

### 強磁性体のキュリー温度

強磁性体の磁気モーメントは、熱振動(磁気モーメントをそろえる力とそれを乱そうとする力)に影響を受けるので、温度が上昇するとその並び方が乱れるようになってくる。そして、物質ごとに定まったある温度(キュリー温度)で強磁性が失われ常磁性体となる。

磁化率  $x$  との間に

$$x = \frac{C}{T - T_c} \quad T : \text{絶対温度} \quad , \quad T_c : \text{キュリー温度}$$

の関係がある。 **キュリー・ワイスの法則**

#### 4 D) キュリー温度 < Fe 片, Ni 片を使用 >

Fe 片に磁石を近づけ、磁石にくっつくことを確認する。

↳ 磁化の弱いもの

(Fe 片が磁石についている状態で) Fe 片をバーナーで加熱すると、やがて磁石から離れる。

↳ この時の温度：キュリー温度

バーナーは弱い炎で Fe 片のみを加熱する

Fe 片に磁石を近づけてもつかない。

加熱をやめ、Fe 片が冷えると再び磁石につく。

キュリー温度 Fe : 760 Ni : 360
--------------------------

#### 4 E) キュリー温度を利用した消磁：熱消磁

鉄(Fe)片を磁石で磁化させ、くぎをつける。

バーナーで鉄片を加熱すると、くぎが少しずつ落ちていきやがて全て落ちてしまう。鉄片にくぎを近づけてもつかない。

#### 4 F) 磁歪(じわい)：磁気ひずみ

強磁性体が磁場により歪む(伸び縮みする)現象。

コイルを巻いた金属筒の中に Fe 棒を入れ、棒の一方の端をねじで固定する。

他方の固定台と棒の間にミラーのついた針を挟む。

ミラーに He - Ne レーザーを照射し、反射光の位置を確認する。

筒のコイルに直流電流を流すと、反射光の位置が(上下に)変化する。



図 4 - 62



図 4 - 63

- ・ Fe : 元の位置より下がる  
Fe 棒が伸びてミラーが下向きに押される

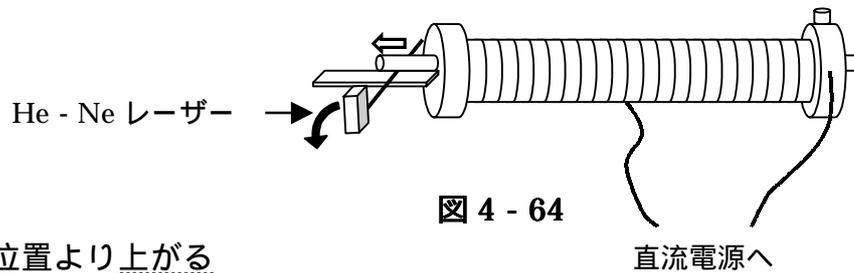


図 4 - 64

- ・ Ni : 元の位置より上がる  
Ni 棒が縮んでミラーが上向きに引っ張られる



図 4 - 65 実験装置全体図

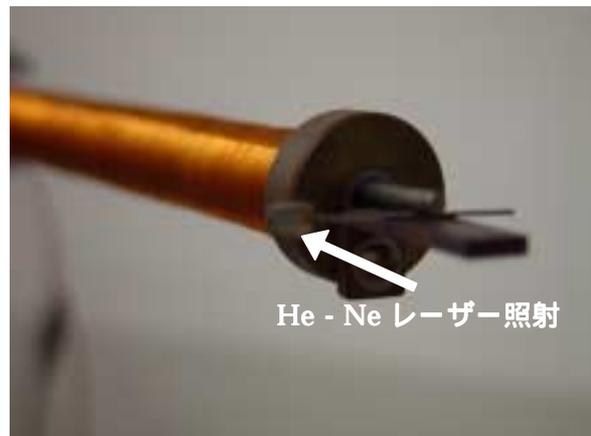


図 4 - 66 ミラー部分

## (2) 常磁性体

アルミニウム Al・白金 Pt・液体酸素  $O_2$  (liq)等の磁石に弱く引き寄せられる物質。

常磁性体の分子または原子は、電子磁気モーメントを持っており、それぞれが勝手な方向を向いていて全体として磁化は零である。磁場がかかると磁場の方向にそろおうとするが、熱運動がそれを妨げるので、全体としてわずかな磁化が生じる。

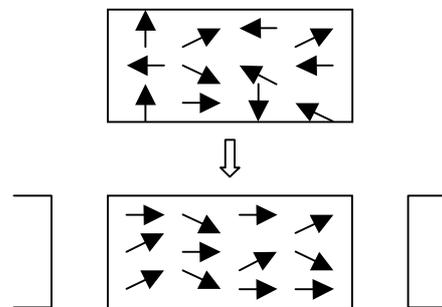


図 4 - 67

< 磁化の向き : 磁石に引かれる方向 (強磁性体と同じ) >

### 4 G) 常磁性体の実験

Al 片を図 4 - 68 のように磁石の間にぶら下げ、コイルに電流を流すと、磁石の隙間に引き寄せられる。

液体酸素

液体酸素を磁石に注ぐと磁石の隙間に引き寄せられて落ちる。(電流が流れていない時は引き寄

附磁用電磁石 < 島津製 >



図 4 - 68

せられずに流れ落ちる。反磁性の液体窒素と比較せよ。)

### 液体酸素の作り方 (図 4 - 69)

魔法瓶に液体窒素を入れ、空の試験管を漬けておくと、試験管の中に液体酸素が溜まる。(約 30min) これは、液体酸素の方が(液体窒素より)沸点が高いため、空気を冷却すると先に液体酸素ができる。



図 4 - 69

### (3) 反磁性体

$H_2 \cdot Cu \cdot H_2O \cdot Bi$  ・ ガラス等の磁石に反発される物質。

<身の回りにあるほとんどの物質>

反磁性体は外部磁場がなければ、内部に磁化はない。

これを磁石の間に置いて外部磁場が加わると、図 4 - 70 のような向きにミク

ロな磁化が生じ、磁石の N 極に近い側に N、S 極に近い側に S が現れる。 <外部磁場を打ち消そうとする向きに磁化が現れる> そのため磁石から反発力を受けて、両方の端が磁石から遠ざかるような配置をとる。図は誇張して描いているが磁化の値は常磁性の  $10^{-3}$  程度と小さい。

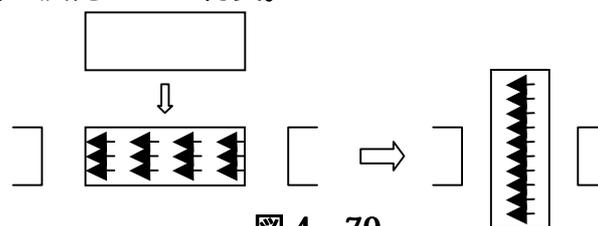


図 4 - 70

### 4 G) 反磁性体

Bi (ビスマス)

両端に Bi の付いた棒を図のようにセットする。Bi 部分に磁石の N 極・S 極どちらを近づけても反発力によって棒が磁石から遠ざかる方向に回転する。(図 4 - 71)

ガラス片

ガラス片を図 4 - 72 のようにセットして電流を流すと、磁石から遠ざかる方向に動く。

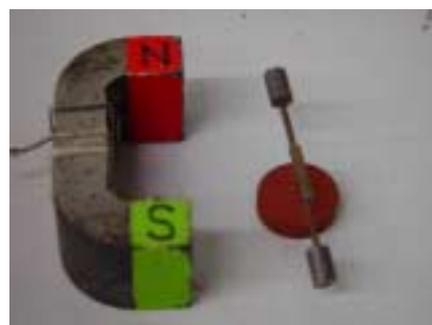


図 4 - 71 ビスマス

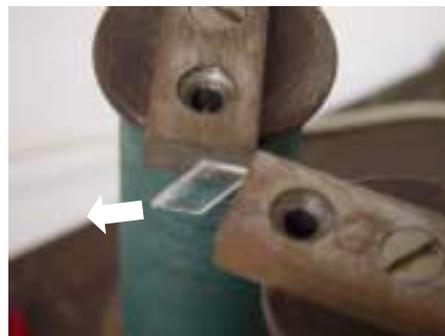


図 4 - 72

## § 4.5 電磁誘導

磁束の時間変化によって(導体)に起電力が生じることを電磁誘導という。

図 4 - 73 のような 1 次、2 次のコイルがあり、1 次コイルのスイッチを閉じて電流を流すと、2 次コイルに電流が流れ、1 次コイルの電流が一定になると、2 次コイルに電流は流れなくなる。次にスイッチを開くと逆方向に電流が流れる。 **電磁誘導**

