講義内容

前回、前々回に引き続きＮＨＫ企画 アメリカＭＩＴ「ウオルター・ルーウィーン教授による実験物理（１～８回）の内、第６回「音（ＳＯＵＮＤ）の正体？」のＤＶＤ映像（約５０分）観て、その解説、実験、演習問題などを行います 。

※マサチュウセッツ工科大学Ｍａｓｓａｃｈｕｓｅｔｔｅ Ｉｎｓｔｉｔｕｔｅ ｏｆ Ｔｅｃｈｎｏｌｏｇｙ（ＭＩＴ）１８６１年創立（アメリカ南北戦争勃発）

所在 ボストン郊外、ケンブリッジ（ハーバード大学もここ）

講師 物理学名誉教授ウオルター・ルーウイン（Ｗａｉｔｅｒ Ｈ、Ｇ、Ｌｅｗｉｎ）

「ＭＩＴ白熱教室」

第６回「音の正体？」

１．固有振動と共振の基本の理解

２．弦と管の振動と共鳴

音に秘められたパワー、 さまざまな 共振

３．タコマ・ナローズ橋の崩落、レイケ管、金属板の共振（クラドニ図形）

ヘリウムの音声

ＤＶＤ映像を観る前に

・波（波動）とは、それを伝える媒質（空気、水、地殻、綱、糸・・・など）が波の進行方向に直角に振動する横波と同じ方向に振動する縦波（粗密波）がある。

例・地震の波 先ず横揺れ Ｐ波（Primarywave)縦波速度５Km/sが来て、次ぎに上下動のＳ波（Scondarywave）横波速度３Km/sが来る。

横波････固体中のみ伝わり、液体・気体中は伝わらない

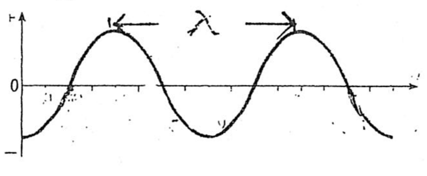
縦波････固体・液体・気体中を伝わる

・ つまり、音は空気が 媒質の縦波(粗密波)である。しかし、図形としては粗密波は（||| |||| ||| ||||）と書きにくいので横波の図形で書いている 参考図１（４Ｐ）で山から谷への斜面(Ａ点付近）が密部 、 谷から山への斜面(Ｂ点付近）が疎部である。

・波の振動数(ｆ）について

振動数とは１秒間に波の１振動が何回あるかということである。単位はHzヘルツ（サイクルともいう）である。ＮＨＫラジオ第一放送の電波の振動数は590Kサイクル. 5.9×10^5 HZ、この電波は1秒間に59万回振動していることになる。

