

第4章 電気と磁気

はじめに

電気は直接には見えないのでこれをわからせるためには異なった電荷の間に働く力(すなわちクーロンの法則)を利用する。一方磁気は有史以前より、方位針などの形で知られていたが、その源がわかったのは20世紀である。

摩擦電荷の存在を検電器で示す前に摩擦したものの同士が引き合うのを見せることが必要である。

電荷の存在とその正負 電場と電位	検電器を使用する一連の実験 検電器の開きが電荷量とほぼ比例することを示す。そして電場や電位は開きに働いた力から導かれる。 ファンデグラフなどを使う実験は応用として面白い。
誘電体と電束密度	静電誘導と物質の性質を説明 電束密度の次元は電荷であること 検電器でひとつの例で電位がさがること電荷をよく蓄えることを示す。 応用例をマイク、超音波など圧電効果でしめす。
電流と抵抗	抵抗の大きさとその温度変化を説明 金属と半導体の例で見せる。 ガラスのイオン伝導は見せるのには面白い 超伝導は抵抗零で永久電流 完全反磁性 浮き上げは説明と見せるだけでよい。
電流の作る磁場	ビデオでもよい。磁束密度が電流に対して出来る方向を理解させるのが重要 アンペールの定理、直線電流とそれを囲む円形の道筋を説明しソレノイドコイルの作る磁場をしめす。 また強磁性体は電流のつくる磁場と同じで原子の電子の運動であることを理解させる

強磁性体	磁石の作る磁場を鉄粉を使ってみせる。 磁化過程のヒステシスループ、消磁の方法 応用の特にトランスの材料などに言及する。
磁性体のいろいろ	不均一磁場をつかってみせる。 常磁性 強磁性 磁化の概念 キュリーの法則、キュリー ワイスの式の解説と磁気製品の取り扱い注意
電磁誘導	ビデオをみせてもよい。 地球磁場をつかってみせるのは興味をそそる。 逆起電力や渦電流は応用として面白い例
相互誘導	かんたんな実験をみせる。
荷電粒子の実験	とくに陰極線管についてみせること TV モニターとの関連
交流回路	抵抗 コンデンサー、コイルの交流に対する応答 をシンクロでみせる強度と位相に注意
電磁波	マックスウェルの 4 番目の方程式(電場の時間変化が磁場 を作る)の考え方を示す。 波動方程式は興味をもつものには参考書をあげる。 電磁波の性質をみせることが重要

§ 4.1 静電気

1 A) 摩擦電気を箔検電器で調べる (島津製)

箔検電器は導体である金属を使い、同種の電気がしりぞけあうという性質を利用して、物体の帯電の有無やその程度、帯電体の符号を調べる装置である。この検電器を用いて様々な物体の帯電の仕方を調べる。

< 検電器を + に帯電させる方法 >

毛皮でエボナイト棒をこすると摩擦電気が生じることを利用して検電器に + の電荷を与える (図 4 - 1)。

毛皮が (+)、エボナイト棒が (-) に帯電

方法

毛皮とエボナイト棒で摩擦電気を発生させる。

エボナイト棒 (-) を金属円板に近づける。

箔が開く

金属円板に指を触れる。 箔が閉じる
(人の体はアースされている。)

指を離してからエボナイト棒を遠ざける。

箔が再度開く

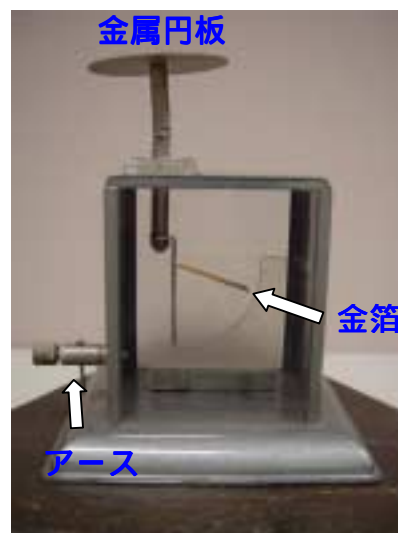
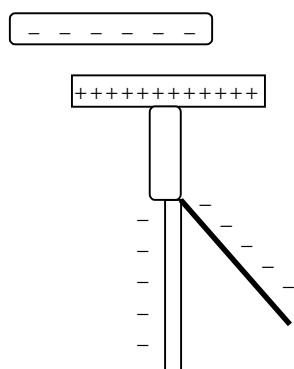


