

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	検電器を使用する一連の実験
電場と電位	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

電気の認識の歴史

電気の実在は、紀元前 600 年頃から琥珀をいろいろな物体で摩擦すると、紙や羽根などの軽いものを引きつける事実によって知られていた。16 世紀になってギルバートはこのことについてさらに研究を行い、摩擦によって生ずる力を琥珀力という意味でエレクトリカ「Electrica」と名付けた。＜現在使っている「電気 (electricity)」は、electria から生れた。＞ これについて電気物質と非電気物質を分類し、琥珀だけでなく硫黄、樹脂、ガラス、水晶なども摩擦により同様の現象が生じることを明らかにした。

静電気（物質間の摩擦等によって生じる電荷）の研究は、18 世紀に入ると著しい進歩をとげるようになった。電気には 2 種類の性質のものがあることが発見され、フランクリンによってこれらは正電気・負電気と名付けられた。以来、2 種類の電気に対して正・負が用いられるようになった。後に、負電気が電子の電荷であることが、19 世紀末の陰極線の実験と 20 世紀初期のミリカンの油滴の実験からわかった。

電荷の正体と最小単位

現在では電荷は物質の最小単位である原子の構成成分である電子の過不足によって生じることが知られているが、実際にその質量と電荷の値が決定されたのは 1914 年のミリカンの液滴の実験によってである。

食塩 (NaCl) を電気分解したとき陰極の金属表面に 1 グラム原子の Na を生じる電気量として 1 F(ファラデイ)という。また 1F は $9.648 \times 10^4 \text{C}$ (クーロン) であることからこれをアボガドロ数の 6.02×10^{23} で割って 1 個の原子の生ずる電気素量は 1.6×10^{-19} クーロンである。これが電荷の最小単位として最初に知られたものである。

J.J トムソンが電極を封じたガラス管の真空度を上げてゆく過程で陰極線を見出した。これは電場によって曲げられ。また陽極側の蛍光物質を光らせることに負電荷を持つことがわかった。この段階で e/m の値が決定された。これは現在のブラウン管となっている。

ミリカンは液滴に X 線など当てて帯電させ、その粒子が電場のもとで動く速度と電場のないときの速度を観測して、電荷と電子の質量を独立に決定した。そして電荷の最小単位は 上述の電気素量と一致するもので、質量は $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ である。(ミリカンの実験についてはビデオを見ること)

電荷の正負と帯電列（静電序列）

摩擦によって正電荷を帯びるか負電荷を帯びるかは、こすり合わせる物質の組み合わせによって異なり、一つ(一定)の物質にいつも決まった極性の電荷が生じるわけではない。以下に主な物質の帯電列（静電序列）をしめす。この列の中の2つの物質を摩擦すると、左側の物質が正に、右側の物質が負に帯電する。また、離れた位置にある物質を組み合わせるほど帯電量は多くなる傾向がある。

ボルタの帯電列

+ 毛皮・フランネル・ガラス・絹・手・金属・ゴム・琥珀・エボナイト -

ボルタの帯電列（静電序列）は次ぎの規則に従って並べたものである。

ボルタの帯電列に関する規則

3種類の物質 A、B、C について、A と B を摩擦したとき、A が正、B が負に帯電し、B と C を摩擦したとき、B が正、C が負に帯電するならば、A と C を摩擦するときは、A は正に C は負に帯電する。

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

- ① 毛皮とエボナイト棒で摩擦電気を発生させる。
- ② エボナイト棒(-)を金属円板に近づける。
⇒ 箔が開く
- ③ 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。)
- ④ 指を離してからエボナイト棒を遠ざける。
⇒ 箔が再度開く

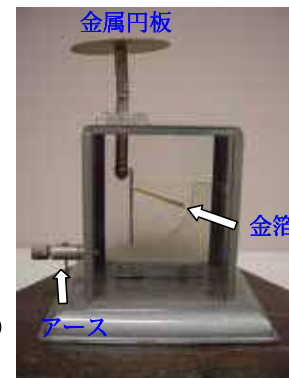
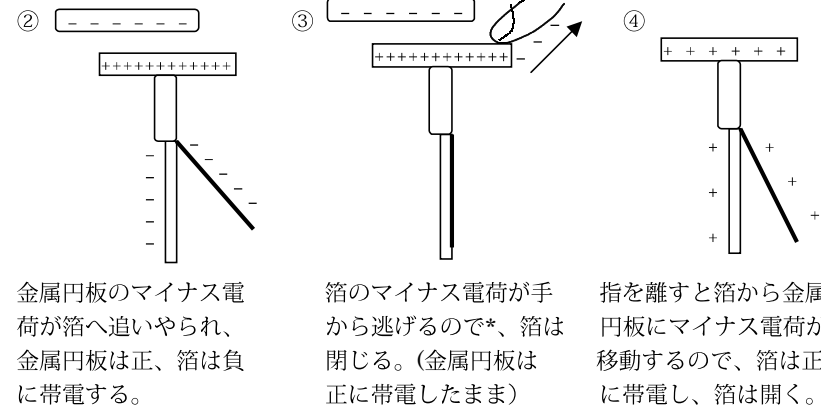


図 4-1 箔検電器

説明図 <図 4-2>



*人の体はアースされている。

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

- ① 箔は全く動かない場合 ⇒ 物体は帯電していない
- ② 箔の開きが大きくなった後、元に戻る場合 ⇒ 物体は+(正) に帯電している
- ③ 箔の開きが小さくなった後、元に戻る場合 ⇒ 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>

