

6 音の物理——足踏み揃えて吊り橋渡るな

音も光も波として同じように扱えます。波の特徴である、反射・屈折・回折・干渉の現象が音でも光でも生じることを 2 回にわたって紹介します。

6.1 波の特徴 — 波は何をどう伝えるのか

波が伝えるものは振動だ。では、波はどのように振動を伝えるのか、波を表す物理量をまとめ、波の性質をみてみよう。

6.1.1 波の基本的な量

池に石を投げ込むと、同心円上に波動が広がっていく。このとき、波が生じた場所を**波源**といい、波を伝える物質（水）を**媒質**という。波は物体が動いているわけではなく、振動している状態が周囲に伝播していく現象である。スポーツ観戦などで、観客席にいる多くの人が順々に一斉に立ち上がる「ウェーブ」も、(1 回きりの現象かもしれないが) 波といえる。

波 (wave)
波源 (source)
媒質 (medium)

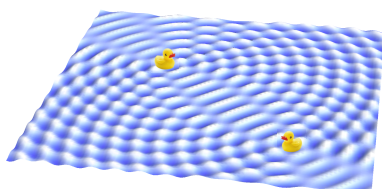


図 1: 2つの波が重なると、強めあって振幅が大きくなる場所と、弱めあって振幅がゼロになる場所がある。(波の**干渉**という.)

振幅 (amplitude) A
振動中心から測った山の
高さ
波長 (wave-length) λ
山から山の長さ

定義 振幅・波長

波形のうち最も高い（低い）ところを**山（谷）**といい、振動の中心からの山の高さ（谷の深さ）を**振幅** A （単位は [m]）という。山から山（谷から谷）の長さを**波長** λ （単位は [m]）という。

単位

振幅・波長は [m].

図 2 は、波の全体図をある時刻でみたとき（写真を撮ってみた場合）と、波の振動をある 1 つの場所で記録した場合の図である。横軸が x 軸の空間軸であるか、 t 軸の時間軸であるかの違いであるが、波の振動の形は、同じように記録される。振幅も波長も、どちらの図でも同様に定義される。

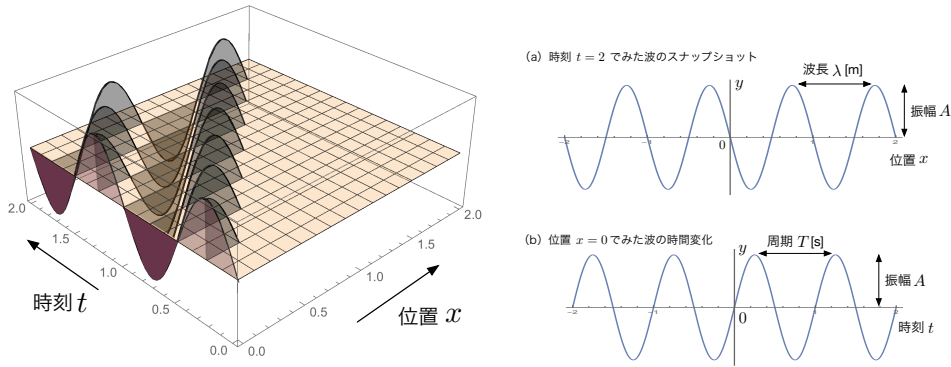


図 2: 正弦波の伝わる様子. ある時刻で写真を撮っても, 1ヶ所で止まって時間変化を観測しても, 周期的な変動になる. [左] 位置 $x = 0$ で単振動している波源から, x 軸の正の向きに正弦波の伝わる様子を $1/4$ 周期ごとの波形を並べて示した. [右] (a) x 方向に進む振幅 A , 波長 $\lambda = 1[\text{m}]$ の波を時刻 $t = 2$ でみた図. (b) は, この波を位置 $x = 0$ で観測したもの. 周期 $T = 1[\text{s}]$ であることがわかるので, この波の速さ v は, $v = \lambda/T = 1 [\text{m/s}]$ である.

定義 周期・振動数 (周波数)

1つの場所で波を観察するとき, 山から山が伝えられる時間を**周期 T** (単位は $[\text{s}]$) という. 1秒間に何回振動するかを**振動数**または**周波数 f** (単位はヘルツ $[\text{Hz}]$) という. 両者の関係は,

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{振動数} = \frac{1}{\text{周期}} \quad (1)$$

長さの量 (波長 λ) と時間の量 (周期 T) が決まったので, 波の速さ v を $v = \frac{\lambda}{T}$ すなわち $v = f\lambda$ として決めよう.

定義 波の速さ

波の伝わる**速さ $v[\text{m/s}]$** は, 次式で決められる.

$$v = f\lambda \quad \text{速さ} = \text{振動数} \times \text{波長} \quad (2)$$

周期 (period) T [s]
振動数・周波数 (frequency) f [Hz]

単位

周期は [s]. 振動数は [Hz] (ヘルツ).

波の速さ (velocity) v [m/s]

表 1: 典型的な波の速度・振動数・波長.

波	速度 v	振動数 f	波長 λ
光	$c = 299792458 \text{ m/s}$	赤い光	$4.0 \times 10^{-4} \text{ Hz}$ 750 nm
		紫の光	$7.9 \times 10^{-4} \text{ Hz}$ 380 nm
電磁波	$c = 299792458 \text{ m/s}$	電子レンジ	2450 MHz 12.24 cm
		FM	80 MHz 3.74 m
		AM	666 KHz 450 m
音	$v = 340 \text{ m/s}$ (温度で変化)	A の音	440 Hz 77.2 cm
		高い A	880 Hz 38.6 cm

■縦波と横波

波には、**縦波**（振動方向と進行方向が同じ波）と**横波**（振動方向と進行方向が垂直な波）がある。音波は縦波、水面を伝わる波は横波である。

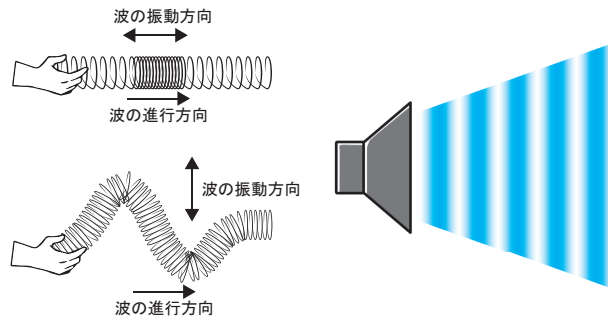


図 4: [左] 上が縦波, 下が横波, [右] 音波は空気振動を伝える縦波。

縦波
(longitudinal wave)
横波
(transverse wave)

