# 第2章 音

私たちの周囲は，人の話し声，ラジオやテレビの音，楽器の音，鳥の鳴き声など様々な音に満ちあふれている。

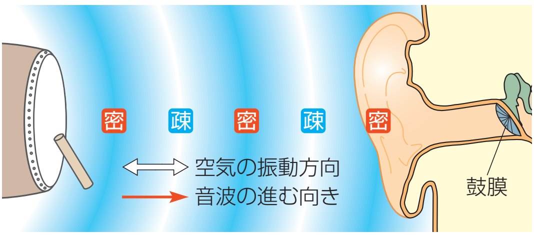
音も波の一種であり，空気や水などを媒質として振動が伝わる現象である。

この章では，これまでに学んだ波の性質をもとに，私たちにとって最も身近な波の１つである音について学習しよう。

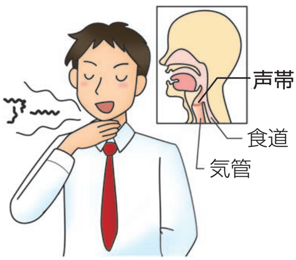
## 1 音波の性質

### A 音波

音を出している太鼓に手を触れると，細かく振動していることがわかる。図１のように，太鼓の膜が振動し，空気の一部が押されて変位すると，その前方の空気は圧縮されて圧力がわずかに上昇する。そして，その部分が膨張するとき，さらに前方に変位を引き起こす。このように，空気などの媒質の変位と圧力変化が伝わっていく現象が **音波**（sound wave）である。このとき，媒質の振動方向は音波の進む方向と同じであり，音波は媒質の疎密が連なって進行する縦波(疎密波)といえる。また，声を出しながらのどに軽く手を当てると，声帯が振動していることが確認できる。➡図２太鼓の膜や声帯のように，媒質を振動させて音を発生させるものを **音源**（sound source）または **発音体** という。




⬆図１　音波の発生と感覚器官　太鼓の膜が振動し，圧力の変化を生じる。圧力の変化によって耳の鼓膜が振動し，脳がそれを音として感じる。




⬆図２　声が出るしくみ

## B 音の速さ

音波の伝わる速さを **音速**(sound velocity) という。音速は媒質や温度によって異なる。(➡表1) 空気中を伝わる音速は振動数や波長にほとんど関係なく，振幅によって変化することもない。乾燥した空気の温度 $t$〔℃〕とその温度での音速 $V$〔m/s〕との間には，およそ，次の関係がある。

**音速**

$$V = 331.5 + 0.6t \quad (1)$$ [1]

$V$〔m/s〕 空気中の音速（sound velocity）
$t$〔℃〕 温度（temperature）

**表1 いろいろな媒質中の音速** ヘリウムのように分子量が小さな軽い気体中では大きく，二酸化炭素のように分子量が大きな重い気体中では小さい。

| | 媒　質 | 音速〔m/s〕 |
|---|---|---|
| 気体 | ヘリウム（0 ℃） | 970 |
| | 二酸化炭素（20 ℃） | 275 |
| | 窒素（20 ℃） | 349 |
| 液体 | 水（20 ℃） | 1482 |
| | 海水（20 ℃） | 1513 |
| | メタノール（20 ℃） | 1121 |
| 固体 | 窓ガラス | 5440 |
| | 鉄 | 5950 |
| | アルミニウム | 6420 |

15 ℃の空気中の音速は，およそ 340 m/s である。遠くで打ち上げられた花火の光を見てから，「ドーン」という花火の音を聞くまでの時間から，あるいは，目の前で出た音が少し離れた壁などに反射して戻るまでの，音が往復する時間から，音速のおよその値を求めることができる。

また，音波は媒質のない真空中では伝わらないが，液体中や固体中では，それらの物質が媒質となって伝わる。液体中の音速は空気中よりも数倍大きく，減衰もしにくいため，遠くまで伝わる。ガラスや金属など固体中の音速はさらに大きい。[2]

**問1** 遠くで打ち上げられた花火の光を見てから，花火の音を聞くまでの時間が 4.6 秒であった。気温を 25 ℃とすると，花火までの距離は何 km か。

1.6 km

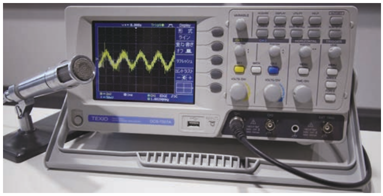
**問2** 振動数 450 Hz の音が，20 ℃の部屋から 5.0 ℃の室外に出るとき，波長は何 cm 変化するか。ただし，振動数は変化しないものとする。

2.0 cm だけ短くなる

[1] この式と測定値とのずれは，−20〜40 ℃の温度範囲で 0.5 m/s 以内である。また，ここでは，$V$ と $t$ はそれぞれ m/s と℃を単位としたときの数値として扱っている。
[2] 固体中では，縦波の音波だけではなく，横波の音波も伝わる。表1は縦波の音波の速さである。

## C　音の三要素

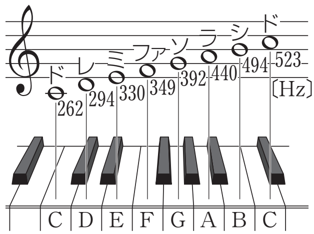
私たちは音のいろいろな違いを聞き分けることができる。音は，**高さ**，**大きさ**，**音色**(ねいろ) によって特徴づけられている。これらを **音の三要素** といい[1]，マイクロホンとオシロスコープを用いて観察することができる。
➡図3，やってみよう