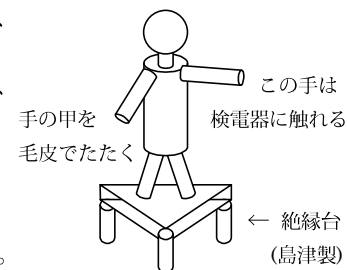
検電器の金属円板の上に(ステンレス製)容器を置き、洗瓶を使ってその中に水を噴出すると、水の帯電によって検電器の箔が少しずつ開く。



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

人体は静電気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。

- ① 絶縁台にのり、人差し指で検電器の金属円板に触れる。
- ② 反対の手の甲を(別の人が)毛皮でたたきつける。

図 4-4



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。

静電誘導

導体の近くに帯電体を近づけると、帯電体に近い側には帯電体と異種の電気が現れ、遠い側には帯電体と同種の電気が現れる現象。(図 4-5・6)

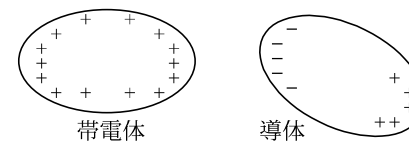


図 4-5

誘電分極

不導体では、電子は原子や分子から離れられないが、帯電体の静電気力によって原子や分子の中の電子配置がずれる分極が起こる。不導体の内部では正負の電気が打ち消されるが、帯電体側の不導体の表面に帯電体と異種の電気が現れる現象。(図 4-7)
“不導体を誘電体ともいう。”

・ 導体 ⇒ 静電誘導

電気が取り出せる

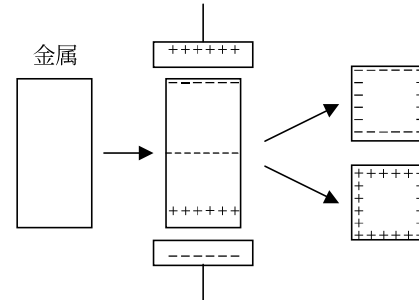


図 4-6

・ 絶縁体 ⇒ 誘電分極

電気は取り出せない

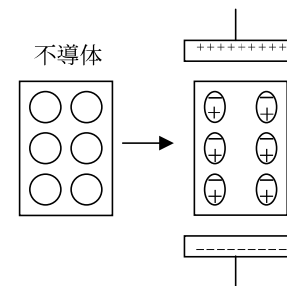


図 4-7

1 - C) 静電誘導の実験

- ① 図 4-8 のように 2 本の鋼鉄棒をくっつけてそれぞれの棒の連結付近にデジタルボルトメータ(以下デジボルと略す)の端子をつなげておく。
 - ② 毛皮とエボナイト棒で摩擦電気を発生させる。
 - ③ エボナイト(-)をア側(左側の鋼鉄棒の左端)に近づける。
 - ④ 右側の鋼鉄棒を離す。(図 4-9)
 - ④ エボナイトを遠ざけると、デジボルの数値が変化する。
- ⇒ 静電誘導によって電流が流れた。



図 4-8 静電誘導実験

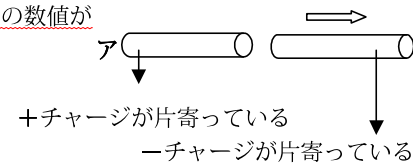


図 4-9 鋼鉄棒の様子

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。

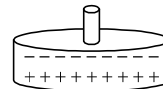
接地した盆が帯電した現象は、接地した盆の絶縁体に接触している面には誘導された電荷があるが、それは絶縁体表面の電荷と結びついていて、全く外部に影響を持たない。だから、盆が帯電していないのと同じ状況になっていると考えてよい。しかし盆を絶縁体から離すと、盆の誘導電荷は結びつく相手から離れてしまうため自由になり、盆の表面全体に分散して分布するようになる。その結果、盆が帯電する。

電気盆に絶縁体から離れた状態で接地線を触れれば、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>

- ① (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>
- ② 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。



- ③ 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)。
- ④ 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>
- ⑤ ②～④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

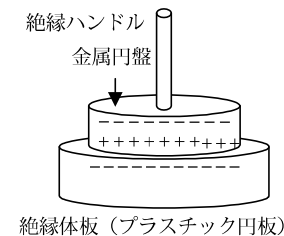


図 4-11

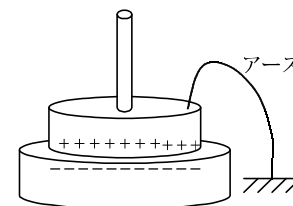


図 4-12

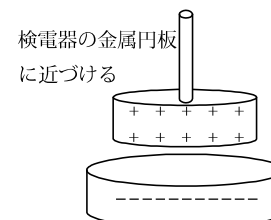


図 4-13

電荷の間に働く力

2つの電荷の間には力が働く

同じ符号の電荷の間には斥力が働き、異なる符号の電荷間には引力が働く

18世紀にクーロンが力は2つの距離の2乗に逆比例することを見出し、現在ではクーロンの法則として、次の式で表される。

$$F = kq_1q_2 / r^2 \quad (1-1)$$

q_1 と q_2 は電荷で正負の符号も含む。

k は単位系に依存する比例定数

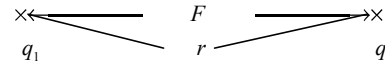


図 4-14

SI では $k = 1/4\pi\epsilon_0$

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ は真空の誘電率

電荷の単位はクーロン(C)、距離の単位はメートル(m)

力の方向は2つの電荷を結ぶ方向で、ベクトルの表し方では

$$F = q_1q_2r_{12} / 4\pi\epsilon_0 r^3 \quad (1-2) \quad r = \left| \vec{r}_{12} \right|$$