縦波のことを**疎密波**
(compression wave)ともいう。



図 3: スピーカーの前にロウソクを置くと炎がゆれる。音が空気中を縦波として伝わる様子がわかる。

Topic

真空中では音は伝わらない

真空中では音は伝わらないことを実験で示したのは、気体の法則を見出したボイルである。ガラス瓶の中に鈴を入れ、中の空気を抜いてしまうと、鈴の音が聞こえないことを確かめた。波を伝える媒質がないと波は伝わらない。したがって、宇宙空間では音はない。

コラム

コラム 15 (緊急地震速報のしくみ)

地震の発生直後、各地での強い揺れの到達時刻や震度を予想し、可能な限り素早く知らせる緊急地震速報が運用されている。地震波には P 波と S 波の 2 種類があり、その伝わる速度の違いから震源地を予測することができる。

P 波 (Primary wave) は、弱い揺れを引き起こす縦波で、地表近くでは秒速 5~6 km で進む。S 波 (Secondary wave) は、大きな揺れを引き起こす横波で秒速 3~4 km で進む。P 波の到着から S 波の到着までを初期微動継続時間というが、この時間が 10 秒あれば、その場所から震源地までの距離はおよそ約 80 km であることがわかる。震源地が特定できたら、遠くの都市に揺れが到達する前に、地震発生を知らせることができるのだ。

P 波は地震発生の衝撃、S 波は断層のずれそのものから発生している。縦波・横波の区別は、進行方向に対する振動方向の違いであり、地震の縦揺れ・横揺れを意味しているのではない。しかし、直下型の大きな地震のときは、足元から P 波がきて縦揺れに、その後 S 波が到達して横揺れを感じることになる。

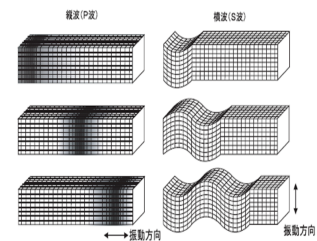


図 5: P 波と S 波の振動 (気象庁)

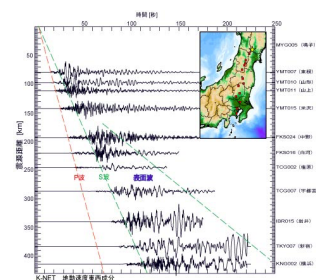


図 6: 震源からの距離と地震波到達時刻の違い (東京大)

6.1.2 波の特徴：重ね合わせと干渉

■重ね合わせの原理

2つの波が左右から進んで来たとしても、波は互いをすり抜けて進んでいく。波が重なる場所では、波の変位はそれぞれのもとの波の変位を足し合わせた**合成波**になる。これを重ね合わせの原理という。

法則 波の特徴：重ね合わせの原理

波が重なる時の変位は、もとの波の変位を足しあわせた値になる。

重ね合わせ
(superposition)

2つの波を重ね合わせた結果、どのような振幅になるのかは、波の**位相**(どのタイミングで山が来るか)によって決まる。

- 同じ位相の2つの波を重ね合わせるとき 波は強めあう (大きく振動する)。 (図7)
- 逆位相の2つの波を重ね合わせるとき 波は弱めあう。 (図8)

以上2つの例は、単純に

- 山+山=強めあって大きく振動 (**腹**という)
- 山+谷=弱めあってほとんど振動しない (**節**という)

干渉
(interference)

山 (crest)
谷 (trough)
腹 (loop)
節 (node)

として理解することができる。このように、合成された波が、互いに強めあったり弱めあったりする現象を**干渉**という。

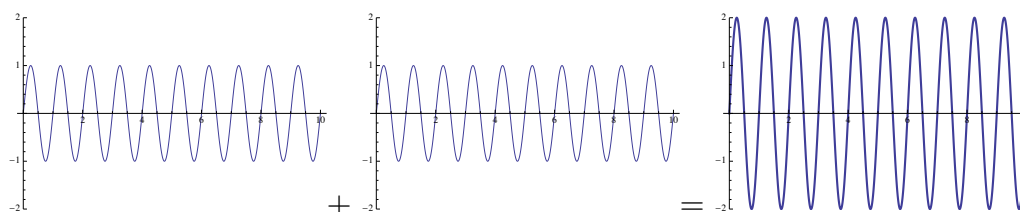


図7: 左2つの波を足すと右の波になる。 $y_1(t) = \sin(2\pi t)$, $y_2(t) = y_1(t)$ としたときの、 $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$ の図。

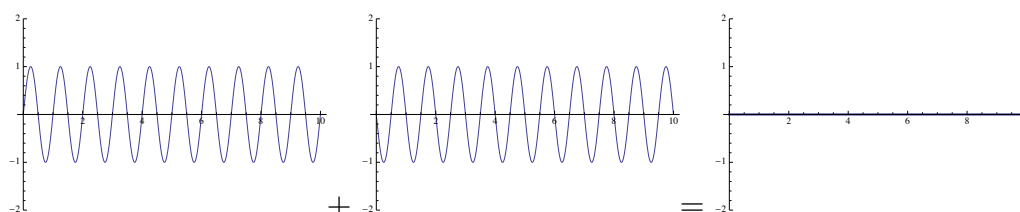


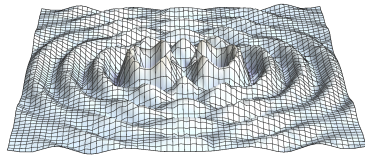
図8: 図7と同様。 $y_1(t) = \sin(2\pi t)$, $y_2(t) = -\sin(2\pi t)$ としたときの、 $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$ の図。

