

4.1 電気の測定

クーロンの法則

ファラデーの実験

トムソンによる電子の発見

電源、直流・交流（単相・三相）

電場の測定

電圧、電流の測定

誘電率の測定

電気抵抗の測定

ホール抵抗の測定

電子線の利用

オシロスコープ

電気(electricity)の語源は、琥珀を意味するギリシア語elektronであると言われている。絶縁体である琥珀を擦る事により静電気が発生することに由来する。

古代より「絶縁体に電気が蓄積される」「導体によって電荷が伝わる」ことなどが知られていた。また、電気を発生する生物の研究の記録が残されている。

18世紀になると、ライデン瓶やエレキテルなどの静電気を利用する発電機・電源が発明され、放電や電流について研究が進んだ。

今回は、電気に関する測定の歴史と実験手法についての内容です。

クーロンの法則

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

帯電させた球の間に働く力を
ねじり天秤によって測定

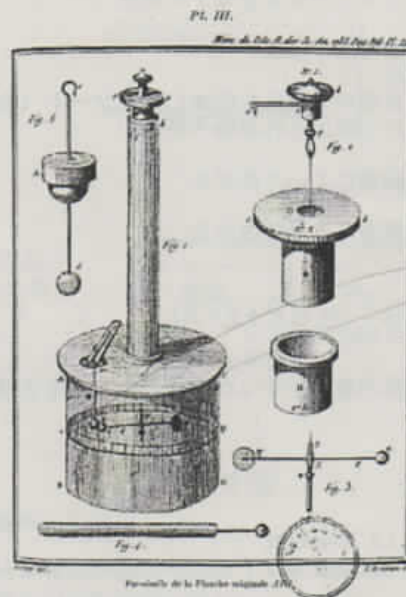
1773年 ヘンリー・キャベンディッシュ

1785年 シャルル・ド・クーロン

Charles-Augustin de Coulomb,
Histoire de l'Academie Royale des Sciences,
569-577 (1785).

電場による力の伝達

$$\vec{F} = q\vec{E}$$



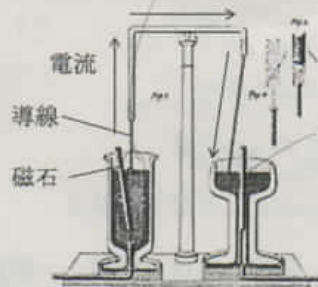
2個の荷電球間の
静電斥力
をねじり天秤で測定
可測の範囲
電荷は正負あり

ファラデーの実験

電流と磁場の相互作用
(ビオ・サバールの法則、ローレンツ力)

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Michael Faraday,
Quarterly Journal of Science, Vol XII, 1821

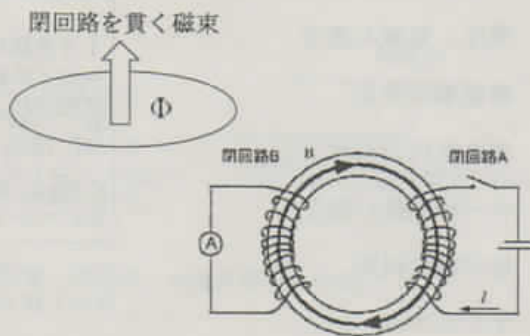


磁石が回転 導線が回転

時間変動する磁場と起電力
(電磁誘導)

$$\mathcal{E} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

1831年 マイケル・ファラデー
1831年 ジョセフ・ヘンリー



トムソンによる電子の発見

陰極線の実験

真空中で電圧を印加したカソード (陰極) から放出される粒子線

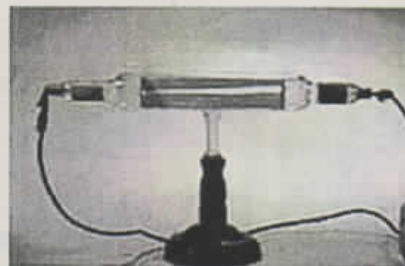
磁場によって曲がる

電場によって曲がる

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

負の電荷を持った質量の小さい粒子線

↓
電子



J.J. Thomson,
Cathode rays, Philosophical Magazine 44, 293 (1897).