電荷が数多く存在する場合はたとえば q_1 に働く力は q_2 とそれ以外の電荷の及ぼす力を足し合わせ、重ね合わせの原理で表す。

$$F_1 = F_{12} + F_{13} + F_{14} + \dots \quad (1-3)$$

電場と電位

電荷 q_1 が他の電荷から受ける力をその電荷の単位で表し、他の電荷は q_1 に電界を及ぼしている。電界を表す E は次の式で表し、電場とも言う。

$$F_1 = q_1 E_1 \quad (1-4)$$

$$E_1 = q_2 / 4\pi\epsilon_0 r^3 + q_3 / 4\pi\epsilon_0 r^3 + \dots \quad (1-5)$$

q_1 の他の電荷からの距離が無限大の場合電場は零である。そこで電荷 q_1 を r_1 の位置に運ぶには q_1 は電場からの力を受けながら仕事をすることになる。

$$W = \int_{\infty}^r F ds = q_1 \int_{\infty}^r E_1 ds = q_1 V \quad V = 1 / 4\pi\epsilon_0 r \quad (1-6)$$

V は電位で単位はボルトである。また電場は V/m で表す。

1 - E) ウィムスハーストの誘導起電機 (島津製) 少し隙間を空けておく

自動的に静電誘導を行う 2 枚の絶縁円板に この部分で放電現象が見られる
扇形のアルミニウム箔が対称についている。
この 2 枚の円板が共通軸を中心に反対方向に
回転する。すると、静電誘導によって電荷が
発生し、各々の電荷が 2 本の電極に集まり、
ライデン瓶に電荷が蓄えられる。

各電極がライデン瓶に接続されると、ライ
デン瓶に多量の電気がたまり、ある電位に達
すると放電して火花が飛ぶ。

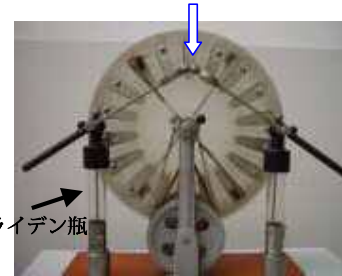


図 4-15 誘導起電機

1 - F) Van de Graaff : 静電高圧発生機 (島津製)

コロナ放電によって、電荷をベルトで運んで高圧を
発生させる装置。

島津製は摩擦帯電を利用したベルト発電機で、図 4
-16 のように、合成樹脂で作られた下部ローラーBの
回転でそのローラーと、それに掛けられたゴムベルト
間に摩擦が起こり、ローラーBは正に、ゴムベルトは
負に帯電する。負に帯電したゴムベルト上の電荷は、
ベルトの上昇によって、絶縁支持された中空の球状電
極内に運び込まれ、電極に接した突端導体の集電板に
よって、ベルト上の負の電荷は電極の表面に移される。
電荷を与え終わったベルトは表面に特殊被膜を施した
上部ローラーAと摩擦して、ローラーAは負に、ベル
トは正に帯電して下部ローラーの方に降り、台に接続
された集電板にその電荷は移る。そして、ゴムベルト
は再び下部ローラーBと摩擦帯電して上昇する。

このように連続して運び込まれた電荷が、電極に蓄
積されて、高電圧になる。球状電極の電気容量は電極
の表面積と共に増加し、電極の大きさによっては、ほ
とんど無限の電位に達することも可能である。

(通常 250,000V 位に達する。)

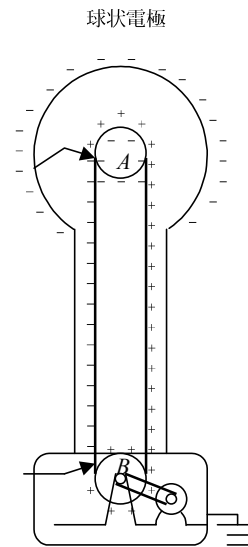


図 4-16 静電高圧発生機

<実験>

- ① Van de Graaff の電源を入れ、高電圧を発生させる。
- ② 接地した支持台付電極 (小さい方の放電極) を、①の Van de Graaff に近づけると、火花放電が見られる。

理由) Van de Graaff の電極 (球の表面) は+に帯電しているの、近づけた方の電極の表面は-の電荷が誘導され、放電現象が見られる。

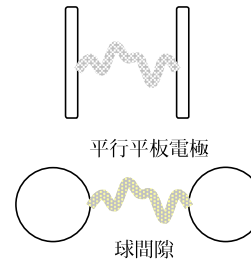
注意) 電源を切った後、必ず小さい方の電極を Van de Graaff の電極に一度接触させてアースする。
(アースするのを忘れて触ると感電する危険がある。)



図 4-17

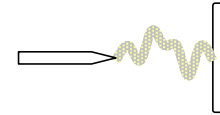
★火花放電

平行平板電極や球間隙の電界分布は均一性が良いので、平等電界という。これらの電極間の電圧を次第に高くすると、電極間の気体が帯電し、衝突するときに火花が飛ぶ。このような放電を火花放電又はフラッシュオーバーという。



★コロナ放電 (先端放電)

導体棒や導線と平面電極との間の電界を不平等電界というが、導線 (導体棒) の付近の電場が非常に高くなると、空気分子が電離 (イオン化) して絶縁性を失い、ごく弱い (かすかな) 光を放ちながら起こる放電現象。導線の一部に鋭い先端があると特に起こりやすいので先端放電とも呼ばれる。



参考)

表面の電荷密度 $\rho_s = \frac{q}{4\pi r^2} \quad \dots \textcircled{1}$

表面の電位 $V = k \frac{q}{r} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad \dots \textcircled{2}$