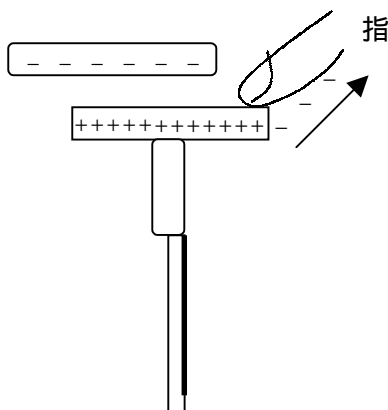
図 4 - 1 箔検電器

説明図 < 図 4 - 2 >

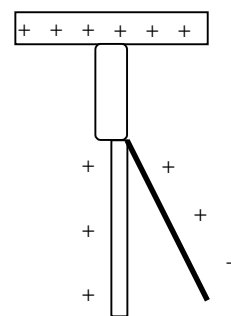


金属円板のマイナス電荷が箔へ追いやられ、金属円板は正、箔は負に帯電する。

*人の体はアースされている。



箔のマイナス電荷が手から逃げるので*、箔は閉じる。(金属円板は正に帯電したまま)



指を離すと箔から金属円板にマイナス電荷が移動するので、箔は正に帯電し、箔は開く。

1 B) 検電器を用いた実験例

実験 1 : 物体の帯電の有無や電荷の正負を調べる。

上記の方法で + に帯電させた検電器の金属円板に、(調べたい)物体を近づけた後、遠ざける。このときの箔の動きを確認する。

・箔の開きと帯電の関係

箔は全く動かない場合

箔の開きが大きくなった後、元に戻る場合

箔の開きが小さくなった後、元に戻る場合

物体は帯電していない

物体は + (正) に帯電している

物体は - (負) に帯電している

箔の開きの変化が大きい程、強く帯電していると言える！！

実験 2：水の帯電（噴霧帯電）

ノズルから液体を噴出する場合には、水のような液体でも帯電する。噴出された液体は、小さな液滴になって空中に浮遊するため、電荷の逃げ場がなくなり、電荷を保持するためである。

参考)

水が噴霧されると、できる液滴の大きさはある分布を持つが、特に大きな液滴と細かい液滴の間には帯電極性の逆転が見られる場合がある。水の表面は負極性に、そのすぐ内側は正極性に帯電しており、水が分裂して小さな粒径の液滴ができると、小さな液滴は負極性に帯電し、大きな液滴は残りの正極性電荷を持つ傾向がある。これをレナード効果という。

< 実験 >

検電器の金属円板の上に(ステンレス製)容器を置き、洗瓶を使ってその中に水を噴出すると、水の帯電によって検電器の箔が少しずつ開く。



図 4 - 3 水の帯電

(検電器は絶縁台に乗せている)

実験 3：人体の帯電

人体は静電的には導体であると考えてよいが、完全な導体でない。人体は絶縁性の良い靴を履いたり、あるいは絶縁性の良い床の上にいるときは、導体として静電気をためるコンデンサの役割をして帯電し得る。特に動き回ったりすると帯電しやすい。

< 実験 > 人でも簡単に帯電させることができる。

絶縁台にのり、人差し指で検電器の金属円板に触れる。

反対の手の甲を（別の人）毛皮でたたきつける。

手と毛皮の摩擦によって帯電現象が生じ、箔が少しずつ開く。



図 4 - 4

電荷をためる

1 D) 電気盆 (島津製)

金属の円盤に絶縁体の柄を付けたものを電気盆という。摩擦により帯電させて絶縁板の上に電気盆を接触させる。次に金属の盆の部分に指を触れると、絶縁板表面の電荷と同じ極性の電荷は指から人体を伝わって大地に逃げる。この状態で、盆の柄を持って盆を絶縁板から離すと、いったん接地したはずなのに盆は強く帯電している。

接地した盆が帯電した現象は、接地した盆の絶縁体に接触している面には誘導された電荷があるが、それは絶縁体表面の電荷と結びついていて、全く外部に影響を持たない。だから、盆が帯電していないのと同じ状況になっていると考えてよい。しかし盆を絶縁体から離すと、盆の誘導電荷は結びつく相手から離れてしまうため自由になり、盆の表面全体に分散して分布するようになる。その結果、盆が帯電する。

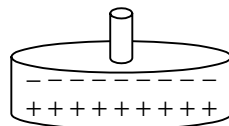
電気盆に絶縁体から離れた状態で接地線に触れれば、電荷は大地に流れて帯電していない状態になる。しかし、これを再び帯電した絶縁体に接触させると静電誘導が起こるので、何度でも帯電させられる。電気盆を帯電した絶縁体から離す力学的な仕事が電荷を溜めるエネルギーを生んでいる。

