

「エレクトロニクス科学史」

那須科学歴史館 館長 田澤勇夫

第1回 講義

電磁理論の歴史

電気・磁気の発見からMaxwell理論の確立まで

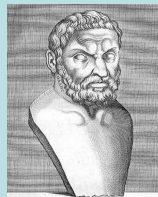
	科 学	技 術	
前6世紀	静電気の発見(タレス)		
11世紀		水上式磁針(中国)	
16世紀		吊下げ式羅針盤(イタリア)	
1600	「磁石について」(ギルバート)		17世紀に近代科学が誕生 アマチュア時代 (知的趣味の時代)
1666	光のスペクトル発見(ニュートン)		
1669	光の粒子説(ニュートン)		
1675	光速の測定(マーレー)		
1678	光の波動説(ホイヘンス)		
1745	ライデン瓶の発明(オランダ)		
1752	雷の研究(フランクリン)		
1780	動物電気の発見(ガルヴァーニ)		
1785	クーロンの法則(フランス)		
1800	電池の発明(ボルタ)		
1820	水の電気分解(カーライル他)		科学のアカデミズム時代 (1800~1940) (正式に高等教育に)
	電流の磁気作用(エールステズ)		
	ビオ・サバールの法則		
1824	アンペールの法則		
	ゼーベック効果の発見		

1827	オームの法則		電気回路理論の始まり
1830	自己誘導の発見(ヘンリー)		
1831	電磁誘導の発見(ファラデー)		電磁理論工学の始まり
1832		発電機の発明(ピキシ)	
		電磁式電信機の発明(シリンク)	
1837		電信用符号を考案(モールス)	
1840	電流の熱作用(ジュール)		
1842	ドップラー効果(ドップラー)		
1847	キリヒホッフの法則		
1850		英仏海峡海底電信ケーブル敷設	第2次産業革命
1861	電話機の発明(ライス)		
1864	電磁場の理論(マクスウェル)		
1866		自励式発電機の発明	電力技術時代の始まり
1869	元素の周期律表(メンデレーフ)	直流発電機の発明(グラム)	
1876		電話の発明(ベル)	
1878	光速測定(マイケルセン・モーレー)	すず箔円筒蓄音器の発明(エジソン)	
		炭素フイルメント電球の実用化(エジソン)	
1879		アーク灯の実用化(ブラッシュ)	世界初の工学部の誕生
1881		電車運行(ベルリン)	(1886 東大)

静電気の発見(紀元前600年)

ギリシャの哲学者タレス(Thales)により琥珀を擦ることにより生じる不思議な現象として発見される。

琥珀はギリシア語でエレクトルムで英語の電気(electricity)の語源となる。



タレス



琥珀(装飾品)

二つの物をこすり合わせると摩擦によって静電気が生まれ、摩擦によって正の電気が生ずるか負の電気が生ずるかは、摩擦電気系列によって決まる。

+	摩擦電気系列	-
毛皮	ガラス 雲母 絹 絹綿 木材 琥珀 樹脂 金属	いおう
Wが小	仕事関数W	Wが大

羅針盤の実用化(16世紀)、磁気の本格的な研究(1600年)

ギルバート(イギリス人、エリザベス1世女王の侍医)が1600年に著書「磁気について」において磁気を体系的に取り上げる。



ギルバート

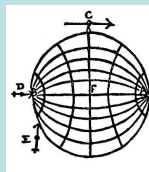


「磁気について」

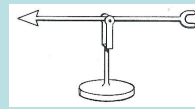


エリザベス女王に磁気を説明

- ・地磁気の発見
- ・鉄を磁化させる方法の発明



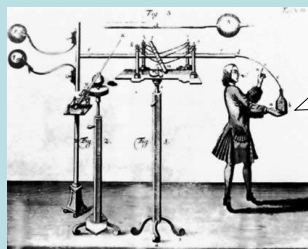
磁鉄鉱による地球模型



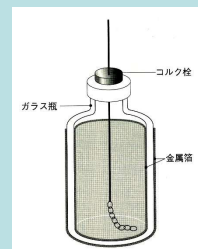
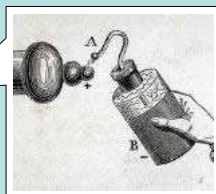
磁鉄鉱の周囲を観測

ライデン瓶の発明(1745)

1745年、ミュッセンブルーク(Musschenbroek)(オランダ・ライデン)は電気を蓄えるライデン瓶を発明。



起電器の電気をライデン瓶に蓄える実験



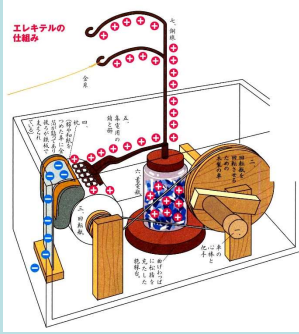
静電気に関する定性的な実験が行えるようになる。

平賀源内のエレキテル(1776)



平賀 源内
1728-1780

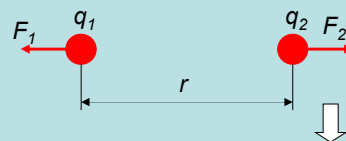
江戸時代中頃に活躍した本草学者、地質学者、蘭学者、医者、殖産事業家、戯作者、浄瑠璃作者、俳人、蘭画家、発明家。



欧州より遠く離れた極東の日本において、早い段階で、静電気の科学の知識が持ち込まれていた。

クーロンの法則(1785)

