

第3章 波動

はじめに

振動や波動現象は広範な物理現象と深く関連する重要なテーマである。共鳴（共振）、位相、振動の伝播、干渉という抽象的な物理概念を具体的な現象として視覚的に理解させることを目的として、数少ないながら興味ある実験テーマを選んで実演した。

波動の特色は周期運動である。周期運動でもっとも簡単なものは力学の章で述べた円運動である。また単振動も周期運動のひとつである。さらに波動は空間的にも時間的にも伝わって行く。周期運動の仕方や波の伝わり方にはさまざまあり、以下順にその特徴を述べる。

§ 3.1 簡単な周期運動（振子の運動：単振動）

ばね振子や単振子のような周期的の往復運動を単振動という。

図3-1のように、等速円運動をしている物体に左側から平行光線を照射すると、その正射影は右側のスクリーン上で往復運動をするので、その時間的变化は、図3-2のようなサインカーブを描く。物体Pが半径Aの円周上を角速度 ω で等速円運動をすると、スクリーン上の影P'の位置x[m]は、 $x = A \sin \omega t$ となる。時刻 $t=0$ のときの角度を ϕ とすると、P'の位置xは、

$$x = A \sin(\omega t + \phi)$$

で表される。上式は単振動の基本式で、Aを振幅、 ω を角振動数(または角周波数)、 $\omega t + \phi$ を位相、 ϕ を初期位相という。振幅Aは変位の最大値を表す。また、1秒間に振動する回数 ν を振動数(周波数)とよび、その単位にはHzを用いる。振動数の逆数、つまり1振動に要する時間Tを周期という。角振動数、周期、振動数は、それぞれ等速円運動の角速度、周期、回転数に対応するので、 ω 、T、 ν の間には次の関係が成り立つ。

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

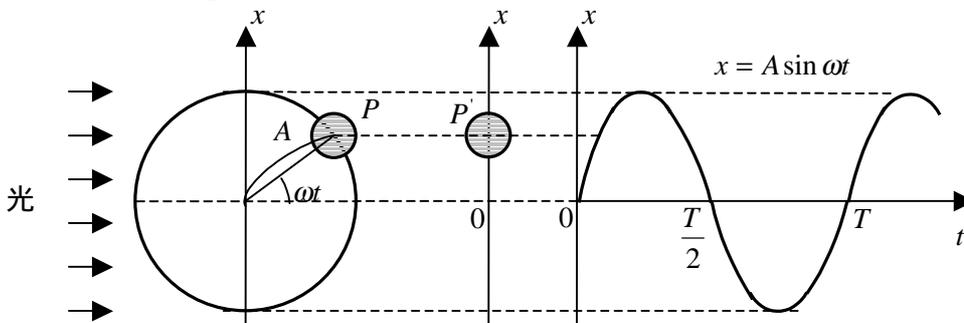


図3-1 等速円運動とその影の運動

図3-2 影の運動の時間的变化

4 A) ばねの振動運動：連結振動（島津製）

図3-9のようなおもりを吊るしたばね2本を同じ棒に吊るし、2本のばねをゴムで連結する。このときのばねの振動の様子をみる。

・運動の変化の様子

左側のおもりを引いてばねを振動させる。左側のばねの振幅が小さくなるにつれて、右側のばねが振動し始め、どんどん振幅が大きくなる。やがて左側のばねが止まる。このとき、右側のばねの振幅は最大になる。

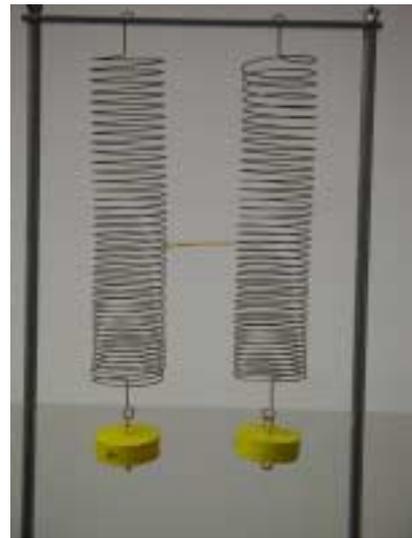


図3-9 共振り振子

右側のばねの振幅が小さくなるにつれて、左側のばねが振動し始め、どんどん振幅が大きくなる。

やがて右側のばねが止まる。このとき、左側のばねの振幅は最大になる。

～ が繰り返される。

2本のばねを連結しているゴムを通してエネルギーが移動する。

このとき2つの振子の振動の位相はずれていて、一方の振子の振動が他の振子に対する外力として作用して強制振幅を起こし、作用・反作用の法則によって一方はエネルギーを失い、他方はエネルギーを獲得するということが交互に繰り返される。

