

§ 3.6 弦を伝わる横波とばねを伝わる縦波(疎密波)

6 A) 弦を伝わる横波

図 3 - 17 のような細くて長いバネの両端を持ち、上下方向の振動を与え続け、上下方向に振る手の速さで様々な波を作る。



図 3 - 17

弦を伝わる波の伝播速度は、張力と線密度で決まるので、一定とみなすことができる。そのため、弦を振る振動数を速くすると、波長は短くなる。

ばねの一方の端を手で強く固定すると、固定端での反射が観測できる。一方、端に長い糸を結んでこれを引っ張って手でもつと、自由端での波の反射が観測できる。

定常波の生成

定常波を表す式

x の正の向きに進む(進行波)正弦波 y_1 と、同じ振幅・周期・波長で x の負の向きに進む(後退波)正弦波 y_2 との合成。



連続して入射してくる正弦波 y_1 が端で反射されて反射波 y_2 と干渉すると定常波ができる。

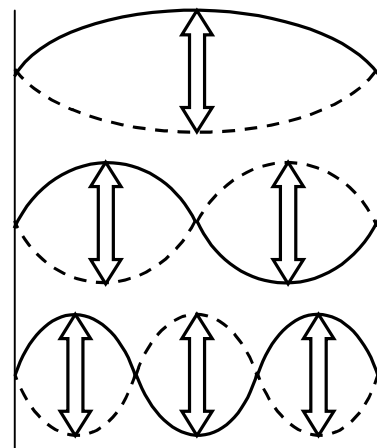


図 3 - 18 定常波

基本振動

2 倍振動

3 倍振動

もし、 $x=0$ の位置を固定端として入射し、正弦波が反射されたとすると、正弦波 y_1 の式は、振幅 A , 周期 T , 波長 λ とすると

$$\begin{aligned} y_1 &= A \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \\ &= A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \\ &= A \sin (kx - \omega t) \end{aligned}$$

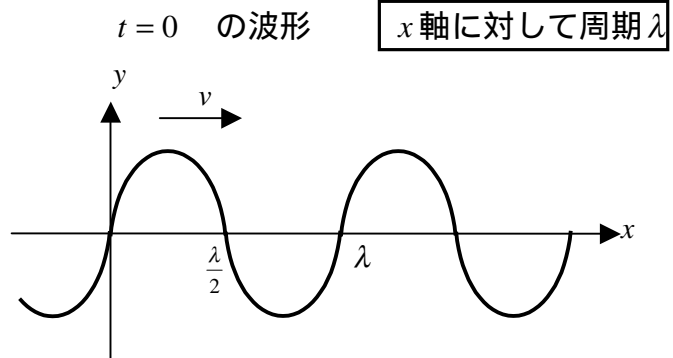


図 3 - 19

同様に、正弦波 y_2 の式は

$$\begin{aligned}
 y_2 &= A \sin \frac{2\pi}{\lambda}(x + vt) \\
 &= A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T} \right) \\
 &= A \sin(kx + \omega t)
 \end{aligned}$$

波数： $k = \frac{2\pi}{\lambda}$	振動数： $\nu = \frac{1}{T}$
周期： $T = \frac{\lambda}{\nu}$	角振動数： $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$

y_1 と y_2 を合成する

$ \begin{aligned} y &= y_1 + y_2 = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t) \\ &= 2A \sin kx \cdot \cos \omega t \end{aligned} $	定常波の式
--	--------------

節： $x = 0, \pm \frac{\lambda}{2}, \pm \lambda, \dots$ の点 腹： $x = \pm \frac{\lambda}{4}, \pm \frac{3}{4}\lambda, \pm \frac{5}{4}\lambda, \dots$ の点

弦の両端を固定端とすると、弦に生成しうる定常波は、半波長の整数倍が弦の長さに等しくなるものだけで、それ以外の定常波は干渉によって消滅する。

6 B) 縦波をバネの運動で見る

縦波：波の進行方向と振動方向が平行であるような波。

< 固体・液体・気体中を伝播する > 例) 音波・地震の P 波
 密部と疎部ができるので‘疎密波’とも呼ばれる。

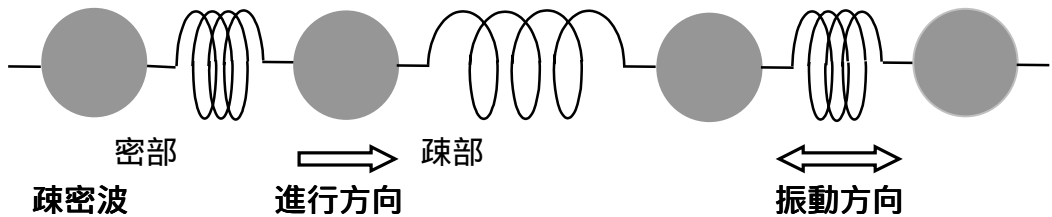


図 3 - 20 疎密波

実験

図 3 - 21 のように数箇所を糸で空中にぶら下げたばねをセットし、モーターを利用してばねの端を水平方向に振動させ、縦波の伝播の様子を見る。

伝播(疎密部分)の様子の確認

ばねを水平方向に手で押すとばねの疎密波が伝播する様子が確認できる。この場合も、波の伝播速度は振動数に依存しない定数であることがわかる。また、波はいつも正弦波の形をしている必要はなく、パルス状の波が伝播することも理解できる。