①, ②より $\rho_s \propto \epsilon_0 \frac{V}{r} \Rightarrow \rho_s = \epsilon_0 \frac{V}{r}$

つまり、曲率半径の小さい (尖った) 場所に電荷は集まる。

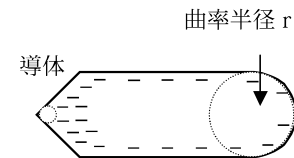


図 4-18

放電管（真空放電）

ガラス管の両端に金属線電極を封じ込み、真空ポンプで管内の気圧を減らした後、電極間に十分高い電圧をかけると、希薄な気体原子がイオン化して放電が起き、美しい光を出す。このような放電管は、1859年プリュッカーが硝子工ガイスラーに依頼して作ったのが最初であることから、ガイスラー管ともプリュッカー管ともいう。ガイスラー管から放電中に放出される光の色は、気圧や管の太さによっても変わるが、封入する気体の種類によっての変化が最も著しい。例えば、窒素は赤紫、ヘリウムは黄、水素は赤もしくは赤みがかった白、ネオンは華やかな橙赤、水銀は白みがかった青である。＜参考：p. 137（第5章：光）＞

1 - G）電気反動車

先の尖った(手裏剣型の)金属板を図4-18の様に一本の支柱で支え、静電発電機につなげると、金属板は図の（先端の向きと反対）方向に回転する。

↓
金属板の先端のコロナ放電によって空気が帯電し、先端と空気中の極性が同じ為空気分子と先端は反発する。よって、金属板は常に図の方向（先端の向きと反対方向）に回転する。

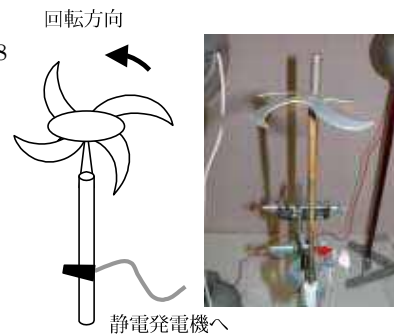


図4-19 先の尖った金属板

＜実験＞

先の尖った(手裏剣型の)金属板を図4-20の様に一本の支柱の先端で支え、Van de Graaff（静電高圧発生機）につなげる。Van de Graaffの電源を入れ、高電圧を発生させると、金属板は先端の向きと反対方向に回転する。

注意） 電源を切った後、必ず小さい方の電極を Van de Graaff の電極に一度接触させてアースする。
（アースするのを忘れて触ると感電する危険がある。）



図4-20 電気反動車

1 - H) コットレルの集塵装置

図 4-21 の様なガラスの筒の下部から煙を入ると、煙は上昇し筒の上部から外に出て行く。

筒の両端を静電高圧発生機(ブアン・デ・グラーフ)につなげると、やがて筒から外に煙が出なくなる。これは空気中のチリ等の粒子が帯電し、中心にある導体に吸い付けられるため。

<配線> 下部コード (黒ワニ口)

→ 静電発電機の-(下)部分へ

上部コード (赤ワニ口)

→ 静電発電機の+(金属球)部分へ



図4-21 コットレルの集塵装置

1 - I) 電気毛管現象

導体をコイル状にして中に固定してある分液ロートに水を満たし、コックを適当に開くとロートの先端から水が水滴となってポタポタ落ちる。

ロートを静電発電機につないで電場をかけると、コックの開き方を変えていないが、水が連続的に流れ落ちる。



⇒水のしたたる割合がはるかに大きくなる。

水が電荷を帯びると表面電界が生じ、表面張力が小さくなるため。

(表面電界と表面張力が打ち消し合う)

帯電した水滴の内部圧力 P は

$$\text{表面張力: } P_{\sigma} = \frac{2\sigma}{r} \quad \sigma: \text{表面張力}$$

$$\text{表面電界: } P_e = -\frac{\epsilon_0}{2} E^2 \quad \epsilon_0: \text{真空の誘電率}$$

$$P = P_{\sigma} + P_e = \frac{2\sigma}{r} - \frac{\epsilon_0}{2} E^2 = \frac{2\sigma}{r} - \frac{\epsilon_0}{2} \frac{V^2}{r^2}$$

半径 r の導体球(水滴)の表面電荷を q とすると



図 4-22 実験装置

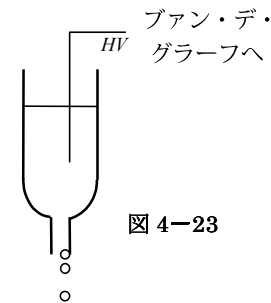


図 4-23

$$\text{表面の電位： } V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$\text{表面の電界： } E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

図 4-24



§ 4.2 物質の誘電現象 コンデンサと電気容量

(1) 平行平板コンデンサの電気容量

一般に帯電している導体があるとき、導体内部の電界は 0 だが、導体のすぐ外側の電界 E (V/m) は

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad \dots \textcircled{1} \quad \sigma \text{ (C/m}^2\text{)} : \text{表面電荷密度}$$

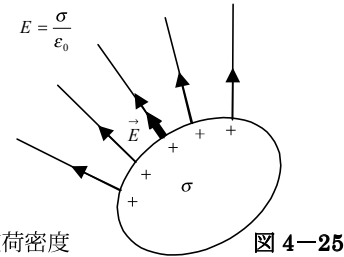


図 4-25

電荷が導体表面にある場合、電気力線は導体の外側に向かって出る。このように導体表面の電気力線の本数は表面電荷に比例し、単位面積あたりの電気力線の本数（電気力線密度）が電界なので、導体表面の電界 E は表面電荷密度 σ に比例する。