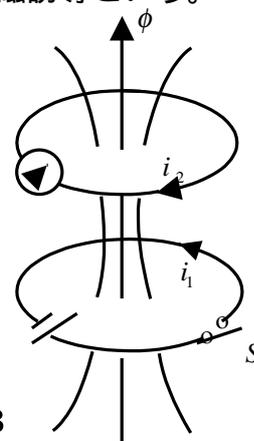
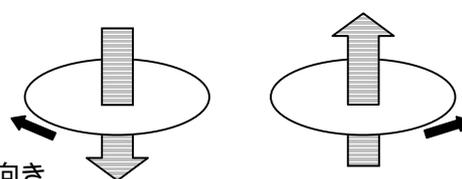


図 4 - 73

電磁誘導の際に生じる起電力を誘導起電力  
電流を誘導電流という。

### (1) 誘導起電力の向き

鎖交する磁束の変化を妨げる（外から加えられた磁束の変化を打ち消すような）向きに生じる。 **レンツの法則**



電流の向き

### (2) 誘導起電力の大きさ $e$

磁束  $\phi$  の時間変化の割合に比例する。

**ファラデーの電磁誘導の法則**

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (\text{V}) \quad < \text{- 符号はレンツの法則を示す} >$$

コイルの巻き数が  $n$  巻き的时候は誘導起電力も  $n$  倍になる。



図 4 - 74

## 5 A) 電磁誘導実験

**準備：**ガルバノメーターの鏡に He - Ne レーザ光を照射し、数メートル先の反射光の位置を確認する。電流が流れると平衡位置から左右に動く。

### 1. 地球磁場を変化させる

(コイル自身の向きを変える)

赤い束のコイルを直接ガルバノメーターに接続する。コイルを素早く 90° 回転 (右方向) させて、止める。

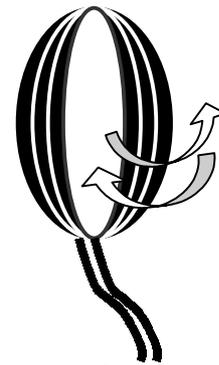
コイルを動かした瞬間的にコイルの中を通っている磁束 < (地球) 磁場 > が変化することにより、誘導起電力・誘導電流が生じる。



図 4 - 75 ガルバノメーター  
< 島津製 >

この電流によってガルバノメーターのミラーが微少に動き、その結果レーザーの反射光の位置も動く。

コイルを素早く元の位置まで〈左方向 90°〉回転させて、止める。



ガルバノメーターへ

図 4 - 76 地球磁場を変化させる方法

< 反射光の位置の動き >

例) のとき平衡位置から右方向に動くとする。

: 瞬間的に右方向に移動し、その後平衡位置まで戻る。

: 瞬間的に左方向に移動し、その後平衡位置まで戻る。



左右方向への移動距離は磁束の変化に比例する。

< 磁束を変えるその他の方法 >

1'. コイルを押しつぶしたり、広げたりする 2'. コイルの中に磁石を出し入れする

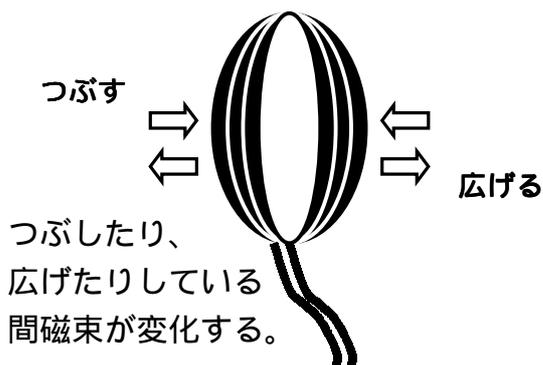


図 4 - 77

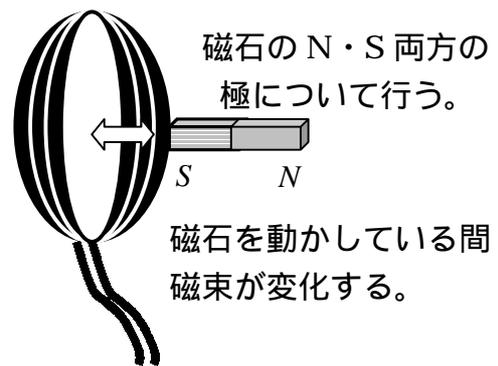


図 4 - 78

### 3 . 別 ( 左側 ) のコイルに電流を流す



・左のコイルはスイッチ・6V アルカリ蓄電池と直列回路になるように配線。

図 4 - 79

電流を流す瞬間と切る瞬間に磁束が変化

### 4 . 別のコイルの電流の大きさを変える



3 . のスイッチをスライダックと交換し、左コイルに流す電流量を変える。

図 4 - 80

電流量が変化している間磁束が変化

### 5 . 1 巻きコイルでの磁束の変化

( 地球磁場のつくる磁束の変化を利用 )

1 巻きコイルでも面積を大きくすることで、多重巻きコイルと同様に扱うことができる。

磁束は面積  $S$  と巻き数  $n$  に比例する。

$$\phi = nSB$$

と書ける。

1 . と同じ実験をして示す。



図 4 - 81 1 巻きコイル

#### 磁束 $\phi$ の定義

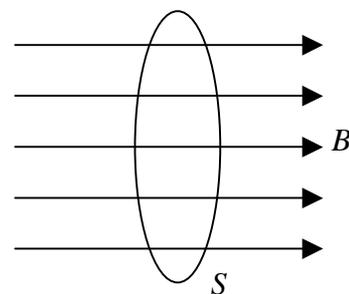
ある面積  $S$  ( $\text{m}^2$ ) を垂直に通る磁束密度  $B$  ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ ) の総量。

( 面積  $S$  を通る磁束線の総数 )

$$B = \frac{d\phi}{dS} \text{ (T)}$$

$$\phi = \int B_n dS = \int B \cos \theta dS \text{ (Wb)} \quad (1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2)$$

$\theta$  は面積  $S$  の法線と磁束密度  $B$  のなす角



磁束密度  $B$  の単位 : テスラ (T) の定義

1A の電流が磁場と垂直に流れているとき、電流 1m 当りに働く力が 1N になる場合の磁束密度を 1T と定義。 <  $1\text{T} = 10^4\text{G}$  ( Gauss ) >

## 5 B) 蛍光灯点灯の原理（逆起電力を見る）

レンツの法則は電流を流そうとする反対方向に起電力が発生するので逆起電力とよんでいる。

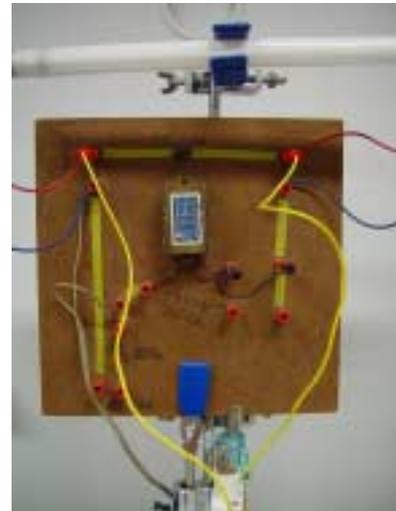
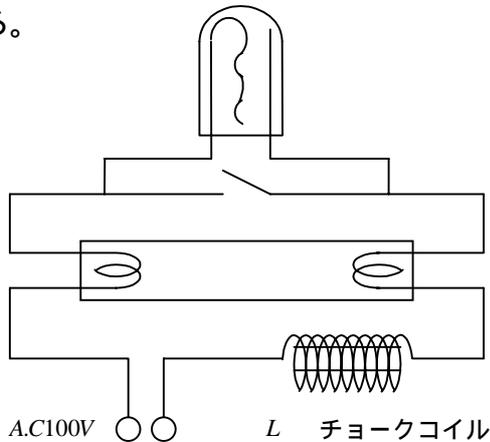


図 4 - 82

切換えスイッチを on 側にして電源を入れると蛍光灯はヒーターによって両端だけ明るくなる。(中央部分は暗い)

スイッチを off 側にすると、完全に点灯する。

⇒スイッチを切る瞬間にチョークコイル(鉄芯を入れ、巻き数を多くしたコイル)中の電流が急激に変化するので、大きな誘導起電力が生じて蛍光灯が点灯する。

蛍光灯の点灯開始には 200V 以上の電圧が必要であるが、いったん点灯すると電流がながれやすくなり、その後は 100V でも点灯を続ける。

スイッチを on 側にすると、再び両端のみが明るい(と同じ)状態になる。

スイッチを off 側にした状態で電源を入れても蛍光灯は点灯しない！！

↓ 蛍光灯を点灯させるためにスイッチを on・off するのは大変

グロー球(点灯管)を回路中に入れる(蛍光灯に並列に接続する)ことで自動的に点灯する。

スイッチは on・off どちらの状態であっても電源を入れると点灯する

### 点灯管のしくみ

点灯管に電流が流れるとバイメタル(青色)の部分が熱によって伸び、反対側の極板に近づく。反対側の極板との距離が非常に近づいてスイッチが入り、蛍光灯の電極を数秒間予熱して、蛍光灯を点灯させる。