・波長 λ ラムダ とは 波の山から山、谷から谷の距離、単位はｍ である。



・振動数と波長の関係

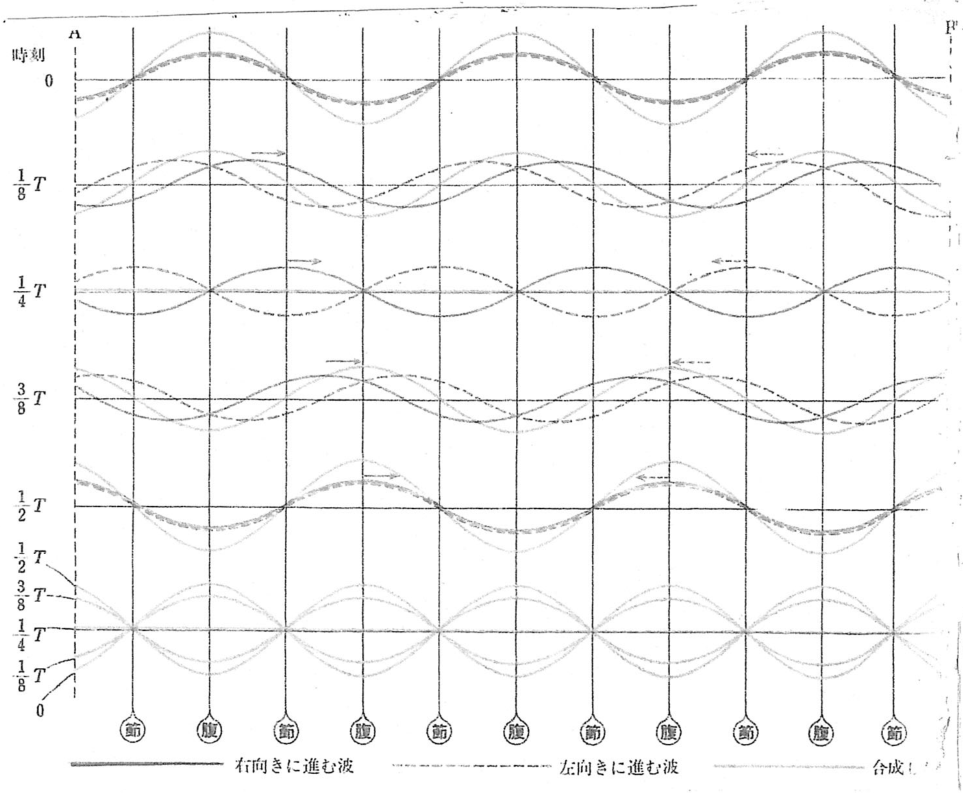
波が１波長 λ m進んだとき波は１振動したことになる。

波の進む速さをＶm/sとすると波は1秒間にＶm進む、このＶmに入る波長 λ mはＶ/λ つまり、これは1秒間の振動の数、振動数である。

ｆ＝Ｖ/λ Hz ･･････(1)

・定常波について

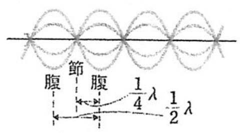
図において波源 A、Bから振動数、波長、振幅の等しい波が互いに逆向きに進んで重なりあって（干渉）いる。それを合成した波が赤実線であり、これを定常波という。全く振動しない点･･･節 と最も良く振動する点･･･腹が交互に並んでいる。節と節(腹と腹)の間隔はもとの波の波長の半分、腹における振幅はもとの波の2倍



定　常　波

最も大きい振幅はもとの波の２倍(腹の位置)

最も小さい振幅は０(節の位置)，振動の周期，振動数はもとの波と同じ

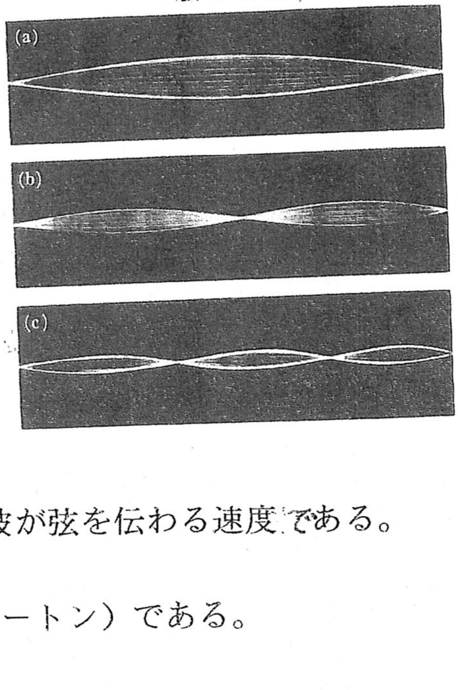


・固有振動数と共振（共鳴）について

どんな物体（振動体）にもそれ自身固有の振動数を持っている。これをその物体の固有振動数という。外からその固有振動数と同じ振動数の振動を加えるとエネルギーがその物体に伝わり、振動を始める、これが共振（共鳴）である。

・弦の振動

弦の振動



弦（ギター、ヴァイオリンなど）をはじく、こするといろいろの振動数の波が右向き左向きに生じて互いに打ち消しあって消滅するものもあるが、うまく位相が合い、定常波ができるような振動だけが残りそれが継続して音を鳴らすのである。

・弦の固有振動

出来た定常波の元の波長の一番長いものをλ_1とすると(a)図の場合（節と節の間隔は弦の長さl）その波長はlの2倍になる。

$\lambda_1 = 2l$, $\lambda_2 = 2l/2 = l$ ･･････ $\lambda_n = 2l/n$

振動数と波長の関係の（1）式　$f = V/\lambda$　でVは波が弦を伝わる速度である。

$V = \sqrt{S/\rho}$　と表すことがわかっている。

ここでρは線密度Kg/m　、Sは弦を引っ張る力N(ニュートン）である。

$f_1 = V/\lambda_1 = V/2l = (1/2l)\sqrt{S/\rho}$

$f_2 = V/\lambda_2 = 2 \times V/2l = (1/l)\sqrt{S/\rho} = 2f_1$

・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

$f_n = V/\lambda_n = n \times V/2l = (n/2l) \cdot \sqrt{S/\rho} = n f_1$ （nは自然数）

・この式から解ること　弦が短い程、 線密度（弦の重さ）小さい程、弦を強く張る程振動数fは多くなり、したがって音が高くなることがわかる。

・弦の固有振動数

このように弦が定常波になる振動を弦の固有振動、その振動数が弦の固有振動数である。n＝1 のときを基本振動、n＝2のときを2倍振動、n＝3を3倍振動・・・・・・・・・そのとき生ずる音を基本音、2倍音、3倍音・・・・・・・・・という。