⇧図3　オシロスコープ　マイクロホンを用いて，音波による空気の圧力の時間変化を調べることができる。

### 音の高さ

音の高さの違いは，音波の振動数の違いによる。高い音ほど振動数が大きい。
➡図4



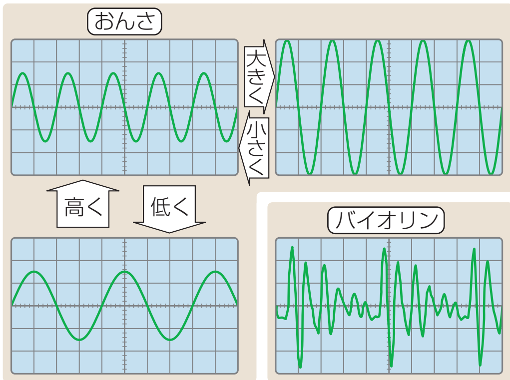

⇧図4　振動数と音階の関係　ある音より1オクターブ高い音では，振動数が元の音の2倍，2オクターブ高い音では4倍となる。

### 音の大きさ

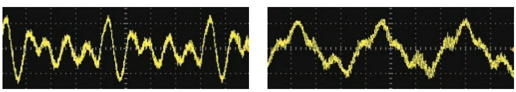
音の大きさの違いは，振動数が同じならば，音波の振幅の違いによる。振幅が大きい音は圧力変化(密度変化)も大きく，大きな音に聞こえる。

### 音色

音の高さと大きさが同じでも，楽器の種類により異なった音に聞こえる。これは，楽器により音波の波形が異なり，感じ方が違うからである。このような違いが音色である。おんさや時報の音のように，振動の様子が正弦曲線で表される音を **純音** という。一方，人の声や楽器の音などは，一般に複雑な振動をしている。
➡図5，6




⇧図5　音の三要素



(a)人の声「あ」　(b)人の声「い」

⇧図6　音色の違い

[1] 音の大きさの代わりに，音のエネルギーを表す **音の強さ** を音の三要素に入れることもある。音のエネルギーは，振幅の2乗に比例する。

## D 可聴音と超音波

人の耳が聞くことのできる音波は，振動数がおよそ 20 Hz～20000 Hz の範囲であり，**可聴音**(かちょうおん) という[2]。振動数が可聴音よりも小さい場合は，耳ではなく身体で振動として感じられる。

⬆図 7　超音波画像診断装置で撮影した胎児の画像

一方，振動数が可聴音よりも大きく，人の耳に聞こえない音を **超音波** (ultrasonic wave) という。超音波には様々な応用例がある。例えば，海中に超音波を送り，反射波を受けて物体を探査する装置がソナー (sonar(sound navigation and ranging)) である。➡p.218 また，医療における超音波診断は，体内に超音波を送り，反射波を受けて体内の様子を画像化している。➡図 7

**問 3**　人の可聴音は，空気中の波長にすると，およそ何mから何mの範囲になるか。ただし，空気中の音速を 340 m/s とする。　$1.7\times10^{-2}$ m から 17 m の範囲

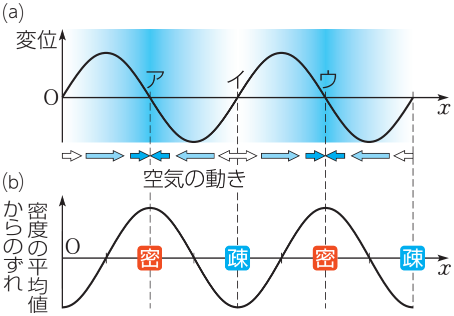
### やってみよう　音と振動

低周波発振器やコンピュータの音波発生ソフトを用いて音を出し，音波の振動数をしだいに大きくして，人の耳が聞くことのできる振動数を確認してみよう。

また，振動数が 400 Hz，600 Hz，800 Hz の音はどのように違うのだろうか。オシロスコープやコンピュータの波形分析ソフトを用いて，音波の振動数の変化を観察してみよう。

### 参考　音波のグラフ表示

音波は空気の密度の変動，つまり，疎密が伝わる縦波である。縦波が伝わるとき，図A(a)の媒質の変位に対応する媒質の密度の平均値からのずれ(平均の密度より大きければ正，小さければ負とする)は，図A(b)のようになる。変位の波形と密度の波形とは波長の $\frac{1}{4}$ だけ異なっており，図A(a)のア，イ，ウのように，空気の変位が 0 のところで，媒質の密度は平均値から最も大きくずれる。

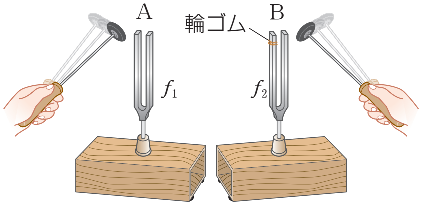



⬆図A　縦波による媒質の変位と密度分布

[2] 可聴音の範囲は音の大きさにもより，また個人差や年齢差もある。

## E うなり

図8のように，振動数が少しだけ異なる2つのおんさを同時に鳴らすと，音の大きさが周期的に変化して「ワーン，ワーン」というように聞こえる。このような現象を **うなり**（beat）という。