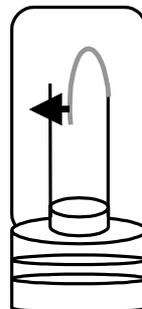


図 4 - 83 点灯管

## 5 C) 渦電流

導体板でも磁束の変化があればコイルと同様に誘導起電力が生じ、電流が流れる。このときの電流は環状になっているので、渦電流という。

渦電流は(ジュール)熱となって消費されるので、電力損失の原因となる。またブレーキとして働く。



図 4 - 84 Waltenhofen の振り子

### (1) Waltenhofen の振り子 (図 4 - 84・85)

図のように金属板を電磁石の間に吊るす。

の状態  
で金属板を の方に引いて手を離すと、金属板は振り子(単振動)運動を行い、減衰して静止するまで、かなり時間がかかる。

電磁石に電流を流して と同様の実験をすると、金属板はすぐに静止する。

金属板に渦電流が発生し、これが制動力となる。

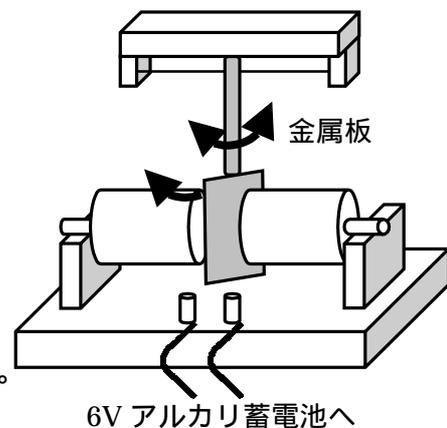


図 4 - 85 Waltenhofen の振り子

図 4 - 86 のような磁場中を金属板がの向きに動く時、金属板の手前部分には右側に N 極の磁石ができる様な誘導起電力が生じ、奥の部分には逆の誘導起電力が生じる。この結果、金属板がの向きに動くのを妨げる。

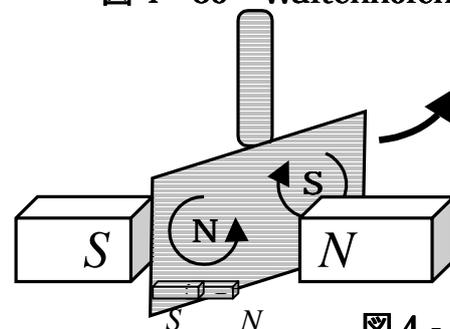


図 4 - 86

### (2) 渦電流実験器 < 島津製 >

まず円盤を手で回転させて、静止するまでの時間間隔をチェックする。

4V の電圧を加えて、と同様に円盤を手で回転させると円盤はすぐに止まる。

渦電流による影響

周囲に溝のある円盤の場合、4V の電圧を加えて回転させても静止時間は とほぼ同じ。 溝があるので渦電流が生じない

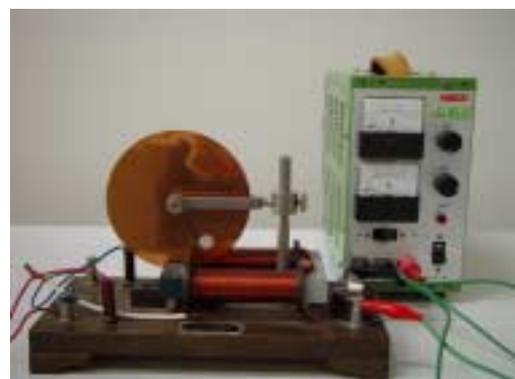


図 4 - 87 渦電流実験器

## 自己誘導と相互誘導

レンツの法則は次式に書ける。 $L$ は自己誘導係数で単位は1 A/秒の電流変化が1Vの起電力を発生するとき1ヘンリーである。

### (1) 自己誘導

回路を流れる電流が変化したとき、その回路に誘導起電力が生じる現象。

コイルに電流が流れると、その大きさに比例した磁束が生じるが、磁束は図に示すようにコイル自身と鎖交しており、コイル中の磁束密度 $\phi$  (Wb)は電流 $i$  (A)に比例する。

$$\phi = Li \quad (L: \text{自己誘導係数 単位) H = Wb/A}$$

よってこのときの誘導起電力(単位時間における磁束密度の変化の割合)は

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (\text{V})$$

となる。

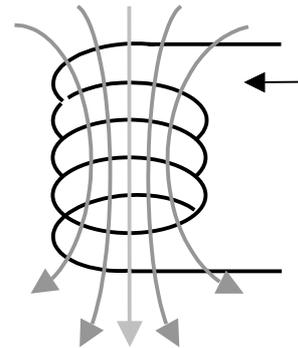
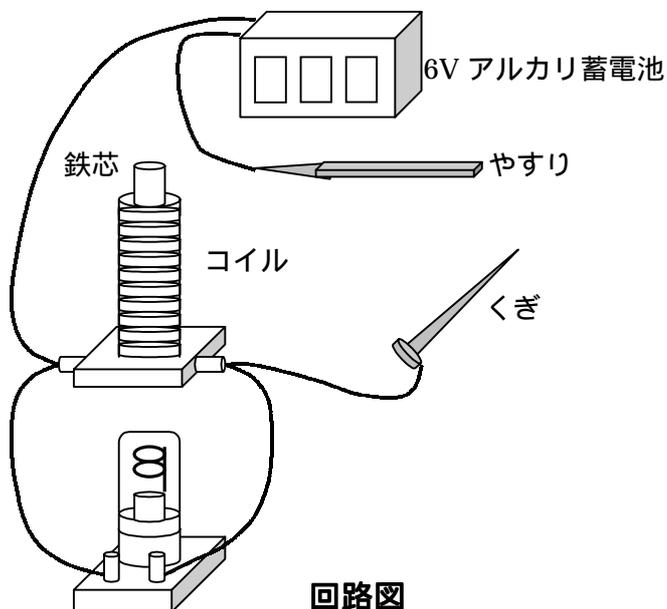


図 4 - 88

自己誘導係数(自己インダクタンス)の単位: 1H(ヘンリー)

回路を流れる電流が毎秒1Aの割合で変化したとき、自分の回路に1Vの誘導起電力が生じるような自己誘導係数という。

### 5 D) ネオンランプを点灯して明るさを比較



回路図



図 4 - 89

コイルとネオンランプを並列に接続しただけでは、ネオンランプは点灯しないが、回路図のようにやすりとくぎを回路に入れ、くぎでやすりをこするとネオンランプが点灯する。釘とやすりはパチパチ音を立てながら火花を散らし、こすり方を激しく(早く)する程ランプは明るくなる。

(2) 相互誘導

図4-79と図4-80のように2つの回路があり、一方の回路を流れる電流が変化すると、他方の回路に誘導起電力が生じる現象。

一方のコイル1に電流 $i_1$ (A)が流れるとき、これによって生じる磁束のうち、他方のコイルと鎖交する磁束を $\phi_{21}$ (Wb)とすると、

$$\phi_{21} = M_{21} i_1 \text{ (Wb)} \quad \text{Wb : ウェーバー}$$

で表され、この比例定数 $M_{21}$ を相互誘導係数(相互インダクタンス)という。単位はヘンリー。

相互誘導によって生じる起電力は

$$e_2 = -\frac{d\phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{di_1}{dt} \text{ (V)}$$