<実験>

(絶縁)台の上にプラスチック円板を置き、毛皮で円板をこする。<プラスチック円板は - に帯電> 帯電した円板の上に、絶縁ハンドルにつけた金属円盤を置く(図4-11)。

金属円盤の下部に+の電荷

上部に-の電荷が片寄る。



金属円盤の上部に指を触れ、-電荷をアースして逃がす(図4-12)。

金属円盤を検電器の金属円板に近づけると、箔が開く(図4-13)。<金属板が+に帯電した状態>

~ を繰り返すごとに、箔の開きが大きくなっていき、電荷量が増えていくのがわかる。



図4-10 電気盆

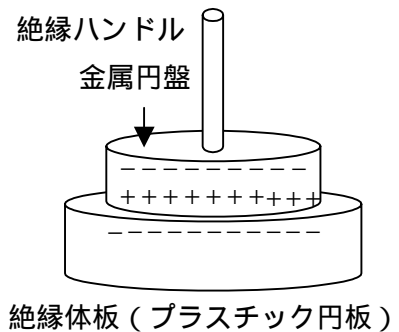


図4-11

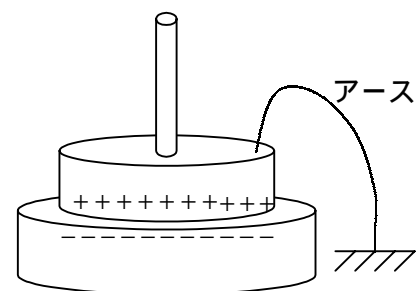


図4-12

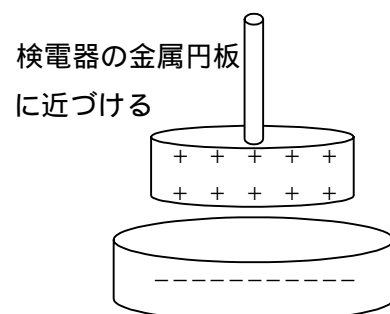


図4-13

2 A) コンデンサの実験

あらかじめ検電器の金属円板に+の電荷を与えておく。(毛皮とエボナイト使用)
箔が開いた状態にしておく

(1) 電極間の距離を変える

電極間の距離を長くすると箔の開きが大きくなる。これは、金属円板にあった+の電荷が箔に片寄るため。これによって、電極間の電気容量は減少する。

電極間の距離を短くすると箔の開きが小さくなる。これは、箔にあった+の電荷がさらに金属円板に片寄るため。これによって、電極間の電気容量は増加する。



図 4 - 27

平行平板コンデンサの電気容量は電極間の距離に反比例する。

(2) 電極間に誘電率の違う物質を入れる

↳ 比誘電率：エタノール(27)，水(81.07)，雲母(5.6～6.6)，
高分子膜(2前後)，空気(1.00)

< 誘電率の大きな物質 >

電極間に入れるとき	箔の開きが小さくなる。	電気容量：増加
電極間から出すとき	箔の開きが大きくなる。	電気容量：減少

電極間に誘電体を入れると平行平板コンデンサの電気容量は増加する。

§ 4.3 電流と電気抵抗

電気抵抗の温度変化

3 A) タングステン（電球のフィラメント）をうちわで扇ぐ
電球を電流計（300mA）とスライダックに
直列接続する。

電流計の値が 200 mA 程度の電流が流れる
ようにスライダックで調節する。

うちわでコイル部分を扇ぐと電流値が大き
くなる。つまり、冷やしたことで抵抗値が
小さくなった。

タングステン：温度抵抗係数・・・正

温度が高くなると抵抗が大きくなる



図 4 - 42 実験装置



図 4 - 43 電球のフィラメント

コイル部分が（炭素の）フィラメントの場合
温度抵抗係数・・・負

温度が高くなると抵抗が小さくなる

3 D) ストレインゲージ(歪み計) < 新興通信工業(株) >
金属(針金)に力学的歪みを加えると抵抗値が変化
するのを利用したもの。

オームの法則 ($V = RI$) に従う。

抵抗 R は

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad l : \text{長さ (m)}, S : \text{断面積 (m}^2\text{)}$$

である。

つまり抵抗は長さに比例し、断面積に反比例する。



図 4 - 47 ストレインゲージ

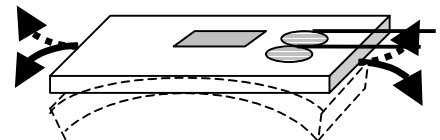


図 4 - 48

実験: ストレインゲージをデジボルに接続し、圧力(歪み)による抵抗値の変化を確認。

針金が**伸びる**方向にプラスチック板を曲げる：抵抗値が**大きくなる**(図 4 - 52)