法則 波の特徴：干渉

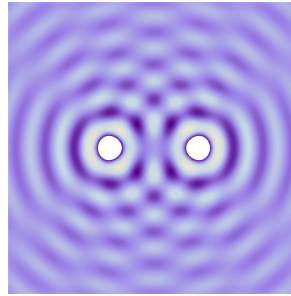
合成された波が、互いに強めあったり弱めあったりする現象を干渉という。

■二つの波の干渉

二つの波源から波を発生させると、二つの波が常に強めあうところと、弱めあうところが生じて、模様が見られる。



(a) 斜め上から見た図



(b) 下から光を当てて上から見た図

図 9: 二つの波の干渉の様子 2つの波源から同じタイミングで波を発生させたシミュレーション結果。どちらも波が干渉しあって、強め合うところとまったく振動しないところが存在する。

■干渉条件

2つの波源 A と B から、同じパターンの波（同じ位相の波）が出されるとしよう。ある場所 P で、2つの波の合成が強め合うか弱め合うかの条件は、2つの波源からの距離で決まる。PA と PB の距離の差が波長の整数倍であれば（山と山、谷と谷が一致するので）強め合い、距離の差が波長の半波長分ずれていれば（山と谷が一致するので）弱め合う。

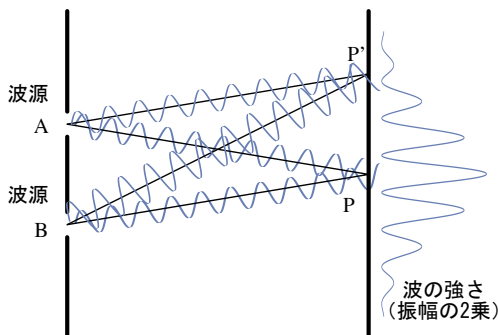


図 10: 干渉条件 強めあうか弱めあうかは波源からの距離の差で決まる。A と B の波源を通過して P に着いた波が山と山（谷と谷）ならば強めあう。P' に着いた2つの波が山と谷であれば弱めあう。右側のグラフは波の強度（振幅の2乗）を示す。

■自由端・固定端

波が反射する様子は、端の点で媒質が自由に動けるか、固定されているかによって異なる。前者を**自由端**，後者を**固定端**という。自由端反射の場合，反射波はそのまま折り返すことになるが，固定端反射の場合，反射波は上下反転して折り返して進む。

自由端 (free end)
固定端 (fixed end)

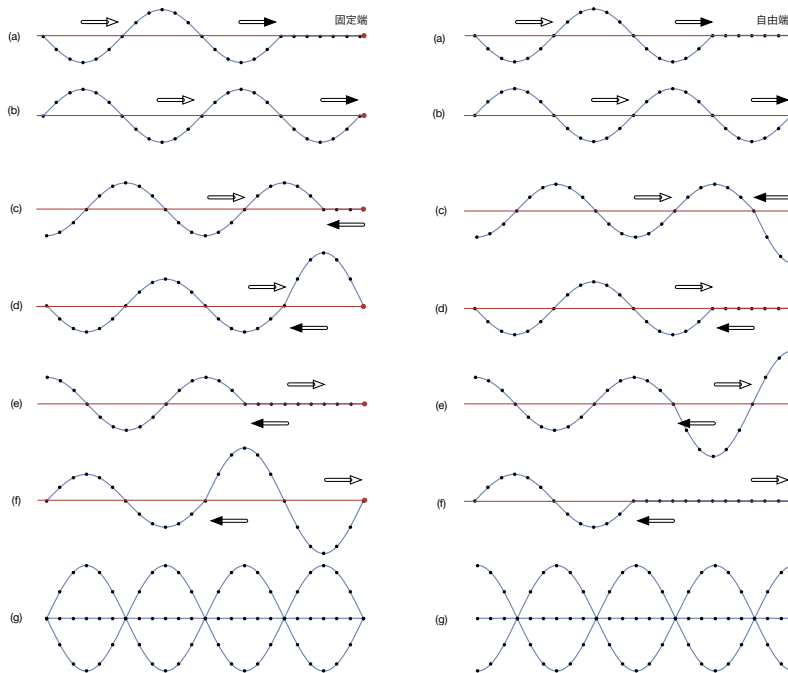


図 11: 左から来た正弦波が折り返してできる合成波の様子。右端が固定端〔左〕のときと，自由端〔右〕のとき。(a)(b)・・・(f)の順に時間が進む。(g)は最終的な定常波になったときの波形。右端の点の振動状態に注目。

Topic

岸壁で大きな波

自由端では，もとの波の振幅よりも大きな振幅で振動することになる。海岸の岸壁では，やってくる波よりも大きな波が立つので注意。



図 12: 岸壁でざぶん。

6.1.3 波の特徴：反射，屈折，回折

波の伝わり方の特徴として，異なる媒質での境界面で反射したり屈折したりする現象や，すき間や障害物の後ろに回り込む回折現象がある．これらは，**ホイヘンスの原理**を使って統一的に説明することができる．

法則 ホイヘンスの原理

波面は無数の波源の集まりとみなすことができ，波の各点を波源として球面状に広がっていく**素元波**の重ね合わせとして，次の瞬間の波面が形成される．

ホイヘンス
Christiaan Huygens
(1629–95)

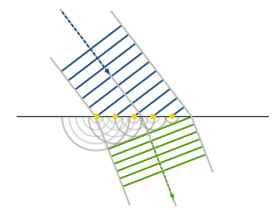


図 13: 波が屈折するのも素元波で説明ができる．

■反射の法則，屈折の法則

媒質が異なる物質中へ波が進むとき，波は，一部は**反射**し一部は**屈折**して進む．異なる媒質中では，波の伝わる速さも異なる．図 13 は，波の速さが遅くなる媒質に進んだ波の屈折の例である．素元波で考えると，波面が角度を変えて進むことが説明ができる．

屈折角や反射角は，媒質面の法線を基準に角度を測ることにする（図 14）．屈折角は，それぞれの媒質中での屈折率を考えて，その比として表すことができる．

法則 反射の法則，屈折の法則

● 反射の法則

入射角 θ_0 と反射角 θ_0 は等しい．

- **屈折の法則**：媒質 0（絶対屈折率 n_0 ）での波の速さを v_0 ，波長を λ_0 ，媒質 1（絶対屈折率 n_1 ）での波の速さを v_1 ，波長を λ_1 とすると，