となる。逆にコイル2に電流 $i_2$ (A)を流すとき、コイル1と鎖交する磁束を $\phi_{12}$ (Wb)とすると

$$\phi_{12} = M_{12} i_2 \text{ (Wb)}$$

であり、コイル1に誘導される起電力は

$$e_1 = -\frac{d\phi_{12}}{dt} = -M_{12} \frac{di_2}{dt} \text{ (V)}$$

となる。従って

$$M_{21} = M_{12} = M \text{ (H)}$$

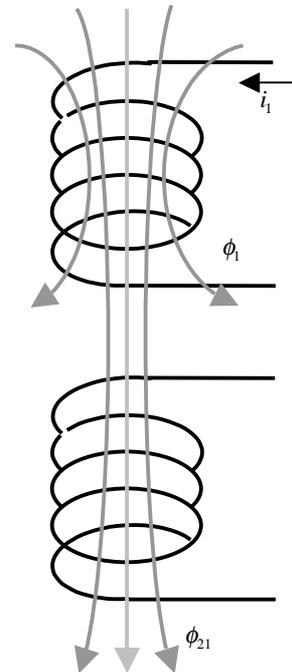
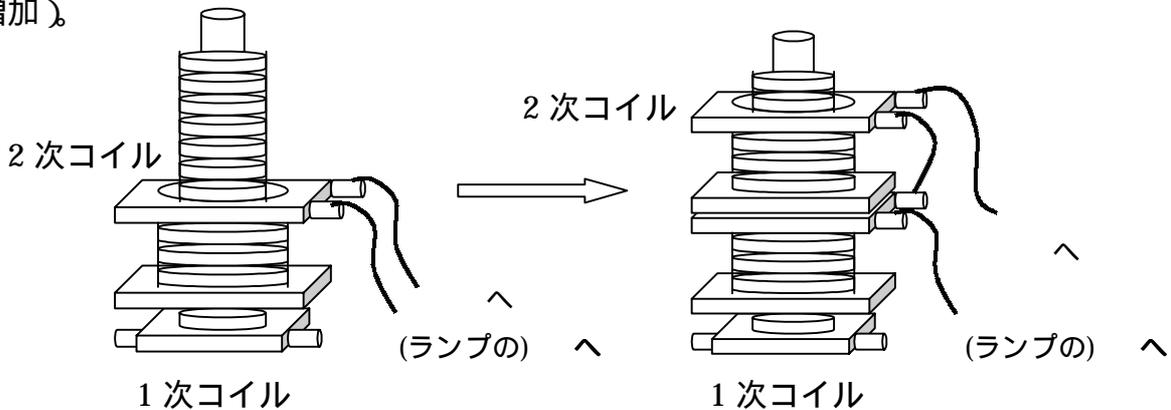


図4-90

5 E) ネオンランプを点灯して明るさを比較2

回路図 (p.114)の coils部分にさらにコイルを重ね相互誘導によるネオンランプの明るさを比較すると、自己誘導(p.114)のときよりネオンランプが明るく点灯する。

また、2次コイルの巻き数を増やすことで、さらに明るくなる(得られる電圧が増加)。



この原理を利用したのがスライダックである。

## 5 E) 相互誘導の利用

### (1) 電気溶接器：釘の溶接

図4-91のように溶接機器をセットし、部分に釘(2本)を置いて挟むと溶接できる。

↓ 理由

1次コイルは250回巻きに対して、誘導炉は数巻きなので、誘導炉の電圧は1次コイルより小さく(1/250)になるが、誘導炉に流れる電流が大きくなり大量のジュール熱が発生するため。



図4-91 釘の溶接

### (2) トムソンリング

図4-92のように装置を配線し、1次コイルに電圧を加えると、2次コイルにあたるリングに起電力が生じ(ローレンツ力の作用も加わって)浮き上がる。

**切れ目のあるリングは起電力が生じない!!**



図4-92

## ローレンツ力

動いている荷電粒子が磁場から受ける力

電荷  $q$  (C) をもった荷電粒子が磁束密度  $B$  (Wb/m<sup>2</sup>) の磁場中を磁場と角  $\theta$  (rad) をなす方向に速度  $v$  (m/s) で運動するとき、帯電粒子が受けるローレンツ力  $F$  (N) は次の式で表される。

$$F = qvB \sin \theta = q\vec{v} \times \vec{B}$$

ローレンツ力  $F$  の方向は、速度と磁束密度のいずれにも垂直で、その向きは、力の方向に右ねじを置いて、速度の向きから磁場の向きに回したとき、右ねじが進む向き。

< 右ねじの法則 >

< 導体の移動による誘導起電力 >

図のように、磁束密度  $B$  (T) の一様な磁界の中にある平行導体棒上を、直線導体が速度  $v$  (m/s) で移動しているとする。  $dt$  秒の間に移動する距離を  $dx$  とすると磁束と鎖交する面積は  $dS = ldx = lvdt$  となるから、ファラデーの法則によりこの回路に誘導される起

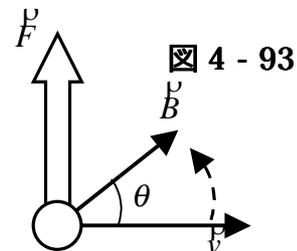


図4-93

右ねじを回す向き

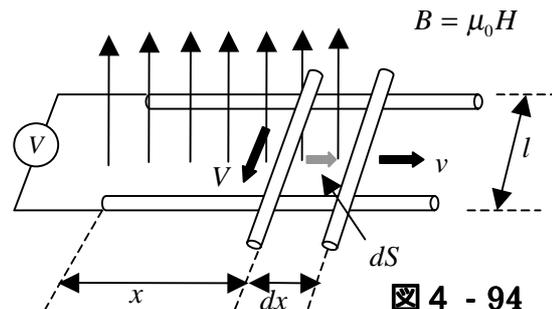


図4-94

電力は

$$V = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{Blvdt}{dt} = -vIB \text{ (T)}$$

で、導線の単位長さ当りでは

$$V_e = -vB \text{ (T)}$$

である。

そして、移動する磁束密度  $B$  と  $\theta$  の角度をなしているときは、単位長さ当りの起電力は

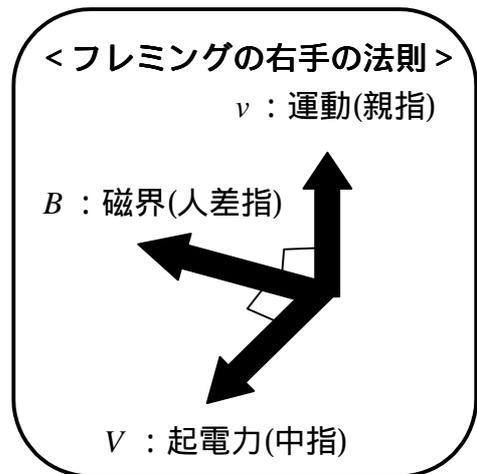
$$V_e = -vB \sin \theta \text{ (T)}$$

となる。

ここで、導線内にある自由電子に着目する。導線を動かすと電子も一緒に速度  $v$  で動くから、単位体積当りの電子の個数を  $n$ 、電荷を  $e^-$  とすると、ローレンツ力により

$$F = ne^-vB$$

の力が磁束密度および移動の両方に対し、直角に働くことになる。これにより、電子の移動が起こり、起電力が発生する。



### 5 F) 磁場中の金属棒の運動

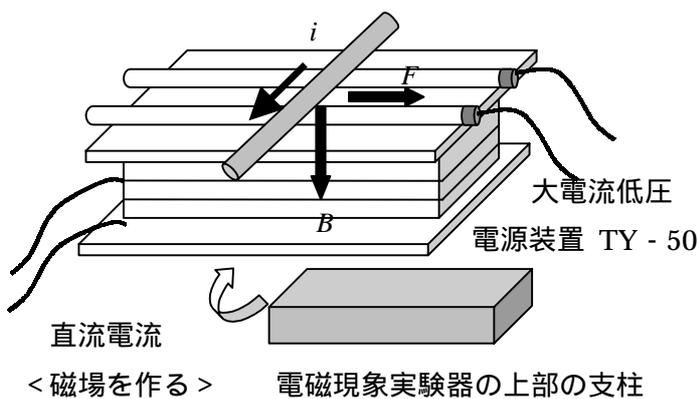


図 4 - 95 磁場中の金属棒の運動

上図のように配線して(電源装置の)電源を入れると、金属(鉄)棒は右方向に動く。フレミングの左手の法則より磁場は下向きとわかる。

└─▶ 電流が磁界から受ける力としてみているため

電源装置やアルカリ蓄電池の + ・ - を逆にした時の金属棒の動きも確認する。

## 5 G) ローレンツ力の応用

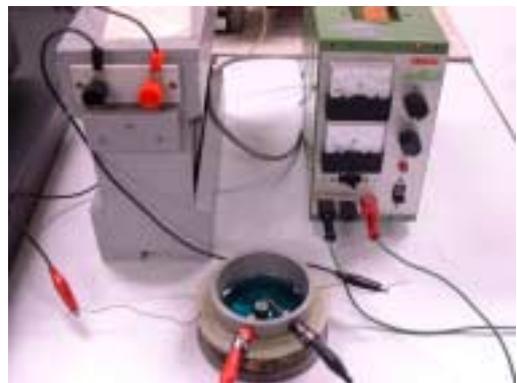
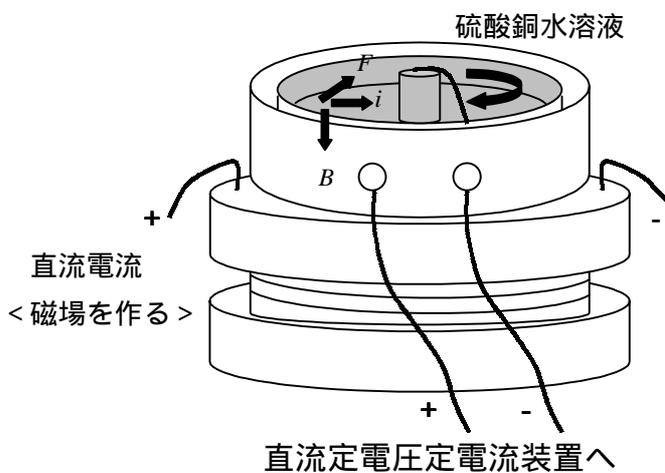
(1) スピーカーのボイスコイルに直流電流を流す  
 スピーカーを 6V アルカリ蓄電池に接続すると、スピーカー前面の円形の布部分が外側に押し出される。+・- の配線を逆にすると、内側に引っ張られる。