・気柱(管)の振動

(楽器の楽器のフルート、クラリネット、オーボエなど)

管は一方が開き、他方の口が閉じたものを・・閉管　両方の口とも開いた管を・・開管がある。この管の振動の考え方は定常波が管内にできる振動数、固有振動数、基本音、2倍 音、3倍音・・・・・等弦の振動と基本的には同じである。違いは音の発生源が弦(固体)ではなく空気(気体)であること。したがって波の伝わる速度Vが音速331.5+0.6t(m/s)、tは気温で常温でほぼ 340m/sである。

閉管内の定常波の波長と振動数　閉管の長さを l (m)，音の速さを v (m/s)，各場合の定常波の波長をそれぞれ λ_1 (m)，λ_3 (m)，λ_5 (m)，……，振動数を f_1 (Hz)，f_3 (Hz)，f_5 (Hz)，……とすると

$$l = \frac{1}{4}\lambda_1,\ l = \frac{3}{4}\lambda_3,\ l = \frac{5}{4}\lambda_5,\ \cdots\cdots$$

$$\therefore\ \lambda_1 = 4l,\ \lambda_3 = \frac{4}{3}l,\ \lambda_5 = \frac{4}{5}l,\ \cdots\cdots,\ \lambda_m = \frac{4l}{m}\quad (m\text{は奇数})$$

$$\therefore\ f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4l},$$

$$f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = \frac{3v}{4l} = 3f_1,$$

$$\cdots\cdots,\ f_m = \frac{v}{\lambda_m} = \frac{mv}{4l} = mf_1\quad (m\text{は奇数})\quad \cdots\cdots④$$

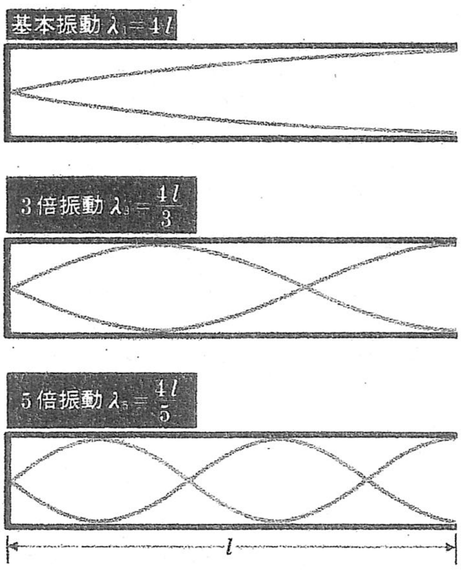


図 3-72　閉管内の気柱の振動

3 気柱の固有振動　このように，管内の気柱には特定の振動数の定常波だけができる．この振動を気柱の**固有振動**といい，その振動数を**固有振動数**という．固有振動が $m=1$ のときを**基本振動**，$m=3$ のときを **3倍振動**……，といい，そのとき生ずる音をそれぞれ**基本音**，**3倍音**，……という．一般に，閉管のm倍音の振動数は基本音の振動数のm倍（mは奇数）である．

4 開口端補正　詳しく調べると，腹の位置は開端よりは少し外部のところになっている．このため，気柱の長さが管の長さより少し長くなる．このための補正（管口から腹の位置までの距離）Δl を**開口端補正**（または**管口補正**）という．