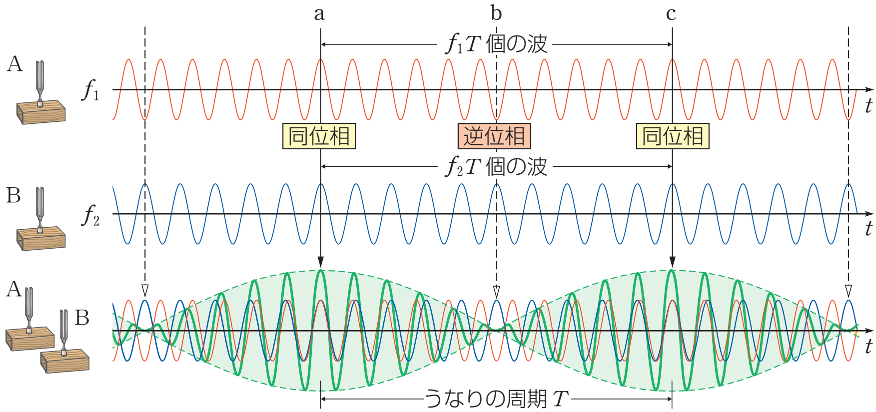

⬆図8　うなりの実験　同じ振動数のおんさA，Bを用意し，一方のおんさBに輪ゴムを巻いて，振動数が少しだけ異なるようにする。[1]

振動数がそれぞれ $f_1$，$f_2$ の2つの音が，1s間に起こすうなりの回数 $N$ を求めてみよう。図9に示すように，時刻aでは2つの波が同位相となり，山と山が強め合って合成波の振幅が最大となる。その後，位相は少しずつずれて，時刻bでは逆位相となり，合成波の振幅は0となる。さらに時間が経過すると合成波の振幅は再び大きくなり，時刻cでは山と山がちょうど1つずれて重なり，再び振幅が最大となる。時刻aと時刻cとの時間間隔がうなりの周期 $T$ である。時間 $T$ の間に入る波の数は，$f_1$ の波では $f_1T$ 個，$f_2$ の波では $f_2T$ 個であり，それらはちょうど波1つ分だけ違うので，$|f_1T-f_2T|=1$ となる。$N=\dfrac{1}{T}$ であるから，次の式(2)が成り立つ。

**うなり**

$$N=|f_1-f_2| \quad (2)$$

$N$〔回/s〕　1s間のうなりの回数
$f_1$，$f_2$〔Hz〕　2つの音の振動数(**frequency**)




⬆図9　うなり　振動数が少しだけ異なるおんさAとおんさBから出る波を合成すると，うなりが生じる。振動数の差が大きくなると，うなりは聞こえなくなる。

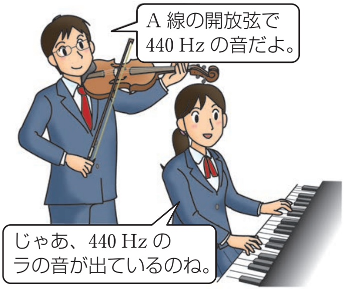
---

[1] 質量が増えるとおんさの動きが遅くなり，振動の周期が長くなるので，音が低くなる。

**問4** 振動数 500 Hz のおんさAと，振動数のわからないおんさBを同時に鳴らしたところ，1 s 間に 2 回のうなりが聞こえた。また，振動数 505 Hz のおんさCとおんさBを同時に鳴らしたところ，1 s 間に 3 回のうなりが聞こえた。おんさBの振動数は何 Hz か。 502 Hz

## 参考 楽器の調律（チューニング）

複数の楽器で演奏するとき，音の高さを合わせるために，うなりが利用される。2 つの楽器で同じ高さの音を出してみて，うなりの周期がだんだんと長くなり，うなりが全く聞こえなくなるまで調節すれば，音の高さが合ったことになる。また，おんさなどを標準として使えば，正確な振動数の音に合わせることができる。




## 解体新書 鐘の音のひみつ

鐘の音は，最初の「ゴォーン」という打音に続いて，「ウォーン，ウォーン，ウォーン」といううなりを聞くことができる。うなりは鐘の善し悪しを決める要素の 1 つである。音源が 1 つしかないにもかかわらず，鐘をつくことでうなりが生じるのはなぜだろうか。

鐘をつくと，鐘は，ついた方向に短い楕円形となり，すぐに円形に戻った後，ついた方向に長い楕円形になるというように振動する。この変化を周期的に繰り返すことで，鐘は音を出している。しかし，厳密には鐘は非対称に作られており，ついた方向とそれに垂直な方向とで振動数が少しだけ異なる音が出る。このため，2 つの音が重なり合ってうなりが生じる。

うなりがよく観察できるのは，鐘をつく方向から 45° の角度であり，反射板など周囲の環境や観察する方向によっても，鐘の音は異なって聞こえる。鐘の周りを回って音を聞き比べてみよう。

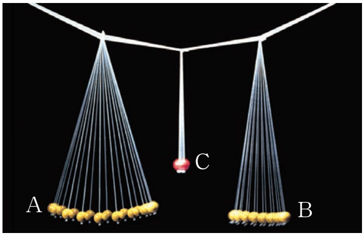
# 2 音源の振動

ギターの弦や笛は，指の押さえ方などで出る音の高さが変わる。ここでは，音が出るしくみやその音の高さがどのように決まるかを考えてみよう。

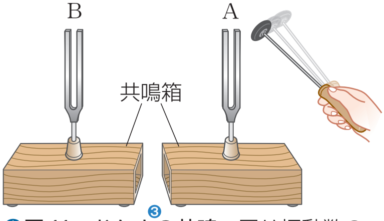
## A 共振・共鳴

太鼓やおんさは，たたくといつも同じ高さの音が出る。これは，物体が自由に振動できる場合，その大きさや形，材質などによって，決まった振動数で振動するからである。この振動を **固有振動**，そのときの振動数を **固有振動数** という。

物体に，その固有振動数と等しい振動数の周期的な力を加え続けると，物体の振動の振幅はしだいに増大し，大きなエネルギーをもつようになる。この現象を **共振**（resonance） または **共鳴** という。[2] このことは，図 10，11 のような振り子やおんさの実験で確かめることができる。




