

【14 音の性質】

・音速

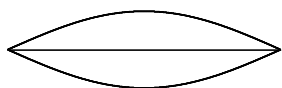
$$V = 331.5 + 0.6t \text{ [m/s]}$$

・うなりの回数

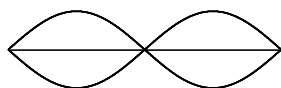
$$f = |f_1 - f_2| \text{ [回]}$$

・弦の振動

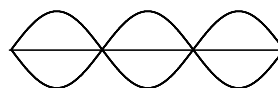
基本振動



2 倍振動

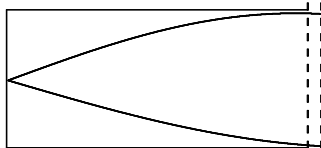


3 倍振動



・閉管の振動

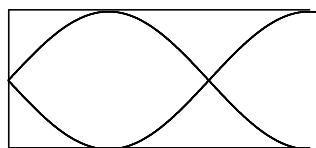
基本振動



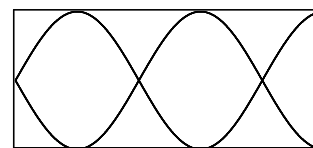
Δl 開口端補正



3 倍振動

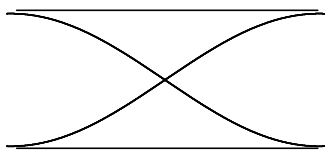


5 倍振動

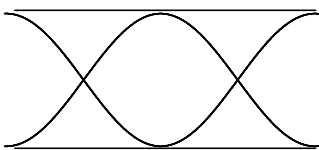


・開管の振動

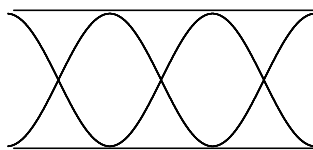
基本振動



2 倍振動



3 倍振動



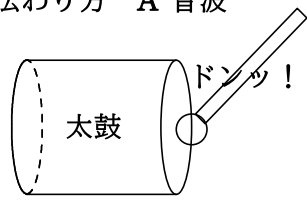
・ドップラー効果

$$f = \frac{V - v_{\text{観測者}}}{V - v_{\text{音源}}} f_0 \text{ [Hz]}$$

()年 ()科 ()組 ()番 名前()

第2章 音

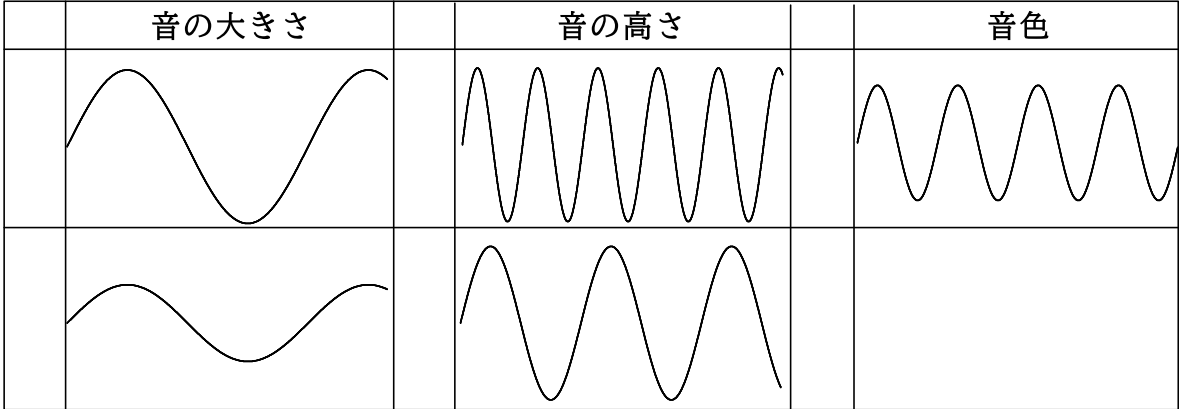
1 音の伝わり方 A 音波



音波... 空気を振動させて伝わる「 」波



B 音の大きさ・高さ・音色



「 」で決まる。 「 」で決まる。 「 」で決まる。

C 音の速さ

【音速】

※この式から普段よく聞く「音速340m/s」は「15℃」のときの音速であることがわかりますね。

D 音の伝わり方

① 音の反射

音も壁に当たると反射します。 往復していることに注意です！

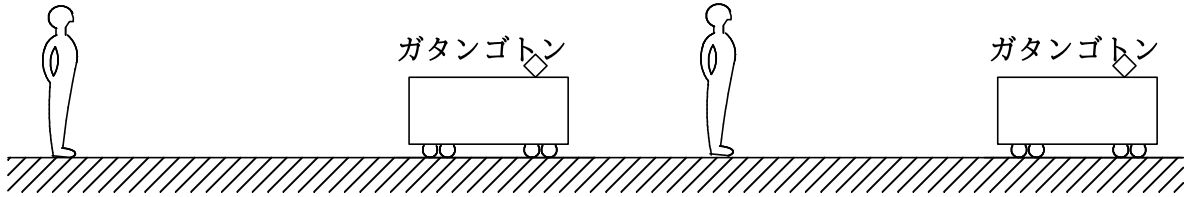
② 音の屈折

夏の昼

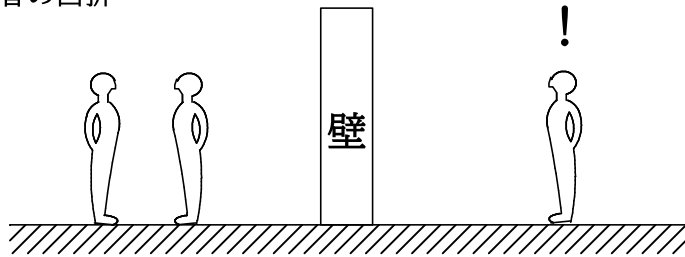
20℃
25℃
30℃

冬の夜

15℃
10℃
5℃

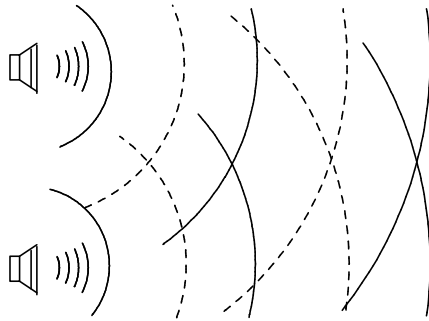


③ 音の回折



音も回折します。壁の向こう側の音が聞こえるのはこのためです。

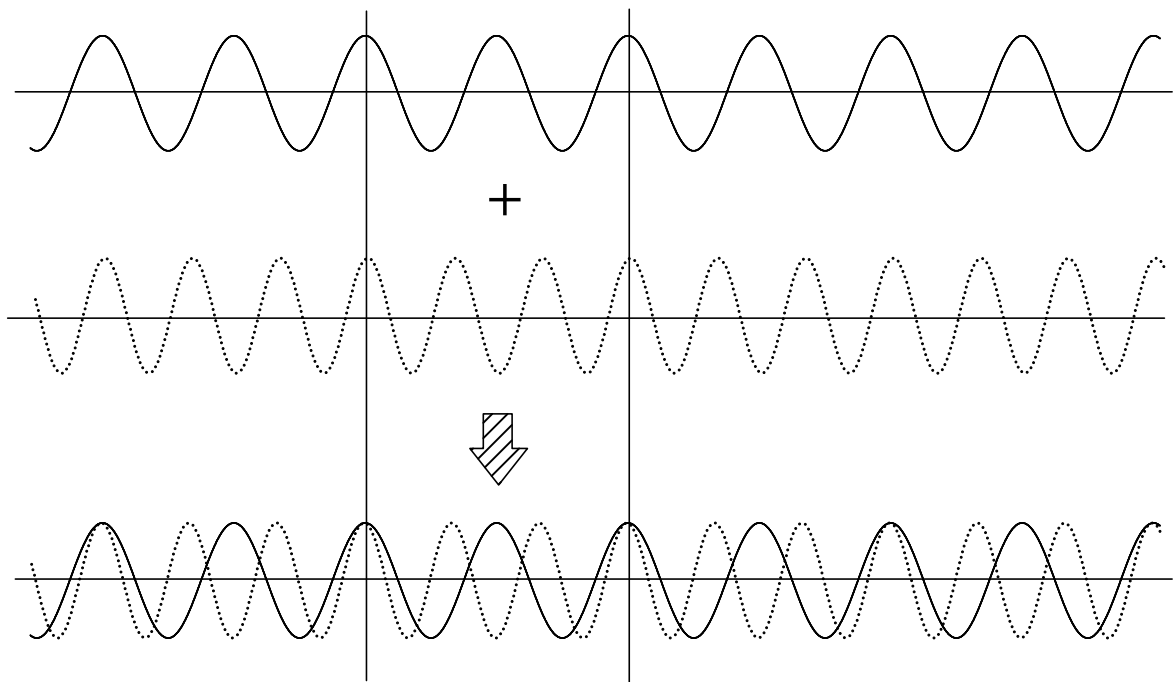
④ 音の干渉



音も干渉します。強めあったり弱めあったりするのです。

E うなり

わずかに異なる振動数の音を同時に鳴らすと「ウォンウォン」と聞こえますよね。それが「」です。1秒間あたりのうなりの回数を f [回/s] とします。



【うなりの回数】

- 1 図のように、容器の中に目覚まし時計を入れて鳴らしながら、容器内の気体を抜いていく。このとき、目覚まし時計の音の聞こえ方はどのように変化していくか。理由とともに説明してみよう。



解答 音波を伝える媒質である空気がなくなっていくため、音はしだいに小さくなっていく。

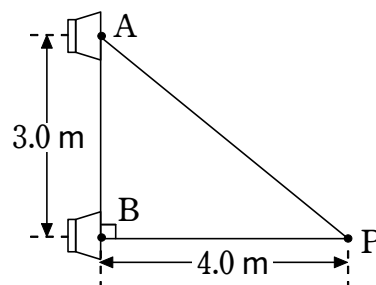
- 2 次の温度の空気中を伝わる音の速さは何 m/s か。音の速さは $V = 331.5 + 0.6t$ にしたがうものとして、小数点以下を四捨五入して答えよ。
(1) -10°C (2) 15°C (3) 30°C

解答 (1) 326 m/s (2) 341 m/s (3) 350 m/s

- 3 壁に向かって手をたたいて音を出したところ、0.40 秒後に壁からの反射音が聞こえた。音の速さを 3.4×10^2 m/s とすると壁までの距離は何 m か。