< 長さが長くなる = 断面積が小さくなる >

針金が**縮む**方向にプラスチック板を曲げる：抵抗値が**小さくなる**(図 4 - 52)

< 長さが短くなる = 断面積が大きくなる >

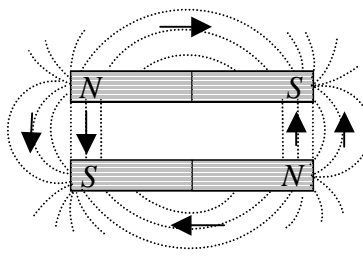
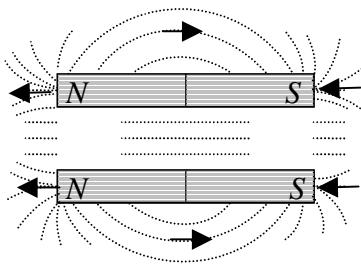
§ 4.4 電流の作る磁場

4 B) 永久磁石の作る磁場

鉄粉が磁場の作る磁力線の方向にならぶのを利用して棒やU字形磁石の作る磁場を見る。磁石の上にプラスチック板を置き、その上に鉄粉を撒く。

2本の棒磁石による磁場（赤がN極、青がS極）

a) 同極が平行のとき b) 同極が逆平行のとき



U字形磁石による磁場

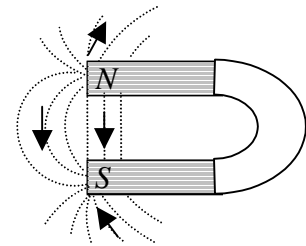


図 4 - 55 永久磁石の作る磁場

磁性体の色々

(1) 強磁性体

鉄・フェライト等の永久磁石になる物質。

物質が磁化されてないとき、図 4 - 56 のように磁化がいくつかの領域（磁区）に分かれている。

それぞれの領域の磁化が異なる方向を向いているため、全体としては磁化が0になっている。これを磁場の間に置くと、各領域の磁化の方向がそろい、全体として大きな磁化を持つ。<磁化の向き：磁石に引かれる方向> 磁場を取り除いて磁化が残っているものを永久磁石と呼んでいる。

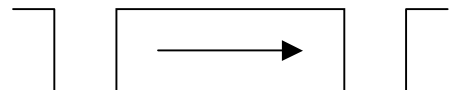
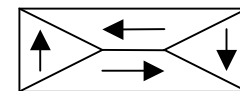


図 4 - 56

4 C) 方位計で地磁気の方位角と伏角方位針を測る < 島津製 >

地磁気の伏角(傾角)および方位角(偏角)を求めることで、地球磁力の方向を求め地球の磁氣的性質を知ることができる。



図 4 - 57
伏角の測定



図 4 - 58
方位角の測定

強磁性体の磁気履歴曲線（ヒステリシスループ）

磁化曲線

強磁性体の磁化 $M = 0$ の状態から磁界 H を印加したときの磁束密度 B 、磁化 M 、透磁率 μ の特性は図 4 - 59 のようになる。

初期段階では B, M とも H の増加に対しゆっくり増加する。このとき $\mu_i = B/H$ (μ_i : 初期透磁率) もそれ程大きくない。

ある点を過ぎると B も M も急激に増加、 μ も急に大きくなり最大透磁率 μ_m に達する。その後 B も M も飽和する。< B の飽和値を飽和磁束密度という > 透磁率 μ は急速に小さくなる。