⬆図 10　**振り子[1]の共振**　横に張ったひもから，糸の長さの等しい振り子 A，B と長さの異なる振り子 C をつるす。A を振動させると B は共振して振動を始めるが，C はほとんど振動しない。




⬆図 11　**おんさの共鳴[3]**　同じ振動数のおんさ A，B の共鳴箱の開口部を向かい合わせて，A をたたく。しばらくしてから A の振動を止めると，B が鳴っているのが聞こえる。

[1] 振り子の振動数は糸の長さで決まることが知られている。
[2] 共鳴は，共振と同じ意味だが，特に音波の関係するときに用いられることが多い。
[3] おんさは長さや断面の形状，材質などによって固有振動数が決まっており，その振動数の純音を出す。

## 解体新書　ビルの固有振動と地震

ビルの固有振動の周期と地震の揺れの周期とが一致すると，共振によって振幅が増大し，大きく揺れることがある。2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では，長周期の地震動によって，遠くの都市でも高層ビルが共振して大きく揺れた。

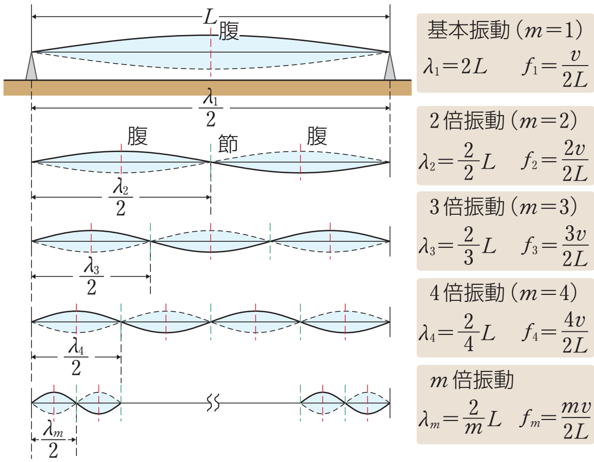
共振による被害を減らすために，建築物の固有振動数と地震の振動数との関係は，慎重に考慮しなければならない。
➡ p.224

## B 弦の固有振動

両端を固定して張った弦の中央部をはじくと，一定の高さの音が出る。これは，弦を伝わる横波が両側の固定端で反射して何度も往復しているうちに，図 12 に示すような特定の波長の定常波ができるからである。定常波ができるときの振動がこの弦の固有振動であり，そのときの振動数が弦の固有振動数である。

**定常波の腹が $m$ 個生じているときの横波の波長を $\lambda_m$〔m〕とすると，弦の長さ $L$〔m〕は $\dfrac{\lambda_m}{2}$ の $m$ 倍に等しい。** つまり，$L=m\cdot\dfrac{\lambda_m}{2}$ なので，次式のようになる。

$$\lambda_m=\frac{2L}{m} \quad (3)$$




⬆図 12　弦の固有振動

弦を伝わる横波の速さを $v$〔m/s〕とすると，弦の固有振動数 $f_m$〔Hz〕は，次式のように表される。

$$f_m=\frac{v}{\lambda_m}=\frac{mv}{2L} \quad (4)$$

✔Check
$v=f\lambda$

**弦の固有振動**

$$\lambda_m=\frac{2L}{m} \quad (3) \qquad f_m=\frac{v}{\lambda_m}=\frac{mv}{2L} \quad (4)$$

$m=1,\ 2,\ 3,\ \cdots\cdots$

$\lambda_m$〔m〕　定常波の腹が $m$ 個生じているときの波長
$L$〔m〕　弦の長さ（**l**ength）
$f_m$〔Hz〕　弦の固有振動数（**f**requency）
$v$〔m/s〕　弦を伝わる横波の速さ（**v**elocity）

固有振動のうち，$m=1$ のものを **基本振動** といい，基本振動によって生じる音を **基本音** という。また，$m=2,\ 3,\ \cdots\cdots$ のものをそれぞれ 2 倍振動，3 倍振動，……といい，それらをまとめて **倍振動** という。倍振動によって生じる音を **倍音**（2 倍音，3 倍音，……）という。このように，物体には固有振動数が複数存在する場合が多い。

## 弦楽器の音の高さ

弦をはじくと基本振動のほかに倍振動も同時に起こり，それらの重なり方により，楽器に特有の音色が出る。また，同じ楽器でも弾き方によって倍振動の起こり方は異なる。ふつう，基本音が最もよく聞こえるので[1]，音の高さは基本音によって決まる。

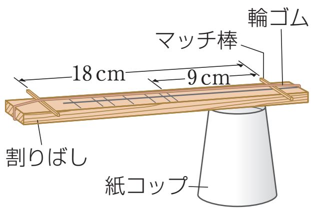
バイオリンやギターなどの弦楽器を演奏するときは，弦の途中を指で押さえて振動する弦の長さを変え，ド，レ，ミなど異なる高さの音を出す。

### ◉弦を伝わる横波の速さ◉

弦を伝わる横波の速さは，弦の単位長さあたりの質量(線密度)が小さいほど大きく，弦を張る力が強いほど大きくなることが知られている。したがって，同じ材質の弦では，細い弦ほど高い音を出しやすい。また，音の高さを調整するときは，弦を張る強さを変えて行う。次の やってみよう で，弦の長さや弦を張る力の強さと音の高さとの関係を調べてみよう。

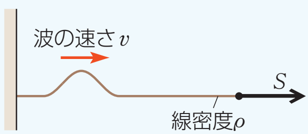
**やってみよう　輪ゴムギター**

輪ゴムと割りばしを使ってギターを作ってみよう。指で押さえる位置を変えながらゴムをはじいて音を聞き，ド，レ，ミ，…の位置に印を入れていく。輪ゴムを強く張ると，音の高さはどうなるだろうか。