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_1} = \frac{v_0}{v_1} = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} = \frac{n_1}{n_0} = n_{01} \quad (3)$$

が成り立つ． n_{01} は相対屈折率とよばれる．

屈折率 (refractive index)

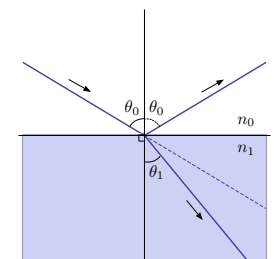


図 14: 反射と屈折．入射角 θ_0 と反射角 θ_0 は同じ．屈折角 θ_1 は，(3) で与えられる．

屈折率が大きいことは，波にとっては「進みにくい」ことに対応する．素元波の速度が遅くなると，波は境界面からより垂直に進むようになる．「波は屈折率の大きな物質に向かって進む」と覚えておけばよい．

絶対屈折率（真空を 1）

氷 (0°C)	1.309
水 (20°C)	1.333
光学ガラス	1.43–2.14
水晶	1.544
ダイヤモンド	2.417

Topic 砂浜に打ち寄せる波は海岸線に平行

海面の波の進む速さは深さによって決まる．浅い方が海底からの抵抗を受けるため進みにくい．これは浅い海岸に行くほど屈折率の大きな場所を進むことと同じである．したがって，緩やかな砂浜では波はしだいに海岸線に向かって進むようになるため，打ち寄せる波は海岸線に平行になる．

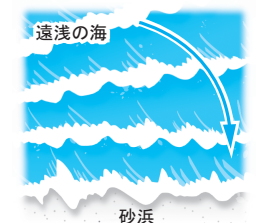


図 15: 遠浅の海では波も屈折する．

Topic 夜汽車の音が遠くまで届く

音も屈折現象を起こす。空気中の音速は温度によって変わり、温度が高い方が音速は速い。日中は地上ほど温度が高く、夜間は地上の方が温度が低い。したがって、音波は、日中は上空に向かって屈折し、夜間は地上に向かって屈折する。夜汽車の音が遠くから聞こえるのは音の屈折現象である。

回折

波はすき間や障害物の後ろにも回り込む。この現象を**回折**という。回折現象は、すき間や障害物の幅と波の波長が同程度のとき、顕著に見られるようになる。

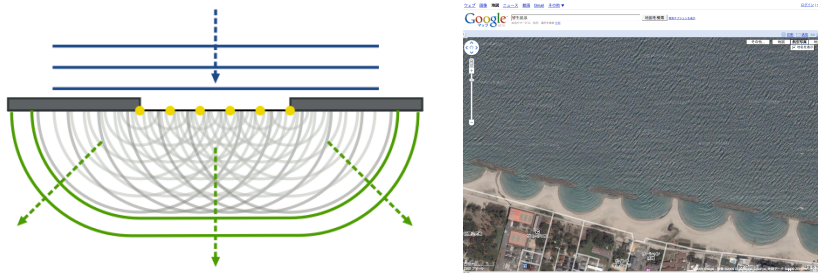


図 17: [左] 回折. [右] 皆生温泉の海岸線にできた回折模様. (google マップ)

Topic 壁に耳あり

ひそひそ話す声は意外に遠くまで聞こえてしまう。小さい声で低く話すと、振幅が小さくて振動数が低い波になる。振動数が低い波は波長長いことに対応し、よく回折する。授業中のひそひそ話はよく聞こえるし、「壁に耳あり」ということわざにも一理あるようだ。

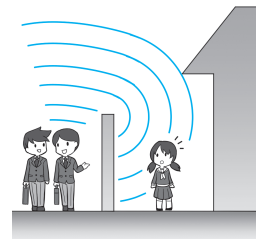


図 18: 壁に耳あり

筒笛をつくろう 実験

80 ページで説明するように、弦や管の長さで発生する音の振動数が決まる。ストローや厚紙で筒を次の長さに作り、笛を作ってみよう。筒のすぐそばから息を吹くのがコツである。

音	筒の長さ	音	筒の長さ
ド	13.0 cm	ソ	8.7 cm
レ	11.6 cm	ラ	7.7 cm
ミ	10.3 cm	シ	6.9 cm
ファ	9.7 cm	ド	6.5 cm

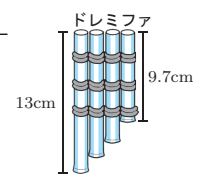


図 19

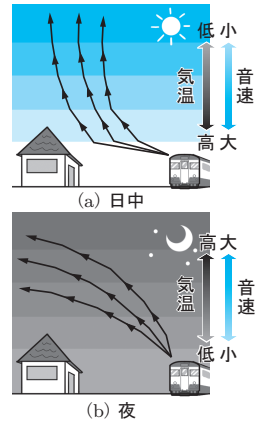


図 16: 夜、遠くの電車の音が聞こえるのは音の屈折現象である。

回折
(diffraction)

6.2 音 — 音楽は数学かも

空気中を伝わる振動のうち、鼓膜で感じられるものが音である。音の違いはなにか、音を出す楽器、音楽を録音する技術、音を再現する技術などあちこちにみられる物理現象を紹介しよう。

6.2.1 音の3要素

私たちは鼓膜で空気の振動を感じ、音を認識する。

定義 音の3要素

音には、**大きさ・高低・音質（音色）**の3つの要素がある。

- 音の**大きさ**を決めるのは、音波の振幅である。
- 音の**高低**（音高, pitch）を決めるのは、音波の振動数（周波数） f [Hz] である。例えば、A の音は、440 Hz, 880 Hz, 1320 Hz, ... の振動数である。
- **音質（音色）**を決めるのは波形である。楽器や個人の声の違いは波形の違いである。

音波
(sound wave)

音の3要素

大きさ
高低
音質（音色）

【図5. いろいろな音の波形】

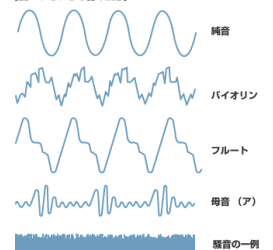


図 20: いろいろな音の波形.