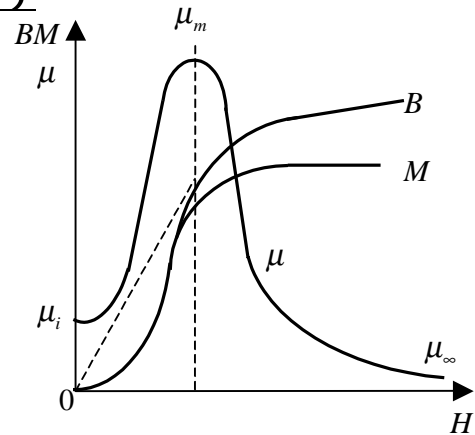


図 4 - 59 強磁性体の磁化曲線

< ヒステリシスループ >

図 4 60 で磁界を小さくしていくと、 B や M はもととは違う経路で減少する。その過程は図 4 - 64 のようになる。

$O \rightarrow a \rightarrow b$ (初期磁化曲線) で磁化

磁界を小さくしていき 0 にすると、 B は 0 になるのではなく B_r の値 (残留磁化) を残す。

今度は磁界の向きを逆にして値を大きくすると、 $B = 0$ になる。このとき磁界を保持力という

負の磁界を大きくすると遂に飽和する。

磁界を逆にし、正にすると f, g を通って b に戻る。

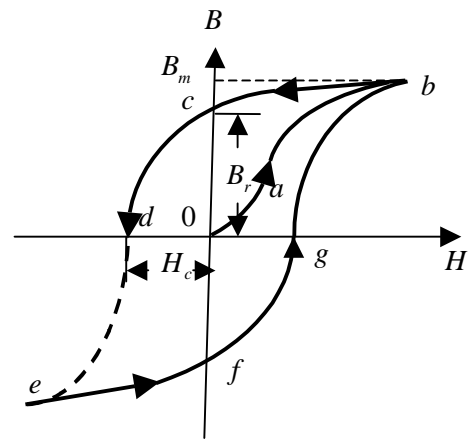


図 4 - 60 ヒステリシスループ

実験：オシロスコープで鉄やニッケルのヒステリシスループを見る。

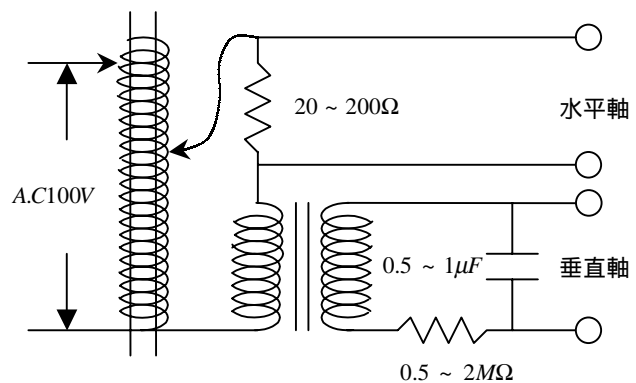


図 4 - 61

附磁用電磁石 < 島津製 >

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せられずに流れ落ちる。反磁性の液体窒素と比較せよ。)



図 4 - 68

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。

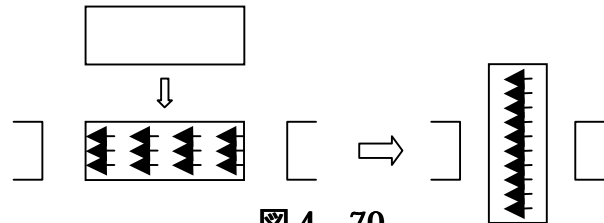


図 4 - 70

これを磁石の間に置いて外部磁場が加わると、図 4 - 70 のような向きにマイクロな磁化が生じ、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 - 71 ビスマス

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4-72

5 A) 電磁誘導実験

準備：ガルバノメーターの鏡にHe-Neレーザー
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。

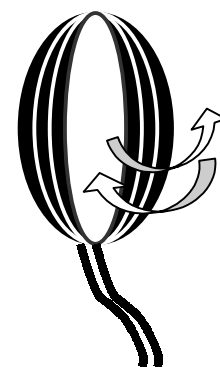
コイルを動かした瞬間的にコイルの中を通っ
ている磁束<(地球)磁場>が変化すること
により、誘導起電力・誘導電流が生じる。

この電流によってガルバノメーターのミラー
が微小に動き、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。



図4-75 ガルバノメーター
<島津製>



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。

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

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。

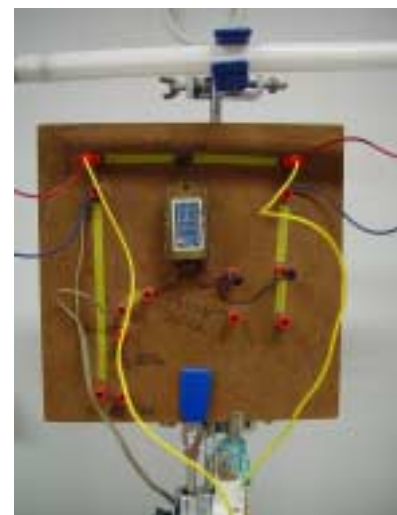
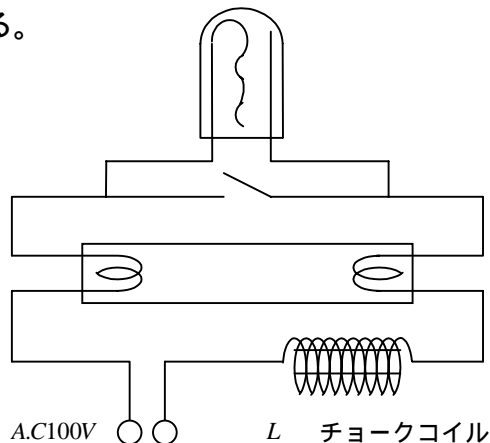