### 発展　弦を伝わる横波の速さ

$S$〔N〕の力で張った線密度 $\rho$（ロー）〔kg/m〕の弦を伝わる横波の速さ $v$〔m/s〕は，次式のようになることが知られている。



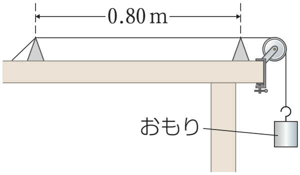

$$v=\sqrt{\frac{S}{\rho}} \quad \cdots\cdots①$$

また，長さ $L$〔m〕の弦の固有振動数 $f_m$〔Hz〕は，式(4)に式①を代入して，次式のようになる。

$$f_m=\frac{mv}{2L}=\frac{m}{2L}\sqrt{\frac{S}{\rho}} \quad (m=1,\ 2,\ 3,\ \cdots\cdots) \quad \cdots\cdots②$$

[1] 弦の端のほうをはじくと倍音が強く出ることもある。

## 例題 1 弦の振動




図のように，ピアノ線を滑車に通し，左右の固定端の間の距離が 0.80 m になるように弦を張った。ピアノ線にはたらく重力は無視できるものとして，次の問いに答えよ。

**(1)** この弦を振動させて，左右の固定端の間に腹が 1 個の定常波ができたとき，振動数は 50 Hz であった。このとき，弦を伝わる波の波長 $\lambda_1$，および速さ $v$ はいくらか。

**(2)** 弦やおもりを変えないで，左右の固定端の間に定常波の腹が 3 個できるように振動させた。このとき，弦を伝わる波の波長 $\lambda_3$，および振動数 $f_3$ はいくらか。

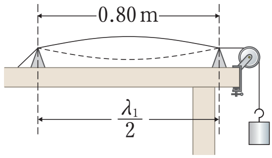
**指針** (1) 腹が 1 個の定常波は基本振動であり，波長は弦の長さの 2 倍である。また，弦を伝わる波の速さ $v$ と振動数 $f$，波長 $\lambda$ の関係は $v=f\lambda$ である。
(2) 弦とおもりを変えなければ，弦を伝わる波の速さは同じである。腹が 3 個の定常波は 3 倍振動であり，波長は弦の長さの $\frac{2}{3}$ 倍である。

**解** **(1)** 右の図より，$\frac{\lambda_1}{2}=0.80\ \mathrm{m}$ であるから，

$\lambda_1=2\times0.80\ \mathrm{m}=\underline{\mathbf{1.6\ m}}$

また，「$v=f\lambda$」より，
➡ p.139 式(4)

$v=50\ \mathrm{Hz}\times1.6\ \mathrm{m}=\underline{\mathbf{80\ m/s}}$

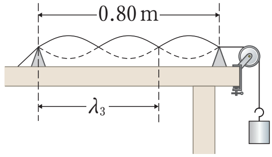



**(2)** 3 倍振動なので，右の図より，$\frac{3}{2}\lambda_3=0.80\ \mathrm{m}$ であるから，

$\lambda_3=\frac{2}{3}\times0.80\ \mathrm{m}=0.533\cdots\ \mathrm{m}\fallingdotseq\underline{\mathbf{0.53\ m}}$

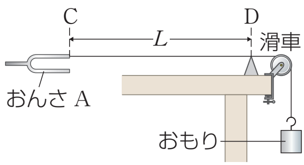
また，「$v=f\lambda$」より，
➡ p.139 式(4)

$$f_3=\frac{80\ \mathrm{m/s}}{\frac{2}{3}\times0.80\ \mathrm{m}}=\underline{\mathbf{1.5\times10^2\ Hz}}$$




---

**類題 1** 振動数 500 Hz のおんさ A の腕を図のように弦につけて，おんさ A を振動させたところ，CD 間に 3 倍振動の定常波が生じた。このとき，CD 間の長さは $L=1.20$ m であった。




**(1)** 弦を伝わる横波の速さは何 m/s か。

次に，おんさ A を振動数のわからないおんさ B に取りかえて，他は同じ条件で振動させたところ，CD 間に 2 倍振動の定常波が生じた。

**(2)** おんさ B の振動数は何 Hz か。

**(3)** (2)でおもりを取りかえたところ，CD 間に 3 倍振動の定常波が生じた。弦を伝わる横波の速さは何倍になったか。

(1) 400 m/s (2) 333 Hz (3) $\frac{2}{3}$ 倍

第 2 章

## C 気柱の固有振動

### 閉管の気柱の固有振動

瓶や試験管の上端に唇を当てて吹くと，笛のような音が出る。➡やってみようこれは，管の中の **気柱**(空気の柱)にいろいろな波長の音が発生して気柱の両端で反射しているうちに，特定の波長の波が定常波をつくるからである。

管の底では空気が管の長さ方向に振動できないので固定端反射が起こり，定常波の節となる。一方，管口である開口端では自由端反射が起こり，定常波の腹となる。このように片側が閉じた管を **閉管** という。

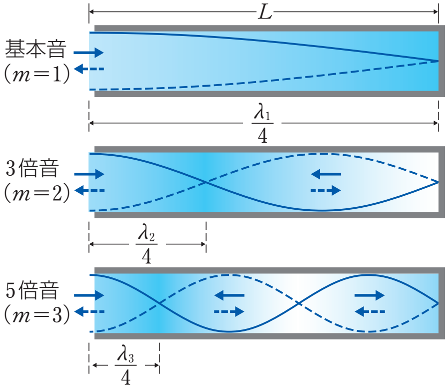
気柱の長さが $L$〔m〕の閉管に，節を $m$ 個もつ定常波ができたとする。➡図 13 **その波長を $\lambda_m$〔m〕とすると，気柱の長さは $\dfrac{\lambda_m}{4}$ の奇数倍に等しい。**