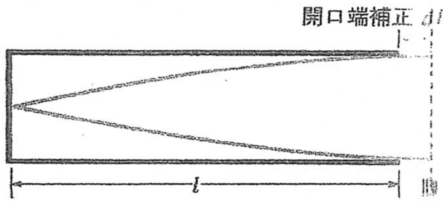


図 3-73　開 口 端 補 正

Δl の値は kr（r は管口の半径）で与えられ，k の値は管口の形によって異なる値をとることがわかっている（普通の円筒管では $k=0.6$ くらいである）．

・開管内の定常波の波長と振動数

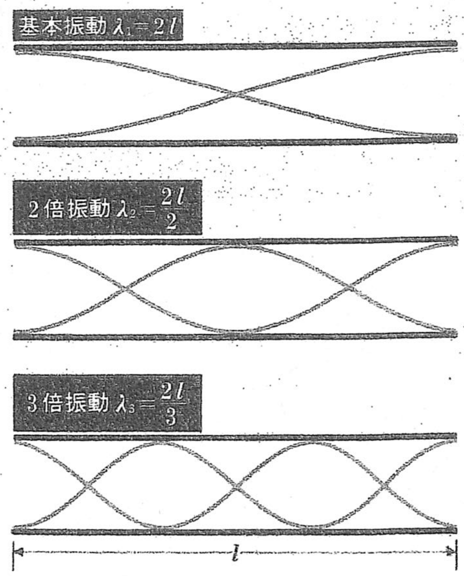


図 3-74　開管内の気柱の振動

開管内の気柱の振動でも，両方の開端は自由端となるような反射をするので（実際には開口端補正があり，管の少し外側が腹になる），両端が腹になるような縦振動の定常波ができる．ある瞬間の波形を横波のように表すと，図 3-74 のようになる　さて，両端の開口端補正を無視して，それぞれの場合の波長を λ_1 (m)，λ_2 (m)，……，振動数を f_1 (Hz)，f_2 (Hz)，……　とすると

$$l=\frac{\lambda_1}{2},\ l=\frac{2\lambda_2}{2},\ l=\frac{3\lambda_3}{2},\ \cdots\cdots,\ l=\frac{m\lambda_m}{2}\quad (m\text{は自然数})$$

$$\therefore\ \lambda_1=2l,\ \lambda_2=\frac{2l}{2},\ \lambda_3=\frac{2l}{3},\ \cdots\cdots,\ \lambda_m=\frac{2l}{m}$$

$$\therefore\ f_1=\frac{v}{\lambda_1}=\frac{v}{2l},$$

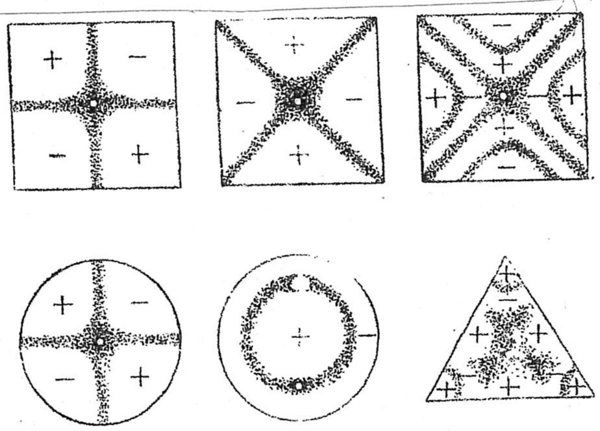
$$f_2=\frac{v}{\lambda_2}=\frac{2v}{2l}=2f_1,\ \cdots\cdots,$$

$$f_m=\frac{v}{\lambda_m}=\frac{mv}{2l}=mf_1\quad (m\text{は自然数})\cdots\cdots⑤$$

一般に，開管の m 倍音の振動数は基本音 $(m=1)$ の振動数の m 倍である．

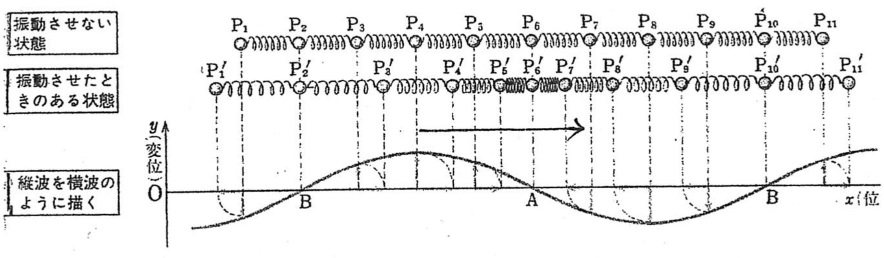
補足　**管楽器の音色**　フルート，クラリネットなどの管楽器はほとんど開管を用いている．管楽器では，このように気柱に定常波を起こさせて音を出すが，楽器の種類によって，倍音の混じり方が異なるために，同じ高さ（基本振動数で定まる）でも音色が異なる．

クラドニの図形



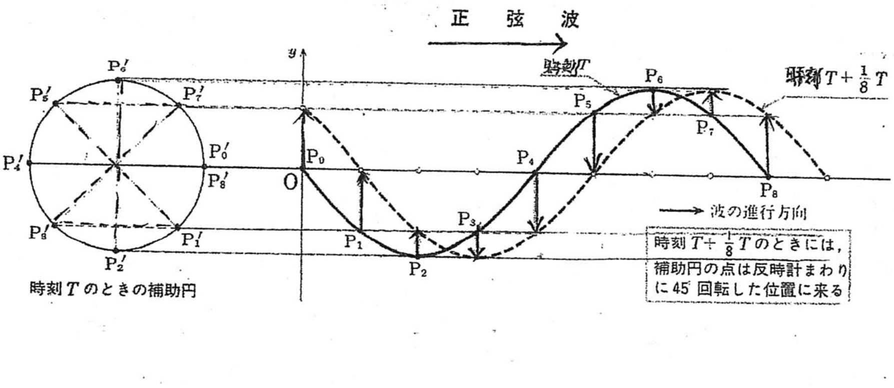
をまき，板を振動させて，砂が不動の部分に集まるのを見ればよい。これを**クラドニの実験**という。図…はこの方法でしらべた板の節線で図中の白い丸は板をささえた点，＋と－とは振動する方向が反対であることを示す。