4 B) 弱く結合した2つの単振子間のエネルギー振動

図3-10のように糸で連ねた2つの振子の片方を止めておいて、もう一方を振動させたときの運動の様子をみる。＜赤い方の振子を振動させる。＞

・運動の変化の様子

赤い振子は振動によるエネルギーを持つ。赤い振子のエネルギーが糸によって少しずつ銀色の振子に伝わる。赤い振子の振幅は弱くなり、銀色の振子が振動を始める。

やがて、赤い振子は静止し、銀色の振子の振幅が最大になる。

今度は銀色の振子から赤い振子へと ～ と同様の変化が見られる。

～ のエネルギーの移り変わりが繰り返される。

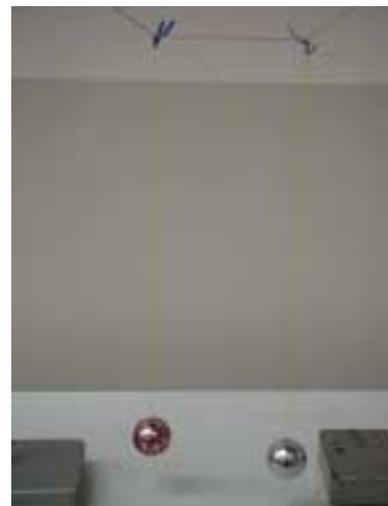


図3-10

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の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。

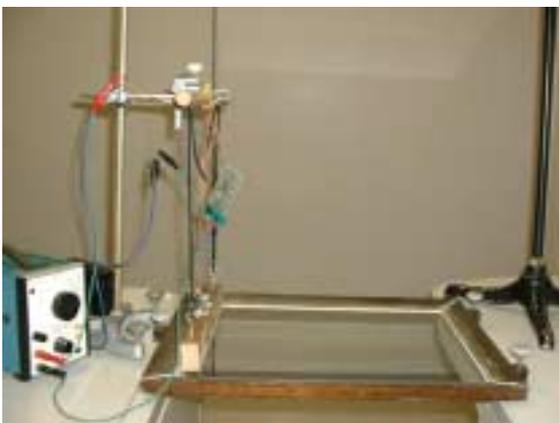
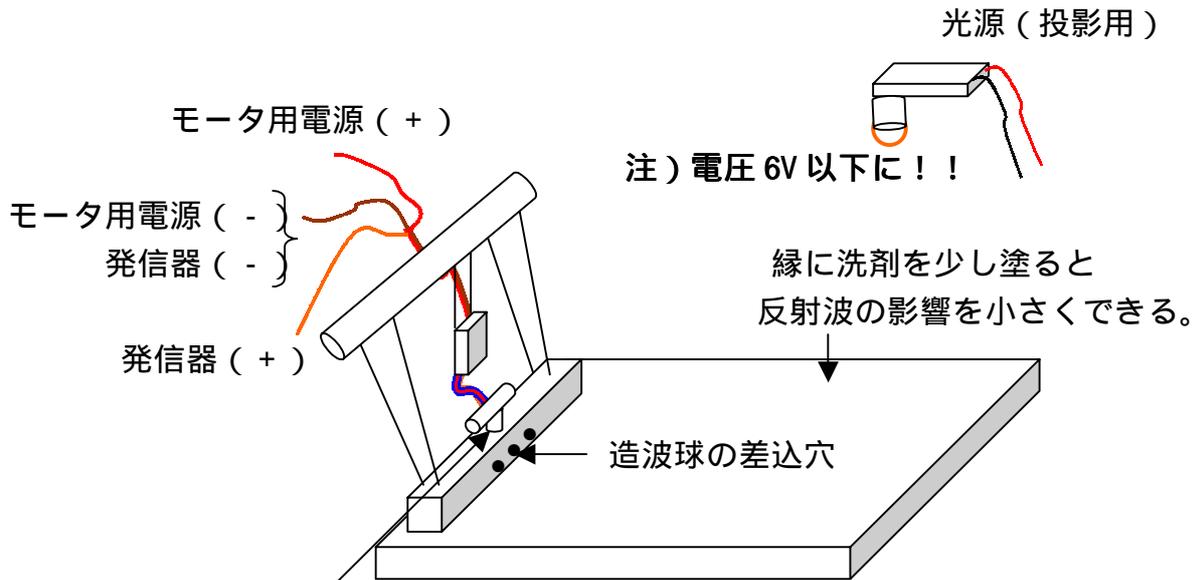