音が壁に当たって反射してもどってくるまでの時間は 0.40 秒であるから、音が壁に届くまでの時間は 0.20 秒である。壁までの距離 l [m] は $l = (3.4 \times 10^2) \times 0.20 = 68$ m

- 4 図のように、2つのスピーカー A, B が、同位相で振動数 1.7×10^2 Hz の音を出している。音の速さを 3.4×10^2 m/s とする。
(1) 音の波長 λ [m] を求めよ。
(2) 点 P は、音が強めあう点か、弱めあう点か。



指針 (2) 2つのスピーカーは同位相の音を出すので、距離の差 $|AP - BP|$ が「波長の整数倍」のときは強めあう点、「波長の整数倍 + 半波長」のときは弱めあう点になる。

解答 (1) 「 $v = f\lambda$ 」より

$$3.4 \times 10^2 = (1.7 \times 10^2) \times \lambda \quad \text{よって} \quad \lambda = 2.0 \text{ m}$$

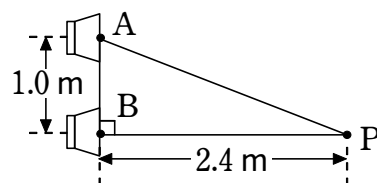
(2) 問題の図より $BP = 4.0$ m

また、三平方の定理より $AP = \sqrt{3.0^2 + 4.0^2} = 5.0$ m

よって $|AP - BP| = 1.0 \text{ m} = \frac{\lambda}{2}$

ゆえに、点 P では、スピーカー A, B からの距離の差が「波長の整数倍 + 半波長」になり、音波が逆位相で重なりあうので、弱めあう点となる。

- 5 図のように、2つのスピーカー A, B が、逆位相で振動数 8.5×10^2 Hz の音を出している。音の速さを 3.4×10^2 m/s とする。点 P は、音が強めあう点か、弱めあう点か。



音の波長を λ [m] とする。

$$v = f\lambda \text{ より } 3.4 \times 10^2 = (8.5 \times 10^2) \times \lambda \text{ よって } \lambda = 0.40 \text{ m}$$

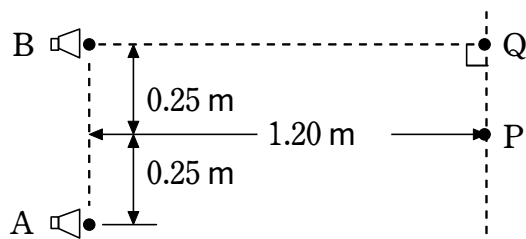
問題の図より $BP = 2.4 \text{ m}$

$$\text{また、三平方の定理より } AP = \sqrt{1.0^2 + 2.4^2} = 2.6 \text{ m}$$

$$\text{よって } |AP - BP| = 0.2 \text{ m} = \frac{\lambda}{2}$$

ゆえに、点 P では、スピーカー A, B からの距離の差が「波長の整数倍+半波長」となる。ところが、音はスピーカー A, B から逆位相で出るので、音波は点 P で同位相で重なりあい、点 P は強めあう点となる。

- 6 図のように、A, B の小さな 2 つのスピーカーから振動数の等しい、同位相の音を出す。マイクを、点 P から AB と平行に移動していくと、音はしだいに小さくなってから大きくなり、点 Q で極大になった。音の速さを 3.4×10^2 m/s とする。



(1) 2つのスピーカーの音の振動数 f [Hz] を求めよ。

(2) この状態から、2つのスピーカーが出す音の振動数を徐々に大きくする。点 Q で次に音の大きさが極大になるときの音の振動数 f' [Hz] を求めよ。

- (1) 点 P は、スピーカー A, B から等距離にあり、音が強めあう。

$$AP - BP = 0$$

また点 Q は、マイクを移動していったときに最初に音が強めあう点である。したがって、音の波長を λ とすると

$$AQ - BQ = \lambda \quad \dots\dots \textcircled{1}$$

$$\text{三平方の定理より } AQ = \sqrt{1.20^2 + 0.50^2} = 1.30 \text{ m}$$

また、 $BQ = 1.20 \text{ m}$ であるから

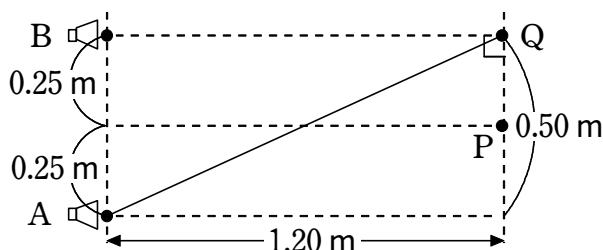
$$1.30 - 1.20 = \lambda \text{ よって } \lambda = 0.10 \text{ m}$$

$$V = f\lambda \text{ より } f = \frac{V}{\lambda} = \frac{3.4 \times 10^2}{0.10} = 3.4 \times 10^3 \text{ Hz}$$

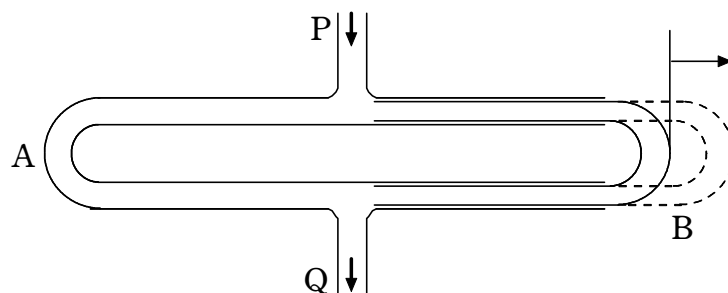
(2) 振動数を大きくしていくと波長が小さくなり、①式を満たさなくなる。音が再び極大になるときの音の波長を λ' とすると

$$AQ - BQ = 2\lambda' \quad 1.30 - 1.20 = 2\lambda'$$

$$\text{より } \lambda' = 0.050 \text{ m} \text{ よって } f' = \frac{V}{\lambda'} = \frac{3.4 \times 10^2}{0.050} = 6.8 \times 10^3 \text{ Hz}$$



- 7 図のように、点 P から音を入れ、左右 2 つの経路 (PAQ と PBQ) を通った音を干渉させて点 Q で音を聞く装置 (クインケ管という) がある。初めは管 B を完全に入れた状態であり、このとき 2 つの経路の長さは等しい。点 P から一定の振動数の音を入れながら、管 B を徐々に引き出したところ、音が小さくなっていき、0.10 m 引き出したときに最小になった。音の波長 λ [m] を求めよ。



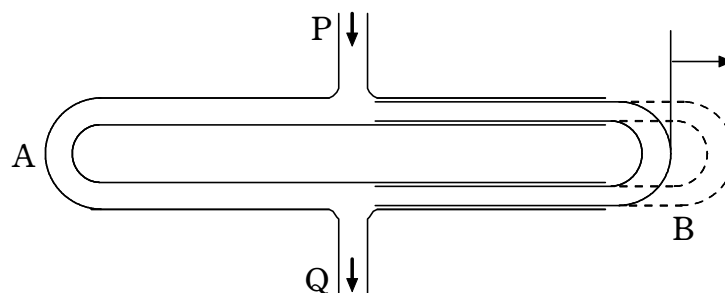
【指針】 音が最小になるのは、経路の差が半波長となる位置であることをふまえて考える。

【解答】 管を 0.10 m 引き出すと 2 つの経路の長さの差は $2 \times 0.10 = 0.20$ m となる。この

経路の差が半波長に等しいとき、音は弱めあって最小になるから $0.20 = \frac{\lambda}{2}$ よって

$$\lambda = 2 \times 0.20 = 0.40 \text{ m}$$

- 8 図のように、点 P から音を入れ、左右 2 つの経路 (PAQ と PBQ) を通った音を干渉させて点 Q で音を聞く装置 (クインケ管という) がある。初めは管 B を完全に入れた状態であり、このとき 2 つの経路



の長さは等しい。点 P から一定の振動数の音を入れながら、管 B を徐々に引き出したところ、0.17 m 引き出したときに音が最小になった。音の波長 λ [m] と振動数 f [Hz] を求めよ。管の内部を伝わる音の速さを 3.4×10^2 m/s とする。

管を 0.17 m 引き出すと 2 つの経路の長さの差は $2 \times 0.17 = 0.34$ m となる。

この経路の差が波長の半分に等しいとき、音は弱めあって最小になる。

$$\text{よって } 0.34 = \frac{\lambda}{2}$$

$$\text{したがって } \lambda = 0.34 \times 2 = 0.68 \text{ m}$$

$$「v = f\lambda」より \quad f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3.4 \times 10^2}{0.68} = 5.0 \times 10^2 \text{ Hz}$$

- 9 おんさ A と、振動数 400 Hz のおんさ B を同時に鳴らすと、毎秒 4 回のうなりが聞こえた。おんさ A の振動数は何 Hz か。なお、おんさ A の振動数はおんさ B の振動数より大きいとする。