つまり，$L=(2m-1)\cdot\dfrac{\lambda_m}{4}$ なので，$\lambda_m$ は次式のようになる。

$$\lambda_m=\frac{4L}{2m-1} \quad (5)$$

気柱内の音速を $V$〔m/s〕とすると，➡p.157 式(1)固有振動数 $f_m$ は，次式のようになる。

$$f_m=\frac{V}{\lambda_m}=\frac{(2m-1)V}{4L} \quad (6)$$




**⬆図 13　閉管の場合の気柱の定常波**　濃淡は，実線のグラフで表した空気の変位に対応する気柱内の空気の密度変化を表す。気柱では，定常波の節の位置で密度変化が最大となる。

$m=1,\ 2,\ 3,\ \cdots\cdots$ の音を，それぞれ基本音，3 倍音，5 倍音，……という。

**閉管の固有振動**

$$\lambda_m=\frac{4L}{2m-1} \quad (5) \qquad f_m=\frac{V}{\lambda_m}=\frac{(2m-1)V}{4L} \quad (6)$$

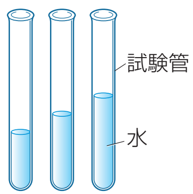
$m=1,\ 2,\ 3,\ \cdots\cdots$

$\lambda_m$〔m〕　節を $m$ 個もつ定常波ができたときの波長　　$f_m$〔Hz〕　閉管の固有振動数(**f**requency)

$L$〔m〕　気柱の長さ(**l**ength)　　$V$〔m/s〕　音速(sound **v**elocity)

**やってみよう**　**試験管笛**

図のように，3 本の試験管やペットボトルに水を入れ，吹いて音を出してみよう。また，水の量を調節してド，ミ，ソの音をつくり，和音を出してみよう。空気の部分の長さと音の高さとは，どのような関係になっているだろうか。



## 開管の気柱の固有振動

筒のように両端が開いている管を **開管** という。管の両端では自由端反射が起こり，定常波の腹となる。

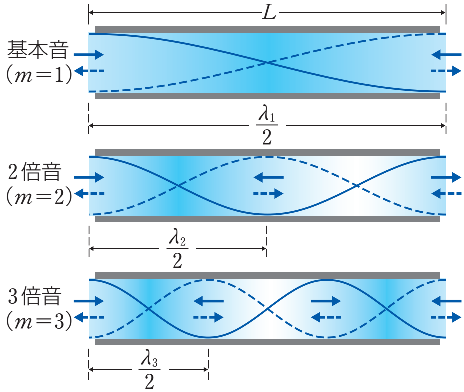



**図 14　開管の場合の気柱の定常波**　濃淡は，実線のグラフで表した空気の変位に対応する気柱内の空気の密度変化を表す。

気柱の長さが $L$〔m〕の開管に，節を $m$ 個もつ定常波ができたとする。**その波長を $\lambda_m$〔m〕とすると，気柱の長さは $\dfrac{\lambda_m}{2}$ の整数倍に等しい。**つまり，$L=m\cdot\dfrac{\lambda_m}{2}$ なので，次式のようになる。

$$\lambda_m=\frac{2L}{m} \quad (7)$$

気柱内の音速を $V$〔m/s〕とすると，固有振動数 $f_m$ は，次式のようになる。

$$f_m=\frac{V}{\lambda_m}=\frac{mV}{2L} \quad (8)$$

$m=1, 2, 3, \cdots\cdots$ の音を，それぞれ基本音，2 倍音，3 倍音，……という。

**開管の固有振動**

$$\lambda_m=\frac{2L}{m} \quad (7) \qquad f_m=\frac{V}{\lambda_m}=\frac{mV}{2L} \quad (8)$$

$m=1,\ 2,\ 3,\ \cdots\cdots$

| | | | |
|---|---|---|---|
| $\lambda_m$〔m〕 | 節を $m$ 個もつ定常波ができたときの波長 | $f_m$〔Hz〕 | 開管の固有振動数(**f**requency) |
| $L$〔m〕 | 気柱の長さ(**l**ength) | $V$〔m/s〕 | 音速(sound **v**elocity) |

式(6)，(8)からわかるように，気柱の固有振動数は，閉管では基本振動数の奇数倍，開管では整数倍となる。おんさについている箱は閉管の役割を担っており，おんさの音を共鳴させて音を大きくしている。

## 開口端補正

管口である開口端付近では，管の中だけでなく外の空気も振動するため，開口端の位置が完全な自由端とはならず，厳密には開口端の少し外側に定常波の腹があるかのように振動する。この腹の位置と管口(開口端)との距離を **開口端補正** という。➡図 15

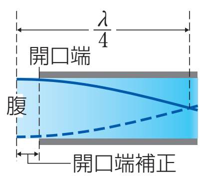
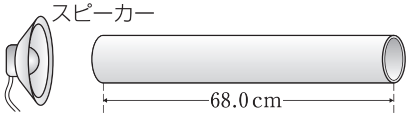



**図 15　開口端補正**

## 例題 2　気柱の振動

図のように，長さ 68.0 cm の開管の管口付近にスピーカーを置き，スピーカーから出る音の振動数を 0 Hz からしだいに大きくしていくと，ある振動数で気柱が共鳴して大きな音が聞こえた。音速を 340 m/s とし，開口端補正は無視できるものとして，次の問いに答えよ。