図 3 - 21 縦波発生用装置

定常波

モーターでばねに一定の振動を与えると疎密部分が変化しない定常波ができる。

§ 3.7 波動

7 A) 群速度と位相速度 (16mm)

波の同一位相の点(例えば山または谷)が走る速度を位相速度という。周波数のわずかに異なる2つ(あるいはそれ以上)の正弦波の重ね合わせによってできる合成波を群波といい、これは振幅の極大または極小を持っている。この極大または極小の点の進行速度を群速度という。

7 B) 水波投影装置(さざ波発生器)による波動現象の実験

波動特有の種々の現象を波面が伝播する様子を直接観察することによって体験的に理解することは波動の本質的理解にとって不可欠である。波面の伝播を明瞭に見せてくれる装置として水面波投影装置は非常に優れている。我々は、この装置を使って平面波の伝播、反射、屈折、回折現象を実演している。波の位相という概念、位相が一定値をとる波面という概念、波面の反射、屈折、回折というホイヘンスの原理を実際目で見て実感することは「百聞は一見に如かず」の好例である。光の屈折という現象の本質が波動現象であること、それが波の伝播速度の違いに由来することを知ることには物理的自然認識の奥の深さを実感させるのに役立つ。最後にレンズ作用について実演する。見事に平行光線が焦点に収束する様子を実現することが可能である。

水面波発生装置の概略

底がガラスでできた浅い水槽(ガラス窓の枠のようなタンク、図参照)に水を薄く張って(厚さ3~5mm)水平に置き、木の角棒を糸で水平に吊り下げ、水面に軽く接触させる。角棒に取り付けた小型パルスモータに偏心したおもりを付けて回転させると、水面に接触した角棒がモータの振動数で前後に僅かに振動する。これに応じて水面にはさざ波が発生し、これが平面波となって水面上を伝播する。水槽上部に取り付けたランプでこのさざ波を照らして水槽下部(約60cmほど離して)に投影し、投影されたさざ波を観察する。このとき、さざ波がより明確に観察できるように投影する部分に白色紙(画用紙等)を敷いておく。

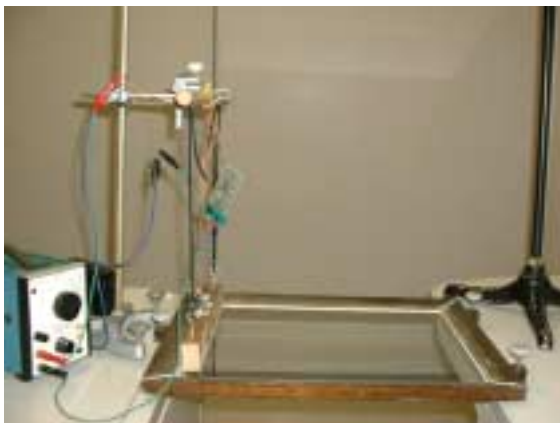
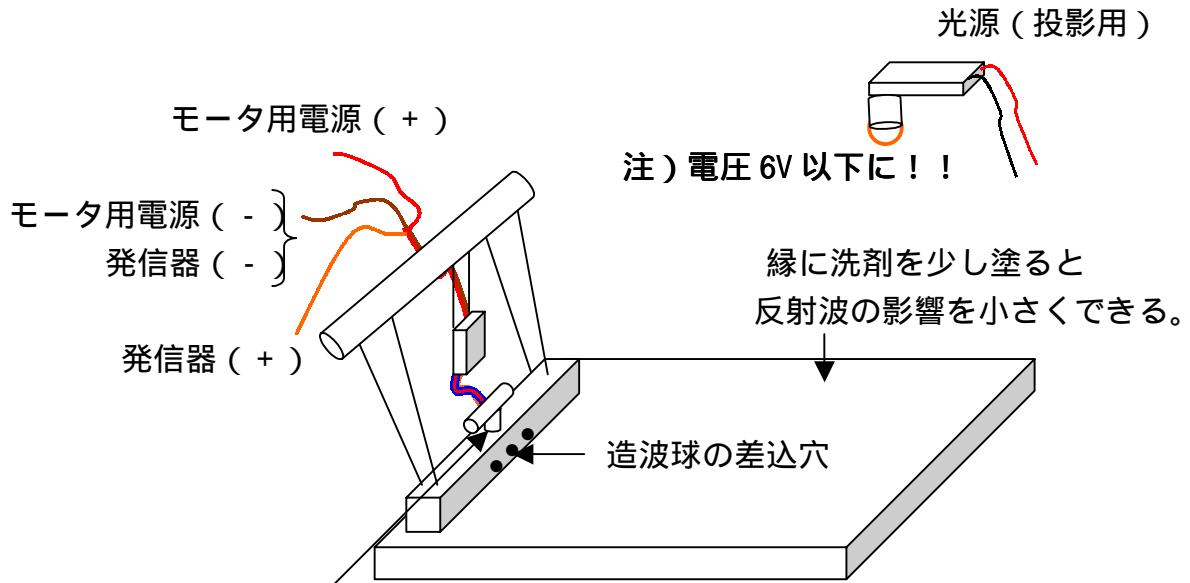