この前後運動(振動)によって音が聞こえる。



図 4 - 96

(2) イオンの動き：磁場中の電解液の運動



電流の向き：壁面から中心

図 4 - 97 磁場中の電解液の運動

このとき電場もかかっているので、この力も考慮する。

$$F = e\vec{E} + ev \times B$$

図 4 - 97 のように配線して電流を流すと硫酸銅水溶液は上から見て時計回り(右回り)に回転する。(水溶液に白い紙片を浮かせるとよくわかる。)

液中のある点でローレンツ力を考えると、フレミングの左手の法則より、磁場は下向き。



図 4 - 98

電源やアルカリ蓄電池の +・- を逆に配線したときの回転方向も確認する。

## § 4.6 荷電粒子の運動

### 6 A) ホール効果 <Komatsu ホール係数測定素子>

金属や半導体に電流が流れているとき、電流に垂直方向に磁場をかけると、両者に直角な方向に起電力が生じる現象。

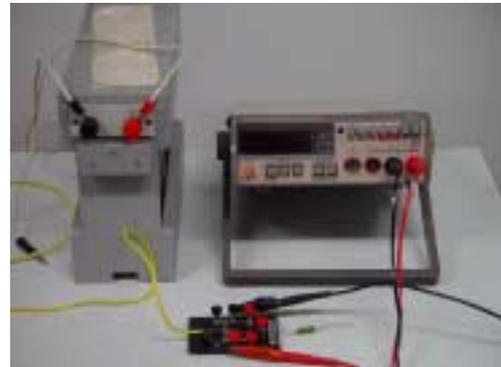
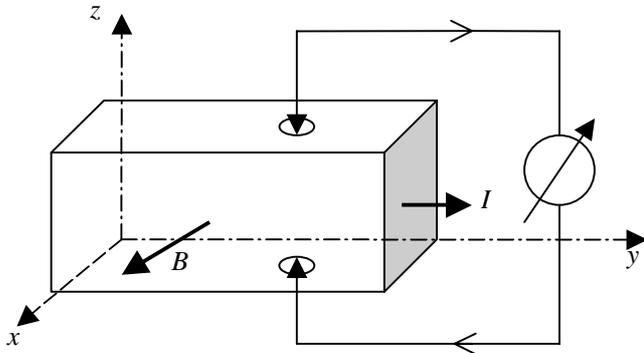


図 4 - 99

図 4 - 99 のようにホール素子とデジタル、電源を配線して、(デジタルの) 電圧値を測定する。ホール素子の中央部分に棒磁石を近づける。このとき磁場の影響によって電圧値が変化することを確認する。



図 4 - 100 ホール素子

(1)の状態での電圧 (mV)	16.3
S 極を近づけたときの電圧 (mV)	18.2
N 極を近づけたときの電圧 (mV)	14.7

ホール効果の応用 電圧値の変化を測定することで、磁場の大きさを求めることができる。<ガウスメーター等>

### 6 B) 荷電粒子の運動 (電子の流れは磁場によって曲げられる: 陰極線の性質)

発見当時にわかった陰極線の性質

物体によってさえぎられ、その物体の影をつくる。

磁場によって曲げられる。

電場によって、電場の向きと反対の方向に曲げられる。

羽根車に当てると、それを回すことができる。

上記性質は(陰極の)金属の種類や(管内の)気体の種類には無関係

陰極線は負電荷をもつ高速の粒子の流れで、その粒子は様々な金属に共通に含まれている。

**実験：**図 4 - 101 の装置を用いて陰極線 (電子線) の性質を確認する。

**配線**

放電用コイル：陰極線を作る  
 クルックス管専用電源器  
 ：電場を作る  
 6V アルカリ蓄電池：磁場を作る



図 4 - 101

放電用コイルで陰極線を作る  
 陰極線の向き：真空管の右から  
 左向き

の状態に電場をかけると陰極線は下向きに曲がる。

の状態に磁場をかけるとフレミングに左手の法則に従い陰極線は曲がる。

コイルの巻き方向がわからないので、磁場の方向は陰極線の曲がった方向から確認する。

**磁場の向きは紙面に垂直**

電場で曲がった陰極線を磁場によって元の位置まで戻すこともできる。  
 このとき  $eE = evB$  となっている。

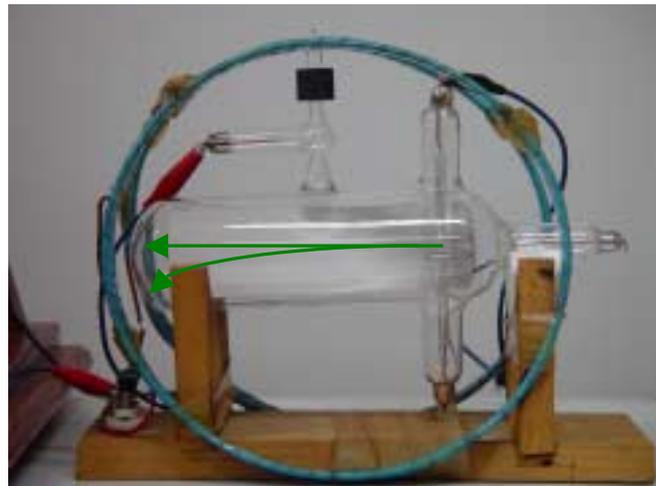


図 4 - 102

§ 4.7 交流回路

交流に対してコンデンサーは電流を通しやすいがコイルには逆起電力が働いて大きな抵抗を示す。これらの要素を含んだ回路について考える。

7 A) 回路のインピーダンス

(1)L だけを含む回路

自己インダクタンス  $L$ [H] のコイルに、交流電圧  $v$ [V] を加えたとき、 $i = I_0 \sin \omega t$  [A] で与えられる交流電流が流れるとする。

$\Delta t$  [s] 間に電流が  $\Delta i$  [A] だけ変化したとすると、コイルに生じる自己誘導起電力  $v$  [V] は、

$$v = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} = -\omega L I_0 \cos \omega t = \omega L I_0 \sin(\omega t - \pi/2)$$

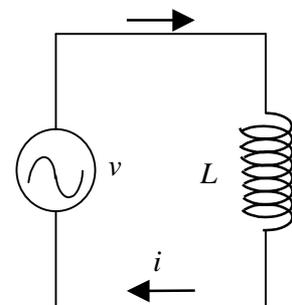


図 4 - 103

とかける。これが、電流の変化を妨げる働きとして、コイルに抵抗がなければ、外から加えられた電圧  $v$  とつり合っている逆起電力である。従って、加えられた交流電圧  $v (= -v')$  [V] は、

$$v = \omega L I_0 \sin \omega t = V_0 \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

で表される。  $V_0 (= \omega L I_0)$  は、加えた電圧の最大値である。

このとき、流れる電流は

$$i = I_0 \sin \omega t = \frac{V_0}{\omega L} \sin \omega t$$

となり、コイルに流れる電流  $i$  は、コイルにかかる電圧  $v$  より位相が  $\frac{\pi}{2}$  だけ遅れている。

また、上式より電流の最大値  $I_0$  と電圧の最大値  $V_0$  の間に

$$I_0 = \frac{V_0}{\omega L} \text{ の関係がある。よって、実効値 } I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}、V = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \text{ についても}$$

$$I = \frac{V}{\omega L}$$

$\omega L$  : 誘導リアクタンス

が成立する。

交流に対する抵抗の働きをする量で、単位はオーム ( $\Omega$ )。

実効値は電流の大きさの 2 乗平均根 (2 乗平均の平方根) である。



図 4 - 104 コイルと鉄心

### 実験

図 4 - 105 のようにコイルを配線して回路 (直列回路) を組み、140mA 程度の電流が流れるようにスライダックで調節する。

コイルに鉄心を入れて自己インダクタンス  $L$  を変えた (大きくした) 時の電流値の変化を確認する。

自己インダクタンス  $L$  を大きくすると、誘導リアクタンスが大きくなるので、電流値は小さくなる。

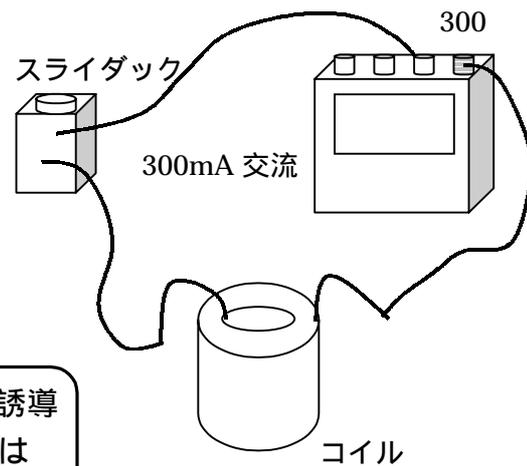


図 4 - 105

(2)C だけを含む回路

電気容量  $C$ [F] のコンデンサに交流電圧  $v = V_0 \sin \omega t$  を加える。回路に抵抗がなければ、電圧  $v$  はコンデンサの両極板にかかる電圧になり、コンデンサにたまる電気量  $q$ [C] は、

$$q = Cv = CV_0 \sin \omega t$$

である。電流は、この電気量の時間的な変化によって生じるから、

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \omega CV_0 \cos \omega t$$

となる。

ここで、 $I_0 = \omega CV_0$  とおくと、

$$i = I_0 \cos \omega t = I_0 \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