図3-22 水面波発生装置(全体)



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。

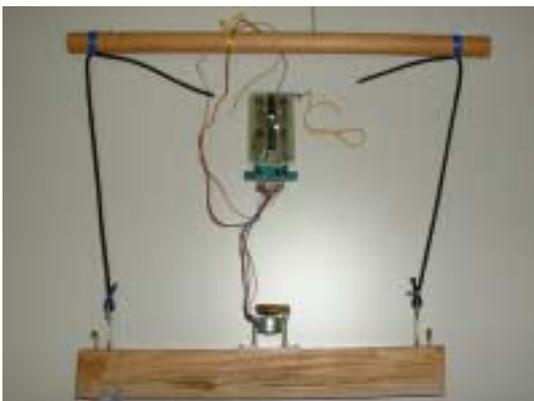


図 3 - 25 パルスモータ



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

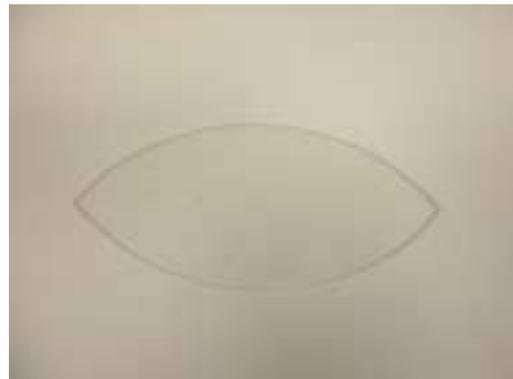


図 3 - 28 台形のガラス板（波の屈折） 図 3 - 29 凸レンズ形のガラス板（レンズ作用）



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。

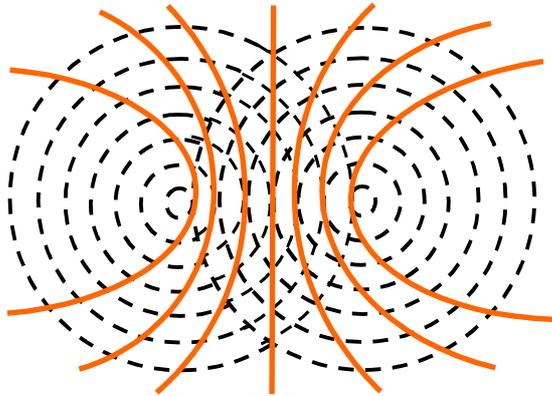
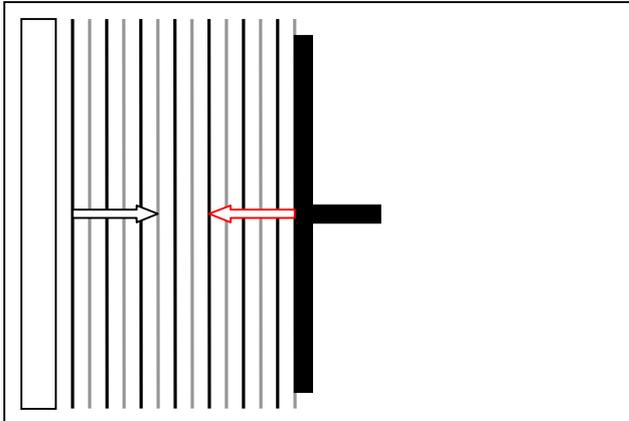