AIP web page より

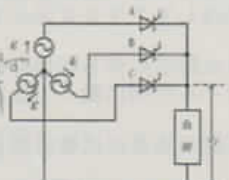
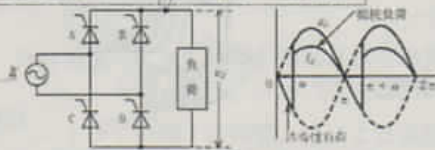
電源について

静電気による電源 ^{Van de Graaff} ヴァンデグラフ発電機 (Van de Graaff generator)
高電圧を発生させることが可能だが、電流は小さい

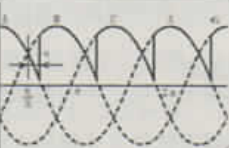
電気化学による電池 主要な直流電源 内部抵抗に注意

電磁誘導による発電 主要な交流電源
単相100V、単相200V、三相200Vなど

整流器による直流化 単層の場合の整流器



三相の場合の整流器



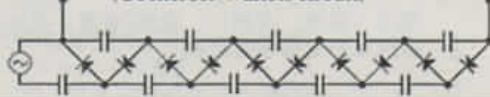
物理実験でよく使用される電源機器

安定化電源 フィードバック回路による安定化、出力インピーダンスが低い

高圧電源

絶縁トランスの利用
耐圧コンデンサーの利用

コッククロフト・ウォルトン回路
(Cockcroft-Walton circuit)



交流電流を整流する

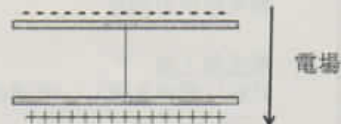
内部抵抗に注意



電場の測定

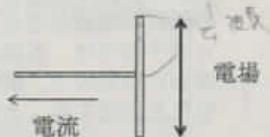
静電場～低周波電場の場合

例えば、平行平板電極に誘起される電荷



高周波電場の場合

アンテナに誘起される電流
ダイポールアンテナ 2分の1波長程度の長さ
モノポールアンテナ 4分の1波長程度の長さ



導体のプローブを挿入すると電場を乱す可能性がある

電場を乱すことなく測定する方法

電場に比例して屈折率の変化する物質 (絶縁体) の利用

ポッケルス効果: 屈折率の変化量が電場の大きさに比例
電場をかける方向の偏光成分のみ効果が表れるので複屈折となる。

アンテナ部の長さ
波長程度

電流、電圧の測定

電圧計

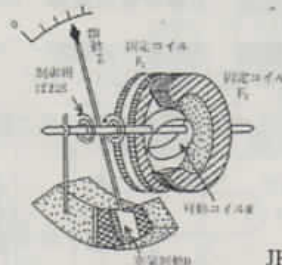
回路に大きな抵抗を並列に接続し、その抵抗を流れる電流を可動コイルなどを利用してアナログ表示する。

永久磁石の作る磁場と電流の流れるコイルの間に働く力をばねで表示。

交流の場合には整流器を使う。

電流計

回路に小さな抵抗を挿入し、その抵抗の両端の電位差を計測。



JEEA web page より

検流計

磁場中のコイルの電流が受ける力によって、電流の有無を判別。

物理実験でよく使用される電圧・電流の計測機器

アナログマルチメーター (アナログテスター)

電圧 (直流、交流)、電流 (直流、交流)、抵抗などを計測

デジタルマルチメーター

電圧 (直流、交流)、電流 (直流、交流)、抵抗などを高精度計測



7.5. 面積を伝はし、
この電流を電流計のVCC
から接触部分の電位差
を測る。

電気抵抗の測定

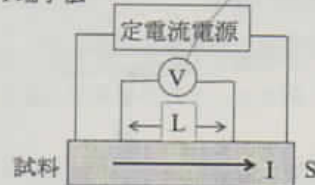
電圧降下法

試料に電流を流し、両端の電圧を計測する。

低抵抗の試料の場合には、端子との接触部分の抵抗が問題となる。

4端子法では、高抵抗の電圧計と接触部分が直列になるので、接触抵抗の効果を抑えて抵抗を測定することが可能である。

4端子法

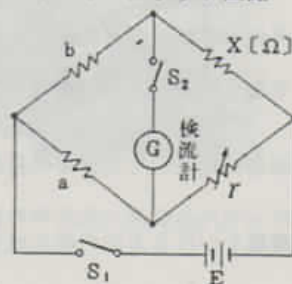


$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{L}{S}$$

ブリッジ法

標準抵抗と試料でブリッジ回路を組み、試料の抵抗を精度よく測定する。

ホイートストンブリッジ回路



ホイートストンブリッジ (Wheatstone bridge) の場合、右のようになる。

$$X = \frac{R_b R_c}{R_a}$$

絶縁抵抗

絶縁の程度を示す抵抗。高電圧を印加できる絶縁抵抗計によって計測する。

1.0 絶縁抵抗
X = \frac{R_b R_c}{R_a} = \frac{10 \times 10}{10} = 10 \Omega

誘電率の測定

誘電体を入れたコンデンサーの静電容量を測定する

交流電源を用いてインピーダンスを計測する方法

ブリッジ回路による $-i/\omega C$ の測定

LC 共振回路 インピーダンス $Z=i\omega L-i/\omega C$ $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