■音の大きさ

音の大きさ（強さ）を表す単位としてデシベル [dB] がある。ベルは、十進法における桁の差を表す量で、3ベルなら 10^3 倍の差があることを示す*。ベルの単位に 10^{-1} 倍を表す接頭語デシをつけたものがデシベル [dB] で、3ベル = 30 dB となる。

音の強さは、人間の聴力の限界といわれる程度の小さな音を基準として、その何倍の強さかで表される。ささやき声の強さは約 1000 倍なので、30 dB（聴力検査はこの値）、通常の会話は約 100 万倍なので 60 dB となる。人間が耐えられる最大の音は約 1 兆倍 (10^{12} 倍) であり、120 dB となる。1000Hz で 30dB の音の場合、空気振動の振幅は 300 万分の 1 mm であり、空気の圧力変動は、1 億分の 1 気圧程度だという。

■音の高低

人間の可聴領域は、振動数で 20 Hz から 20000 Hz といわれる。NHK の時報で時刻を知らせる音は、440 Hz の A の音（ラの音）と 1 オクターブ高い 880 Hz の A の音である。健康診断の聴力検査では、1000 Hz の音と、4000 Hz の音をヘッドフォンで聞かせ、聞こえたかどうかを調べている。成人の歌声は普通 200 Hz から 600 Hz 程度の範囲だという。約 3 オクターブ分である。

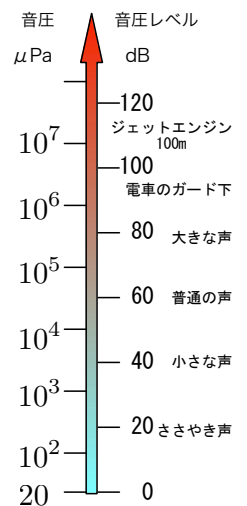


図 21: 音圧レベル.

* 電話の発明者ベル (Alexander Graham Bell, 1847–1922) が考えた単位である。

Topic

モスキート音

人間は若い人の方が高音が聞き取れる。20代前半くらいまでは、17000 Hzの音が聞こえるという。蚊の飛ぶ時のような音で、モスキート音と呼ばれている。最近の携帯電話ではモスキート音を通知音にすることができるようだ。授業中でも学生は受信通知が聞き取れるが、先生には聞こえない(はず)。

6.2.2 音階

振動数が倍になると、1オクターブ上がる。その間に7音を設定するのが西洋の音階である。それぞれの音の間の振動数間隔は、全音か半音の差として設定されるが、その入り方は長調と短調で異なる。

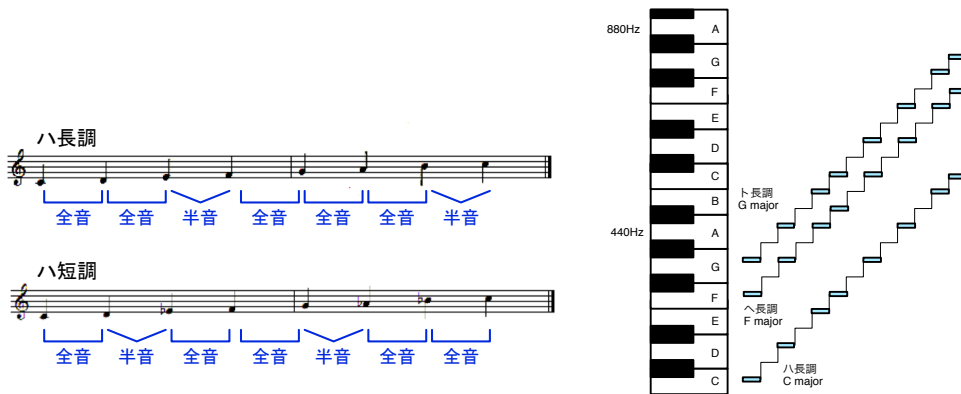


図 22: [左] 長調と短調. [右] 転調は音律の階段の平行移動.

振動数の比が単純な整数比で構成される音律を**純正律**という。うなりを伴わない純正な和音をつくることができるが、転調・移調が困難であり、全音に2種類あるため音階が不均等な印象を与えてしまう欠点がある。これに対して、1オクターブの音程を均等な振動数比で分割した音律を**平均律**という。2倍になる振動数比を半音12個分で分けるので、半音の間隔は振動数比で $\sqrt[12]{2} = 1.059463$ 倍になる。

純正律
(just tuning/just intonation)
平均律
(equal temperament)

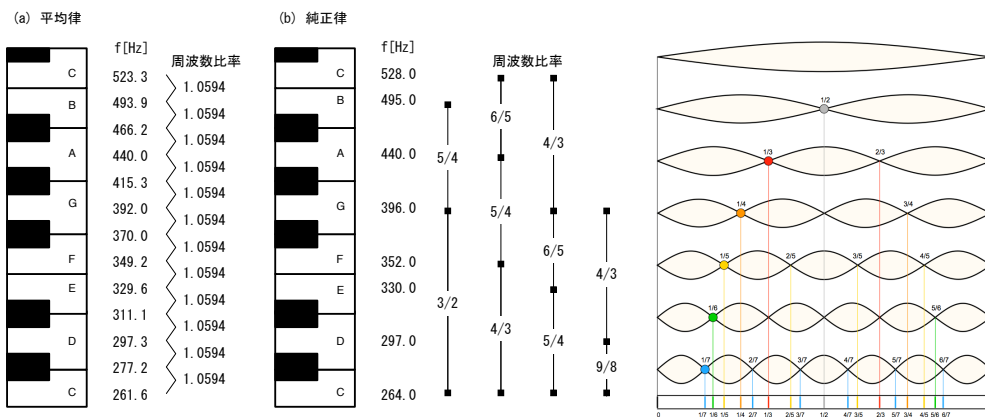


図 23: [左] 平均律・純正律のそれぞれの音の振動数と隣あう音どうしの比. [右] 純正律は弦の振動比をもとに決められた.