となり、電流の位相はコンデンサにかかる電圧

の位相より  $\frac{\pi}{2}$  だけ進んでいる。

$I_0 = \omega CV_0$  より、実効値について次の式が成立する。

$$I = \omega CV = \frac{V}{\left( \frac{1}{\omega C} \right)} \quad \frac{1}{\omega C} : \text{容量リアクタンス}$$

交流に対する抵抗の働きをする量で、単位はオーム ( $\Omega$ )。

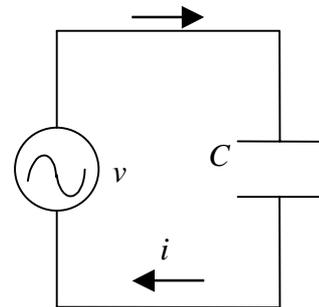


図 4 - 106



図 4 - 107 コンデンサ

実験

図 4 - 108 のように配線を行い、140mA 程度の電流が流れるようにスライダックで調節する。コンデンサの電気容量  $C$ [F] を変化させた時の電流値の変化を確認する。

電気容量を小さくすると、容量リアクタンスは大きくなるので、電流値は小さくなる。

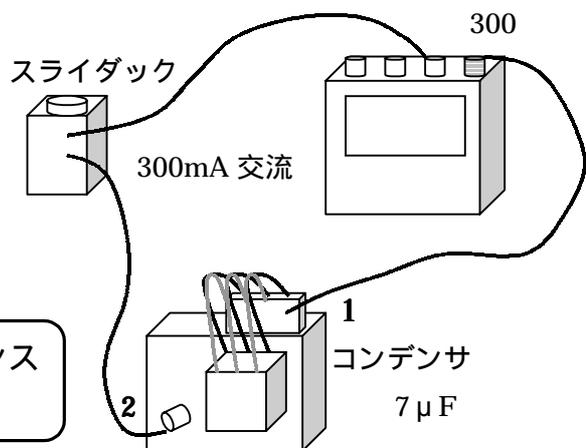


図 4 - 108

### (3)LRC 直列共振回路

図 4 - 109 のように抵抗値  $R[\Omega]$  の抵抗、容量  $C[F]$  のコンデンサ、自己インダクタンス  $L[H]$  のコイルを直列に接続し、交流電圧  $v = V_0 \sin \omega t$  を加えるとき、流れる電流  $i[A]$  が

$$i = I_0 \sin(\omega t - \alpha)$$

で表されるとする。また、抵抗、コンデンサ、コイルの両端の電圧を各々  $V_R, V_C, V_L [V]$  とすると、 $v = V_R + V_C + V_L$  となる。

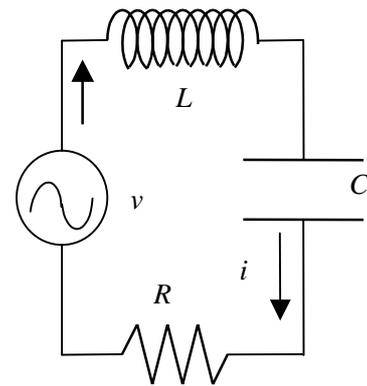


図 4 - 109

$i$  を基準にすると、 $V_R$  は同位相で、 $V_C$  は  $\frac{\pi}{2}$  だけ遅

れ、 $V_L$  は  $\frac{\pi}{2}$  だけ進んで、同じ周期  $T = \frac{2\pi}{\omega} [s]$  で変化する。

この回路の電流  $I_0 [A]$  は

$$I_0 = \frac{V_0}{Z}$$

$$\text{ただし } Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

で表され、 $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$  のとき、 $Z$  は最小

になり、回路に最大の電流が流れる。この  $Z$  をインピーダンスといい、交流に対する回路全体の抵抗の働きをする量である（単位はオーム  $[\Omega]$ ）。

また、この時の周波数  $f_0 [Hz]$  は次のようになる。

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

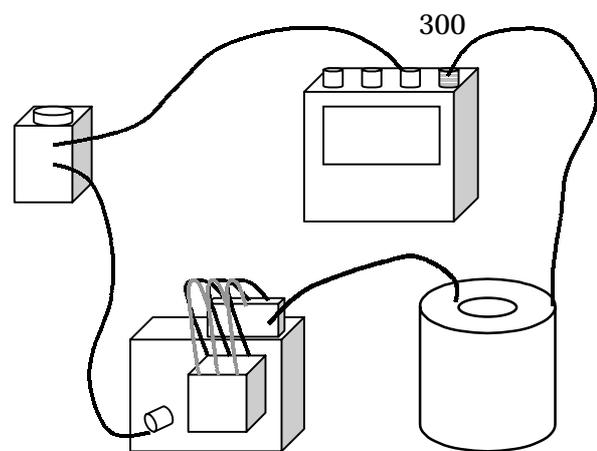
この周波数を  $f_0$  共振周波数という。

#### 実験

図 4 - 111 のようにコンデンサとコイルを配線して回路（直列回路）を組み、100mA 程度の電流が流れるようにスライダックで調節する。コンデンサの容量を  $7 \mu F$  にする。コイルに鉄心を入れて自己インダクタンス  $L$  を変えた時の電流値の変化を確認する。



図 4 - 110



コンデンサ：7または  $5 \mu F$       コイル

図 4 - 111

コイル中の鉄心がある位置にきた時電流値が最大になる  
 <さらに鉄心を入れていくと電流値は小さくなっていく>

を  $5 \mu\text{F}$  にした場合についても同様の実験を行う。

7 B) LRC 直列回路の  $V$  と  $I$  の位相 (直列共振回路の波形)

図 4 - 113 のように回路を組み、LCR の様々な直列回路での入力信号と出力信号をオシロスコープで確認する。この実験では電圧  $V$  を波形にしている。

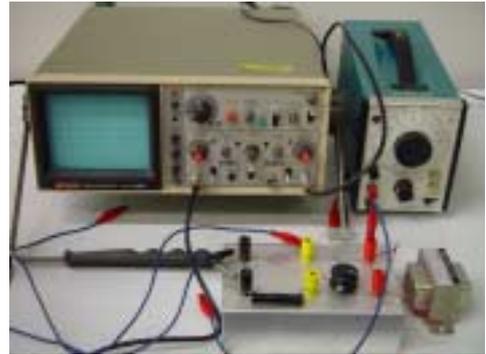


図 4 - 112

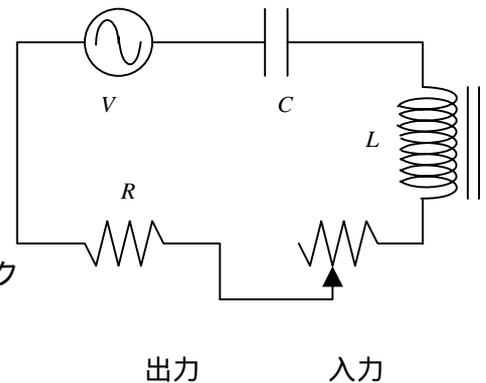
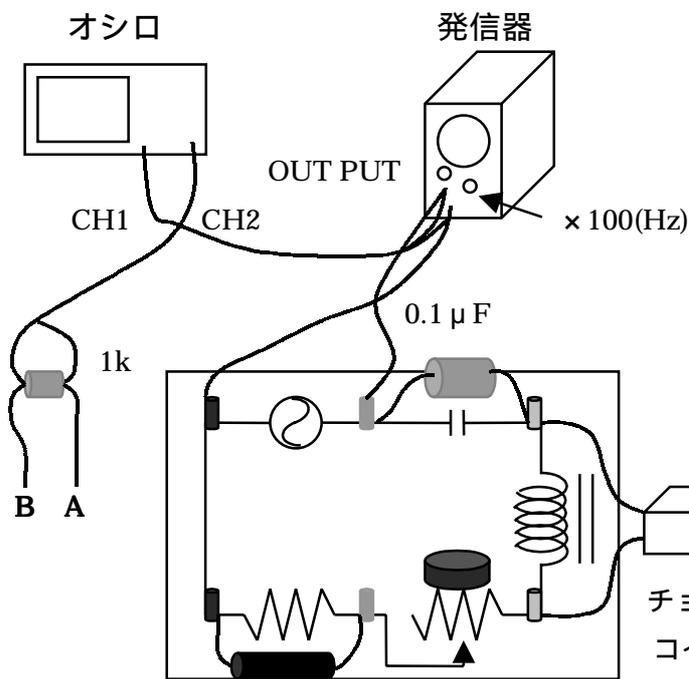