図 3 - 22 水面波発生装置 (全体)



図 3 - 23 撮影用光源
(スライダックで明るさを調節)

水面波発生装置：概略説明図 < 図 3 - 24 >



水槽に入れる水の量で波形の見やすさが変わる

(この実験では深さを 5mm 程度にする)

パルスモータ：周波数によってモータの回転数を変えられる。

実験に使用したパルスモータの規格

1 パルス 18° (周波数を 20Hz にしたとき、1 秒間に 1 回転する)

(通常のモータは一定の回転数でしか回らない)

< 角棒に振動を与えるために、わざと金属の中心から外れた所を支点にしている >

この実験では、発振器の周波数を変えることで、モータの回転数を変えている。

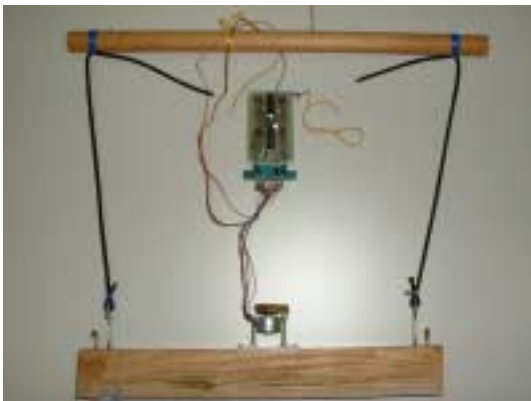


図 3 - 25 パルスモータ



図 3 - 26 パルスモータ (拡大)

平面波の伝播

モータの回転数を毎秒約 2-10 回転程度の低速で回転させると、波長約 2-5cm 程度の水面波が発生する。直線状の波面が平行線を描いて約 20cm/s 程度の伝播速度で伝播する。ランプを通してこの波面を白い紙に投影するときれいに平行線の影が進行する様子を見ることが出来る。波の位相、波面、伝播速度、波長、振動数、水の深さと伝播速度の関係など種々の物理量が明瞭に実体験を伴って理解できる。