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k_0} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ (F/m)} : \text{真空の誘電率}$$

図 4-26 の平行平板コンデンサで、持ち、 $+Q$ (C)、 $-Q$ (C) の電荷を持ち、それぞれの電位が V (V)、 0 (V) とすると

$$\sigma = \frac{Q}{S} \text{ (C/m)} , \quad E = \frac{V}{d} \text{ (V/m)} \quad \text{なので、}$$

①式を考えると

$$\frac{V}{d} = E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{Q}{S} \rightarrow Q = \frac{\epsilon_0 S}{d} V$$

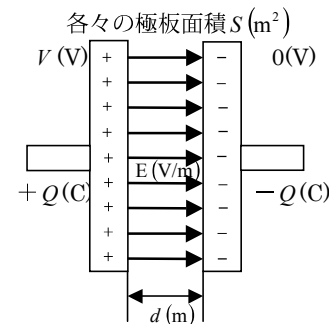


図 4-26

また 上式を $Q = CV$ (C : 比例定数＜電気容量＞) と比較すると

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d} \text{ (F)} \quad \dots \textcircled{2} \Rightarrow \text{平行平板コンデンサの電気容量}$$

(2) 誘電体が極板間にあるときの平行平板コンデンサの電気容量

a) 誘電率

コンデンサの極板間が真空のときの電気容量を C_0 とする。極板間に誘電体を入れると、その電気容量は大きくなって C となり

$$C = \epsilon_r C_0 \quad \cdots \cdots \textcircled{3} \quad \epsilon_r : \text{比誘電率 (誘導体の種類によって定まる定数)}$$

また、 ϵ_r と ϵ_0 (真空の誘電率) との積

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad \cdots \cdots \textcircled{4}$$

で決まる ϵ を誘電率という。

b) 誘電体のある平行平板コンデンサの電気容量

誘電率 ϵ の誘電体が極板間に入っている平行平板コンデンサの電気容量 $C(F)$ は②, ③, ④式から

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{d} = \epsilon \frac{S}{d}$$

電束密度

誘電体の挿入によって誘電分極により電極の電荷の一部が打ち消され余分の電荷を蓄えることが出来る。そのため実際の電荷が作る電場は打ち消された電場 E よりも大きい。 いっぱんに電荷 Q より生ずる電場を電気力線で表すが。実電荷から生ずる電場を電束密度として表す。

$$D = \epsilon E$$

で次元は電荷と同じである。真空中では ϵ の代わりに ϵ_0 となる。

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

①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。

②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＞

- ① 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
- ② 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。

コンデンサ各種

コンデンサは平行平板で代表される電荷を蓄えることができる一組の導体で、薄いプラスチック膜の両面に金属を薄く塗布（真空蒸着）したものを巻いて、樹脂で固めたものが一般的。コンデンサには、電極間にはさむ誘導体の種類によってフィルムコンデンサ・電解コンデンサ・セラミックコンデンサ等呼び名が違い、電気容量の大きさの範囲や用途が異なる。



図 4-28

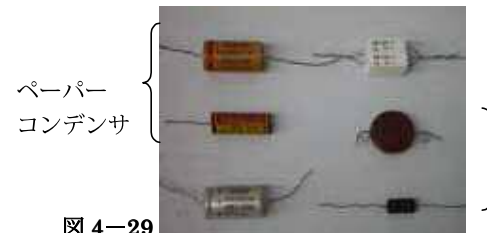


図 4-29

ケミコン マイカコンデンサ
その他：セラミック・マイラー・チタコンなど

2-B) 圧電効果

強誘電体に電界を与えると分極が起き、それに伴い寸法の変化が生じる現象を電気ひずみと言う。また、力を加えると電荷が誘導されて電界が生じる現象を圧電気と言う。

・圧電結晶体（圧電気を示す結晶）

チタン酸バリウム、ロッシェル塩、水晶など

図 4-30



(1) チタン酸バリウム（圧電結晶体）

図1のようにチタン酸バリウムをヤンキーバイスに固定し、検電器につなぐ。バイスを強く締めると電圧が生じて検電器の箔が開く。バイスを緩めると箔は閉じる。(図4-30・31)

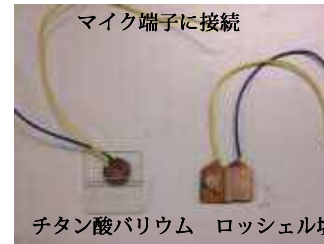


図4-31

(2) ロッシェル塩

金属板（プラスチック付）電極の間（金属面）にロッシェル塩をはさみ、ペンチで固定する。プラスチック部分をドライバーでたたくとトントントンという（増幅された）音がでる。(図4-30・31)

(3) ガス器具の点火装置

瞬間的にかける力によって発生する火花によって点火させる。(図4-32)

点火装置



図4-32

電気石<京都科学標本(株)>

(4) コンデンサマイク（クリスタルマイク）：島津製

マイクの中にクリスタルが入っていて、吹き込み口（→）部分をたたくことでクリスタルが振動する。この振動が電気信号に変わり、増幅されてスピーカーから音が出る。(図4-33・34)