おんさ A の振動数を f_A [Hz] とする。毎秒 4 回のうなりが聞こえたので

$$|f_A - 400| = 4$$

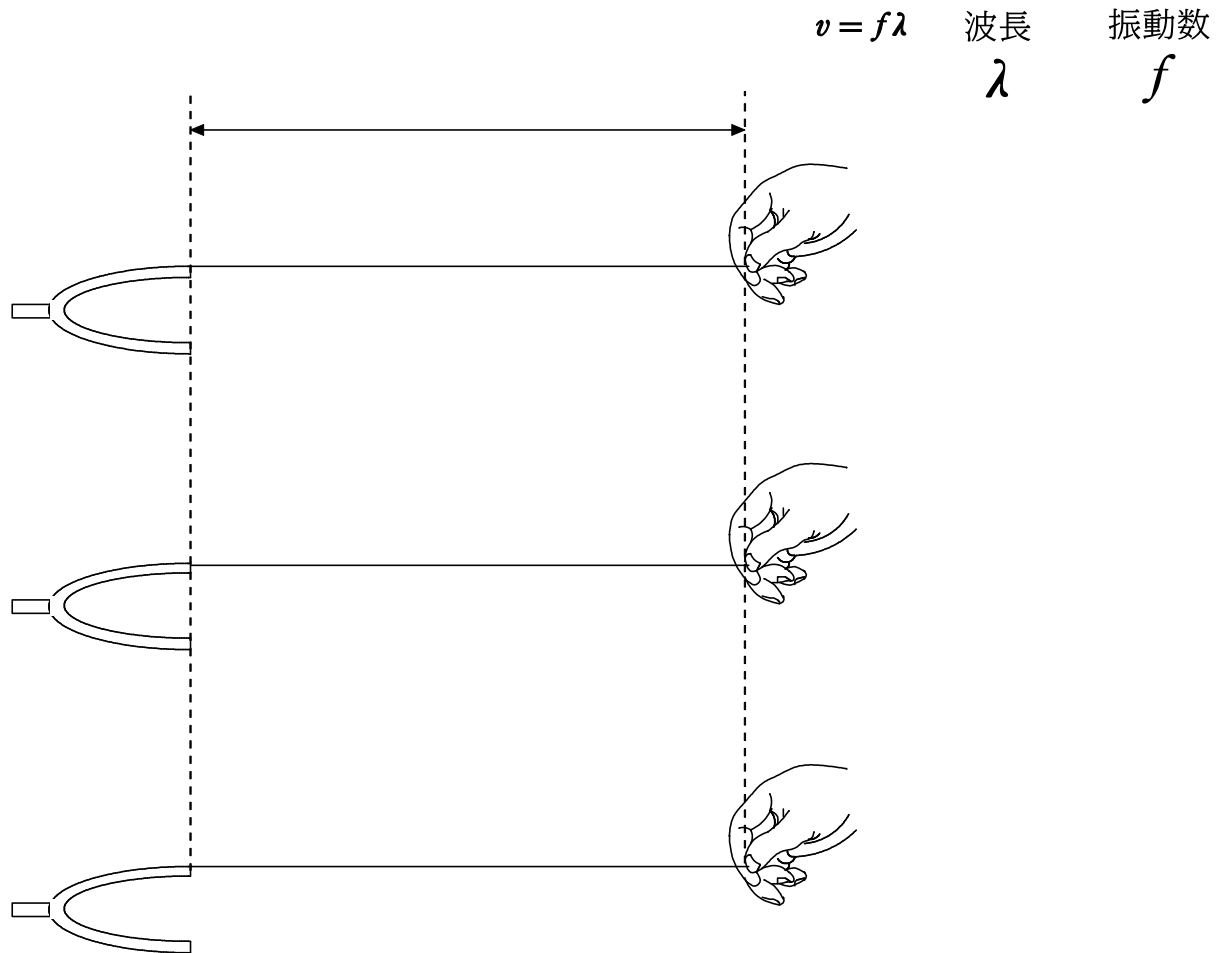
$$\text{より } f_A = 404 \text{ Hz} \quad \text{または} \quad f_A = 396 \text{ Hz}$$

$$f_A > 400 \text{ Hz} \quad \text{であるから} \quad f_A = 404 \text{ Hz}$$

2 発音体の振動と共振・共鳴

A 弦の振動

弦やひもを振動させたとき、両端が節となる定常波ができることがあります。その振動のことを「固有振動」といいます。そしてその振動数のことを「固有振動数」といいます。



※ 弦を伝わる波の速さは、 $v = \sqrt{\frac{S}{\rho}}$ [m/s] で表されます。（ S は張力、 ρ は線密度）

- 1 両端を固定した弦について 3 倍振動を生じさせた。このとき、波長と振動数は基本振動の何倍となるか。

【解答】 波長： $\frac{1}{3}$ 倍，振動数：3 倍

- 2 両端を固定した弦について，定在波を作図し，弦を伝わる波の波長，および固有振動数を求めよ。
弦の長さ 0.60 m，波の速さ $v = 96 \text{ m/s}$

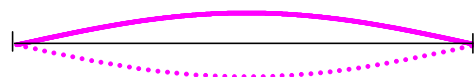
(a) 基本振動

波長 λ_1

[1.2 m]

固有振動数 f_1

[80 Hz]



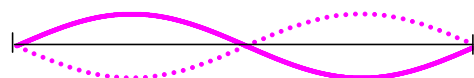
(b) 2 倍振動

波長 λ_2

[0.60 m]

固有振動数 f_2

[$1.6 \times 10^2 \text{ Hz}$]



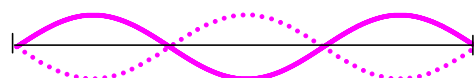
(c) 3 倍振動

波長 λ_3

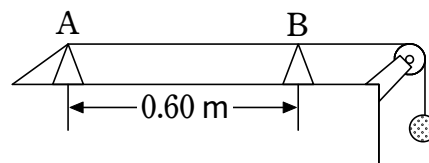
[0.40 m]

固有振動数 f_3

[$2.4 \times 10^2 \text{ Hz}$]



- 3 図のように，間隔が 0.60 m の 2 つの支点 A，B の間に弦を張り，一端におもりをつり下げた。この弦を振動させて，腹の数が 2 個の定在波を生じさせたとき，その振動数は $4.0 \times 10^2 \text{ Hz}$ であった。



(1) 弦を伝わる波の波長 $\lambda_2 [\text{m}]$ と速さ $v [\text{m/s}]$ を求めよ。

(2) 次に，異なる振動数で弦を振動させて，腹の数が 3 個の定在波を生じさせた。このときの振動数 $f_3 [\text{Hz}]$ を求めよ。

- (1) 図のように，A，B 間の定在波の腹の数は 2 個であるから，弦の長さは半波長 2 個分，すなわち，波長 $\lambda_2 [\text{m}]$ に等しい。

$$\lambda_2 = 0.60 \text{ m}$$

また，「 $v = f\lambda$ 」より

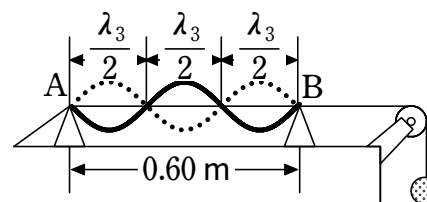
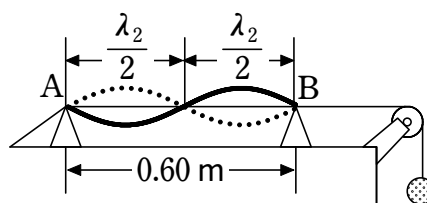
$$v = (4.0 \times 10^2) \times 0.60 = 2.4 \times 10^2 \text{ m/s}$$

- (2) 図のように，A，B 間の定在波の腹の数は 3 個である。このとき，弦の長さは半波長 3 個分となる。弦を伝わる波の波長を $\lambda_3 [\text{m}]$ とすると

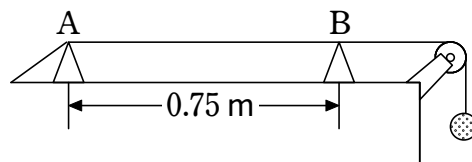
$$0.60 = 3 \times \frac{\lambda_3}{2} \quad \text{よって} \quad \lambda_3 = 0.40 \text{ m}$$

$$\text{「} v = f\lambda \text{」より} \quad 2.4 \times 10^2 = f_3 \times 0.40$$

$$\text{ゆえに} \quad f_3 = 6.0 \times 10^2 \text{ Hz}$$



- 4 図のように、間隔が 0.75 m の2つの支点 A, B の間に弦を張り、一端におもりをつり下げた。この弦を振動させて、腹の数が3個の定在波を生じさせたとき、その振動数は $3.0 \times 10^2 \text{ Hz}$ であった。



- (1) 弦を伝わる波の波長 $\lambda_3 [\text{m}]$ と速さ $v [\text{m/s}]$ を求めよ。
 (2) 弦を振動数 $2.0 \times 10^2 \text{ Hz}$ で振動させたところ、弦に生じる定在波の腹の数が変化した。
 このときの定在波の腹の数を求めよ。

(1) 定在波の腹の数は3個なので、3倍振動が生じている。よって、

$$「\lambda_m = \frac{2l}{m}」より \quad \lambda_3 = \frac{2 \times 0.75}{3} = 0.50 \text{ m}$$

$$\text{また, } 「v = f\lambda」より \quad v = (3.0 \times 10^2) \times 0.50 = 1.5 \times 10^2 \text{ m/s}$$

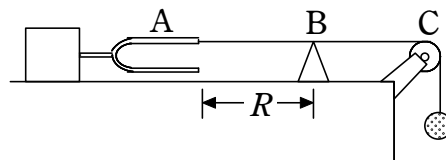
(2) 「 $f_m = m \cdot \frac{v}{2l}$ 」より、固有振動数 f_m と腹の数 m は比例する。

$$\text{よって } 3 \times \frac{2.0 \times 10^2}{3.0 \times 10^2} = 2 \text{ 個}$$

- 5 線密度が $2.0 \times 10^{-4} \text{ kg/m}$ の弦の両端を、大きさ 0.98 N の力で引いて固定した。この弦を伝わる波の速さは何 m/s か。

$$「v = \sqrt{\frac{S}{\rho}}」より \quad v = \sqrt{\frac{0.98}{2.0 \times 10^{-4}}} = \sqrt{49 \times 10^2} = 70 \text{ m/s}$$

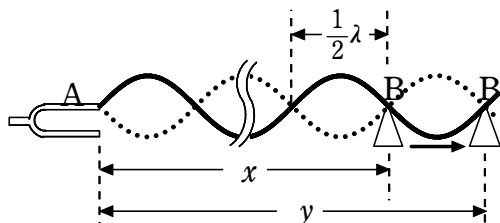
- 6 図のように、弦の両端におんさA(振動数 $f [\text{Hz}]$)とおもりが取り付けられている。こまBはAと滑車Cの間を移動して任意の1点で弦を固定することができる。おんさを連続的に振動させながらBを適当に動かすと、AB間の弦の長さ R の値が $x [\text{m}]$



のとき、弦が共振した。引き続きBをCへ向かってゆっくり移動させると、 R の値が $y [\text{m}]$ のとき、再び共振した。

- (1) 弦を伝わる横波の波長 $\lambda [\text{m}]$ を求めよ。
 (2) この実験では、おんさと弦は等しい振動数で振動している。弦を伝わる波の速さ $v [\text{m/s}]$ はいくらか。

題意により、弦には下図のような定在波ができています。



- (1) 横波の波長を $\lambda [\text{m}]$ とすると、図より

$$\frac{1}{2}\lambda = y - x \quad \text{ゆえに} \quad \lambda = 2(y - x) [\text{m}]$$

- (2) 弦を伝わる波の速さを $v [\text{m/s}]$ とすると、「 $v = f\lambda$ 」より $v = 2f(y - x) [\text{m/s}]$