造波球（球面波を発生する小球）

定常波の発生
平面波の反射
波の回折

等に使用

波の回折等に使用

定常波の発生
平面波の反射
波の回折

等に使用

図 3 - 27 様々な波形を発生させるための道具



図 3 - 28 台形のガラス板（波の屈折） 図 3 - 29 凸レンズ形のガラス板（レンズ作用）



図 3 - 30・31 平面波（発振器の周波数：180Hz）

球面波の発生：双曲線関数の干渉縞

造波球（球面波を発生する小球）を2点にして振動すると、発生した球面波がたがいに干渉して干渉縞が観測される。理論通りの双曲線関数がきれいに再現できる。

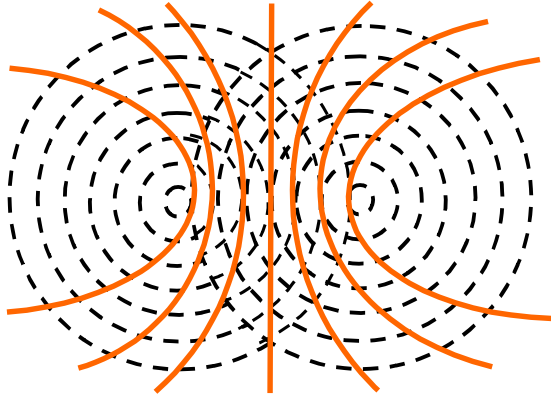


図3 - 32 2つの波源（球面波）からの干渉
（発振器の周波数：180Hz）

定常波の発生

平面波を発生させ、水槽内に金属でできた反射板を進行してくる波面に平行に立てると、板で反射した波と入射波が干渉して定常波が発生する。

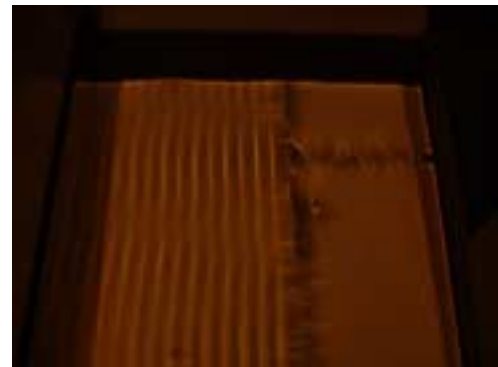
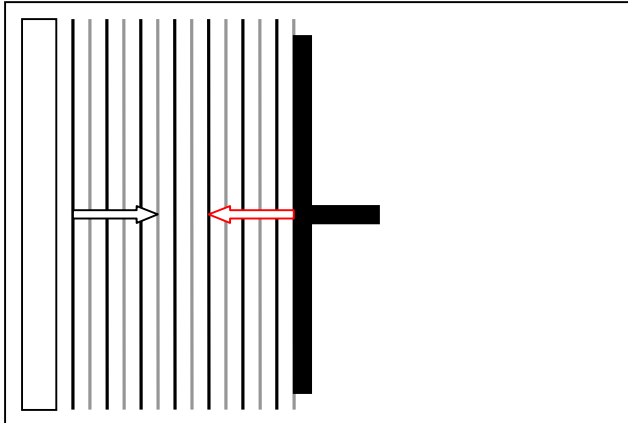


図3 - 34 定常波
（発振器の周波数：180Hz）

⇒ 平面波の進行方向 ⇐ 反射波の進行方向

図3 - 33

平面波の反射

スリットを通して平面波を通過させ、これを金属の板で作られた障壁(反射板)にあてると、ホイヘンスの原理にしたがって反射された波の波面が観測される。反射板に入射する波と反射波との干渉がおきて、きれいな反射波だけを観測することは難しいが、入射波のスリットの幅をうまく調整すると反射板から少し離れた位置で反射波の波面を観測することが可能である。

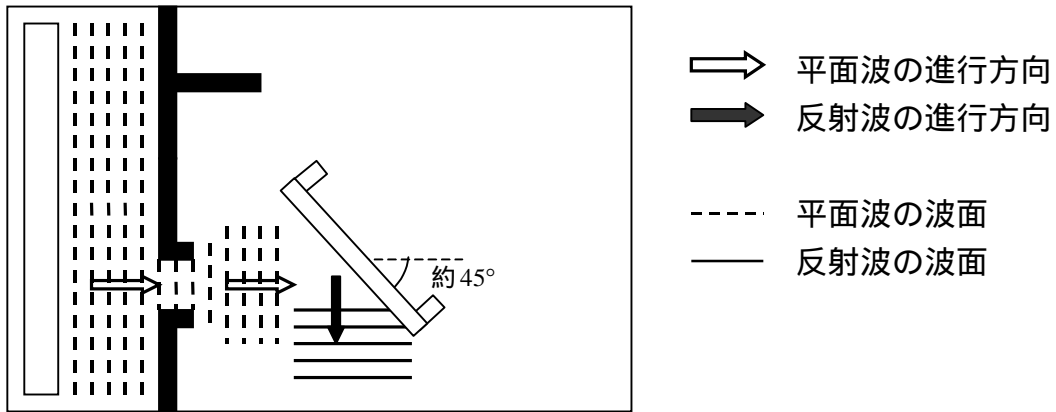


図 3 - 35

波の屈折

台形をしたガラス板を水槽に浸してその部分の水を浅くすると、水面波の伝播速度は遅くなって波長が短くなる。水面波の波面にたいし斜めになるようにガラス板をおくと、ガラス板に入射した後の水面波の伝播方向が屈折する様子がわかる。屈折の様子は見にくいですが、なるべく水の量を減らしてガラス板の上の水の厚さを薄くすると状況は改善される。

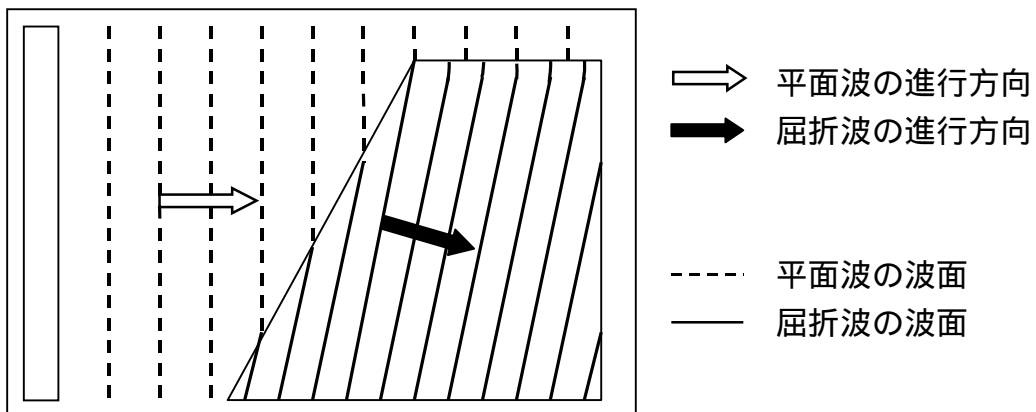
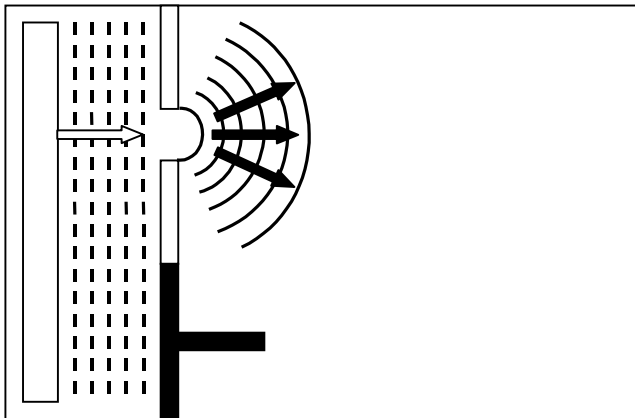