図4-33



図4-34 クリスタルマイク

2 - C) 逆圧電効果

電界を与えたときに生じる電気ひずみを利用。

(1) (クリスタル)イヤホン⇔ クリスタルマイク>

通常は電気信号によってクリスタルが歪み、それが音として聞こえる。

※イヤホンをマイクとして利用することも可能

図 4-35 のイヤホンにマイク端子を接続し、

→部分をたたくとマイク同様に増幅した音が聞こえる。



図 4 - 35 クリスタルイヤホン

(2) コンデンサマイク(クリスタルマイク)の逆利用

マイクに発信機を接続し、様々な周波数の電流を流すと周波数に応じた高さの音がマイクから聞こえる。このようにすれば、マイクをイヤホンとして利用できる。(図 4-36)



図 4 - 36 コンデンサマイク

(3) 超音波洗浄器 <国際電気(株)>

電気振動を音波に変換している。この振動を **Homogenizer** として利用することができる。

→ 試験管に水とベンゼンを入れる。手で試験管を振っても混ざらないが、超音波洗浄器にしばらくつけると混ざる。<液が白濁することで確認できる> (図 4-38)

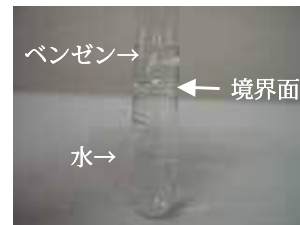


図 4 - 37 水とベンゼン



超音波洗浄器
にかけると、
水とベンゼン
が混ざる。

図 4-38 超音波洗浄器にかけたときの様子

2 - D) 焦電気

熱(温度差)から電流(電荷)への変換

電気石(図 4-32)、硫酸リチウム一水和物、ショ糖、強誘電性チタン酸バリウム 等。

① 初め電気石は電荷の無い状態 ⇒ 検電器に近づけても箔は開かない。

② これを液体窒素で冷却すると、分極によって電荷が生じる。

⇒ 検電器に近づけると箔が開く。

★ 両端によって＋・－違う電荷に帯電していることも確認

検電器に既知のチャージを与える（毛皮とエボナイト使用）：検電器は＋に帯電した状態

例）一端を近づけると箔の開きが大きくなる ⇒ ＋に帯電している

他端を近づけると箔の開きは小さくなる ⇒ －に帯電している

§ 4.3 電流と電気抵抗

オームの法則

電流 I は電荷がある断面積 S を 1 秒間に通過する電荷量として定義される。

1 [C/s] をアンペア A で表す。

電流は導体である金属では流れやすく、絶縁体ではほとんど流れない。

電流を流すには起電力 V が必要で電流の流れやすさをオームの法則としてあらわす。

$$V = RI$$

R は抵抗でこれは電流の流れている導体の断面積 S と長さ L により次の式で表される。

$$R = \rho L / S$$

ρ は抵抗率と呼ばれ単位は $\Omega \cdot m$ で表される。表 1 に物質の抵抗値の例を挙げる。

表1 抵抗率 $\rho [\Omega \cdot m]$

Ag	1.629×10^{-8} (18 °C)	グラファイト	4.2×10^{-5}
Cu	1.724 (20 °C)	Ge	$\times 10^{-1}$
Al	2.828 (20 °C)	Si	$\times 10^3$
Fe	10.0 (20 °C)	ガラス	9×10^{11}
ニクロム	70-110	イオウ	1×10^{15}

抵抗率の値で $10^{-8} - 10^{-5}$ を導体、 $10^{-7} - 10^3$ を半導体、 10^4 以上を絶縁体と呼んでいる。

電気抵抗の温度変化

導体の抵抗は温度によって変化する。金属導体の抵抗は一般に温度の上昇とともに増加し、温度 t_1 , t_2 のときの抵抗率をそれぞれ ρ_1 , ρ_2 とすると

$$\rho_2 = \rho_1 (1 + \alpha t + \beta t^2 + \dots) \quad t = t_2 - t_1$$

と表される。

常温付近では通常

$$\rho_2 \doteq \rho_1 (1 + \alpha t)$$

となる。また一般的に抵抗 R に対して

$$R \doteq R_1 (1 + \alpha t)$$

カーボン抵抗

コンスタンタン線



図 4-39



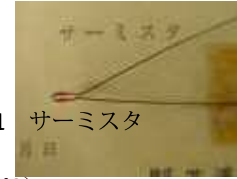
図 4-40

の形で表される。 α は抵抗の温度係数で

$$\alpha = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1(t_2 - t_1)} = \frac{R - R_1}{R_1(t_2 - t_1)}$$

となる。

図 4-41 サーマスタ



おもな金属の抵抗率(20℃)と抵抗の温度係数 ($t_1 = 0^\circ\text{C}$)

金 属	抵抗率 $\times 10^{-2}$ ($\mu\Omega/\text{m}$)	温度係数 $\times 10^{-3}$ ($/^{\circ}\text{C}$)	金 属	抵抗率 $\times 10^{-2}$ ($\mu\Omega/\text{m}$)	温度係数 $\times 10^{-3}$ ($/^{\circ}\text{C}$)
アルミニウム	2.75	3.9	炭 素		-0.5
銅	1.72	3.9	マンガン	43	0.00
鉄	9.8	6.2	コンスタンタン	50	0.008
鉛	21.0	4.3	ニクローム	103	0.4
銀	1.62	3.8	サーミスタ		-44*
白金	10.6	3.7			

※ 炭素・サーミスタは冷やすと抵抗が大きくなる。

* 抵抗率が様々な値になるように設計できる。

3-A) タングステン（電球のフィラメント）をうちわで扇ぐ

- ①電球を電流計（300mA）とスライダックに直列接続する。
- ②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。
- ③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

※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



図 4-42 実験装置



図 4-43 電球のフィラメント

3-B) 鉄コイルをバーナーで熱する

- ①コイルを電流計（300mA）とスライダックに直列接続する。
- ②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。
- ③バーナーでコイルを加熱すると、温度上昇に伴い**電流値が小さくなる**。つまり、加熱によって**抵抗値が大きくなった**。