B 気柱の振動

管楽器は、吹き込む息による音と、反射した音が重なり合って定常波をつくるときに大きな音となり、きれいな音色が聞こえるのです。

閉管

$v = f\lambda$

波長
 λ

振動数
 f

空気が自由に動けない
 へいこうたん
 閉口端は

空気が自由に動ける
 かいこうたん
 開口端は

開管

$v = f\lambda$

波長
 λ

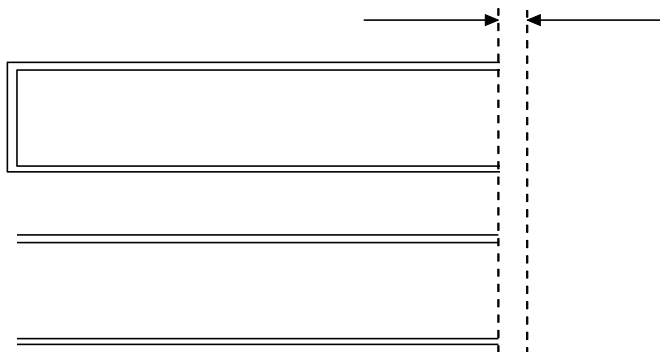
振動数
 f

空気が自由に動ける
 かいこうたん
 開口端は

空気が自由に動ける
 かいこうたん
 開口端は

開口端補正

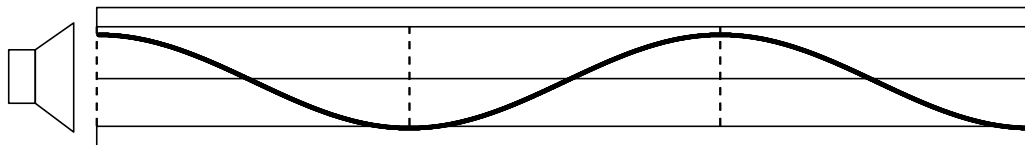
実際は、開口端の少し外側に定常波の腹ができるのです。これを「」といいます。
(コップにジュースを注いだときにできる表面張力のようなものですね。)



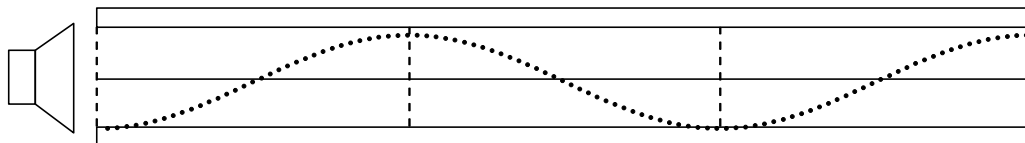
気柱の圧力変化

音は縦波だという話をしましたが、縦波には「密」部と「疎」部が存在します。音の媒質は空気なので、「密」部では空気が集まるため「圧力が大きく」なり、「疎」部では空気が散るため「圧力が小さく」なります。さらに気柱の固有振動は定常波だということにも注意します。

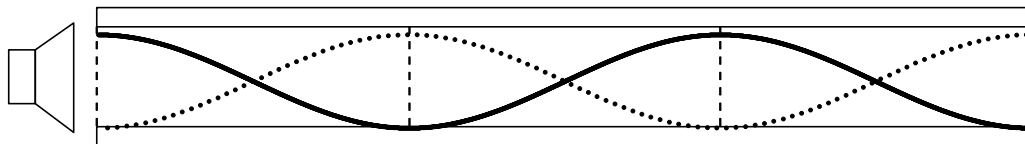
ある瞬間の
定常波



ある瞬間の
定常波



定常波

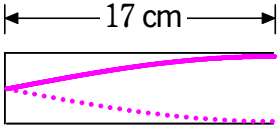
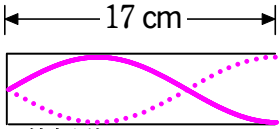
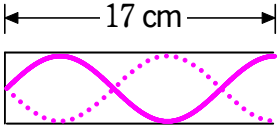


定常波の「」の部分で最も圧力の変化が大きく、「」の部分では圧力変化が小さくなります。

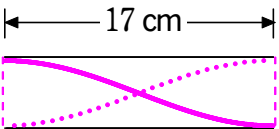
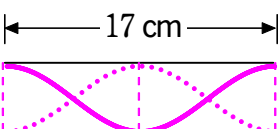
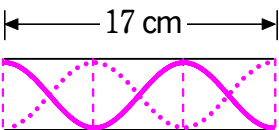
共振・共鳴

どんな物体にも「固有振動」というものが存在します。その固有振動数にあった力を加えると、小さな力でも振動がどんどん増幅していき、大きな振動になってしまうことがあります。これを「共振」または「共鳴」といいます。

- 1 閉管内に生じる音波の定在波を作図し、次の値を求めよ。なお、音の速さを 340m/s とし、管口の位置を腹とする。答えの数値は有効数字 2 桁で示せ。

- (1) 基本振動 波長 λ_1

 $[0.68 \text{ m }]$
 固有振動数 f_1
 $[5.0 \times 10^2 \text{ Hz }]$
- (2) 3 倍振動 波長 λ_3

 $[0.23 \text{ m }]$
 固有振動数 f_3
 $[1.5 \times 10^3 \text{ Hz }]$
- (3) 5 倍振動 波長 λ_5

 $[0.14 \text{ m }]$
 固有振動数 f_5
 $[2.5 \times 10^3 \text{ Hz }]$

- 2 開管内に生じる音波の定在波を作図し、次の値を求めよ。なお、音の速さを 340m/s とし、管口の位置を腹とする。答えの数値は有効数字 2 桁で示せ。

- (1) 基本振動 波長 λ_1

 $[0.34 \text{ m }]$
 固有振動数 f_1
 $[1.0 \times 10^3 \text{ Hz }]$
- (2) 2 倍振動 波長 λ_2

 $[0.17 \text{ m }]$
 固有振動数 f_2
 $[2.0 \times 10^3 \text{ Hz }]$
- (3) 3 倍振動 波長 λ_3

 $[0.11 \text{ m }]$
 固有振動数 f_3
 $[3.0 \times 10^3 \text{ Hz }]$

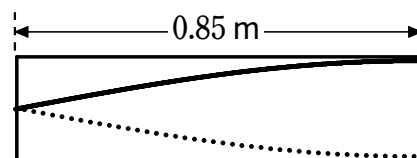
- 3 長さ 0.85 m の閉管内の気柱が基本振動するとき、出る音の振動数は何 Hz か。音の速さを $3.4 \times 10^2 \text{ m/s}$ 、管口の位置を腹とする。

長さ 0.85 m の閉管内の気柱が基本振動するときの

波長 $\lambda_1 [\text{m}]$ は $\lambda_1 = \frac{4 \times 0.85}{1} = 3.4 \text{ m}$

このときの振動数 $f_1 [\text{Hz}]$ は「 $V = f\lambda$ 」より

$$f_1 = \frac{V}{\lambda_1} = \frac{3.4 \times 10^2}{3.4} = 1.0 \times 10^2 \text{ Hz}$$



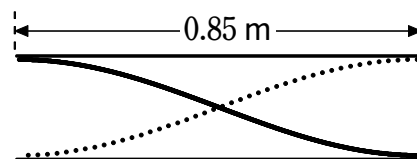
- 4 長さ 0.85 m の開管内の気柱が基本振動するとき、出る音の振動数は何 Hz か。音の速さを 3.4×10^2 m/s, 管口の位置を腹とする。

長さ 0.85 m の開管内の気柱が基本振動するときの

波長 λ_1 [m] は $\lambda_1 = \frac{2 \times 0.85}{1} = 1.7$ m

このときの振動数 f_1 [Hz] は「 $V = f\lambda$ 」より

$$f_1 = \frac{V}{\lambda_1} = \frac{3.4 \times 10^2}{1.7} = 2.0 \times 10^2 \text{ Hz}$$



- 5 両端が開いた管を使って気柱の共鳴実験をしたところ、ある振動数の音で共鳴した。そのとき定在波の節は 4 か所あり、管の長さは 68 cm であった。音の速さを 340 m/s とし、管口の位置を腹とする。
- (1) 共鳴した音波の波長は何 cm か。
 - (2) 共鳴した音波の振動数は何 Hz か。
 - (3) この気柱の基本振動数は何 Hz か。

(1) 開管内の気柱には、両側の開口端がともに腹となるような定在波が生じている。

定在波の節と腹の間隔は $\frac{1}{4}$ 波長である。管の長さは、

この間隔 8 つ分になるので波長 λ [cm] は

$$\frac{\lambda}{4} \times 8 = 68 \quad \text{より} \quad \lambda = 34 \text{ cm}$$

(2) 音の速さを V [m/s], 共鳴音の振動数を f [Hz] として、波の基本式「 $V = f\lambda$ 」より

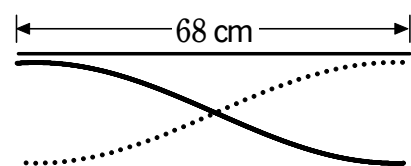
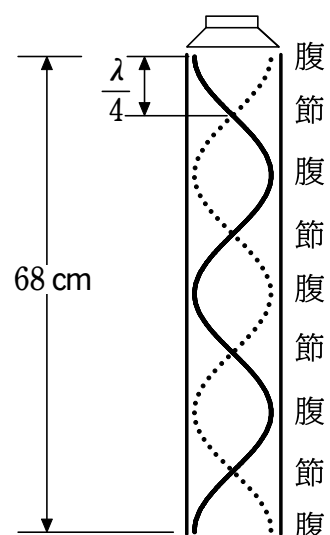
$$f = \frac{V}{\lambda} = \frac{340}{34 \times 10^{-2}} = 1.0 \times 10^3 \text{ Hz}$$

(3) 基本振動のときは右図のようになる。このときの波長 λ_1 [cm] は

$$\lambda_1 = 68 \times 2 = 136 \text{ cm}$$

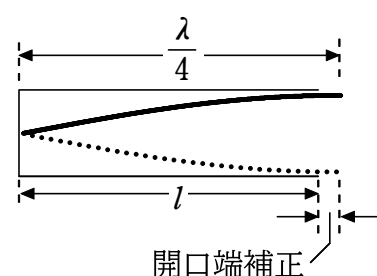
よって、基本振動数 f_1 は

$$f_1 = \frac{V}{\lambda_1} = \frac{340}{136 \times 10^{-2}} = 2.5 \times 10^2 \text{ Hz}$$

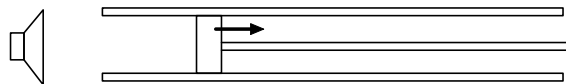


- 6 長さ l [m] の閉管内で波長 λ [m] の音が基本振動している。腹の位置は管口の位置からいくら離れているか。 l , λ を用いて表せ。

閉管内で基本振動しているとき、管底から腹の位置までの距離は $\frac{\lambda}{4}$ [m] である。したがって、管口から腹の位置までの距離は $\frac{\lambda}{4} - l$ [m] となる。