図 3 - 36

波の回折

金属でできた板 2 枚を水槽にたてて、その間に狭いスリット状の隙間をあけると、波の回折現象を観測することができる。スリット幅を波の波長程度に小さくすると、波面が大きく回りこむ回折現象が観測される。一方、スリット幅を波長に比べ大きく開けると波の回折は少なくなる。

(1) スリット幅が (波長程度に) 小さいとき

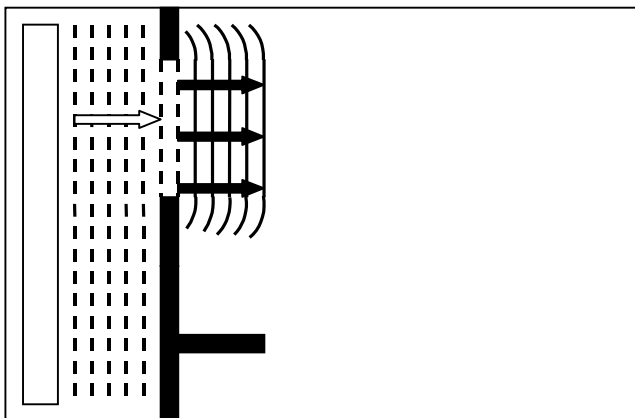


⇨ 平面波の進行方向
 ⇨ 回折波の進行方向

----- 平面波の波面
 ———— 回折波の波面

図 3 - 37

(2) スリット幅が (波長に比べて) 大きいとき



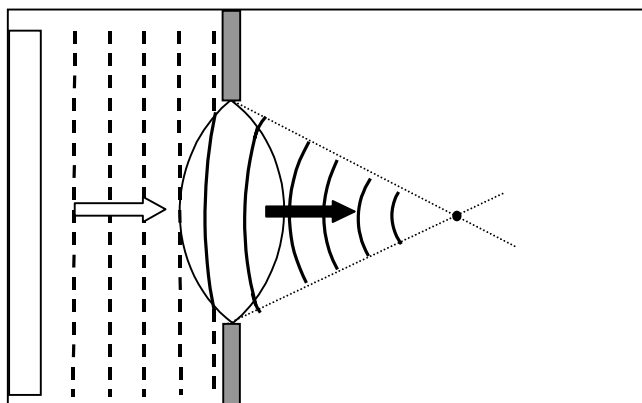
⇨ 平面波の進行方向
 ⇨ 回折波の進行方向

----- 平面波の波面
 ———— 回折波の波面

図 3 - 38

レンズ作用

凸レンズの形をしたガラス板を水槽に沈めると、その部分の水の深さが浅くなって水面波の屈折現象が起きる。ガラス板の凸レンズ部分で屈折した波面は、レンズによる屈折の式にしたがって焦点を形成する。光学レンズの原理を波動の物理現象として明瞭に実証する恰好の実演実験である。



⇨ 平面波の進行方向
 ⇨ 屈折波の進行方向

----- 平面波の波面
 ———— 屈折波の波面

図 3 - 39

: 凸レンズ（形ガラス板）の焦点

凸レンズ形のガラス板があると、レンズの中央部を通る波は速度の小さい部分を長く通らなければならないので、周辺部を通る波より遅れてしまう。その結果、レンズを通過した後、波は円形波となってある一点（焦点）に集まる。

波長が長い波（振動数の小さい波）の方が焦点距離は長くなる。

§ 3.8 音波

8 A) 管の長さを変えるとその共鳴する音の周波数が変わる

空気で満たされた管の中にも音の定常波を発生させることができる。音波は管の中を進み、管の端で反射して戻ってくる。音波の波長と管の長さが適当な関係になれば、管の中を反対方向に進む波が重なり合って定常波の形が作られる。この条件を満たす波長は、管の共鳴振動数に対応している。定常波が発生すると、管中の空気の振動は大きな振幅を持続し、管の開口端から音を発する。このときに出る音の振動数は、管中の空気の振動数に等しい。