■固有振動

弦楽器や管楽器を使って音を出すとき、弦や管の長さによって発生する音の振動が決まってくる。

- 両端が固定された**弦**の場合 (図 24 [左]), 両端の固定端では振動しない点 (**節**) になり, 中央で振動が最大となる点 (**腹**) となる基本振動が存在する (図の $n = 1$ のもの). ところが, これ以外に, 腹の数が 2 個, 3 個, 4 個, \dots の振動状態が存在する. これらをまとめて, **固有振動**という. 弦の長さを変えれば, 音の高低が変わることになる.
- 一方だけが開いている**管**の場合 (図 24 [右]), 一方が固定端で節, もう一方が自由端で腹となる振動が発生する. 基本振動 (図の $n = 1$ のもの) の次には, 波長が $1/3, 1/5, \dots$ となる固有振動が存在し, これらを 3 倍振動, 5 倍振動, \dots という.

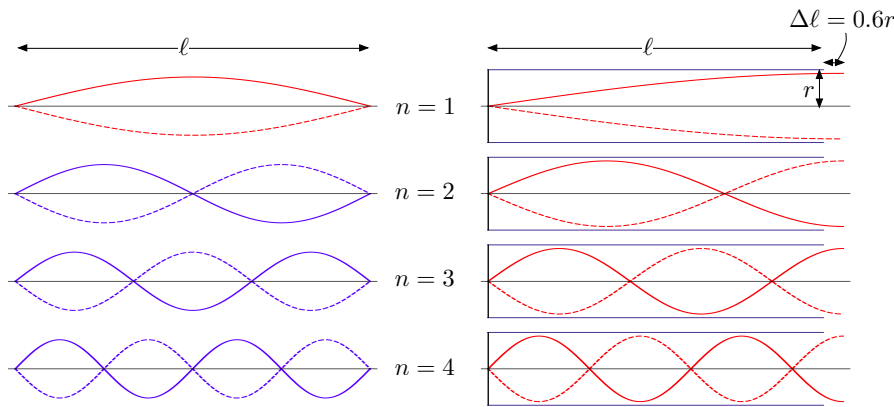


図 24: [左] 長さ l の弦に生じる振動. 両端が固定端となる. $n = 1$ が基本振動, $n = 2, 3, 4, \dots$ の順に短い波長の波が発生する. [右] 長さ l , 半径 r で一方が開いている管に発生する固有振動. 片方が固定端で節, 管が開いている方が腹となる振動が発生する. 実際には, 開口端の少し外側 ($0.6r$ 外側) に振動の腹ができる (開口端補正という).

Advanced

基本振動数

弦の場合 (図 24 [左]), 固有振動の波長 λ_n は $\lambda_n = 2l/n$ となる. 音速を v とすれば, 発生する音の振動数 f_n は,

$$f_n = n \frac{v}{2l} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

となって, 基本振動数 $f_1 = v/(2l)$ の n 倍の振動が存在する.

管の場合 (図 24 [右]), 固有振動の波長は $\lambda_n = 4l/(2n - 1)$, 発生する音の振動数 f_n は,

$$f_n = (2n - 1) \frac{v}{4l} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

となって, 基本振動数 $f_1 = v/(4l)$ の $2n - 1$ 倍の振動が存在する.

腹 (loop)
節 (node)
固有振動
(characteristic vibration)

固定端・自由端
⇒75 ページ

弦楽器の弦の長さの $1/2, 1/3, 1/4, \dots$ の位置を軽く押さえて弾くと, 押さえた箇所が節となる倍音が発生する. ギターでは 12, 7, 5 フレットが弦の長さの $1/2, 1/3, 1/4$ に対応している.

n は整数を表す.
($n = 1, 2, 3, \dots$).

■和音

音が重なるとき、心地よく聞こえる**和音**になるときに、そうでない場合（**不協和音**）がある。和音になるかどうかは、重なる音の振動数が簡単な整数比かどうかで決まる。

和音 (chord)
不協 (discord)

例えば、ドミソの3音は和音となるが、各音の振動数は $1:5/4:3/2$ の比になっている。整数比に直すと、 $4:5:6$ である。

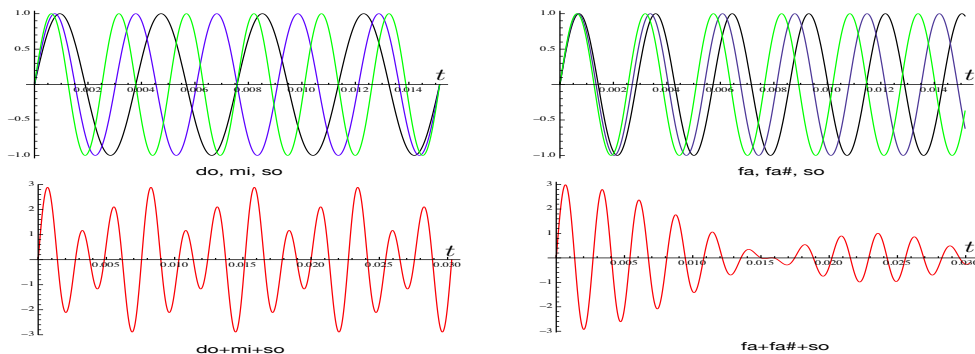


図 25: [左上] ド, ミ, ソの3音の振動数で三角関数を重ねたもの。ドが4周期目, ミが5周期目, ソが6周期目で再びそろふ。[左下] ドミソの3音の和の波形を描いたもの。振動数比が簡単であれば, 短い時間で周期的な波になることがわかる。

[右上] ファ, ファ#, ソの3音の振動数で三角関数を重ねたもの。[右下] ファ, ファ#, ソの3音の和の波形を描いたもの。3音の和の波形は, 元の音の周期に比べてかなり長い時間をかけないと, 繰り返しの波形にならない。したがって, 人々は雑音に近いように感じてしまうのである。

Topic

駅での発車メロディ

最近では, 駅で聞く列車の発車がベルではなく, メロディになっている。これは以前のベルが耳障りだったこともあるが, 発着の多い都会の駅では, どのホームのベルかわかりにくい, という理由もあった。メロディが開発されたときには, 行き先方面ごとにメロディをつくり, しかもどの部分が重なっても不協和音にならないように工夫したそうだ。



図 26: 駅での発車メロディ

Topic

チューニング

オーケストラのコンサートでは, 演奏直前に各楽器の音合わせが行われる。まず, オーボエが A の音を出し, それぞれの楽器が A の音を出して揃えていく。楽器の音は, 弦の締め方や管の長さで音の高低(振動数)が微妙に変わってしまう。調整が悪いと, うなりが聞こえてしまい, 和音にならないからだ。ちなみに, いつもオーボエからはじまるのは, オーボエは管の長さを調整できないからである。

Topic

「ピ・ポ・パ」の電子音 DTMF

プッシュ式の固定電話をかけるときの、「ピ・ポ・パ」の音は、2つの音の合成で作られる。たとえば、「1」の音は、697 Hz の音と 1209 Hz の音を同時に流した時の音として定義されている。他の数字は以下の表のようだ。電話局は音で番号を認識するので、これらの合成音が出せれば、番号を電話機で入力する必要はない。

表 2: DTMF 信号の合成.

