラリー) という名前がついていて、今では観光名所になっている。30 m ほど離れた場所でどうして音が届くのか、多くの研究者が調べてきた。その結果、レンズのように音が集束するのではなく、**図 1.4** 右側のように回廊に沿った壁の多くの場所で反射してきた音がうまく重なり合って反対側に届く、ということがわかってきた<sup>2)</sup>。体験した人たちはさぞ驚いたことだろう。この場所以外でも北京の天壇公園にある**回音壁**で同じよ

# 索引

## 【あ, い】

アインシュタイン	3
圧縮率	28
圧電セラミクス	130
圧力	26
位相	10
位相速度	23
イルカ	135

## 【う, え】

宇宙膨張説	85
うなり	72
運動方程式	16
エコーロケーション	136
エーテル	3
エレクトレットコンデンサー マイクロホン	105
円形波	35

## 【お】

オカリナ	112
音の強さ	63
音の速さ	28
音圧	30
音響キャビテーション	134
音源	94

## 【か】

回音壁	5
外核	143
開管	44
開口端補正	44
外耳	99
外耳道	99
回折	74
蝸牛	100

角周波数	13
活性酸素	134
カルマン渦	119
干渉	67
慣性	8

## 【き, く】

球面波	35
共鳴	44
共鳴器	94
協和音	1, 109
緊急地震警報	142
空力音	119
屈折率	56

## 【こ】

剛性率	140
高調波	42
喉頭	95
コウモリ	135
骨導音	102
固定端	38, 64
鼓膜	99
固有音響インピーダンス	63
固有周波数	42
固有モード	42
コロトコフ音	37
コーン	103

## 【さ】

最小可聴値	31
最小作用の原理	56
残響時間	118

## 【し】

指向性	81
耳小骨	99

地震計	141
射線	56
周期	8
集束超音波治療法	132
自由端	39, 64
周波数	13
周波数変調	74
重力波	137
重力波天文学	145
純正律	109
消音器	112
衝撃波	89
蟹気楼	66
深水波	139
振動数	8
振幅	8
振幅変調	74

## 【す】

スネルの法則	56
スピードガン	88
スペクトル	49
スペクトログラム	97
ずれ弾性率	140

## 【せ】

声帯	95
声道	96
声紋	99
赤方偏移	85
浅水波	138
セント・ポール大聖堂	5

## 【そ】

相対屈折率	56
素元波	75
ソナー	131

ソニックブーム	91	内 耳	99	平面波	35
疎密波	20, 25	鳴き龍	116	ベ ル	5
<b>【た】</b>		波の速さ	15	ヘルムホルツ	1, 109
胎児超音波心音計	88	逃げ水	66	ヘルムホルツ共鳴	109
体積弾性率	28	ニュートン	4	偏微分	18
ダイナミック型	103	音 色	47	<b>【ほ】</b>	
縦 波	20	<b>【は】</b>		ボイスコイル	103
谷	12	倍振動	42	ホイヘンス	3
単振動	8	波 源	11	ホイヘンスの原理	75
断熱圧縮	28	波 数	12	ボイル	2
断熱過程	28	バスレフ型スピーカー	103	放射体	94
断熱膨張	28	波 長	12	<b>【ま行】</b>	
<b>【ち】</b>		ハップル・ルメートルの法則	85	マイクロホン	104
チェレンコフ光	92	波動方程式	23	マイケルソン	3
地球内部構造	143	ばね振り子	7	マッハ数	89
中 耳	99	腹	41	マントル	143
チューニング	71	パワー	20	密 度	26
超音速	83, 89	反 響	116	メルセンヌ	3
超音波	129	搬送波	73	モスキート音	128
超音波エコー	131	<b>【ひ】</b>		モード	42
超音波診断装置	131	ピタゴラス	1	モーリー	3
超音波振動子	129	表面張力	139	<b>【や行】</b>	
超音波洗浄器	132	表面張力波	137	山	12
<b>【つ、て】</b>		<b>【ふ】</b>		有毛細胞	101
津 波	139	フェルマーの原理	56	横 波	20
定在波	40	フォルタン	36	<b>【ら行】</b>	
定常波	40	フォルマント	98	ラプラス	5
デカルト	3	復元力	8	粒 子	26
デラム	4	節	41	粒子速度	19, 26
<b>【と】</b>		フック	3	粒子変位	26
等温過程	29	ブラックホール	144	量子化	43
特性インピーダンス	19	フラッターエコー	116	臨界角	59
ドップラー効果	83	フーリエ	5	レイリー卿	5
ドップラー・ライダー	88	フーリエ級数	49	<b>【英語】</b>	
ドップラー・レーダー	88	フレミングの左手の法則	102	HIFU	132
トリチェリ	36	<b>【へ】</b>		P 波	140
<b>【な行】</b>		閉 管	44	S 波	140
内 核	143	平均律	108		

—— 著者略歴 ——

1974年東京大学工学部物理工学科卒業、1979年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了（工学博士）。東京大学助手を経て、1989年明治大学理工学部助手。1999年同教授。2021年明治大学名誉教授。研究テーマは、物質の音響特性計測、音響キャビテーションとソノルミネセンス。おもな編著書は、『音響バブルとソノケミストリー』コロナ社（2012）、『Ultrasonics: Physics and applications』Institute of Physics Publishing（2022）。

## 身近な音と音波

Sounds And Sound Waves Around Us

© CHOI Pak-Kon 2026

2026年7月8日 初版第1刷発行



検印省略

著者	さい 崔	ひろ 博	し 坤
発行者	株式会社	コロナ社	
印刷所	三美印刷株式会社		
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 978-4-339-01505-8 C3055 Printed in Japan

(新宅)



**JCOPY** <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

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。