- 7 図のように、ガラス管にピストンを取りつけて閉管とし、この管口の近くにスピーカーを置いて振動数が一定の音を出した。ピスト



ンの位置を管口から徐々に遠ざけていくと、管口からの距離が近いほうから順に 7.0 cm, 24.0 cm の位置で気柱の固有振動が起こった。開口端補正 Δl [cm] は常に一定とする。

- (1) 音の波長 λ [cm] を求めよ。
- (2) 開口端補正 Δl [cm] を求めよ。

【指針】 定在波を図にかき、管の長さと言の波長の関係を考える。開口端補正は、開口が定在波の腹にならないことに注意して求める。

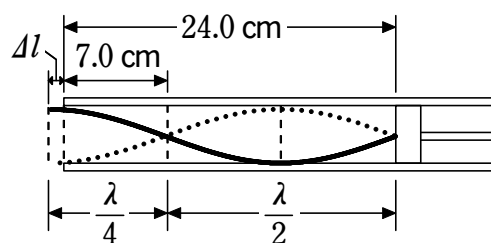
【解答】 (1) 気柱に発生する定在波のようすは図のようになる。7.0 cm, 24.0 cm の位置で固有振動が発生し、その距離の差が半波長に等しいので $24.0 - 7.0 = \frac{\lambda}{2}$

$$24.0 - 7.0 = \frac{\lambda}{2}$$

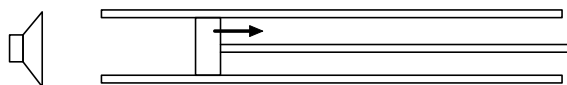
$$\text{よって } \lambda = 2 \times (24.0 - 7.0) = 2 \times 17.0 = 34.0 \text{ cm}$$

- (2) 最初に固有振動が起こるときの、ピストンと管口との距離 7.0 cm に開口端補正 Δl を加えると、4 分の 1 波長となる。

$$7.0 + \Delta l = \frac{\lambda}{4} \quad \text{よって} \quad \Delta l = \frac{34.0}{4} - 7.0 = 1.5 \text{ cm}$$



- 8 図のように、ガラス管にピストンを取りつけて閉管とし、この管口の近くにスピーカーを置いて振動数が一定の音を出した。



ピストンの位置を管口から徐々に遠ざけていくと、管口からの距離が近いほうから順に 5.0 cm, 17.4 cm の位置で気柱の固有振動が起こった。開口端補正 Δl [cm] は常に一定とする。

- (1) 音の波長 λ [cm] を求めよ。
- (2) 開口端補正 Δl [cm] を求めよ。
- (3) 次に気柱の固有振動が起こるのは、ピストンがどの位置のときか。

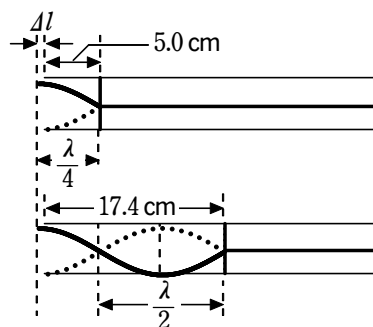
- (1) 5.0 cm, 17.4 cm の位置で固有振動となるから、この距離の差が半波長となる。

$$17.4 - 5.0 = \frac{\lambda}{2}$$

$$\text{よって } \lambda = 2 \times (17.4 - 5.0) = 24.8 \text{ cm}$$

- (2) 最初に固有振動が起こるときの、ピストンと管口との距離 5.0 cm に開口端補正 Δl を加えると、4 分の 1 波長となる。

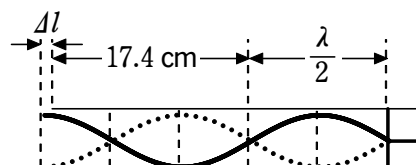
$$5.0 + \Delta l = \frac{\lambda}{4} \quad \text{よって} \quad \Delta l = \frac{24.8}{4} - 5.0 = 1.2 \text{ cm}$$



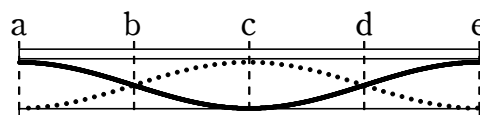
- (3) 次に固有振動が起こるのは、17.4 cm の位置からさらに $\frac{\lambda}{2}$ だけピストンを管口から遠ざけたときである。

$$17.4 + \frac{\lambda}{2} = 17.4 + \frac{24.8}{2} = 29.8 \text{ cm}$$

よって、管口から 29.8 cm の距離のときとなる。



- 9 図のように、開管に2倍振動を生じさせた。
空気の圧力(密度)が最も大きく変化する点を
a~eからすべて選べ。



気柱の振動が図の実線で表されているとき、最も圧力が高い(密な)点はb、最も圧力が低い(疎な)点はdである。半周期後、気柱の振動が図の破線で表されているとき、最も圧力が高い(密な)点はd、最も圧力が低い(疎な)点はbである。すなわち、定在波の節となるbとdは、半周期ごとに圧力(密度)の最大と最小をくり返す。したがって、空気の圧力(密度)の時間変化が最大の点は**bとd**である。

- 10 開管内に振動数が 4.5×10^2 Hzの音を入れたところ、3倍振動が発生した。振動数を徐々に大きくしていくとき、次に固有振動が起こるときの振動数 f [Hz]を求めよ。



なお、管口の位置を腹とする。

開管の長さを l [m]、音の速さを V [m/s]とする。開管内の気柱が m 倍振動したとき、その波長 λ_m [m]は $\lambda_m = \frac{2l}{m}$ ($m=1, 2, 3, \dots$)

であるから、3倍振動では $\lambda_3 = \frac{2l}{3}$ となる。

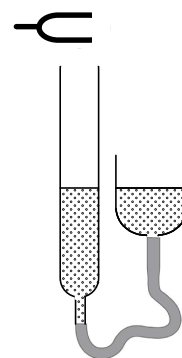
であるから、3倍振動では $\lambda_3 = \frac{2l}{3}$ となる。

したがって「 $V = f\lambda$ 」より $V = (4.5 \times 10^2) \times \frac{2l}{3}$ ①

一方、開管内の気柱が4倍振動すると $\lambda_4 = \frac{2l}{4}$ であるから $V = f \times \frac{2l}{4}$ ②

①, ②式より $(4.5 \times 10^2) \times \frac{2l}{3} = f \times \frac{2l}{4}$ よって $f = (4.5 \times 10^2) \times \frac{4}{3} = 6.0 \times 10^2$ Hz

- 11 図のような、水の入った円筒管がある。円筒管の上端近くで振動数 6.00×10^2 Hzのおんさを鳴らしながら、円筒管の水面の位置を少しずつ下げていったところ、管口から水面までの距離が13.6 cmのとき初めて共鳴が起こり、次に42.6 cmになったとき再び共鳴が起こった。開口端補正 Δl [cm]は常に一定とする。



(1) このときの音の速さ V [m/s]を求めよ。

(2) 開口端補正 Δl [cm]を求めよ。

(1) このときの波長を λ [m]とすると

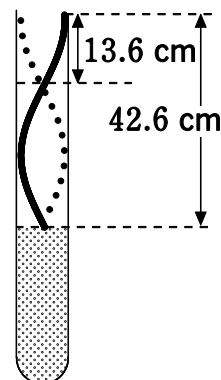
$$\frac{\lambda}{2} = (42.6 - 13.6) \times 10^{-2} \quad \text{よって} \quad \lambda = 0.58 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{「} V = f\lambda \text{」より} \quad V &= (6.00 \times 10^2) \times 0.58 \\ &= 3.48 \times 10^2 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$(2) \Delta l = \frac{\lambda}{4} - (13.6 \times 10^{-2})$$

$$= \frac{0.58}{4} - (13.6 \times 10^{-2})$$

$$= 0.009 \text{ m} = 0.9 \text{ cm}$$



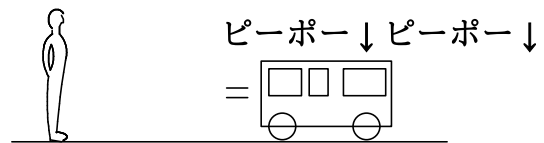
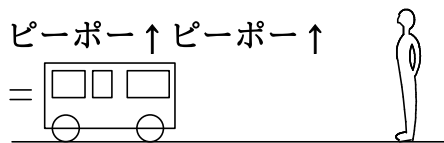
3 音のドップラー効果

A ドップラー効果

- ・ 救急車が通り過ぎるとき
 - ・ 電車に乗っていて踏切を通り過ぎるとき
- その前後で「音の高さ」が変わりますよね。それが、



です！！

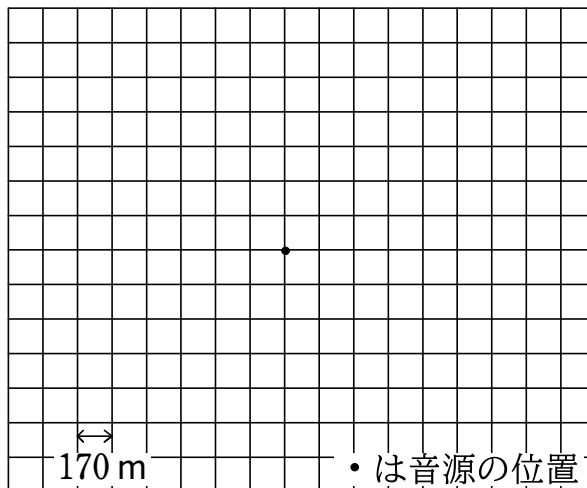


問い

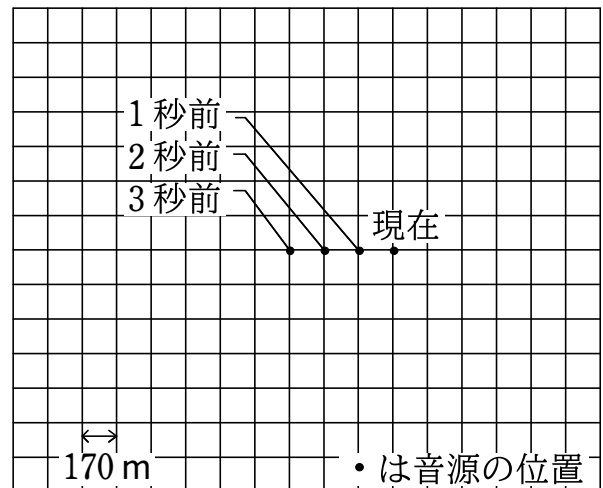
一直線上を速さ 170 m/s で進む音源がある。1, 2, 3 秒前に音源から出た音波の、現在の波面を図中にそれぞれかきこめ。音の速さを 340 m/s とする。