両端が開いた管の中に発生する定常波のパターンを図 3 - 40 に示す。左右の開口端には振動の腹があり、管の中央には節がある。この縦波の定常波をわかりやすく表すために、弦の横波定常波として表す < 図 3 - 41 >。

図 3 - 40・41 の定常波のパターンは基本振動といわれ、音波の波長は $\lambda = 2L$ である。

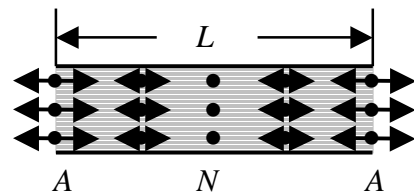


図 3 - 40

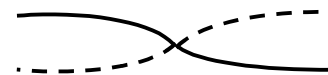


図 3 - 41

両端開口端に発生するいくつかの定常波のパターンを図 3 - 42 に示す。

一般的には、長さ L の両端開口端の管の共鳴振動数に対応する波長は、

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

n は調和振動の指数という。 v を音速とすると、対応する両端開口管の共鳴振動数は次式で表される。

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{2L} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

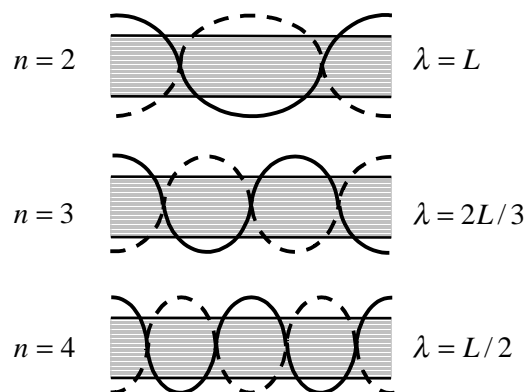


図 3 - 42

図 3 - 43 に一端が開口端で他端が閉口端の管に発生するいくつかの定常波を示す。開口端部分は腹、閉口端部分は節となっている。最も単純なパターンでは、音波の波長は $\lambda = 4L$ となる。

一般的には、長さ L の片端開口管の共鳴振動数に対応する波長は、

$$\lambda = \frac{4L}{n} \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

このとき、調和振動の指数 n は奇数でなければならない。対応する共鳴振動数は次式で表される。

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{4L} \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

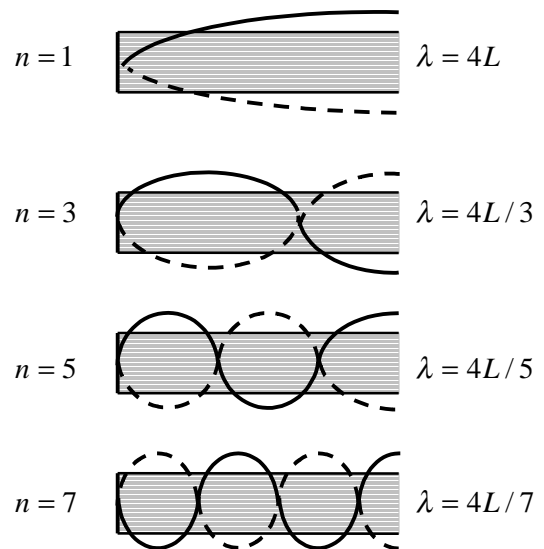


図 3 - 43

8 B) 水の量と共鳴音

8 C) Kundt の実験 (島津製)

音の速さの測定法の 1 つ。

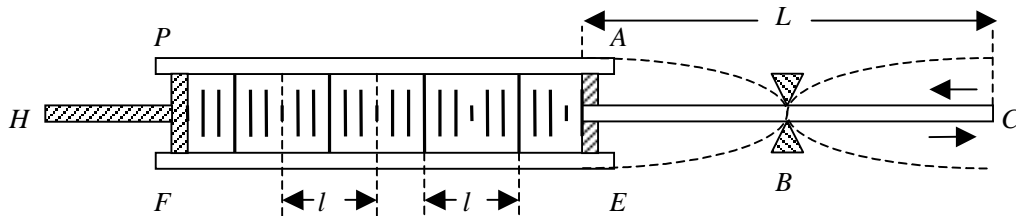


図 3 - 44

図 3 - 44 のように、水平に支えたガラス管 EF 内に、コルク細粉を薄く一様に広げ、一端に棒 H に取付けた可動円板 P を他端に金属棒 AC の円板 A を差し込み、AC を水平に支えて、その中点 B を固定する。金属棒 C の辺りを棒に沿って矢印のように摩擦し、金属棒に縦振動を与えて原音を発音させながら可動円板 P を適当な位置に動かすと、金属棒から出る波と、P で反射する波との干渉の結果、管内に定常波を生じ、管内の気柱は振動して共鳴する。これによって、コルク細粉は振動しながら上図のような規則正しい横縞を生じて配列する。このとき、細粉が大きく振動して集まる点は定常波の腹で、細粉が静止してほとんど集まらない点は節である。よって、隣り合う 2 節点間または 2 腹点間を l 、気柱内の音波の波長を λ 、その振動数を n とすれば、

