物理基礎編

第４章

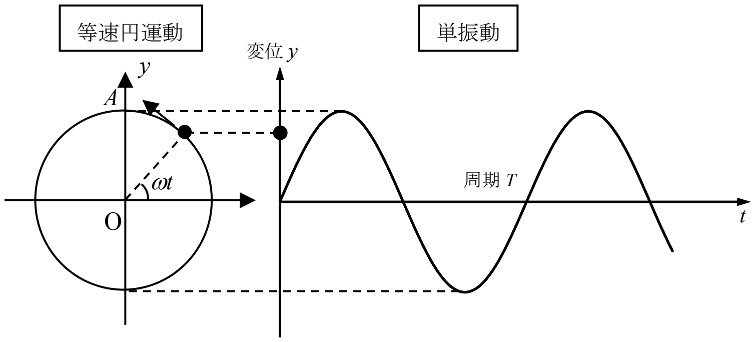
～　波動　～

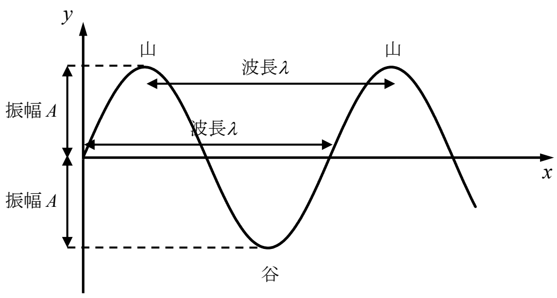
【波の性質】

■波とは■

波の発生している場所を波源という。

- ・正弦波　—　単振動している波源から生じる波。
- ・媒質　—　波を伝える物質。
- ・波形　—　媒質の各点を連ねた形。





波の基本公式　$\boxed{v = \lambda f = \dfrac{\lambda}{T}}$

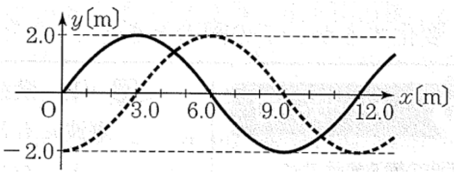
波の速さ　—　波は 1 周期 T[s]の時間に 1 波長(λ[m])の長さ進む。(v〔m/s〕)

位相　—　媒質がどの振動状態にあるかを表す。

※媒質の単振動を表す等速円運動の回転角のこと。

＜例題＞

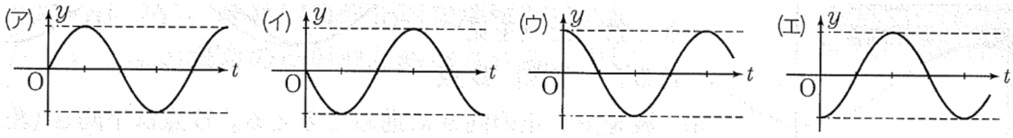
図は x 軸の正の向きに伝わる正弦波の時刻 $t = 0$ における波形（実線）である。$t = 4.0$[s]に波形は実線から破線の位置に初めて移ったものとする。



（１）この波の振幅，周期，波長，振動数，速さを求めよ。

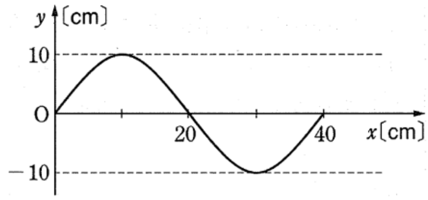
（２）$t = 20$[s]の波形を描け。

（３）$x = 6.0$[m]の位置にある媒質の変位 y と時刻 t の関係は次のグラフのうちどれか。



（４）$t = 0$[s]のときの振動の速度が 0m/s の媒質の位置と，y 軸の正の向きの速度が最大の位置の座標（$0 \leqq x \leqq 12.0$）をそれぞれすべて求めよ。

【１】ある媒質中で，原点 O にある媒質が y 軸方向に振動を始め，この振動が正弦波となって x 軸の正の向きに伝わっている。図は，波源が振動を始めてから 10s 経過したときの波形である。