	1209 Hz	1336 Hz	1477 Hz	1633 Hz
697 Hz	1	2	3	A
770 Hz	4	5	6	B
852 Hz	7	8	9	C
941 Hz	*	0	#	D

DTMF (Dual-tone multi-frequency signaling)

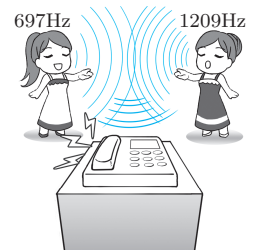


図 27: 以前、絶対音感のある姉妹がテレビ番組で、声で合成音をつくり、電話をかけていた。すばらしい。

■うなり

少しだけ振動数の違う波を重ね合わせると、合成波はうなりを生じる。

うなり (beat)

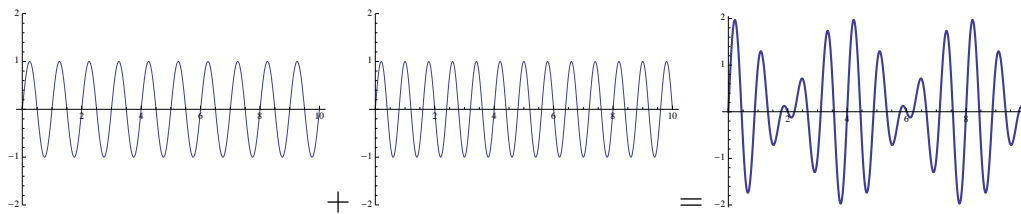
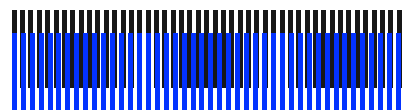


図 28: 左 2 つの波を足すと右の波になる。 $y_1(t) = \sin(2\pi t)$, $y_2(t) = \sin(2.5\pi t)$ としたときの、 $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$ の図。

目で見るうなり

実験

同じ太さで間隔が少しだけ異なる線を重ねると縞模様が見えるが、これは「うなり」と同じ。歯の間隔が少しだけ異なる「くし」を重ねてもみることができる。



■共振・共鳴

弦や管などには、サイズに応じて振動しやすい固有振動数が存在することを説明した。この固有振動数にあわせた外力を加えると、小さな力でも大きく振れる。この現象を共振あるいは共鳴という。

2つの同じおんさを用意し、一方だけをたたいて音を出すと、他方もわずかに振れて音を出す。しかし、振動数の異なるおんさでは、そのような共振現象は見られない。

電気回路でも共振現象をつくることができる。テレビやラジオのチャンネルを選択する、という操作は、電気回路の共振振動数を変化させながら、もとの電波信号から特定の振動数で埋め込まれたデータを復号してゆく、と

共振 (resonance)

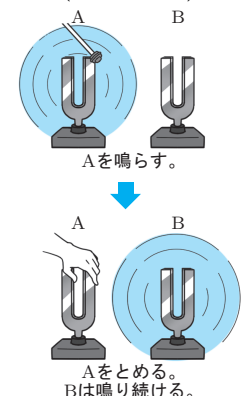


図 29: おんさの実験.

いう作業に他ならない。

Topic 強制振動

非常に小さな力でも、固有振動数と一致していれば、やがて大きな振幅の振動を引き起こす。お寺にある鐘でさえ、親指の小さい力だけでも長時間継続的に一定振動数で力を加えていけば、徐々に大きく揺らすことができる。たとえば子供がブランコをこいでいるとき、親が背中を押す姿を見かけるが、よく観察してみると、親が背中を押している振動数がブランコの周期を決める支配的な要素になっている。このような現象を**強制振動**という。

強制共振 (forced oscillation)

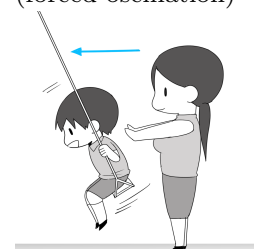
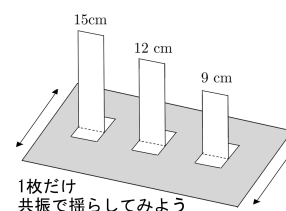


図 30: ブランコの背中押し。結局、振動を支配しているのは親のほうだ。

共振の実験 実験

ボール紙で長さが 9cm, 12cm, 15cm, 幅 3cm の紙を切り取り、ビルと見立てて下敷きに下端を固定する。手で下敷きをゆらすと、1 枚だけ揺らすことができる。



コラム

コラム 16 (共振によるつり橋の落下)

共振によって、大きな災害になることがある。有名な例として 1850 年 4 月におきたフランスのアンジェ (Angers) にあったバス・シェーヌ (Basse-Chaine) 橋の大惨事がある。478 人の軍隊が足踏み揃えて橋を行進したところ、橋が強制振動で共振を引き起こして落下。226 名が死亡したという。つり橋が共振で落ちる事故は他にも多々見られたが、この惨事のあと「つり橋の上で歩調をとるべからず」という教訓が浸透した。

橋は設計段階で改良を重ねられていったが、1940 年 11 月には開通後わずか 4 ヶ月しか経っていないアメリカ・ワシントン州のタコマ (Tacoma) 橋が落下する事故がおきている。この橋は風速 60 m/s まで耐えられるように設計されたつり橋だったが、当日の風速はわずか 19 m/s だった。風によって橋のまわりに渦ができ、渦からの周期的な力が橋のねじれ振動を励起させた。web で探すと、落下する直前に激しく振動している橋の動画映像を見ることができる。