図 4 - 82

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)の部分が発熱によって伸び、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。

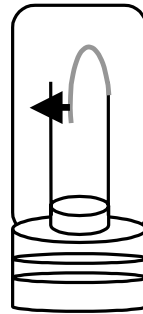


図 4 - 83 点灯管

自己誘導と相互誘導

5 D) ネオンランプを点灯して明るさを比較

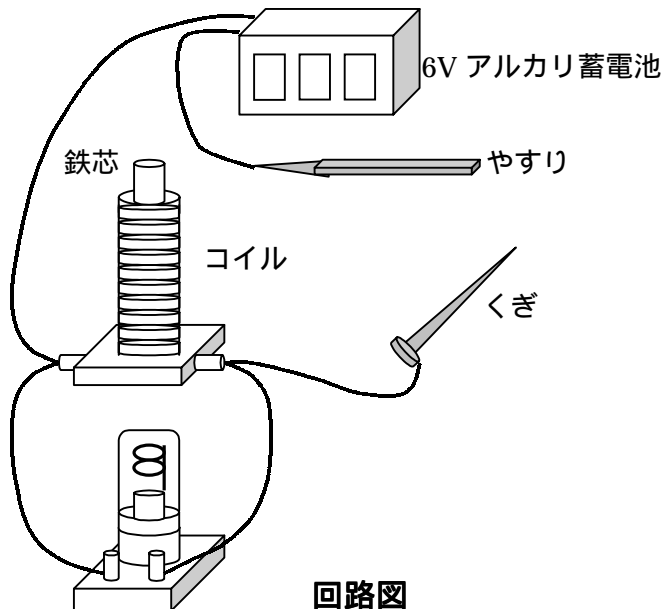


図 4 - 89

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。

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。

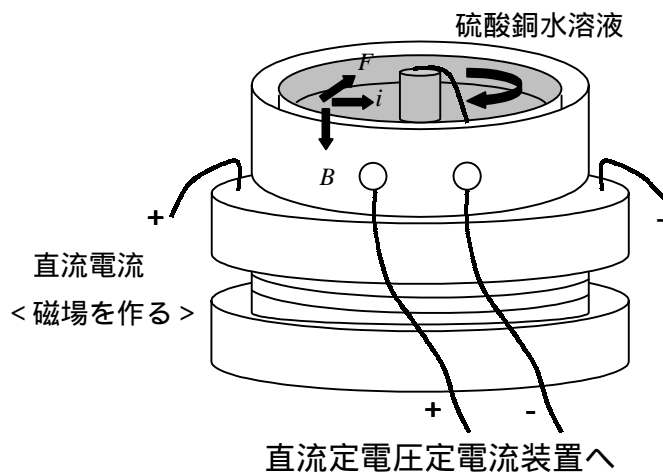
ローレンツ力



図 4 - 91 釘の溶接

5 G) ローレンツ力の応用

(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。

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

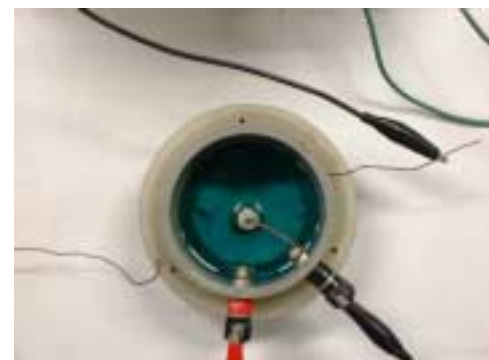


図 4 - 98

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)
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。