（１）この波の振幅 A，波長 λ，周期 T，速さ v を求めよ。

（２）波源が振動を始めた直後の変位の向きは，y 軸のどちら向きか。

（３）$x = 20$cm の点における媒質の変位が，図の瞬間から最初に最大になるまでに要する時間は何 s か。

（４）図において，媒質の速度が y 軸の負の向きである x 座標の範囲をすべてあげよ。

（５）図の瞬間から 25s 後の波形を，$0 \leqq x \leqq 40$[cm]の範囲で示せ。

【２】x 軸に沿って正弦波が伝わっている。図 1 は，時刻 $t = 0\mathrm{s}$ における波の波形 y の空間変化，図 2 は，ある位置での媒質の変位 y の時間変化を表している。

（１）この波の速さ v を求めよ。

（２）次の①，②の場合，図 2 で表される振動をしている媒質の位置は，それぞれ図 1 の P〜S のうちのどこか。

①　x 軸の正の向きに進む波の場合　　　②　x 軸の負の向きに進む波の場合

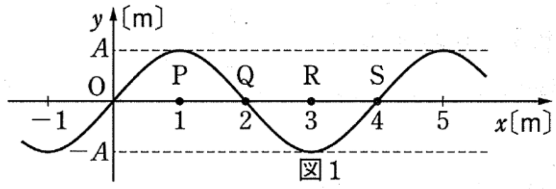


図1

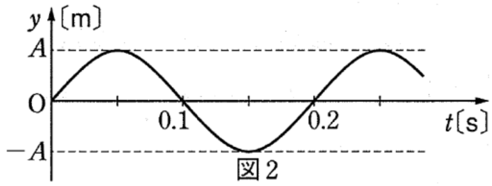


図2

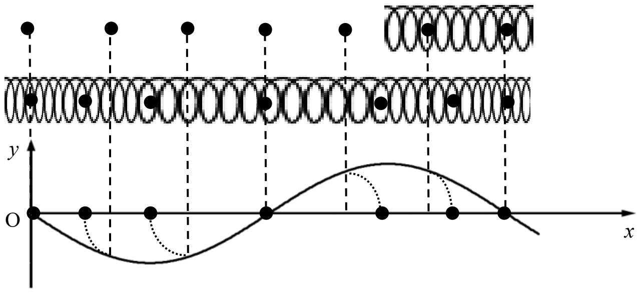
■縦波と横波■

・横波：波の進行方向と媒質の振動方向が垂直な波。

・縦波：波の進行方向と媒質の振動方向が平行な波(**疎密波**)。

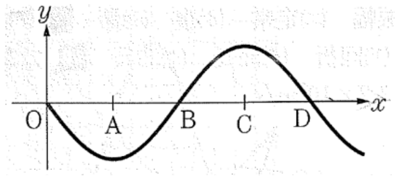
○縦波のグラフ(縦波の横波的表示)

　縦波の波形はわかりにくいので，実際の変位を 90°回転させることにより，横波のように表すことができる。



＜例題＞

　右図のグラフは，x 軸の正の向きに進む縦波を横波で表したものである。



（１）A～D の中で媒質が最も密な点はどこか。

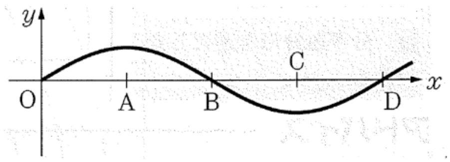
（２）媒質の右向きの速度が最大の点はどこか。

（３）B 点の変位と速度は，時間とともにどのように変化するか。この図のときを $t = 0$ としてグラフに示せ。周期を T とする。

【１】右のグラフは，x 軸の負の向きに進む縦波を横波で表したものである。

　A～D の中で媒質の最も疎な点はどこか。

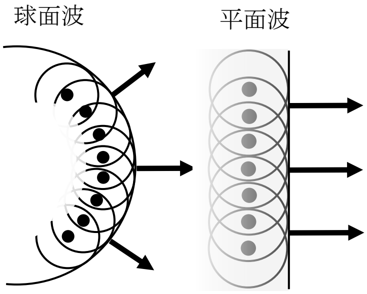
　また，媒質の右向きの速度が最大の点はどこか。



■ホイヘンスの原理■

ある瞬間の１つの波面上のすべての点は新しい波源となり，同じ速さ，同じ振動数の素元波を送りだす。個々の素元波は観測されず，波の進む前方で，これらの素元波の波面に共通に接する局面が次の波面として観測される。