地震でも共振による被害が出る。数十秒周期の長い周期でゆれる震動は「長周期地震動」と呼ばれるが、この周期は超高層ビルの固有振動数と一致しやすい。震源地から遠く離れた所で、しっかりと建てられたビルが思いもよらず大きくゆれるのは、共振現象の現われである。2003 年の十勝沖地震では苫小牧市の石油コンビナートで火災が発生したり、2004 年の新潟県中越地震では東京の六本木ヒルズでエレベーター 6 機が損傷しているが、これらは共振による被害といわれている。

6.2.3 サウンド技術

■蓄音機

音を記録して残す，という発明は，エジソンが最初である。

- 1877年，エジソンが錫箔円筒式蓄音機「フォノグラフ」を完成させた。「話す機械」として大いに評判を呼んだが，評判のわりに性能が低く，実用化にはほど遠かった。
- 1885年，ベルリナーは，録音と再生の針を別にしたり，保存の効かない錫箔をワックス塗りに変えたり，再生にゴム管を使い音声は明瞭に聞こえるようにしたり，といった改良を加えた「グラモフォン」を誕生させた。

その後，エジソンは実用に耐える円筒式蓄音機を，ベルリナーは円盤形蓄音機を発売し，30年以上にわたってこの分野の覇権争いをした。最終的には安価に大量生産できる円盤形が普及した。



図 33: [左] エジソンのフォノグラフ (円筒式蓄音機), [右] ベルリナーのグラモフォン (円盤式蓄音機).

■録音技術

円盤形レコードは，何回も再生すると，針とレコード盤の接触によって盤が摩耗し，波形を記録した溝が壊れてしまうという宿命があった。

- **磁性材料**の粒子を塗布したテープを用いて，録音（録画）する技術が開発され，つい最近まで利用されていた。何回も再生したり，長時間経つと磁力が弱くなるという弱点があった。
- 1982年，ソニーが，音の波形を**デジタル化**して光ディスクに記録する CD (compact disc) を完成させた。デジタル化とは，音の波形を「0」「1」の数字に符号化することである。

デジタル化は，時間的な刻みをどの程度でとるか，という**標本化（サンプリング）**を行い，さらに，連続する信号をどの程度の荒さで矩形に近似するか，という**量子化**を行うことで実現する。CD のサンプリング周波数は

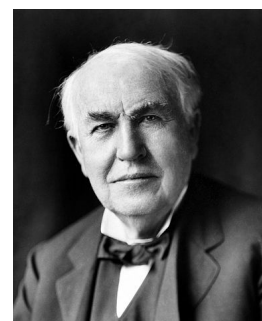


図 31: エジソン
Thomas Alva Edison
(1847–1931)

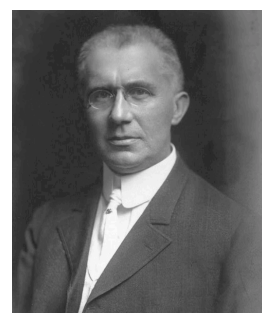


図 32: ベルリナー
Emil Berliner
(1851–1929)

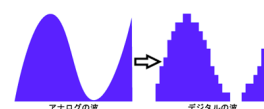


図 34: アナログ信号のデジタル化

44.1[kHz] であり、CD の再生帯域は、その半分の周波数となる。CD には「0/1」の信号が焼き付けられ、光を当てて「0/1」を読み取るので、音質が劣化することがない。

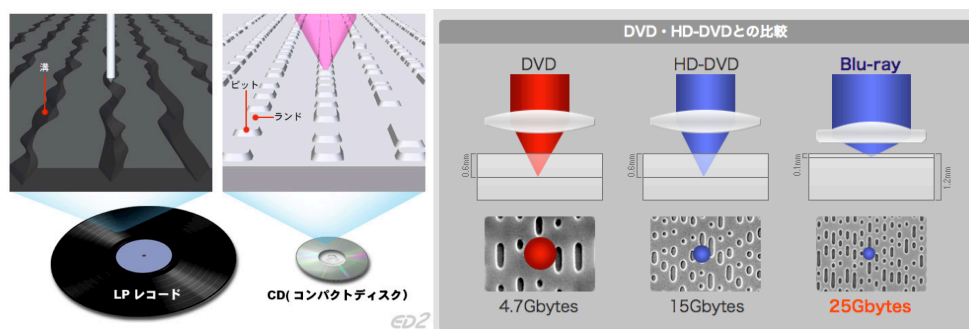


図 35: 〔左〕レコードから CD へ 〔右〕DVD から Blu-Ray へ

画像も記録するように改良されたのが DVD である。CD/DVD では赤いレーザー光を用いていたが、青紫色のレーザー光線にして光束を細くすることが可能になり、約 5 倍の大容量のブルーレイ (Blu-ray) が開発された。

■デジタル信号の圧縮

デジタル信号を圧縮する技術も進んだ。データの圧縮とは、普通の人には聴こえない程度の小さな音（最小可聴限界以下）のデータを消去したり、相対的に小さな音を消去する（マスキング効果）の他に、2進数の数字の並びを、ある規則に従って短くする工夫である。最近では、MP3 と呼ばれる圧縮技術が広く普及しており、ハードディスクに音源データを保存する携帯型プレーヤーの小型化・大容量化も進んでいる。

普通の人々の可聴周波数領域は 20–20 kHz であり、CD の音源では 20kHz 以上の高音はカットされている。しかし、聴こえないはずの音でも再生した方が臨場感のあふれた音になることが再確認されつつあり、最近ではハイレゾと命名されたカテゴリーで音楽データがダウンロードできるようになってきた。

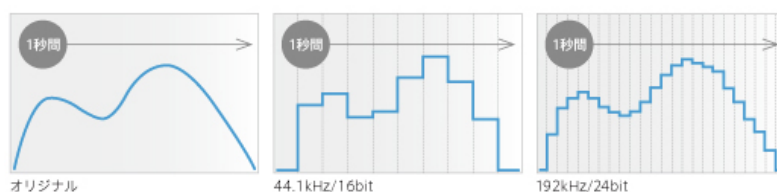


図 36: 音声デジタル信号の高解像度化