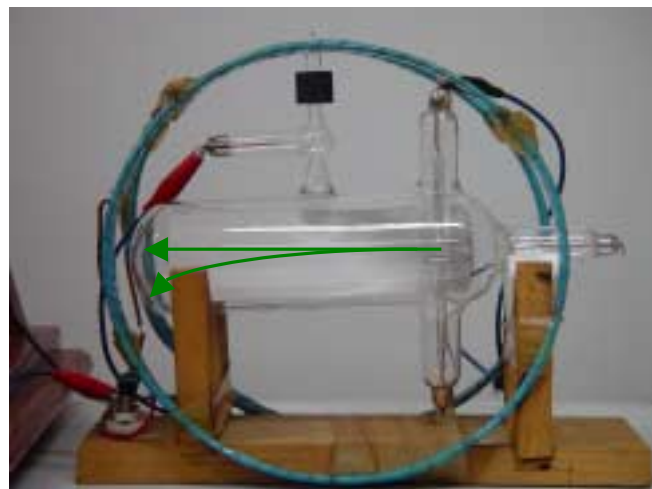


図 4 - 102

§ 4.7 交流回路

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。

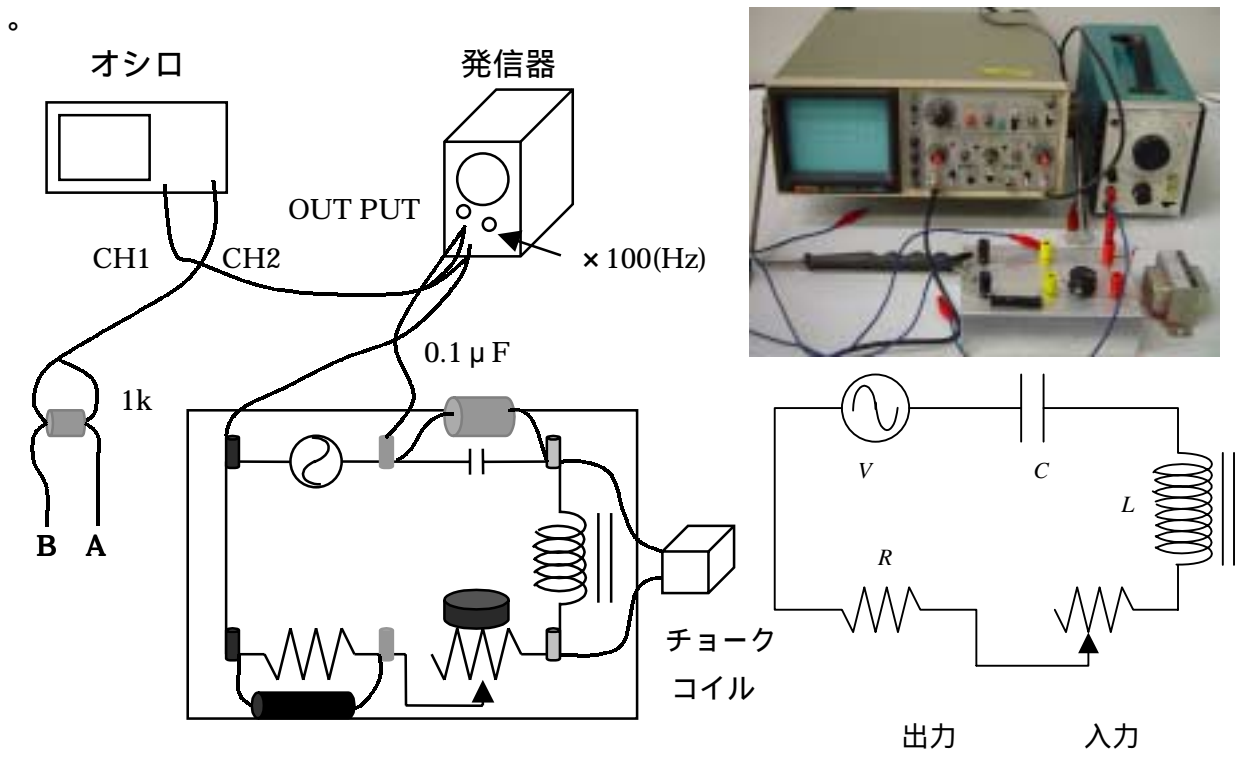
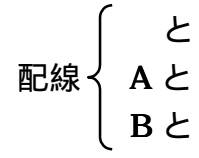


図 4 - 113

<測定される波形>

(1) 抵抗 R のみ



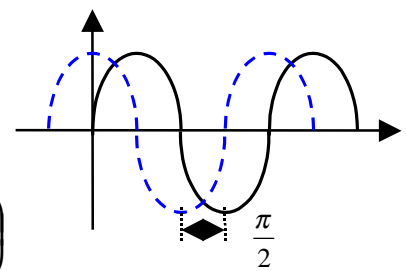
$i = I_0 \sin \omega t$ 位相は同じ

(2) コンデンサ C のみ

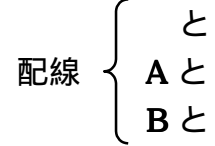


$i = I_0 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$

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。

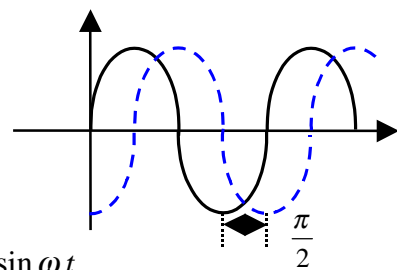


(3) コイル L のみ



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

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。



(4) LRC 回路



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。)