平面上において，位相の等しい点を連ねた面を波面という。波面が球面の波を球面波，平面の波を平面波という。

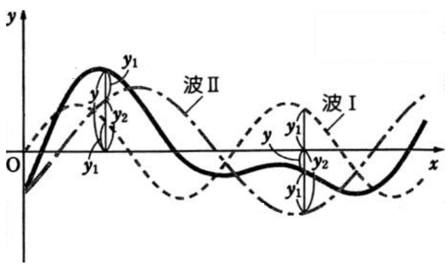


■重ね合わせの原理と波の干渉■

○　重ね合わせの原理

２つの波が到達した場所における変位 y はそれぞれの波が単独で伝わるときの変位 y_1 と y_2 の和になっている。

$$y = y_1 + y_2$$



○　波の独立性

波は衝突のとき，重ね合わせの原理にしたがって波形がかわるが，その後はもとの波形にもどって進み，たがいに他の進行をさまたげたりしない。

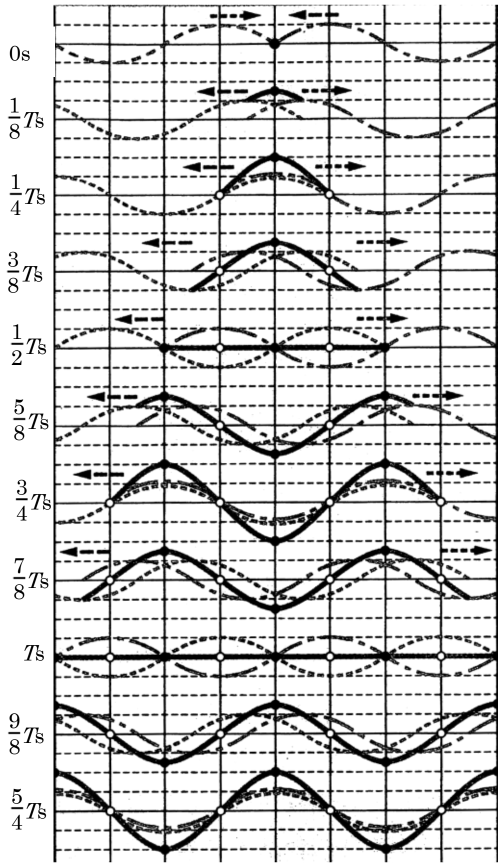
○　定常波

反対方向に進む波が重なってできる，波形が進行しない波。

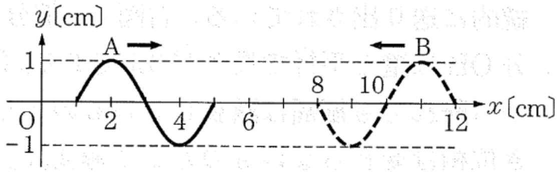
腹：もっとも大きく振動している点。

節：まったく振動していない点。

腹と腹の間隔，節と節の間隔は 1/2 波長である。



＜例題１＞

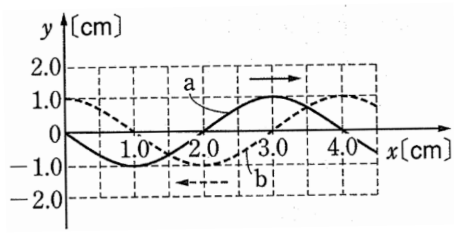


ともに振幅 1cm，波長 4cm，速さ 20cm/s で，x 軸の正の向きに進む正弦波 A と負の向きに進む正弦波 B とがある。図には時刻 $t = 0$[s]における変位のようすが，それぞれ 1 波長分だけ描いてある。T を周期としたとき，