$$\text{気柱内の音速} \quad v = n\lambda = n \cdot 2l \quad \dots$$

また、金属棒の全長を L 、棒中の音波の波長を λ' 、その振動数を n' とすれば、

$$\text{金属棒中の音速} \quad V = n'\lambda' = n' \cdot 2L \quad \dots$$

となる。

気柱は金属棒の振動に共鳴しているから、 $n = n'$ なので、式・式より

$$V = (L/l)v \quad \dots$$

また、実験上から、 t の空气中的音速 v_t は、

$$v_t = (331.45 + 0.61t) \text{ m/s} \quad \dots$$

である。よって、管中の空気の温度がわかっているから式から v_t がわかり、それを式の v に代入すると、金属棒中の音速 V が求められる。

8 D) 共鳴音叉によるうなり (島津製)

うなり：振動数のわずかに異なる2つの音による「ウーン、ウーン」となるような音が聞こえる現象。実際には、同じ周波数の音叉の片方に軽い錘をつけることで周波数をわずかに変える。

波長 λ_1, λ_2 の波の合成 <波の位相速度は2つの波長に対して不変>

$$A \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda_1} (x - vt) \right] + A \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda_2} (x - vt) \right] = 2A \cos \left[\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \pi (x - vt) \right] \sin \left[\left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right) \pi (x - vt) \right] \cdot \dots$$

$$\boxed{\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda, \quad \Delta\lambda \ll \lambda_1, \lambda_2} \quad \text{とすると}$$

$$\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_1 + \Delta\lambda} = \frac{2}{\lambda_1} - \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1^2} \quad , \quad \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_1 + \Delta\lambda} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1^2}$$

以上を に代入すると

$$2A \cos \left[\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1^2} \pi (x - vt) \right] \sin \left[\frac{2}{\lambda_1} \pi (x - vt) \right]$$

振幅変調波
搬送波

振幅変調波の波長： $\frac{2\lambda_1^2}{\Delta\lambda}$ 伝播速度： v

うなりの周期 T $T = \frac{\text{振幅変調波の半波長}}{\text{振幅変調波の伝播速度}} = \frac{\lambda_1^2 / \Delta\lambda}{v} = \frac{1}{v \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}$

うなりの振動数 ν $\nu = \frac{1}{T} = v \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = \nu_1 - \nu_2$

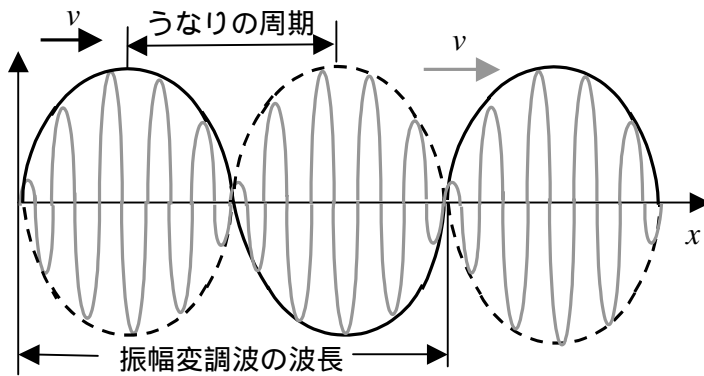


図 3 - 45



図 3 - 46 音叉

§ 3.9 ドップラー効果 (大沢ループフィルム)

救急車が警笛を鳴らしながら、近づいてくるときには音は高く聞こえ、遠ざかるときには音は低く聞こえる。このように、音源が観測者に近づくときと、遠ざかるときで、観測者に聞こえる音の高さ(振動数)が音源の高さと異なる現象をドップラー効果という。ドップラー効果は音源が静止していて、観測者が音源に近づいたり遠ざかる場合にも起こる。

また、ドップラー効果は音波だけでなく、光や電波にも見られ、波源と観測者が相対的に近づいたり遠ざかる場合に起こる。

(1)音源 S と観測者 O が共に静止している場合

音速を c 、音源の振動数を ν 、
音源の波長を λ とすると、

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

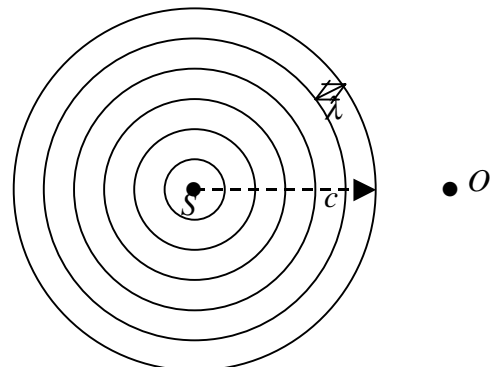


図 3 - 47

(2)音源 S が観測者 O に近づく場合

音速を c 、音源の移動速度を u 、
(音源移動時の)音源の振動数を ν' 、
音源の波長を λ' とすると、

$$\lambda' = \frac{c-u}{\nu} = \lambda \left(1 - \frac{u}{c}\right)$$

$$\begin{aligned} \nu' &= \frac{c}{\lambda'} = \frac{c\nu}{c-u} \\ &= \frac{\nu}{1 - \frac{u}{c}} \end{aligned}$$