図 4-44 実験装置

金属の超伝導とマイスナー効果

温度を下げると金属の電気抵抗値が小さくなるが、絶対温度 0 K 付近まで温度を下げると、電気抵抗がほとんど 0（測定不能）の状態に相転移するものがある。このような状態を**超伝導状態**といい、この性質をもった金属を**超伝導体**という。

ある種（特殊な）セラミック（酸化物）は 100K 程度で超伝導状態を得ることができることが発見された。

超伝導を使わず磁石と石墨で浮き上げを見せることも可能である。（物理教育学会）

3-C) マイスナー効果<ケニス(株)>

通常、金属の上に磁石を近づけると両者はくっつくが、超伝導状態になった金属は磁石の磁力線を通さなくなるので、磁石が浮く。

→ マイスナー効果

図 4-45



実験：シャーレの中に円柱状の酸化物(セラミック)を入れ、液体窒素を注ぐ。しばらくして、磁石をセラミックの上にのせようとすると、磁石が浮く。

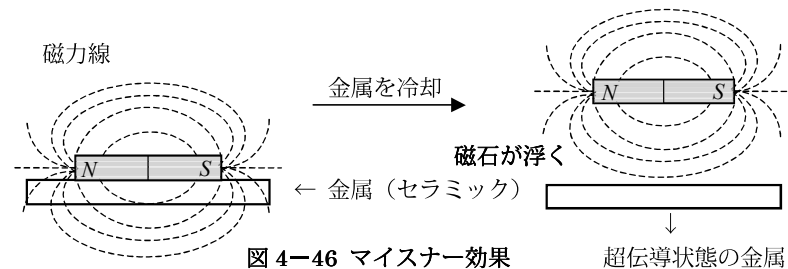


図 4-46 マイスナー効果

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。

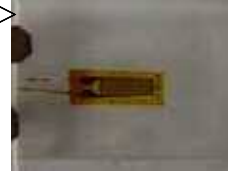


図 4-47 ストレインゲージ

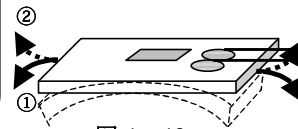


図 4-48

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。

- ① 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＞
- ② 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＞

3-E) イオン伝導

(1) 食塩水中のイオン伝導

- ① スライダック・電球(100W)・電極を直列に接続する。

※ダイヤルはほぼ全開(100 前後)に回しておく

- ② 脱イオン水(8 分目)の入った水槽に電極を入れる。

⇒ 電極をくつつく寸前まで近づけても**電球は点灯しない**

- ③ ②の水槽に食塩を(スプーン 2 杯程度)加えてガラス棒でよく攪拌した後、再び電極を入れる。

⇒ 電極を近づけると**電球が点灯する**



図 4-49 食塩水中のイオン伝導

これは Na^+, Cl^- イオンの移動によって水中に電流が流れたため。

(2) ガラスの伝導（ガラスも高温になると電流を通す）

- ① 軟質の太いガラス棒の2箇所に銅線を巻きつける。
- ② スライダック・ガラス棒・電球(100W)を直列に接続する。
- ③ バーナーで銅線の間のガラス部分を加熱する。



ガラスが溶け始めたら電球が点灯する。これは、ガラスに含まれているイオン(主成分として含まれている金属がイオンとなって)が媒体となってガラス中を電流がながれるためである。

また、加熱を止めてもガラスが溶けきって2つに切断されるまで、電球は点灯し続ける。これは、電流が流れることでジュール熱が発生し、その熱によってガラスは溶け続けるのである。



図 4-50 ガラスの伝導

3 - F) CdS を使った点灯装置（光の伝導を利用）

- ① 図 4-51 のように装置を組み、10V の電圧をかける。
- ② 可変抵抗をダイヤルで調節する。
- ③ CdS に黒紙筒をはめ込む。
- ④ 筒の手前に手をかざす（光を遮断する）と、スタンドの電気が点灯し、手を放す（光が入る）と電気は消える。



この原理は電気の自動点灯装置（日中電気は消え、夜間は点灯する）として応用されている。

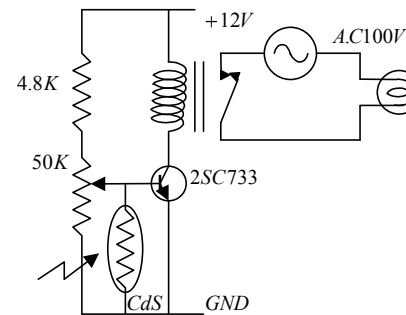


図 4-51

§ 4.4 電流の作る磁場

アンペールは電流の流れている導線の付近に方位針を置くと其の向きがかわること、また2つの電流の流れている導線の間に力が働くことを発見し、磁気についてのアンペールの法則を編み出した。磁性体と言われているものも究極ときには原子のなかの電流に起因する。以下はそれを再現する実験である。

4 - A) 電流の流れている2本の導線間に働く力

平行導線の中心間の距離を $r(\text{m})$ 、導線に流れる電流をそれぞれ $I_1(\text{A})$ 、 $I_2(\text{A})$ とする。

・力の大きさ

I_1 が点Aにつくる磁場の大きさ B_A は

$$B_A = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} \quad B : \text{磁束密度}$$