（１）$t = \dfrac{3}{4}T$ における合成波の変位を描き，節の場所を求めよ。

（２）合成波の変位が，x の値に関係なく，0 になる時刻を求めよ。

【１】x 軸上を要素の等しい 2 つの正弦波 a，b が，互いに逆向きに進んで重なりあい，定常波が生じている。図には，a 波，b 波が単独で存在したときの，時刻 $t = 0$s における a 波（実線）と b 波（破線）が示してある。波の速さは 2.0cm/s である。



（１）図の瞬間（$t = 0$s）の合成波の波形を描け。

（２）定常波の節の位置 x を $0 \leqq x \leqq 4.0$(cm)の範囲ですべて求めよ。

（３）定常波の腹の位置 x を $0 \leqq x \leqq 4.0$(cm)の範囲ですべて求めよ。

（４）$t = 0$s の後，腹の位置の変位の大きさが最大になる最初の時刻を求めよ。

（５）$t = 0$s の後，x 軸上のすべての点で変位が 0 となる最初の時刻を求めよ。

■波の反射と屈折■

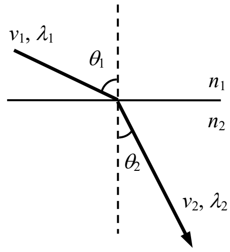
波が異なった領域に入射すると，境界面で一部は反射し，一部は屈折して進む。そのとき，波の振動数に変化はない。

反射の法則　入射角 ＝ 反射角

自由端反射〔屈折率(大)→屈折率(小)〕…波が同位相で反射

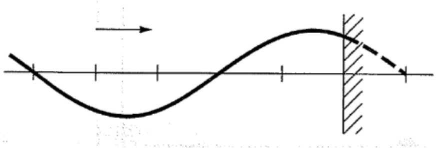
固定端反射〔屈折率(小)→屈折率(大)〕…波が逆位相で反射

屈折の法則　$\dfrac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \dfrac{v_1}{v_2} = \dfrac{\lambda_1}{\lambda_2} = \dfrac{n_2}{n_1} = n_{12}$



＜例題１＞

右図のように，媒質の境界へ波が連続的に入射したとき，次の場合の反射波と観察される波を図示せよ。



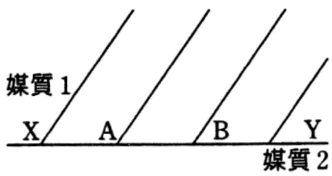
（１）境界が自由端の場合

（２）境界が固定端の場合

（３）境界は定常波の腹になるか節になるか。（１），（２）の各場合について答えよ。

＜例題２＞

平面波が媒質 1 から媒質 2 へ進んでいる。XY は境界を表し，ななめの線はある瞬間の入射波の山の波面を表している。媒質 1 に対する媒質 2 の屈折率を 2.0 とする。