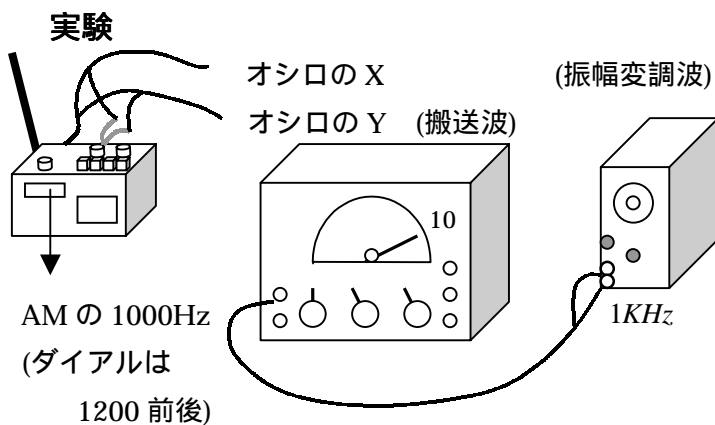
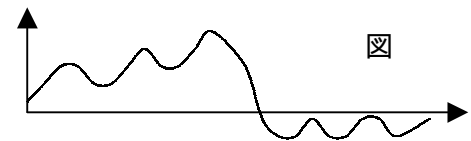
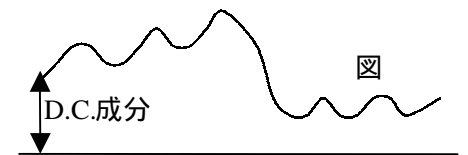
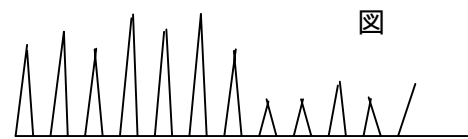
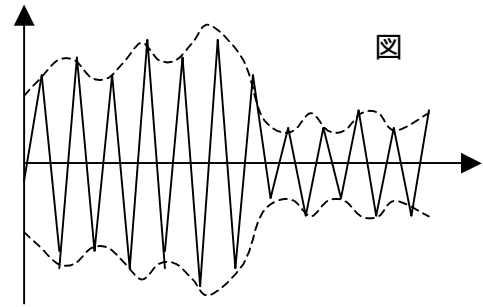


図 4 - 117

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

§ 4.8 電磁波

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ち、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。

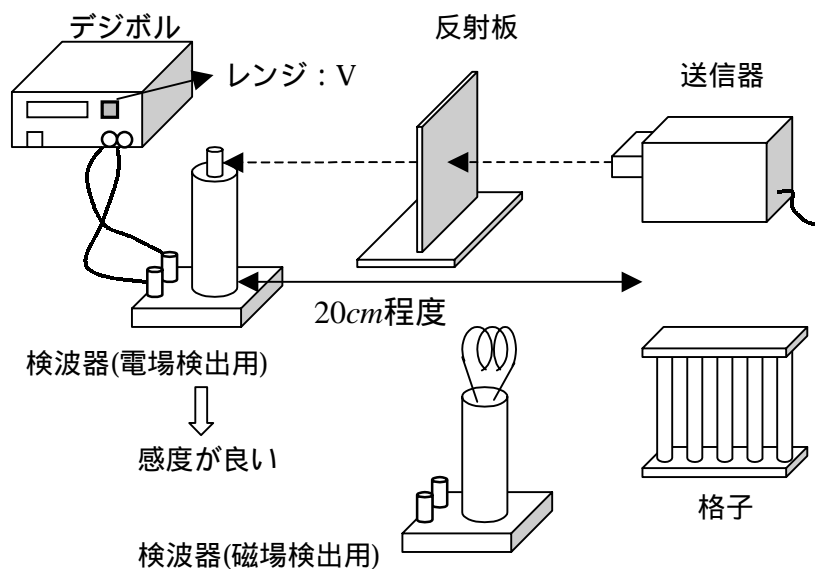


図 4 - 118 電磁波(Hertz 波)の実験



図 4 - 119



図 4 - 120

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)

図 4 - 125 格子(棒)

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。こ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。