参考図１



縦波の波形の図示

参考図２



・実験
共振、共鳴に関する実験

※ 気柱の振動

〔目的〕 気柱の共鳴を利用して，おんさの振動数を求める．

〔準備〕 手もちおんさ(350～400Hz)，メスシリンダー(100cc用)，スポイト(注水用)，気柱の共鳴装置，温度計，ものさし

〔実験〕 ① メスシリンダーにスポイトで水を少しずつ入れながら，管口近くでおんさを軽くたたき，おんさと最もよく共鳴するときの空気柱の長さ l を求める．3回測定し，その平均値を4倍した値 $4l$ をこのときの音の波長 λ とする．

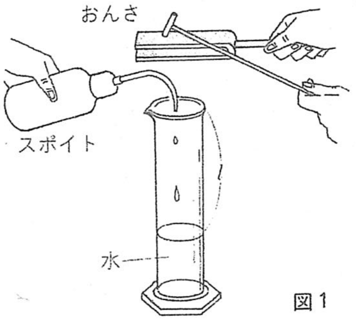


図1

② メスシリンダーの中の気温 t を測定し，このときの音速 v を，$v=331.5+0.6t$〔m/s〕の式から計算により求める．

③ 上の①，②から，おんさの振動数 $f\left(=\dfrac{v}{\lambda}\right)$ を求める．

	l〔m〕	$\lambda=4l$〔m〕	v〔m/s〕	f〔Hz〕
1				
2				
3				

④ 上と同じおんさを気柱共鳴装置の管口近くでたたき，共鳴管中の水面の高さをしだいに下げ，最初に共鳴する所までの気柱の長さ l_1 と，次に共鳴する所の気柱の長さ l_2 を求め，$\lambda=2(l_2-l_1)$ の式から，このときの波長 λ を計算し，管中の気温 t を求め，②の式から音速 v を計算しおんさの振動数 f を求めよ．

	l_1〔m〕	l_2〔m〕	l_2-l_1〔m〕	$\lambda=2(l_2-l_1)$〔m〕	v〔m/s〕	f〔Hz〕
1						
2						
3						

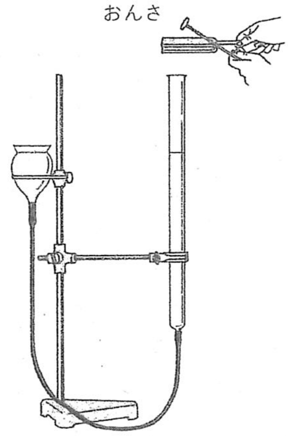


図2

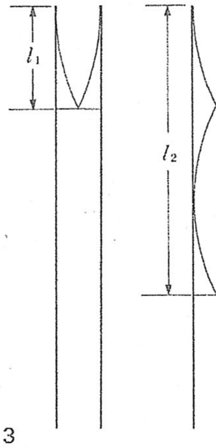
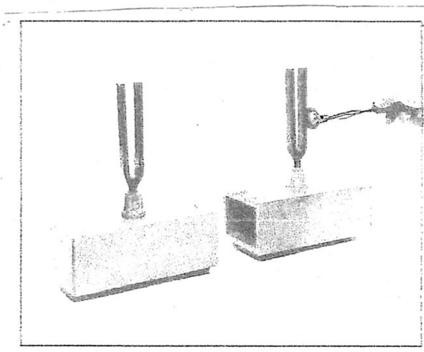


図3

〔研究〕 メスシリンダーで求めたおんさの振動数と，共鳴装置を用いて求めた振動数に違いがあるのはどうしてだろうか．その理由を考えよ．

※ 振動数の等しいおんさの共鳴



※ うなりの発生

振動数の等しい２つの音叉Ａ、Ｂの一方Ｂの両方の枝の端に針金を巻くと、Ｂの振動数がわずかに小さくなる。このようにわずかに振動数の違うおんさを同時に鳴らすとウアーン、ウアーンというなりが生ずる。

うなりの回数・・・・・１秒間に　$|f_1-f_2|$ である　（計算略）