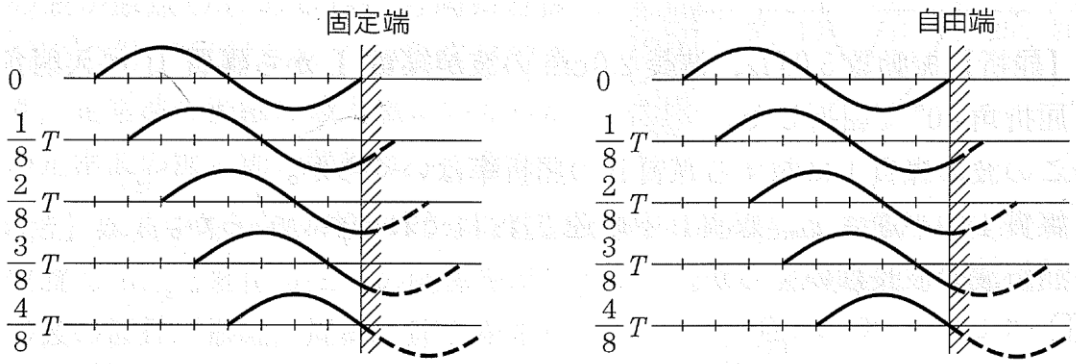


（１）図の時刻に B 点にある山は，1 周期前にはどの点（C とする）にあったか。

（２）図の時刻に A 点にある山は，1 周期後にはどの点（D とする）に達するか。

（３）図のすべての入射波の波面に対する屈折率の波面を作図せよ。

【１】次の図は，1 波長分の正弦波が反射面に到達したときから，半周期後までの波形である。各場合について反射波と合成波を図示せよ。



【２】図のように，媒質 1 と媒質 2 が境界面 A で，また媒質 2 と媒質 3 が境界面 B で接している。媒質 1 から入射した平面波の一部が，境界面 A で屈折して媒質 2 へ入っていく。図中の平行線は波の波面を表している。媒質 1 における入射波の波長は 1.4cm，振動数は 50Hz である。$\sqrt{2}=1.4$ として計算せよ。

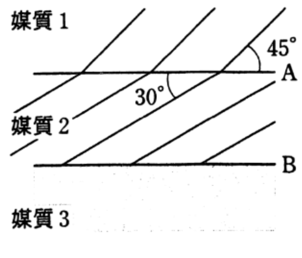
（１）媒質 1 の中での波の速さは何 cm/s か。

（２）媒質 1 に対する媒質 2 の屈折率はいくらか。

（３）媒質 2 の中での波の波長は何 cm か。

（４）媒質 2 の中での波の振動数は何 Hz か。

（５）媒質 1 に対する媒質 3 の屈折率は 0.70 であるとすると，媒質 2 に対する媒質 3 の屈折率はいくらか。

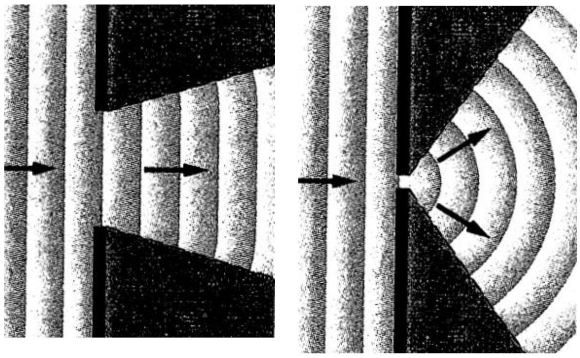


■回折■

波がすき間や障害物の背後にまわりこむ現象。

○回折の強さと波長の関係

波長が長ければ長いほどよく回折する。



＜証明＞

図のように，障害物の陰になる点 P に，すき間の端点 A と中央の点 B とから同時に届く素元波の経路差を考えてみる。

すき間の幅がせまく，波長と同程度以下のときは（図 1），経路差は $|\mathrm{AP}-\mathrm{BP}| \fallingdotseq \dfrac{d}{2}\sin\theta < \dfrac{\lambda}{2}$ ときわめて小さいから，これらの素元波はほぼ同位相で点 P に届く。したがって，すき間全体から届く素元波も，点 P ではほぼ同位相で重なり，波は弱まらない。一方，すき間が広いときは（図 2），点 P に相当する点 P′に，点 A′，B′から同時に届く素元波の経路差 $|\mathrm{A'P'}-\mathrm{B'P'}|$ は，波長に比べて大きくなる。したがって，すき間全体から届く素元波は山から谷まで様々な位相をとり，打ち消しあい，回折現象を弱めてしまう。