磁束密度の方向

1本の直線の導線のまわりの磁場は円形を描く。電流の方向にねじを向けると右ねじの方向となる。

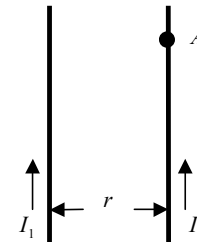


図 4-52

I_2 の長さ l の部分が受ける力 F は

$$F = I_2 l B_A = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}$$

となる。

・力の働く向き

上図のように平行導線に同じ向きに電流が流れている場合、 I_1 が点Aにつくる磁場は、右ねじの法則から、紙面に垂直で表から裏を向いている。

すると、フレミングの左手の法則より I_2 には左向きの力が働くことがわかる。同様にして I_1 には右向きの力が働く。よって、2本の導線は互いに引き合う。

平行電流（同方向）の場合：引力 反平行電流（逆方向）の場合：斥力



図 4-53 実験装置

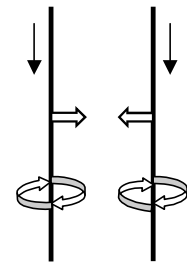
実験：電流の流れの向きによる2本の導線間に働く力を見る。

(1) 平行電流による力

(2) 逆平行電流による力

配線

1と5, 2と3, 4と6



配線

1と2, 3と5, 4と6

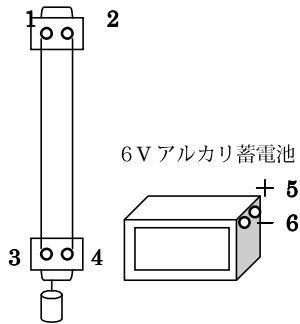
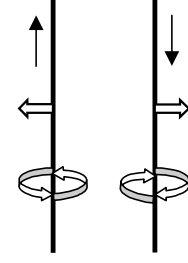


図 4-54 電流の流れている2本の導線間に働く力

4 - B) 永久磁石の作る磁場

鉄粉が磁場の作る磁力線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。

① 2本の棒磁石による磁場 (赤がN極、青がS極)

② U字形磁石による磁場

a) 同極が平行のとき

b) 同極が逆平行のとき

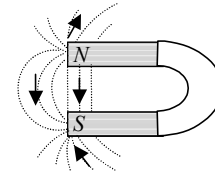
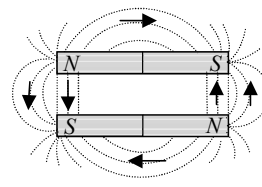
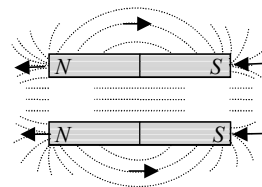


図 4-55 永久磁石の作る磁場

磁性体の色々

物質を構成している原子や分子の磁気的な相互作用によって常磁性、反磁性、強磁性等ある。棒磁石を図のように配置して其の間にできる不均一磁場のなかでの物質の振る舞いを調べる。反磁性体の磁化率は温度によらないが、常磁性体は低温になるほど磁化率が大きくキュリーの法則に従う。

(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。

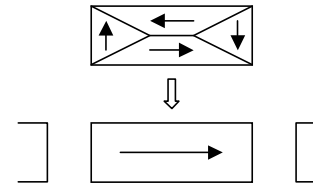


図 4-56

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。

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 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。

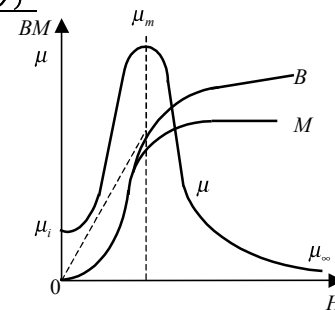


図 4-59 強磁性体の磁化曲線

<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 はもとは違う経路で減少する。その過程は図 4-64 のようになる。

- ① $O \rightarrow a \rightarrow b$ (初期磁化曲線) で磁化
- ② 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。このときの磁界 H_c を保持力という。
- ③ 負の磁界を大きくすると遂に飽和する。
- ④ 磁界を逆にし、正にすると f, g を通って b に戻る。

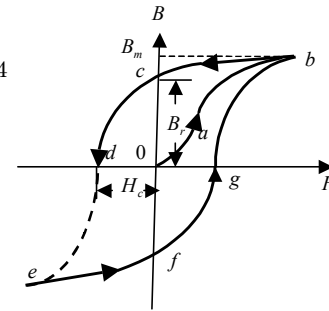


図 4-60 ヒステリシスループ

大量の磁束を通して、変圧器・発電機・モータ・リアクタ・音声機器等の重要な電気機器は、強磁性体を利用されている。

図 4-60 のようなループを書かせるにはエネルギーを必要とし、これは発電機などの電気機器でのエネルギー損となり、機器を加熱昇温させてしまう。また、強磁性体を交流で磁化するとこのサイクルを、交流の 1 サイクル毎に描かせることになる。

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。

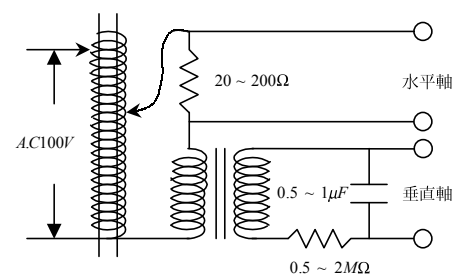


図 4-61

ヒステリシスループを利用した消磁

スライダックで最初 100V をコイルにかけておき、磁化した鉄片をコイルに入れてスライダックの電圧を徐々に下げて最後に 0V にする。鉄片の磁化は全くなくなっている。上述のヒステリシスループを小さくしていくことになる。別法としてスライダックの電圧をそのままにしてゆっくり磁化した鉄片を取り出しても消磁できる。