また、現在の音源の位置の前方でも後方でも波面の数が等しいことを確かめよ。

ずっと同じ場所で音が鳴るとき



動きながら音が鳴るとき



右の図をよく見てみましょう。

- ・ 波源が進む前方では、波がつまって、「波長が短く」なっています。
- ・ 波源が進む後方では、波が引きのばされて、「波長が長く」なっています。

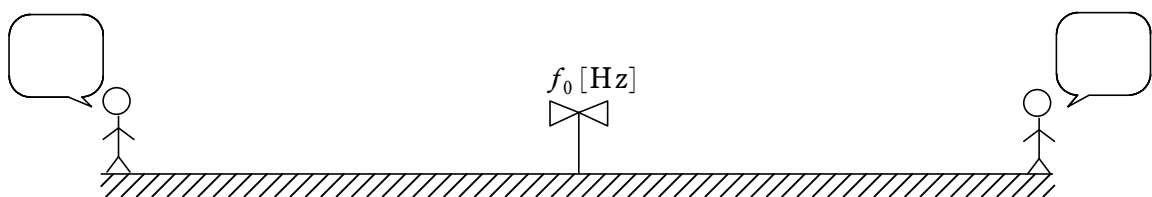
これが「ドップラー効果」です。次のページから具体的に確認していきます。

☆ドップラー効果を理解するための準備☆

音速は、 V [m/s] です。m/s とは 1 秒間あたりに進む距離 のことですね。つまり音は 1 秒経つと、 V [m] 先まで必ず進むということになります。また、振動数 f_0 [Hz] をだす 音さがあるとします。振動数というのは、1 秒間の振動回数のことなので、1 秒間に音さが f_0 回 ふるえているということになります。音は常に進むので、重なることはありません。

I、救急車タイプ

ここまですべて整理すると、音さをたたいてからの 1 秒間、
『 V [m] 先までに f_0 個の波がある』という状況ができるわけです。その状況を図に描いてみましょう。そのとき、人は偶然にも V [m] 先にいるとします。

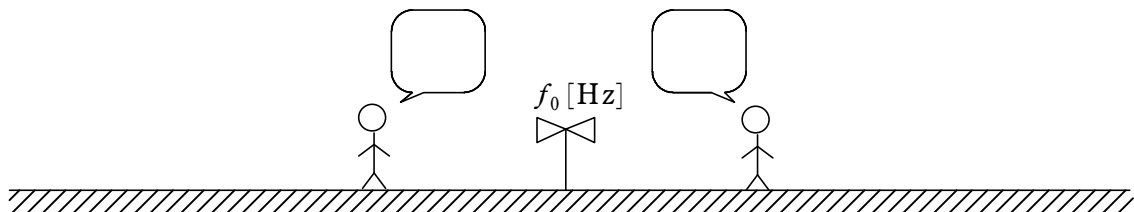


上の図を見ると、 V [m] の中に f_0 個の波が入っているのがわかるので、波長は単純に割り算すればよく、

となります。

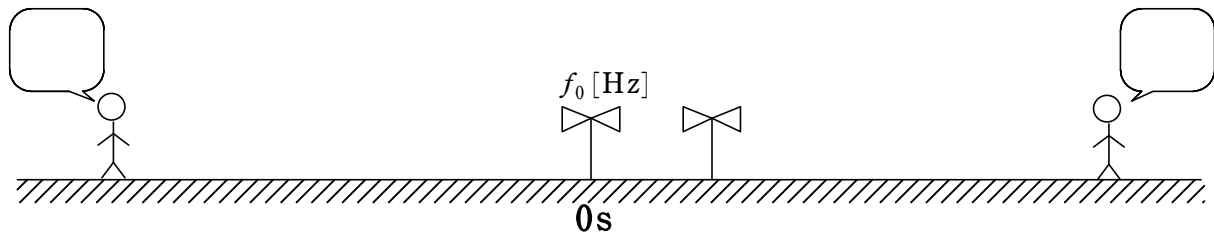
II、踏切タイプ

さきほどとは異なり、音が観測者に到達してから 1 秒間の話をします。
音は 1 秒間で V [m] 進み、その中に f_0 個の波が入っているので、
『1 秒の間に f_0 個の波を含む V m の波が観測者の耳を通過した』と言えます。1 秒間に鼓膜がふるえる回数こそが観測者が聞く音の高さになります。



B 音源が動くタイプのドップラー効果

→ ポイントは『音をだしてから1秒間を考える』です。



<手順>

- ① 0秒のときに出した音は、1秒後に V [m] 先まで届くことを作図します。
- ② 音源はその1秒の間に v [m] 先まで移動することを作図します。
- ③ 音源の前方では $V - v$ [m] の中に f_0 [個]の波が入っているという状況を作図し、
音源の後方では $V + v$ [m] の中に f_0 [個]の波が入っているという状況を作図します。
- ④ 波の長さを波の個数で割ることで波長 λ [m]を求めます。
- ⑤ 波の基本公式 $v = f\lambda$ に代入して振動数 f を求めます。ただし、音速は不変です。

・音源の後方

$$\lambda_1 = \text{—————} [\text{m}]$$

$$v = f\lambda \text{ より}$$

=

$$f_1 = \text{—————} [\text{Hz}]$$

元の音より「 」音になっている。

・音源の前方

$$\lambda_2 = \text{—————} [\text{m}]$$

$$v = f\lambda \text{ より}$$

=

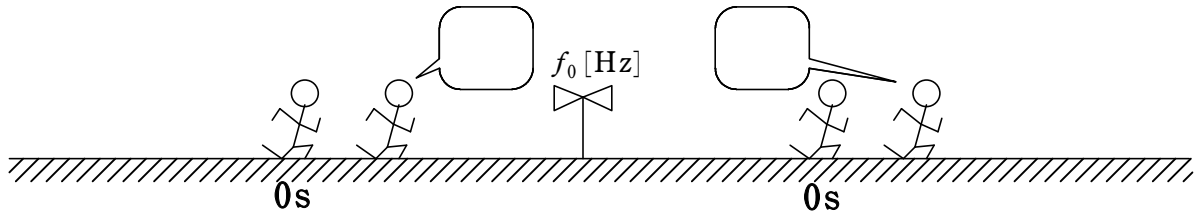
$$f_2 = \text{—————} [\text{Hz}]$$

元の音より「 」音になっている。

☆音源が動くときは、

C 観測者が動くタイプのドップラー効果

→ ポイントは『音が観測者に到達してからの1秒間を考える』です。



- ① 観測者に到達した音は、1秒後に V [m] 先まで届くことを作図します。
- ② 観測者はその1秒の間に v [m] 先まで移動することを作図します。
- ③ 音源に近づく観測者には1秒の間に $V + v$ [m] の波が観測者を通過することを作図し、音源から遠ざかる観測者には1秒の間に $V - v$ [m] の波が観測者を通過することを作図します。
- ④ 観測者に対する音の相対速度 V [m/s] を考えます。
- ⑤ 音源は動かないので、波長は伸び縮みしないことから、波長 λ [m] を求めます。
- ⑥ 波の基本公式 $v = f\lambda$ に代入して振動数 f を求めます。

・音源に近づく観測者
音速の相対速度

$$V_1 = \quad \text{[m/s]}$$

$$v = f\lambda \text{ より}$$

=

$$f_1 = \text{—————} \text{ [Hz]}$$

元の音より「 」音になっている。

・音源から遠ざかる観測者
音速の相対速度

$$V_2 = \quad \text{[m/s]}$$

$$v = f\lambda \text{ より}$$

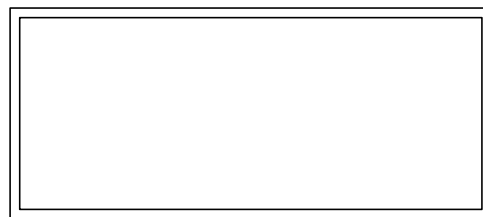
=

$$f_2 = \text{—————} \text{ [Hz]}$$

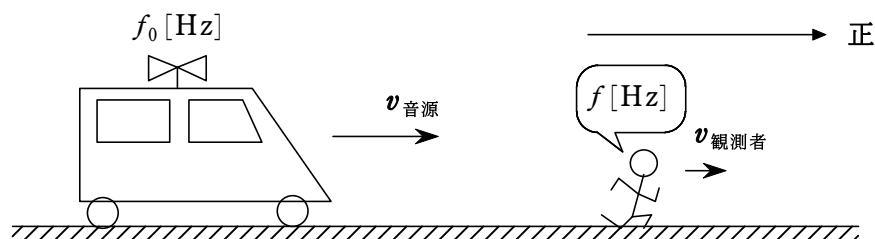
元の音より「 」音になっている。

☆観測者が動くときは、

【ドップラー効果】



$v_{\text{音源}}$ と $v_{\text{観測者}}$ は、音源から観測者に向かう方向を正とする。



※ しかし、ドップラー効果の公式を使っていいのは「作図ドップラー」を極めた者のみです！
まずは、しっかり作図して、何が起きているのか原理から理解することが大切です。それができたら晴れて免許皆伝となります。公式などという甘美な誘いに乗らず、鍛錬の道を歩みましょう。結果としてそれが近道だったりします。

□ ドップラー効果のあれこれ

・ 反射板がある場合

- ①反射板を観測者とみなし、この人が聞く振動数 f_1 を求め、
- ②反射板を振動数 f_1 の波源とみなし、本来の人が観測する振動数 f_2 を求めるという2段階で考える。

・ 風が吹く場合

- 風速を w [m/s]とすると、風上から風下の方は音速が $V + w$ [m/s] に変化し、風下から風上の方は音速が $V - w$ [m/s] に変化すると考える。つまり音速が変わる。

・ 斜めの場合

- 音源と観測者が一直線上に並ぶように速度を分解し、この方向の速度成分だけで従来通りのドップラー効果を解けばよい。

次のページより「作図ドップラー」の修行に入ります。

1 次の各場合について、観測者の聞く音波の振動数 f' [Hz] を求めよ。音源の振動数を $f = 720$ Hz, 音の速さを $V = 340$ m/s とする。

- (1) 音源が 20 m/s の速さで、静止している観測者に近づく。
- (2) 音源が 20 m/s の速さで、静止している観測者から遠ざかる。

音源から観測者へ向かう向きを正とする。

$$\left[f' = \frac{V}{V - v_s} f \right] \text{より}$$

$$(1) \quad f' = \frac{340}{340 - 20} \times 720 = 765 \text{ Hz}$$

$$(2) \quad f' = \frac{340}{340 - (-20)} \times 720 = 680 \text{ Hz}$$

2 次の各場合について、観測者の聞く音波の振動数 f' [Hz] を求めよ。音源の振動数を $f = 510$ Hz, 音の速さを $V = 340$ m/s とする。