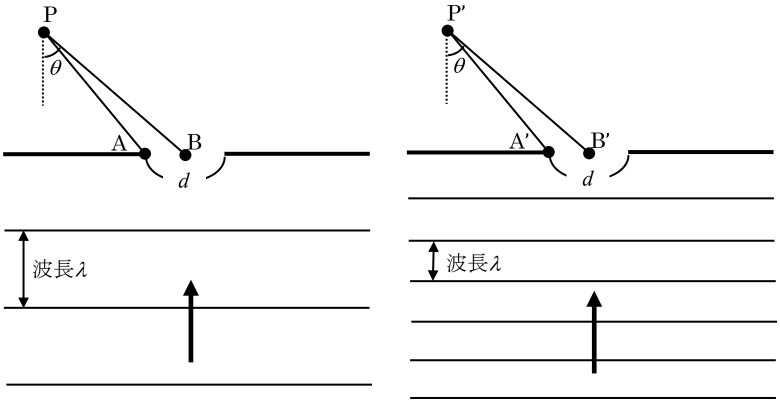


図 1　　図 2

【音の性質】

■音の性質■

○音の高低

　高い音　⇔　振動数大

　低い音　⇔　振動数小

cf. 振動数が 2 倍の音を 1 オクターブ高い音という。

○音の強弱

密度の大きい媒質ほど，また振幅・振動数の大きい音波ほど強い音となる。

○音の大きさ

人が感じる音の大きさは複雑で，振動数が異なると違った大きさに感じる。

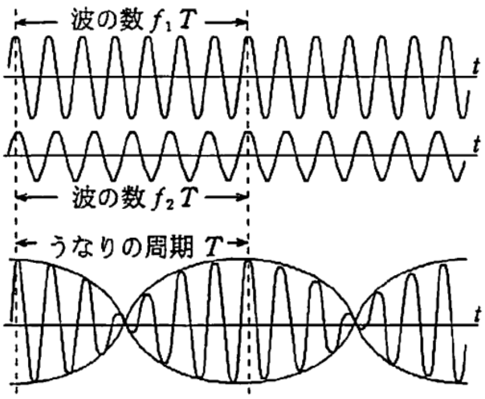
一定振動数の音波では振幅が大きいほど大きく聞こえる。

○音の速さ

t ℃での空気中の音の速さ$V = 331.5 + 0.6t$

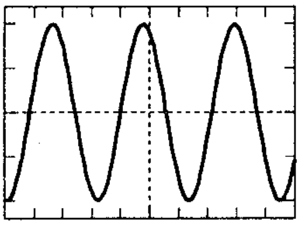
○うなり

　振動数の少し異なる２つのおんさを同時に鳴らすと，音の強弱が繰り返して聞こえる。振動数f_1の波と振動数f_2の波を重ね合わせると，波の数が 1 個ずれるごとに，合成波の強弱が長い周期で 1 回だけ変化し，この変化がうなりとして聞こえる。合成波の振動数は $\dfrac{f_1 + f_2}{2}$〔Hz〕，うなりの振動数（1 秒間に生じる回数）は$|f_1 - f_2|$〔Hz〕である。

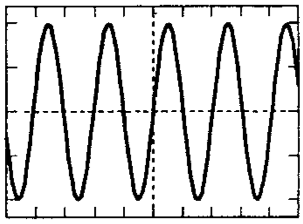


＜例題１＞

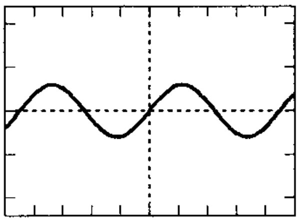
いろいろな音の波形をマイクロホンとオシロスコープを使って観察した。
音A，B，C，D，Eについて観察したオシロスコープの画面が図に示してある。
ただし，縦軸・横軸のスケールは，それぞれ，すべて同じものとする。



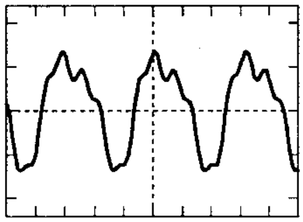
（A）



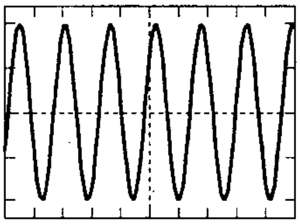
（B）



（C）



（D）



（E）

（1）音程が最も高い音と強さが最も弱い音を，次の①～⑤のうちから一つずつ選べ。
音程が最も高い音
強さが最も弱い音
①　A　　②　B　　③　C　　④　D　　⑤　E