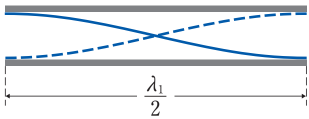

**(1)**　最初に聞こえる共鳴音の波長は何 cm か。

**(2)**　3 回目に聞こえる共鳴音の振動数は何 Hz か。

**指針**　(1)　最初に聞こえた共鳴音は基本音で，管の長さは開管の基本音の波長の $\frac{1}{2}$ 倍である。

(2)　3 回目に聞こえた共鳴音は 3 倍音で，管の長さはその半波長の 3 倍である。また，音速 $V$ と振動数 $f$，波長 $\lambda$ の関係は　$V=f\lambda$　である。

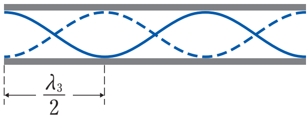
**解**　**(1)**　振動数をしだいに大きくしていき，最初に聞こえた共鳴音は，最も波長の長い基本音だから，波長を $\lambda_1$ とすると，図Aより，




図A

$$\frac{\lambda_1}{2}=68.0\ \text{cm}\quad よって，\lambda_1=\underline{\mathbf{136\ cm}}$$

**(2)**　3 倍音に共鳴する。この音の波長を $\lambda_3$，振動数を $f_3$ とすると，図Bより，




図B

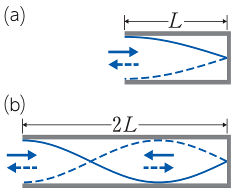
$$3\times\frac{\lambda_3}{2}=68.0\ \text{cm}\quad よって，\lambda_3=\frac{136}{3}\ \text{cm}$$

音速を $V$ とすると，「$v=f\lambda$」より，$V=f_3\lambda_3=340$ m/s　だから，

➡ p.139 式(4)

$$f_3=\frac{V}{\lambda_3}=\frac{340\ \text{m/s}}{\frac{1.36}{3}\ \text{m}}=\underline{\mathbf{750\ Hz}}$$

**類題 2**　右の図は，閉管の気柱に生じた定常波の様子を表している。(a)，(b)の管の長さは，それぞれ $L$〔m〕および $2L$〔m〕であり，(a)の気柱に生じた定常波の振動数は 500 Hz であった。音速は 340 m/s で，(a)，(b)ともに，開口端補正は無視できるものとする。




**(1)**　(a)の閉管の長さ $L$ は何mか。

**(2)**　(a)と同じ長さの開管の場合，基本振動数は何 Hz か。

**(3)**　(b)の気柱に生じた定常波が図のようであるとき，振動数は何 Hz か。

**(4)**　気温の上昇によって，(a)，(b)の気柱に生じる定常波の振動数は大きくなるか，小さくなるか。ただし，管の長さは気温によって変化しないものとする。

**(1)** 0.170 m　**(2)** 1000 Hz　**(3)** 750 Hz　**(4)** 大きくなる

# 解体新書　楽器のしくみ

弦の振動や気柱の振動を利用した楽器にはどのようなものがあり，どのようなしくみで音を出したり音の高さを変えているのだろうか。

## 弦の振動を利用した楽器

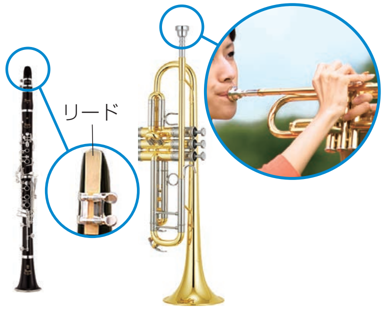
ギターやバイオリンなどは，指や弓で弦を振動させて音を出すが，弦の振動だけではかすかな音しか聞こえない。そこで多くの弦楽器は，箱状の胴に弦の振動を伝えている。胴は幅広い振動数でよく鳴るように，曲面で囲まれた箱になっている。

弦楽器では，胴から発する音が，聞く音の音量の大部分を占める。このため，弦楽器の出す音の音色は，弦の材質や弾き方だけでなく，胴の材質や形，大きさなどによって大きく異なる。

⬆図A　ギターとバイオリン

## 気柱の振動を利用した楽器

フルートなどの管楽器は，気柱の振動を利用した楽器で，楽器によって音源となるものや材質，大きさなどが違う。このため，倍音が混ざる比率は変わり，音色に違いが出る。例えば，クラリネットの音源はマウスピース(口にくわえる部分)にある薄い板状のリードであり，息を吹き込むことでリードを振動させる。一方，トランペットの音源は唇であり，マウスピースの中で唇を軽く閉じ，息を吹き込むときに，その勢いで唇を振動させる。




⬆図B　クラリネットとトランペット

また，管の長さが長いほど，気柱の固有振動の基本音の波長は長く，振動数は小さくなり，低い音を出すことができる。フルートとクラリネットでは，管の長さはほぼ同じであるが，フルートは開管に，クラリネットは閉管になっているため，クラリネットのほうが出る音は低い。また，閉管では奇数倍の倍音しか混ざらないので，音色にその特徴が出る。

⬆図C　**管楽器の大きさの比較**　ピッコロ(上)とフルート(中)では，管の短いピッコロが，より高音部を受けもつ。

# 2章のまとめ

## ❶音波の性質

□**音波**　空気などの媒質の変位と圧力変化(密度変化)が伝わっていく縦波(疎密波)。

□**音の速さ**　$V = 331.5 + 0.6t$　　$V$〔m/s〕：空気中の音速　$t$〔℃〕：温度

□**音の三要素**　**高さ**(振動数の違い)，**大きさ**(振幅の違い)，**音色**(波形の違い)。

□**可聴音と超音波**　人が音として聞くことができる，振動数が約 20～20000 Hz の音波を **可聴音**，可聴音より振動数が大きく，人の耳に聞こえない音波を **超音波** という。