- (1) 観測者が 20 m/s の速さで、静止している音源から遠ざかる。
- (2) 観測者が 20 m/s の速さで、静止している音源に近づく。

音源から観測者へ向かう向きを正とする。

$$\left[f' = \frac{V - v_o}{V} f \right] \text{より}$$

$$(1) \quad f' = \frac{340 - 20}{340} \times 510 = 480 \text{ Hz}$$

$$(2) \quad f' = \frac{340 - (-20)}{340} \times 510 = 540 \text{ Hz}$$

- 3 音源と観測者が同一直線上を同じ向きに進む。音源が速さ 20 m/s で進み、観測者が音源の前方を速さ 10 m/s で進むとき、観測者の聞く音波の振動数は何 Hz か。音源の振動数を $f=640$ Hz, 音の速さを $V=340$ m/s とする。

音源から観測者へ向かう向きを正とする。

$$「f' = \frac{V - v_o}{V - v_s} f」より$$

$$f' = \frac{340 - 10}{340 - 20} \times 640 = 660 \text{ Hz}$$

- 4 静止している観測者に音源が一定の速さで近づいているとき、音源が一定の振動数 f [Hz]の音を時間 t [s] の間だけ出したとする。観測者が音波を観測する時間は t [s] より長いか短い。

ドップラー効果の式「 $f' = \frac{V - v_o}{V - v_s} f$ 」において、 $v_o=0$, $v_s>0$ であるから、観測者が観測する振動

数を f' [Hz] とすると

$$f' = \frac{V}{V - v_s} f > f \quad \dots\dots \textcircled{1}$$

音源が時間 t [s] の間に出した波の数は ft [個]。

観測者が音波を観測した時間を t' [s] とすると、観測者が観測する波の数は $f't'$ [個]。

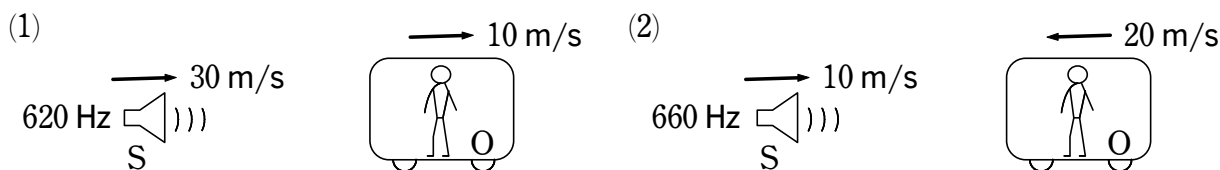
音源が出した波の数と観測者が観測する波の数は等しいので

$$ft = f't'$$

これと ① 式より $t' < t$

よって、観測者が音波を観測する時間 t' [s] は t [s] より短い。

- 5 次の各場合について、観測者 O が聞く音の振動数 f' [Hz] を求めよ。ただし、音の速さを 340 m/s とし、音源 S と観測者 O は、両者を結ぶ直線上を運動するものとする。

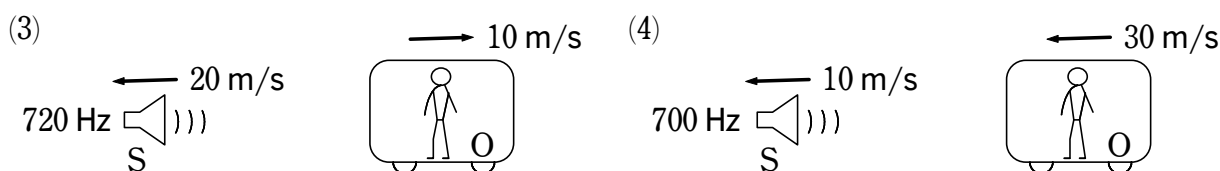


- (1) $v_O = 10 \text{ m/s}$, $v_S = 30 \text{ m/s}$, $f = 620 \text{ Hz}$ より

$$f' = \frac{340 - 10}{340 - 30} \times 620 = 660 \text{ Hz}$$

- (2) $v_O = -20 \text{ m/s}$, $v_S = 10 \text{ m/s}$, $f = 660 \text{ Hz}$ より

$$f' = \frac{340 - (-20)}{340 - 10} \times 660 = 720 \text{ Hz}$$

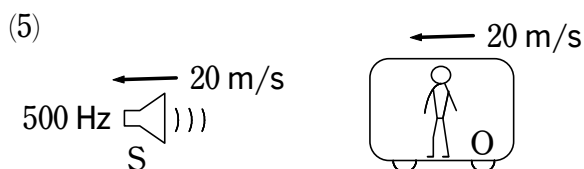


- (3) $v_O = 10 \text{ m/s}$, $v_S = -20 \text{ m/s}$, $f = 720 \text{ Hz}$ より

$$f' = \frac{340 - 10}{340 - (-20)} \times 720 = 660 \text{ Hz}$$

- (4) $v_O = -30 \text{ m/s}$, $v_S = -10 \text{ m/s}$, $f = 700 \text{ Hz}$ より

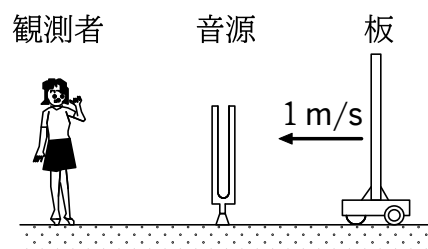
$$f' = \frac{340 - (-30)}{340 - (-10)} \times 700 = 740 \text{ Hz}$$



- (5) $v_O = -20 \text{ m/s}$, $v_S = -20 \text{ m/s}$, $f = 500 \text{ Hz}$ より

$$f' = \frac{340 - (-20)}{340 - (-20)} \times 500 = 500 \text{ Hz}$$

- 6 図のように、観測者、音源、板が一直線上に並んでいる。板は 1 m/s の速さで音源に近づいている。このとき、音源から直接伝わる音と板で反射した音によって、観測者が聞く 1 秒間のうなりの回数 N を求めよ。音源の振動数を $f = 678 \text{ Hz}$ 、音の速さを $V = 340 \text{ m/s}$ とする。



解答 4

【指針】 板は、観測者として音を受け取った後、音源として受け取った音を発する（反射する）。

【解答】 板を、動く観測者と考えて、板の受け取る音波の振動数を $f_1 \text{ [Hz]}$ とすると、

$$「f' = \frac{V - v_0}{V} f」より$$

$$f_1 = \frac{340 - (-1)}{340} \times 678 = \frac{341}{340} \times 678 \text{ Hz}$$

板を振動数 f_1 の音源と考えて、板からの音を観測者が聞くときの振動数を $f' \text{ [Hz]}$ と

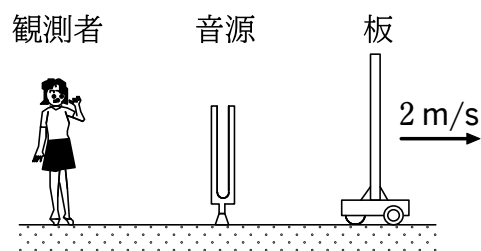
すると、「 $f' = \frac{V}{V - v_s} f$ 」より

$$f' = \frac{340}{340 - 1} \times \left(\frac{341}{340} \times 678 \right) = \frac{340}{339} \times \frac{341}{340} \times 678 = 682 \text{ Hz}$$

1 秒間のうなりの回数は、振動数の差から次のように求められる。

$$|f' - f| = |682 - 678| = 4 \text{ 回/s} \quad \text{よって } N = 4$$

- 7 図のように、観測者、音源、板が一直線上に並んでいる。板は 2 m/s の速さで音源から遠ざかっている。
- このとき、音源から直接伝わる音と板で反射した音によって、観測者が聞く 1 秒間のうなりの回数 N を求めよ。音源の振動数を $f = 513 \text{ Hz}$ 、音の速さを $V = 340 \text{ m/s}$ とする。



【解答】 6

板を、動く観測者と考え、板の受け取る音波の振動数を f_1 [Hz] とすると、

$$\left[f' = \frac{V - v_o}{V} f \right] \text{ より } f_1 = \frac{340 - 2}{340} \times 513 = \frac{338}{340} \times 513 \text{ Hz}$$

板を振動数 f_1 [Hz] の音源と考え、板からの音を観測者が聞くときの振動数を f' [Hz] とすると、「 f'

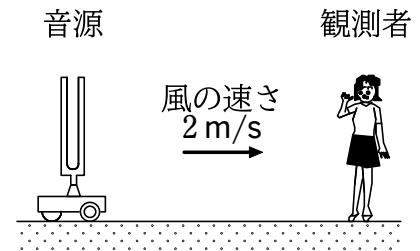
$$= \frac{V}{V - v_s} f_1 \text{ より}$$

$$f' = \frac{340}{340 + 2} \times \left(\frac{338}{340} \times 513 \right) = \frac{340}{342} \times \frac{338}{340} \times 513 = 507 \text{ Hz}$$

1 秒間のうなりの回数 N は、振動数の差から次のように求められる。

$$N = |f' - f| = |507 - 513| = 6$$

- 8 図のように、音源と観測者の間を、右向きに速さ 2 m/s の一様な風が吹いている。次の各場合について、観測者の聞く音波の振動数 f' [Hz] を求めよ。音源の振動数を $f = 644 \text{ Hz}$ ，無風状態での音の速さを $V = 340 \text{ m/s}$ とする。



- (1) 音源，観測者がともに静止している。
- (2) 音源が右向きに速さ 20 m/s で進み，観測者が右向きに速さ 5 m/s で進んでいる。

解答 (1) 644 Hz (2) 674 Hz

- (1) 音源，観測者がともに静止しており，反射板などの動きもないので，ドップラー効果が起きない。

$$f' = 644 \text{ Hz}$$

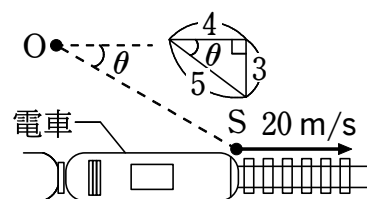
別解 音源から観測者に向かう音の速さは $V + 2 = 342 \text{ m/s}$ となる。

$$f' = \frac{342 - 0}{342 - 0} \times 644 = 644 \text{ Hz}$$

- (2) $f' = \frac{342 - 5}{342 - 20} \times 644$

$$= \frac{337}{322} \times 644 = 674 \text{ Hz}$$

- 9 図のように、速さ 20 m/s で進む電車の先端が点 S を通過するときに鳴らした警笛を、静止している観測者が点 O で聞くときの振動数 $f' [\text{Hz}]$ を求めよ。音源の振動数を $f = 712 \text{ Hz}$ 、音の速さを $V = 340 \text{ m/s}$ とする。