図 4 - 113

<測定される波形>

(1) 抵抗  $R$  のみ

配線 { と  
A と  
B と

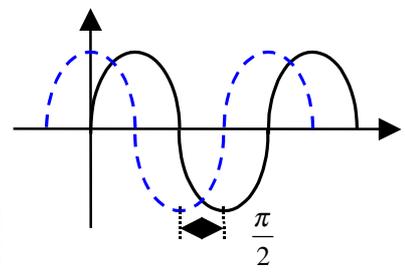
$i = I_0 \sin \omega t$  位相は同じ

(2) コンデンサ  $C$  のみ

配線 { A と  
B と

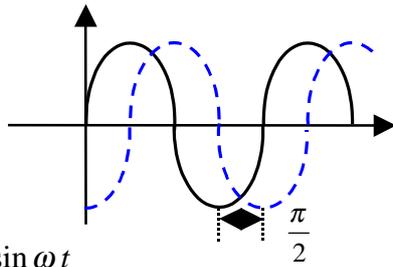
$i = I_0 \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$

電流の位相はコンデンサにかかる電圧の位相より  $\frac{\pi}{2}$  だけ進んでいる。



(3) コイルLのみ

配線 { と  
Aと  
Bと



$$i = I_0 \sin \omega t = \frac{V_0}{\omega L} \sin \omega t$$

(4) LRC回路

配線 { Aと  
Bと

コイルに流れる電流*i*は、コイルにかかる電圧*v*より位相が $\frac{\pi}{2}$ だけ遅れている。

7 C) 整流

交流を直流に変換すること。

半波整流

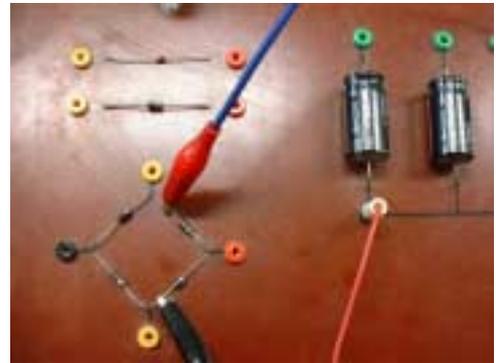
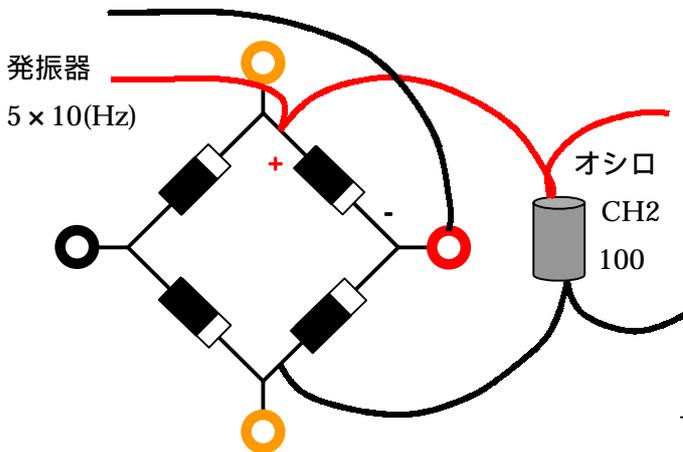


図 4 - 114

図 4 - 115 のように回路を組み、発振器で 50Hz の信号を与えると、下図のような半波整流の波形が得られる。

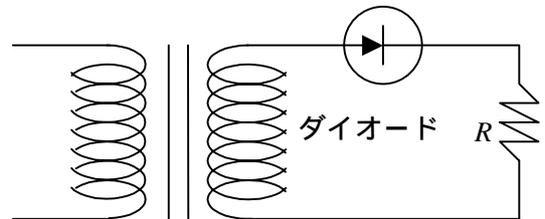


図 4 - 115

< 直流電流が得られる >

オシロのスイッチを DC に切換えておくこと！

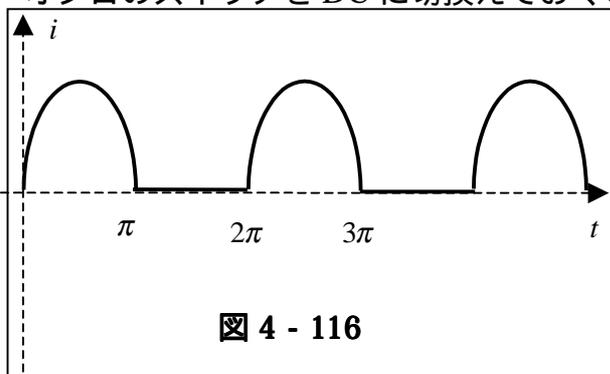
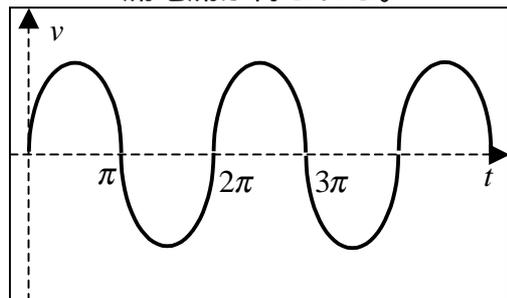


図 4 - 116

参考) *t-v* の波形は下図のようになっているにも関わらず、直流電流が得られる。



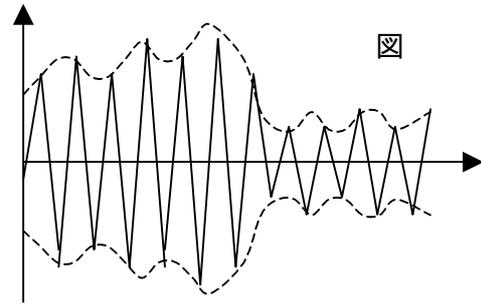
脈流であるのでさらに平滑回路で直流を得る。

## 7 D) ラジオ波の振幅変調

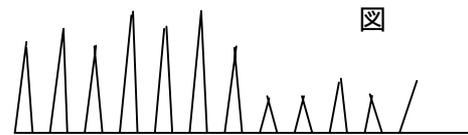
### ラジオ放送の原理

ラジオ放送のように音声を電波で伝えるためには、音の波に相当する電気振動で高周波を変調して電波を送る。

変調には、高周波の振幅を変える振幅変調(AM)と、一定振幅の連続波の周波数を変える周波数変調(FM)がある。



ラジオ受信機は、同調回路、検波回路、電圧増幅回路、電力増幅回路から成り立っている。電波によって導体内に生じる高周波交流(図 )を整流して直流に変える(図 )ことを、検波という。図 に状態から、高周波チョークのフィルター作用で、高周波部分を取り除くと図 のようになる。さらに、この中の定常な直流部分をコンデンサのフィルター作用によって、取り除けば、図 のようになり、これがスピーカーに入る。(実際には、検波と同時に電圧増幅がなされ、スピーカーに入る前に電力増幅が行われる。)