図 3 - 32 2つの波源（球面波）からの干渉
（発振器の周波数：180Hz）

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。



⇒ 平面波の進行方向 ⇒ 反射波の進行方向



図 3 - 34 定常波
（発振器の周波数：180Hz）

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。

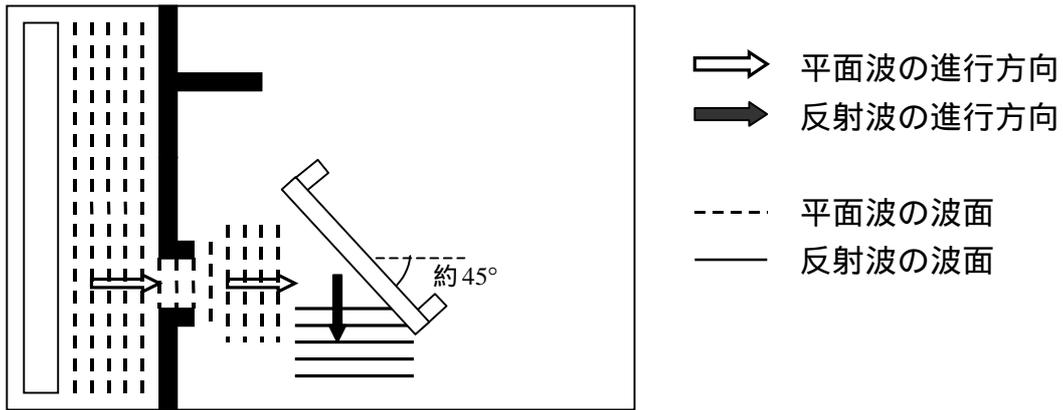


図 3 - 35

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見える。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。