解答 680 Hz

指針 速度の SO 方向の成分を求めて、「 $f' = \frac{V}{V - v_s} f$ 」に代入する。

解答 音源の速度は、 SO 方向の成分の大きさが

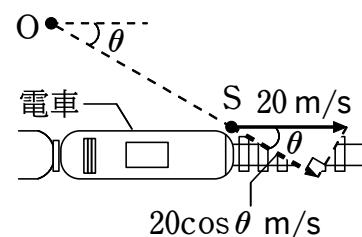
$$20 \times \cos \theta = 20 \times \frac{4}{5} = 16 \text{ m/s}$$

である。よって、音源は点 S を通過するときに、速さ

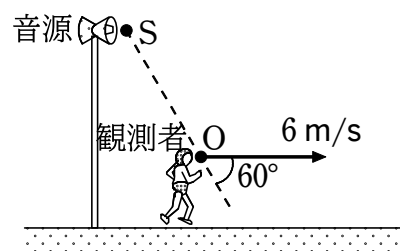
$$16 \text{ m/s} \text{ で観測者から遠ざかると考えると, 「} f' = \frac{V}{V - v_s} f \text{」}$$

より

$$f' = \frac{340}{340 - (-16)} \times 712 = 680 \text{ Hz}$$



- 10 図のように、音源が点 S で静止し、観測者は点 S から離れた直線上を、右向きに速さ 6 m/s で進む。このとき、観測者が点 O で聞く音波の振動数 $f' [\text{Hz}]$ を求めよ。音源の振動数を $f = 680 \text{ Hz}$ 、音の速さを $V = 340 \text{ m/s}$ とする。



解答 674 Hz

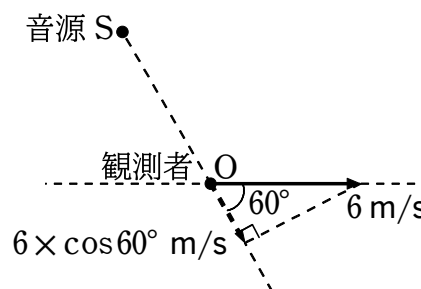
観測者の速度は、 SO 方向の成分の大きさが

$$6 \times \cos 60^\circ = 6 \times \frac{1}{2} = 3 \text{ m/s}$$

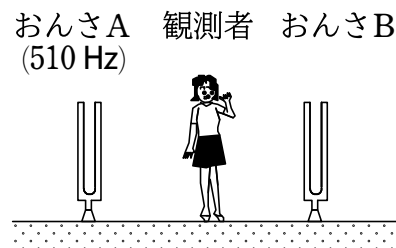
である。よって、観測者は点 O を通過するときに、速さ 3 m/s で音源から遠ざかると考えると、

$$\text{「} f' = \frac{V - v_o}{V} f \text{」より}$$

$$f' = \frac{340 - 3}{340} \times 680 = 674 \text{ Hz}$$



- 11 図のように、振動数 510 Hz のおんさ A、観測者、おんさ B が一直線上に並んでいる。おんさ A、B を同時に鳴らすと、観測者には毎秒 3 回のうなりが聞こえた。音の速さを 340 m/s とし、おんさ A と B では、B の音のほうが低いものとする。



- (1) B の振動数 f_B [Hz] を求めよ。
- (2) B を動かすと、うなりが消えた。B を動かした向きは図の左向きか、右向きか。
- (3) B を動かしたときの速さ v [m/s] を求めよ。

【解答】 (1) 507 Hz (2) 左向き (3) 2 m/s

- (1) おんさ A、B を同時に鳴らすと毎秒 3 回のうなりが聞こえ、 $f_A > f_B$ であるから
($f_A = 510$ Hz はおんさ A の振動数)

$$f_A - f_B = 3$$

$$\text{よって } f_B = f_A - 3 = 510 - 3 = \mathbf{507 \text{ Hz}}$$

- (2) 観測者に、実際の振動数より高く聞こえるようにするには、観測者に近づくように動かせばよい。すなわち、左向き。

- (3) 観測者が聞くおんさ B からの音の振動数が、ドップラー効果により f_A [Hz] となればよい。音の速さを V [m/s] とし

$$f_A = \frac{V}{V - v} f_B$$

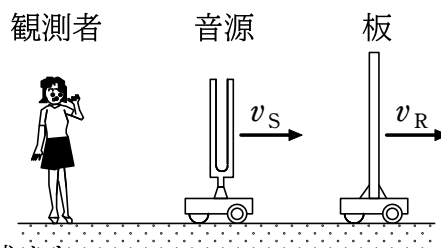
$$510 = \frac{340}{340 - v} \times 507$$

$$(340 - v) \times 510 = 340 \times 507$$

$$340 - v = 340 \times \frac{507}{510}$$

$$\text{よって } v = \mathbf{2 \text{ m/s}}$$

- 12 図のように、観測者、音源、板が一直線上に並んでいる。音源は v_S [m/s] の速さで、板は v_R [m/s] の速さで、ともに観測者から遠ざかっている。音源の振動数を f [Hz]、音の速さを V [m/s] とする。



- (1) 音源から直接観測者に伝わる音波の振動数 f_1 [Hz] を求めよ。
- (2) 板で反射して観測者に伝わる音波の振動数 f_2 [Hz] を求めよ。
- (3) 観測者にはうなりが聞こえなかった。このとき、 v_R を v_S で表せ。

【解答】 (1) $\frac{V}{V+v_S} f$ [Hz] (2) $\frac{(V-v_R)V}{(V-v_S)(V+v_R)} f$ [Hz] (3) $v_R = v_S$

(1) $f_1 = \frac{V}{V-(-v_S)} f = \frac{V}{V+v_S} f$ [Hz]

- (2) 板を観測者とする。板の受け取る音の振動数 f' [Hz] は

$$f' = \frac{V-v_R}{V-v_S} f$$

次に、板を振動数 f' の音を出す動く音源と考える。

板で反射した音を観測者が聞くときの振動数 f_2 [Hz] は

$$\begin{aligned} f_2 &= \frac{V}{V-(-v_R)} f' \\ &= \frac{V}{V+v_R} \cdot \frac{V-v_R}{V-v_S} f \\ &= \frac{(V-v_R)V}{(V-v_S)(V+v_R)} f \text{ [Hz]} \end{aligned}$$

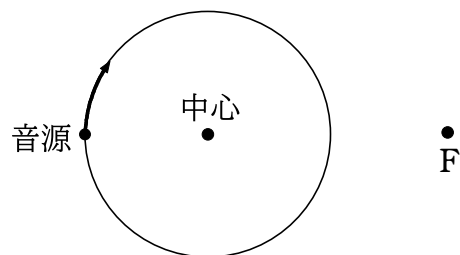
- (3) うなりが聞こえないとき $f_1 = f_2$ である。

すなわち

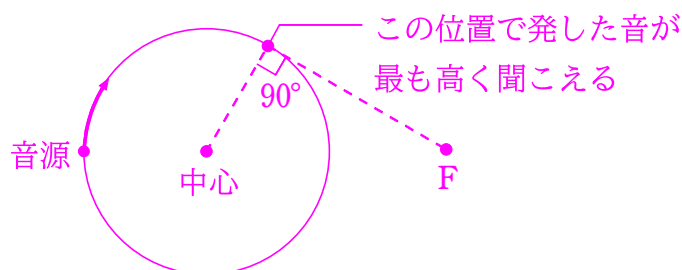
$$\begin{aligned} \frac{V}{V+v_S} f &= \frac{V}{V+v_R} \cdot \frac{V-v_R}{V-v_S} f \\ \frac{V-v_S}{V+v_S} &= \frac{V-v_R}{V+v_R} \end{aligned}$$

よって $v_R = v_S$

- 13 一定の振動数の音を発しながら時計回りに等速円運動している音源がある。静止した F さんが音源からの音を図のような位置で聞くと、音源がどの位置で発した音が最も高く聞こえるか、その位置を図中に示せ。

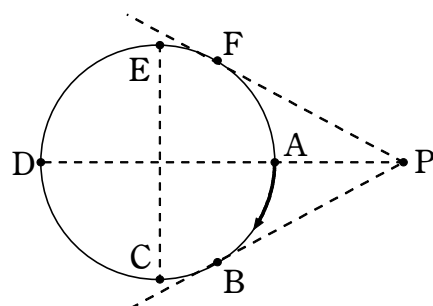


解答



円の中心で音を聞くと、音源が静止している場合と同じ高さの音が聞こえる。

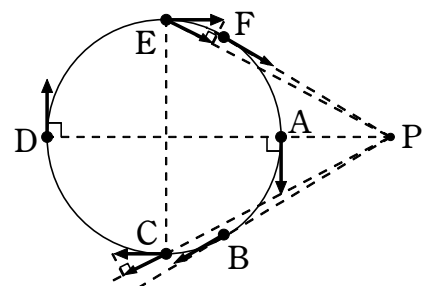
- 14 図のように、水平面内にある円周上を振動数 f [Hz] の音を出しながら、一定の速さ v [m/s] で時計回りに回転している音源がある。音源と同一平面上で円周の外側にある点 P で、振動数の変化を測定した。音の速さを V [m/s] ($V > v$) とする。



- 点 P で振動数が f [Hz] と測定される音は、A～F のうちどの位置で出た音か。
- 点 P で振動数が最大および最小と測定される音は、A～F のうちどの位置で出た音か。それぞれ答えよ。
- 最大の振動数 f_1 [Hz]、最小の振動数 f_2 [Hz] を求めよ。

指針 円運動する音源の速度の方向は、円の接線方向である。この速度の、点 P の方向の成分でドップラー効果が起こる。

解説 各点における音源の速度と、その点での P の方向の成分 (以下、 v_p と表す) をかくと図のようになる。



- v_p が 0 となる時、ドップラー効果による振動数の変化はない。よって、A と D

- v_p が P に近づく向きで最大となると

き、振動数が最大となる。また、 v_p が遠ざかる向きで最大となると、振動数が最小となる。

よって、最大：F、最小：B

- $f' = \frac{V}{V - v_s} f$ より $f_1 = \frac{V}{V - v} f$ [Hz] $f_2 = \frac{V}{V - (-v)} f = \frac{V}{V + v} f$ [Hz]



「不屈不撓の物理」