（2）音 A と同じ音程の音はどれか。次の①～④のうちから正しいものを一つ選べ。
①　B　　②　C　　③　D　　④　E

（3）音Aはどのような音色か。次の①～④のうちから最も似ているものを一つ選べ。
①　人の話し声　　②　おんさの音　　③　ギターの音　　④　雑　音

<例題２>

三つのおんさ A，B，C がある。A の振動数は 440Hz，B の振動数は 443Hz である。A と B を同時に鳴らすと周期的に音が強くなったり弱くなったりするのが聞こえた。この現象を $\boxed{\ 1\ }$ という。A と C を同時に鳴らしたときにも，B と C を同時に鳴らしたときにもこの現象が起きた。A と C を鳴らしたときには 1 秒間に 2 回の割合で音が強く聞こえ，B と C を鳴らしたときには 1 秒間に 1 回の割合で音が強く聞こえた。

（1）前の文章中の空欄 $\boxed{\ 1\ }$ に入れる語として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 回 折　　② 屈 折　　③ 共 鳴　　④ うなり

（2）おんさ A と B を同時に鳴らしたときには，音が強く聞こえるのは 1 秒間に何回の割合か。

（3）おんさ C の振動数はいくらか。

■弦の振動■

○固有振動：定常波ができるのは特定の振動数のみ。

○共振（共鳴）：振動体は固有振動数に等しい周期的な力を受けると，たとえ力が微弱でも，
物体は大きく振動する現象。とくに音を伴うときを共鳴という。

基本振動　　　　　　　２倍振動　　　　　　　３倍振動

○弦を伝わる横波の速さ

$$v = \sqrt{\frac{S}{\rho}}$$

（S：張力〔N〕，ρ：長さ１m あたりの弦の質量（線密度）〔kg/m〕）

○音さと弦の関係

音さと弦の振動方向が同じ場合…弦と音さの振動数は等しい。

音さと弦の振動方向が直交する場合…弦の振動数は音さの半分となる。

■気柱の共鳴■

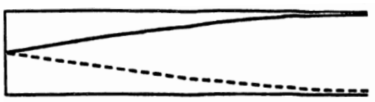
閉口端は節，開口端は腹。

定常波の管口での腹の位置は，管口より少し外側の位置にできる。

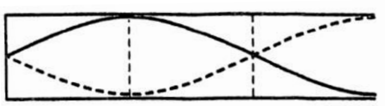
この補正を**開口端補正**という。

＜閉管＞

基本振動

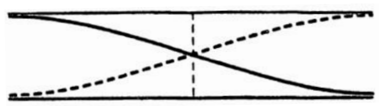


３倍振動

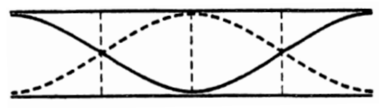


＜開管＞

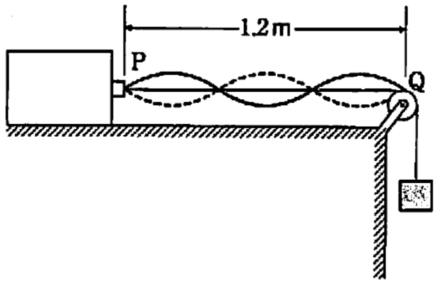
基本振動



２倍振動



＜例題１＞



弦の一端を振動子 P につなぎ，他端は滑車 Q を経ておもりにつなぎ，PQ の部分を水平に張った。振動子の振動数を 1.2×10^2 Hz にして，PQ の長さを 1.2m にすると，図のように弦に 3 個の腹をもつ定常波が生じた。
次の問いに答えよ。

（1）次の文中の $\boxed{\text{ア}}$，$\boxed{\text{イ}}$ に適する語句を埋めよ。

振動子 P から出た波は Q で $\boxed{\text{ア}}$ する。よって PQ 間では逆向きに進む波が重なって $\boxed{\text{イ}}$ し，波が進まないように見える定常波ができる。