□**うなり**　振動数が少しだけ異なる 2 つの音が重なり合って，音の大きさが周期的に変化して聞こえる現象。

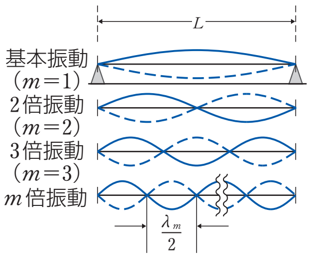
$$N = |f_1 - f_2|$$

$N$〔回/s〕：1 s 間のうなりの回数
$f_1$，$f_2$〔Hz〕：2 つの音の振動数

## ❷音源の振動

□**固有振動**　物体の大きさ，材質などで決まる振動。

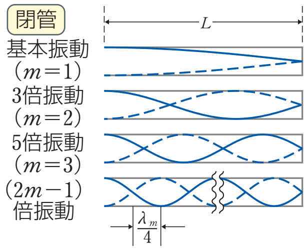
□**共振・共鳴**　物体に，その固有振動数と等しい振動数の周期的な力を加えると，物体は固有振動を始め，大きなエネルギーをもつようになること。




□**弦の固有振動**

$$\lambda_m = \frac{2L}{m},\quad f_m = \frac{v}{\lambda_m} = \frac{mv}{2L}$$

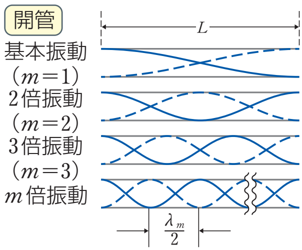
$m = 1,\ 2,\ 3,\ \cdots$
$\lambda_m$〔m〕：定常波の腹が $m$ 個生じているときの波長
$f_m$〔Hz〕：弦の固有振動数
$L$〔m〕：弦の長さ
$v$〔m/s〕：弦を伝わる横波の速さ




□**気柱の固有振動**

・閉管の気柱の固有振動

$$\lambda_m = \frac{4L}{2m-1},\quad f_m = \frac{V}{\lambda_m} = \frac{(2m-1)V}{4L}$$




・開管の気柱の固有振動

$$\lambda_m = \frac{2L}{m},\quad f_m = \frac{V}{\lambda_m} = \frac{mV}{2L}$$

$m = 1,\ 2,\ 3,\ \cdots$
$\lambda_m$〔m〕：節を $m$ 個もつ定常波ができたときの波長
$f_m$〔Hz〕：閉管や開管の固有振動数
$L$〔m〕：気柱の長さ
$V$〔m/s〕：音速

## 1 音の反射

p.157

崖に向かって 10.0 m/s の速さで進んでいる船が汽笛を鳴らしたところ，4.00 s 後に船の上で崖で反射した音を聞いた。この反射音を聞いた位置から崖までの距離は何 m か。ただし，空気中の音速を 340 m/s とする。

## 2 音の性質

p.158，160

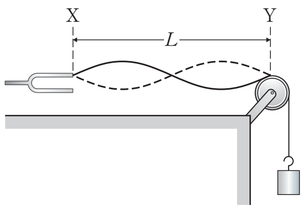
次の $\boxed{\phantom{00}}$ の中に，適切な語句や数値を入れよ。

(1) 耳で聞く音の高さにはいろいろな違いがあり，音波の振動数が $\boxed{①}$ いほど音が高い。また，振動数が同じとき，音波の $\boxed{②}$ が大きいほど音が大きい。ところで，同じ高さの音でも楽器によって音色が異なるのは $\boxed{③}$ が違うからである。

(2) 振動数が少しだけ異なるおんさ A，B を同時に鳴らすと，音の大きさが周期的に変化して聞こえた。この現象を $\boxed{④}$ という。おんさ A の振動数が 400 Hz のとき，5 秒間に 10 回の $\boxed{④}$ が聞こえた。また，おんさ B に輪ゴムを巻きつけて，おんさ A と B を同時に鳴らすと，6 秒間に 9 回の $\boxed{④}$ が聞こえた。この結果から，初めのおんさ B の振動数は $\boxed{⑤}$ Hz とわかる。

## 3 弦の振動

p.165 例題 1




図のように，ある振動数のおんさに一様な糸の一端をつけ，滑車を通して他端におもりをつるした。おんさを振動させたところ，XY 間に腹が 2 個の定常波ができた。糸を伝わる横波の速さを $v$，XY 間の長さを $L$ として，次の問いに答えよ。

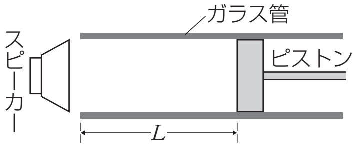
(1) 定常波の振動数を求めよ。

(2) XY 間の長さを $\frac{3}{2}L$ にしておんさを振動させた。このときの糸を伝わる横波の波長を求めよ。また，そのときにできる定常波の腹の数は何個か。

(3) XY 間の長さを $L$ に戻し，おもりの質量を変えておんさを振動させたところ，腹が 1 個の定常波ができた。このときの糸を伝わる横波の速さを求めよ。

## 4 気柱の振動

p.168 例題 2




図のように，ガラス管にピストンを取りつけ，ピストンを自由に動かすことができるようにする。管口近くにスピーカーを置き，振動数が 440 Hz の音を出し続ける。

ピストンを管の左端から右へ動かしていくとき，$L=18.0$ cm のところで最初の共鳴が起こり，$L=56.9$ cm のところで 2 回目の共鳴が起こった。次の問いに答えよ。

(1) スピーカーから出ている音波の波長は何 cm か。

(2) このときの音速は何 m/s か。

(3) 2 回目の共鳴が起こっているとき，管内の空気の密度が時間的に最も大きく変化しているところは，管口から何 cm のところか。