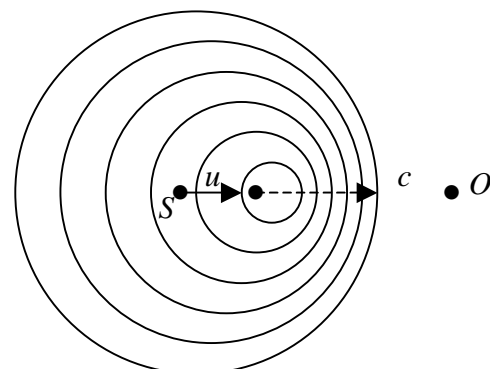


図 3 - 48

- (3)音源 S が観測者 O から遠ざかる場合
 音速を c 、音源の移動速度を u 、
 (音源移動時の)音源の振動数を ν' 、
 音源の波長を λ' とすると、

$$\lambda' = \frac{c+u}{\nu'} = \lambda \left(1 + \frac{u}{c}\right)$$

$$\begin{aligned} \nu' &= \frac{c}{\lambda'} = \frac{c\nu}{c+u} \\ &= \frac{\nu}{1 + \frac{u}{c}} \end{aligned}$$

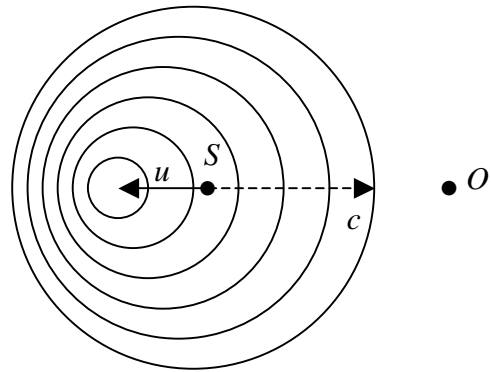


図 3 - 49

- (4)静止している音源 S に観測者 O が近づく場合
 音速を c 、観測者の移動速度を v 、
 音源の振動数を ν' 、
 音源の波長を λ とすると、

$$\begin{aligned} \nu' &= \frac{c+v}{\lambda} = \frac{\nu}{c}(c+v) \\ &= \nu \left(1 + \frac{v}{c}\right) \end{aligned}$$

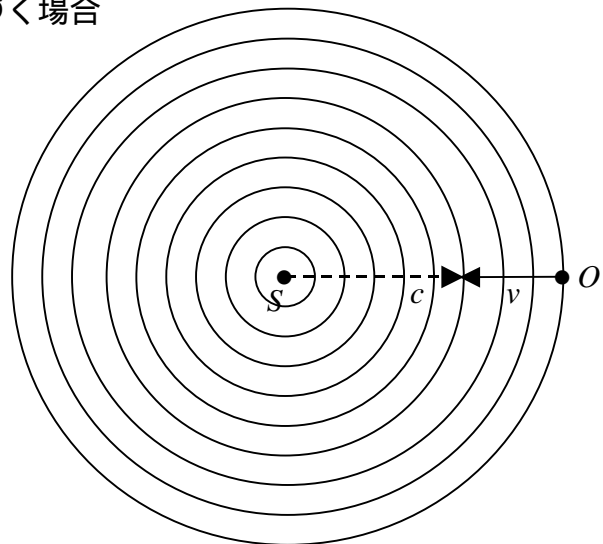


図 3 - 50

- (5)静止している音源 S から観測者 O が遠ざかる場合

$$\begin{aligned} \nu' &= \frac{c-v}{\lambda} = \frac{\nu}{c}(c-v) \\ &= \nu \left(1 - \frac{v}{c}\right) \end{aligned}$$

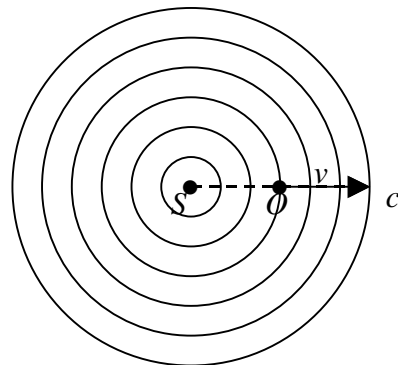


図 3 - 51