（2）弦を伝わる波の波長 λ [m]を求めよ。

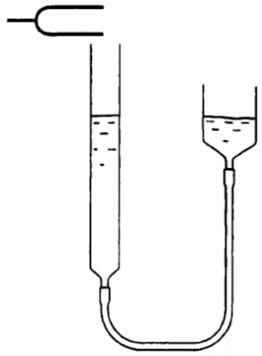
（3）弦を伝わる波の速さ v[m/s]を求めよ。

（4）PQ の長さとおもりは変えないで，振動子の振動数を変えたところ，4 個の腹をもつ定常波に変化した。このときの振動子の振動数 f [Hz]を求めよ。

＜例題２＞

右図のような気柱共鳴装置で，管口付近でおんさを鳴らしながら，水面を管口の所から少しずつ下げていったところ，水面の高さが管口から 16.0cm の所で初めて共鳴し，50.0cm の所で 2 回目の共鳴が起こった。

このときの音速を 340m/s として，次の問いに答えよ。



（１）共鳴音の波長を求めよ。

（２）おんさの振動数を求めよ。

（３）開口端補正はいくらか。

（４）2 回目の共鳴が起こったとき，次の場所は管口から測って何 cm の所か。
ただし，管口より上の部分は考えなくてよい。

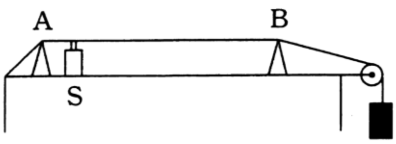
(ア)　空気が振動しない所　　　(イ)　空気の振動が最も激しい所

(ウ)　空気の圧力の変化が最も激しい所

【１】全体の長さが 120cm，質量 1.8g の弦の右端に滑車を通して質量 6kg のおもりをつるし，振動源 S によって弦を振動させる。この弦は，コマ B を動かすことにより任意の一点を固定できる。振動する AB 間の距離を a，重力加速度を $10\mathrm{m/s^2}$ とする。

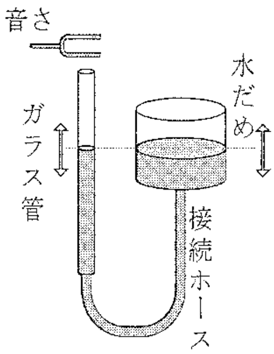
（１）コマ B を適当に動かすと，$a = 30\mathrm{cm}$ で弦が共振する。さらに B を右に移動していくと，$a = 35\mathrm{cm}$ で再び弦が共振する。したがって，弦を伝わる横波の波長は $\boxed{\ 1\ }$ cm であり，このときの AB 間の腹の数は $\boxed{\ 2\ }$ 個である。また S の振動数は $\boxed{\ 3\ }$ Hz である。また，$a = 35\mathrm{cm}$ をそのままにし，おもりを 4 倍に増やしたとき，弦は共振しなくなった。弦を再び共振させるには，B を少なくとも $\boxed{\ 4\ }$ cm 右に移動しなければならない。

（２）もとの弦と同じ材質，同じ長さで直径が 2 倍の弦に張り替えて，a を 30cm にし，おもりの質量を 6kg に戻す。このとき弦は共振し，AB 間の腹の数は $\boxed{\ 5\ }$ 個となる。また，AB 間の腹の数を 3 個とするには，S の振動数を $\boxed{\ 6\ }$ Hz とすればよい。



【２】（2011 年 石川県立大）

下図に示す装置は，水だめを上下させることにより，長いガラス管の中の水面を上下させて気柱の長さを変えることができる。この装置を用いて，音さの振動数を測定する実験を行った。音さを振動させて管口に近づけ，水面をゆっくり下げていったところ，水面が管口から 12cm と 40cm の位置で音が共鳴して大きくなった。なお，空気中の音速を 340m/s とする。



（１）音さと何が共鳴して音が大きくなったのか。

（２）共鳴音の波長は何 cm か。

（３）40cm の次に共鳴するのは，水面が管口から何 cm の位置になったときか。

（４）この音さの振動数はいくらか。

（５）気温が高くなると共鳴を起こす水面の位置はどうなるか，理由を含めて説明せよ。

（６）水面にドライアイスを浮かせてしばらくたってから実験すると，共鳴を起こす水面の位置はどうなるか，理由を含めて説明せよ。なお，二酸化炭素中の音速は，0℃で 258m/s とする。