常誘電体
Paraelectric

外部電場によって分極が誘起される物質

圧電体
Piezoelectric

圧力によって分極する物質。力による振動や変位を電圧に変換。
逆に電圧によって振動や変位を示す。
結晶に反転対称性がなく、ポッケルス効果を示すものがある。
水晶、酸化亜鉛など

焦電体
Pyroelectric

圧電体のうち、圧力や電場がなくても分極する物質。
温度によって分極が変化することを焦電性と呼ぶ。
トルマリン、PZT $Pb(Zr,Ti)O_3$

強誘電体
Ferroelectric

焦電体のうち、外部電場で分極の方向が変化する物質。
酒石酸カリウムナトリウム(ロッシェル塩)
リン酸二水素カリウム(KDP)、チタン酸バリウム $BaTiO_3$

ホール抵抗の測定

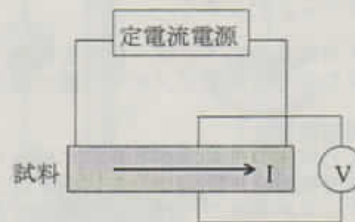
ホール効果

x方向に電流を流し、z方向に磁場をかけると、試料を流れている荷電粒子(キャリア:電子またはホール)は磁場によるローレンツ力を受けてy方向に動く。このため、電流と磁場に直交する方向に電圧 V_H (ホール電圧) が現れる。

ホール電圧はキャリア密度の逆数に比例するため、キャリア密度の大きい金属ではホール電圧が半導体(n型またはp型)に比較して微小な値となるため、ホール効果を利用した物性測定は半導体が主な対象である。

異常ホール効果

強磁性金属など磁化を帯びた物質中では、磁化に起因するホール電圧が生じる場合があり、異常ホール効果と呼ばれる。



$$\text{ホール抵抗 } R_H = \frac{V_H}{IB}$$

電子線の利用

熱電子銃

真空中でカソードから放出される熱電子を電圧で加速する。タングステンフィラメント、 LaB_6 カソードなどが使われる。

ショットキー電子銃

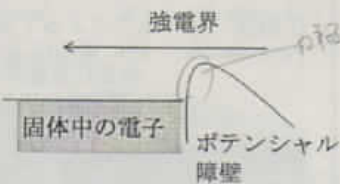
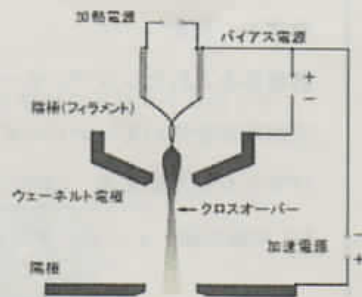
金属表面に $10^7V/cm$ 程度の強電界を印加すると、ポテンシャル障壁が真空との境界で持つ傾斜の効果によって、通常の熱電子放出より低い温度で電子放出が起きる。このショットキー放出を利用する電子銃。

電界放出電子銃

さらに強電界を作るためにカソードの先端を100nm程度の曲率半径に仕上げられている。この先端での強電界によって、室温において電子が放出される。電子源の大きさは5~10nmと小さいため輝度が極めて高いのが特長である。

利用方法:

ブラウン管、電子顕微鏡（透過型電子顕微鏡、走査型電子顕微鏡）、電子線エネルギー損失分光、逆光電子分光



オシロスコープ

ブラウン管オシロスコープ

垂直偏向板に信号電圧を加え、水平偏向板に一定速度で上昇する電圧（ノコギリ波）を加えると、横方向に時間軸をとった波形を描くことができる。

入力信号からトリガー信号を作り、トリガーがかかると同時にノコギリ波の電圧を加える。

周波数特性

入力信号が立ち上がり時間の短いパルス信号である場合には、オシロスコープの周波数特性が問題になる。例えば、周波数帯域がDC~100 MHzと表示されているオシロスコープでは、100 MHzで周波数特性が3dBまで減衰する。この場合、10nsecよりも短い時間で立ち上がるパルス信号を正しく計測することができない。

感度（通常は5mV/div程度）、耐圧などにも注意する必要がある。

デジタル・オシロスコープ

入力信号をデジタル変換して画面に表示する。信号のデータが保存されるので波形を止めたり、トリガーの前のデータを参照することができる。