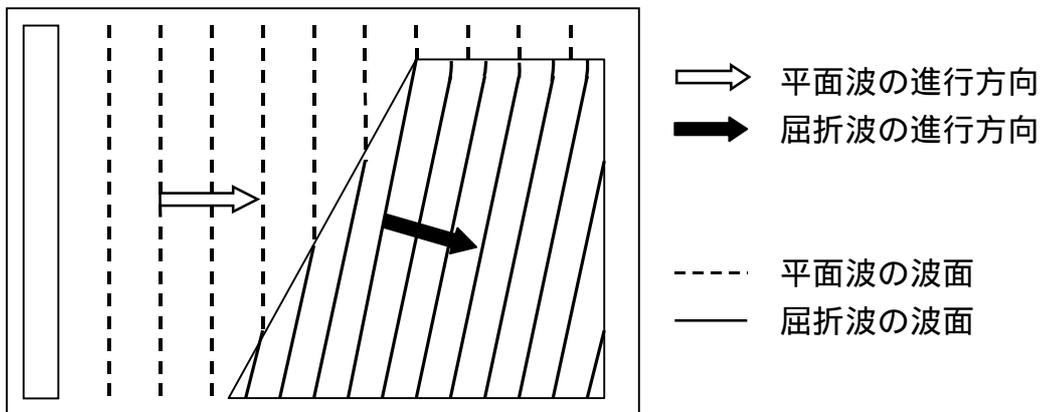


図 3 - 36

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

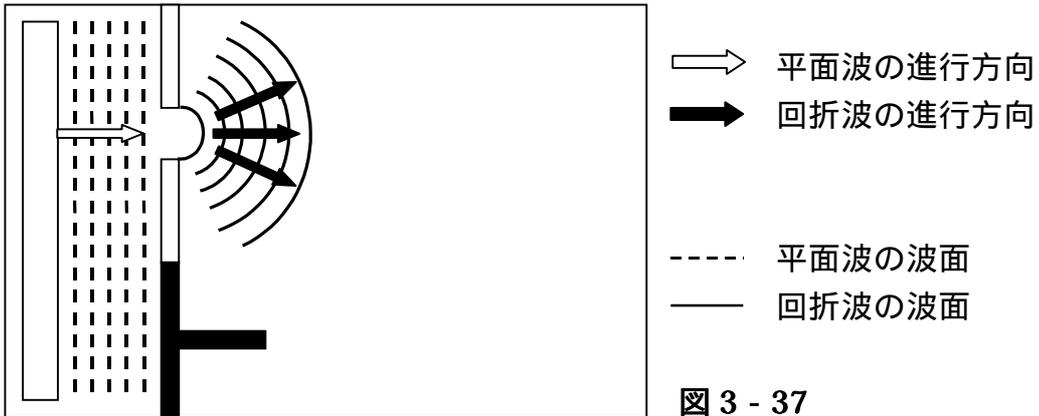


図 3 - 37

(2) スリット幅が（波長に比べて）大きいとき

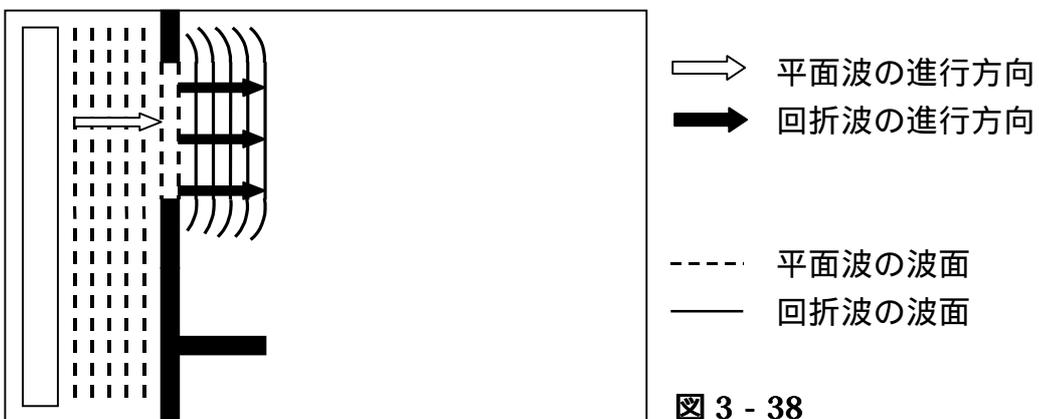


図 3 - 38

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。

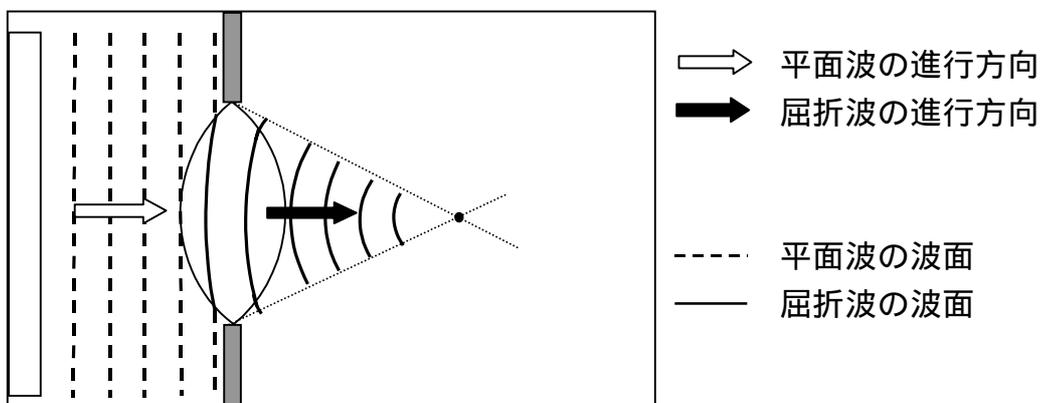


図 3 - 39

: 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。

8 C) Kundt の実験（島津製）

音の速さの測定法の1つ。

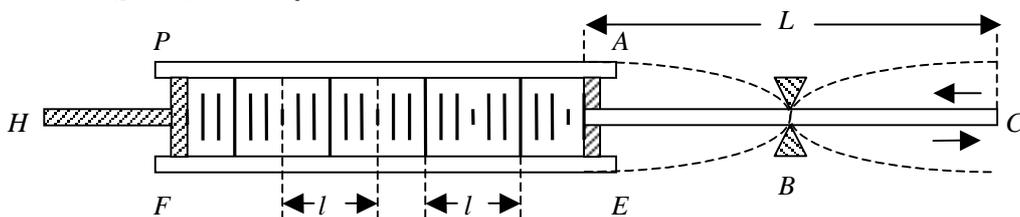


図 3 - 44

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 の空気中の音速 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れば式から 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。

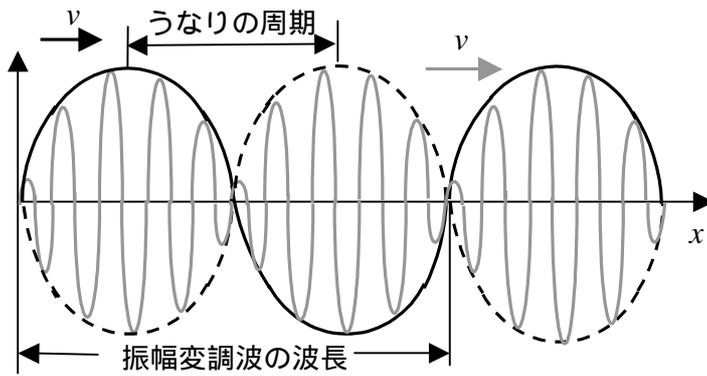


図 3 - 45



図 3 - 46 目入