### 実験

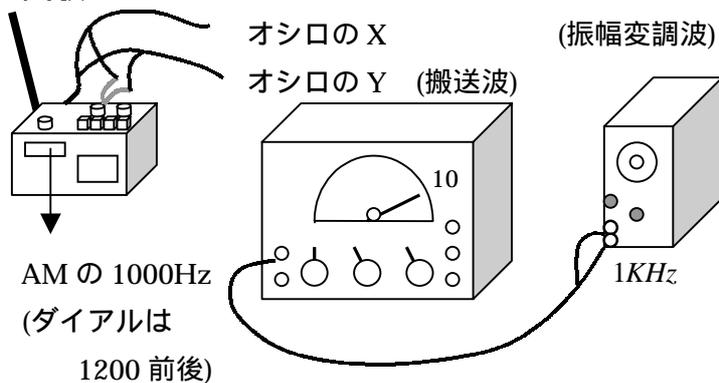


図 4 - 117

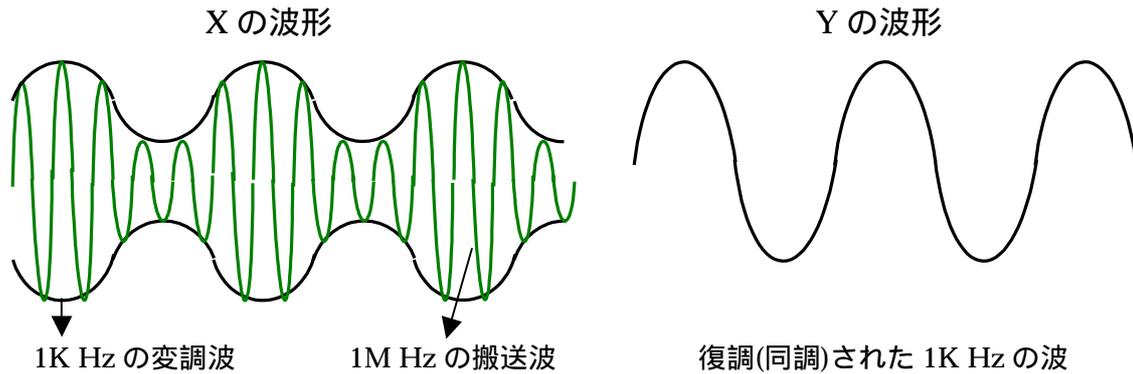
図 4 - 117 のように装置を準備する。

1K Hz の変調をかけた 1M Hz の搬送波を発振器から出す。

ラジオのチューニングを行い、ピーという音が最も良く聞こえるようにする。

↳ 1K Hz の変調波

オシロの波形を確認する。



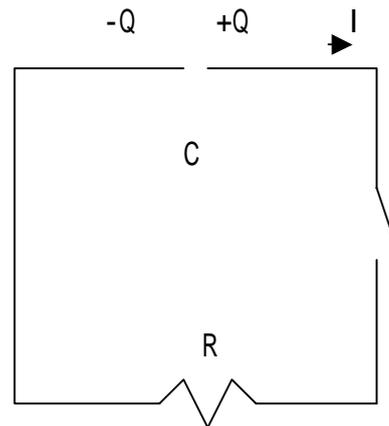
### § 4.8 電磁波

これまで静電場でのクーロンの法則、電流の作る磁場を記述するアンペールの定理、ファラデーの電磁誘導のいずれも実験からみちびかれたが、マックスウェルは一つ足りないことに気づいた。それはファラデーの電磁誘導が磁場の時間変化が電場を作るのなら電場の時間変化が磁場を作ってもよいと。したがってマックスウェルは3個の方程式に1個加えて電気と磁気の現象について纏め上げた。

第4の方程式を導くには最初次のような思考実験がなされた。

コンデンサーから電荷が抵抗を通して流れるときコンデンサーの極板間の電場が時間的に変化する。これは流れる電流に等しく次の式で表すことができる。

$$\partial D / \partial t = -j$$



他方流れる電流は磁場を作り(アンペールの法則)、電場の時間変化が磁場を作ることになる。

マックスウェルはクーロンの法則、アンペールの定理、電磁誘導に上述の思考実験(マクスウェル-アンペールの式)を加え、電気磁気の現象を空間の場の性質の微分形で4個の方程式に纏め上げた。

$$\text{div } D = \rho \tag{8-1}$$

$$\text{div } B = 0 \tag{8-2}$$

$$\text{rot } E = - \partial B / \partial t \tag{8-3}$$

$$\text{rot } H = \partial D / \partial t + j \tag{8-4}$$

ここで $\partial/\partial t$ などは多くの変数のあるとき特定の变数で微分するので偏微分とよぶ。

また  $\text{div}F$  は  $i\partial F_x/\partial x + j\partial F_y/\partial y + k\partial F_z/\partial z$

$\text{rot} F$  は

$$\begin{vmatrix} i & j & k \\ \partial/\partial x & \partial/\partial y & \partial/\partial z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix}$$

で表される行列式の微分演算子である。

この式の後2個より真空中で電磁波が存在すること、速度  $c$  で伝わることが予言され、実際 Hertz によって火花放電によって作り出される電磁波が遠方まで伝わることで検証された。

### 8 A) 電磁波(Hertz 波)の実験 < 島津製 >

マイクロ波(電磁波)も、光と同じような波の性質をもっており、横波で反射や回折現象が起こる。この現象の確認実験を行う。

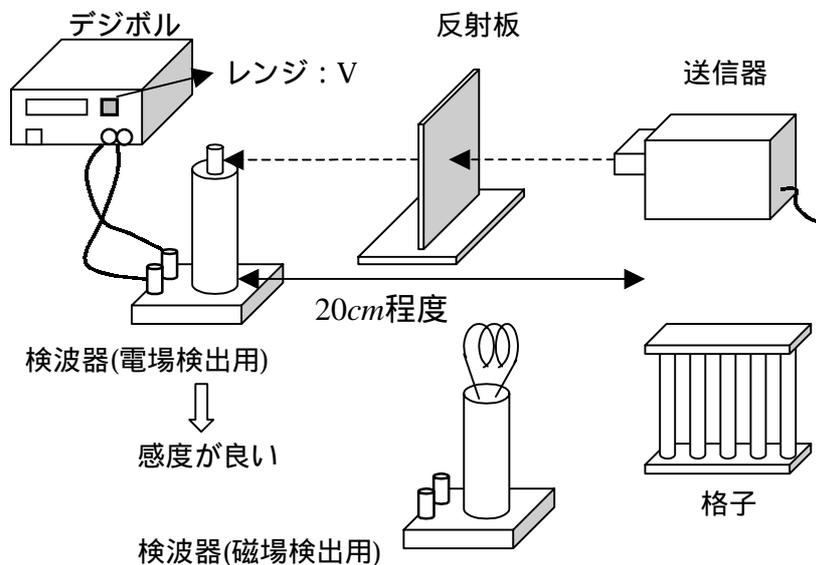


図 4 - 118 電磁波(Hertz 波)の実験



図 4 - 119



図 4 - 120

## 反射(透過性)の実験

- (1)送信器から発信されたマイクロ波  $\lambda = 3\text{cm}(10.5\text{GHz})$  を検波器で受信していることを、デジボルで確認する。
- (2)送信器と検波器の間に様々な障害物を置いた時の変化をみる。

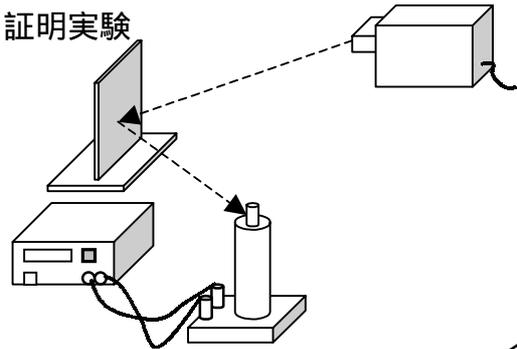
反射板(アルミ板)：銀色

デジボルの値が(ほぼ)0になる      マイクロ波が反射板で全て反射された

吸収されたのではなく反射したという証明実験

右図のように装置をセットしてデジボルの値を測定すると、ほぼ(1)で測定した値と同じになる。

もし、吸収されたのであればデジボルの値は0になるはず！



半透過板(塩ビ板)：黒色

デジボルの値が(ほぼ)(1)で測定した値の半分になる

マイクロ波が半透過板を約半分透過した

木板(紙)

デジボルの値は (1)で測定した値とほぼ同じになる

マイクロ波は木を透過した

## マイクロ波が横波であることを証明する実験(格子を使った実験)

装置は . 反射(透過性)の実験と同じ状態で行う。

- (1)送信器から発信されたマイクロ波を検波器で受信していることを、デジボルで確認する。
- (2)送信器と検波器の間に格子を置いた時の変化をみる。

格子(棒)が机の面と垂直になるように置いたとき

デジボルの値が(ほぼ)0になる

マイクロ波が格子で全て反射された

図4-125 格子(棒)

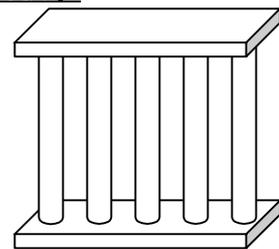
金属棒内の電子が振動し、マイクロ波のエネルギーは格子の後ろへ達しない。

格子(棒)が机の面と平行になるように置いたとき

デジボルの値は(ほぼ)(1)で測定した値と同じになる < 多少は小さくなる >

マイクロ波は格子を透過した

金属棒内の電子が振動できず、マイクロ波のエネルギーは格子を通過する。



机の面と垂直

・ のような結果は縦波ではあり得ない      つまり、マイクロ波は横波である。