点電荷 q_1, q_2 が距離 r だけ隔てておかれている場合、その間に働く力 F_1, F_2 は

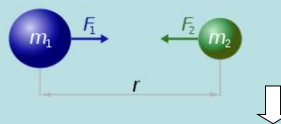


$$F_1 = F_2 = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

電荷間に力を媒介するものは何もなく一瞬にして作用するという遠隔作用の考え方と、力は空間を介して次から次へと伝搬するという近接作用(場の概念)の考え方ができる。

ニュートンの万有引力(1665)

質点 m_1, m_2 が距離 r だけ隔てておかれている場合、その間に働く力 F_1, F_2 は



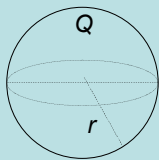
$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

ニュートンは質点間に力の作用を媒介するものは何もなく、一瞬にして作用するという遠隔作用の考え方のみであった。

電荷の持つエネルギーは何処に存在するか？

電荷Qを持つ半径rの導体球の電氣的エネルギーをクーロンの法則に従って求めると

$$U = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon r^2}$$



ニュートン力学同様に遠隔作用の考え方に従うと、この電氣的エネルギーは導体球にあると考える。



電場Eが存在するとする近接作用の考えに従うと、電場Eはエネルギーを持たなければならない、この電氣的エネルギーは導体球ではなく、電場にあると考える。

電場のエネルギー密度が $u = \frac{1}{2}\epsilon E^2$ であるので

$$U = \int_r^\infty \frac{1}{2}\epsilon E^2 4\pi r^3 dr = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon r^2}$$

※ 物理的に存在するということはエネルギーを持つということ

ボルタの電池(電堆)の発明(1800)

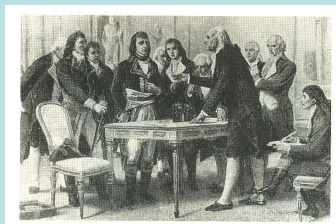


Alessandro Volta
1745-1827

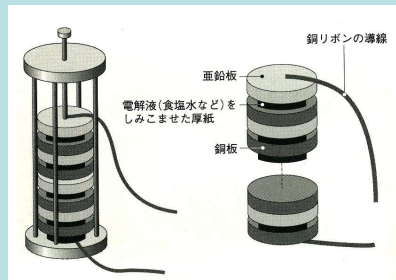
異種金属をくっつけ舌にはさむとピリピリとした刺激がある現象より、1800年にボルタは異種金属間で電気が発生していると推論し、舌の代わりに塩分を浸み込ませた紙を銅板と亜鉛板で挟んだボルタの電池を発明した。



動電気学的な実験が可能に



ナポレオンの前で実験するボルタ

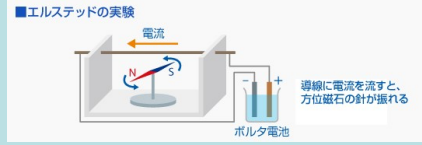


エルステッドの電流の磁気作用の発見(1820)



Hans Christian Oersted
1777-1851

1820年、エルステッドが学生にボルタの電池を使った実験を行っている時、偶然に電線近くに置いてあった磁石の針が動いた。



電気と磁気の相互作用を発見したエルステッドの論文は欧州の学会に大きな反響を呼ぶ。



無通電時、コンパスのN極は北を指す。



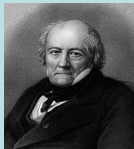
通電(電流3A)時、コンパスのN極は北から大きくずれる

電気により磁気が発生し、全く別の物理現象と思われていた電気と磁気が結びついた

ビオ・サバールの法則(1820)

電流と磁場の関係の定式化(アンペアの法則の微分形)

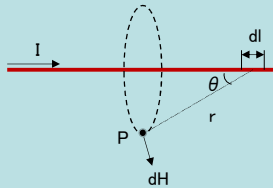
2人の数学者ビオとサバールはエルステッドの論文を手にした数週間後に電流と磁場の関係を数式により定式化する。



Jean-Baptiste Biot
1774-1862

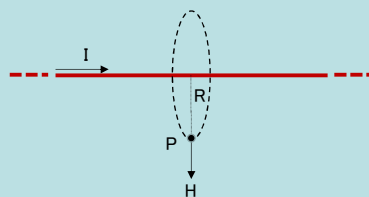


Félix Savart
1791-1841



電流線微分dlにより生じている点Pの磁場の強さは

$$dH = \frac{I dl \sin\theta}{4\pi r^2}$$



無限の長さによる点Pの磁場の強さは

$$H = \int dH = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I \sin\theta}{4\pi r^2} dl = \frac{I}{2\pi R}$$

アンペアの法則

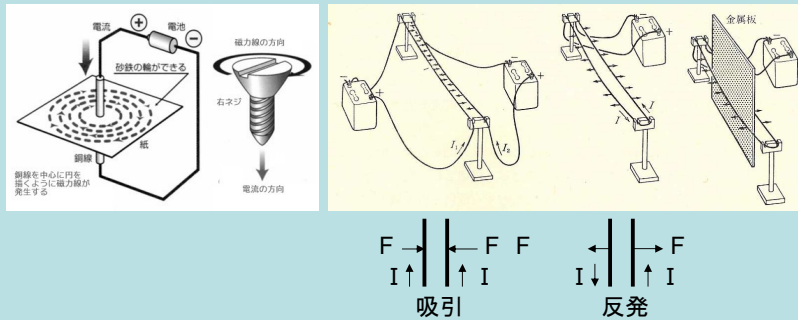
アンペアの法則(1820)



Andre-Marie Ampere
1775-1836

同じくエルステッド論文を読んだアンペールは電流により生じる磁場が電流方向の直角面に右回りでできることを発見

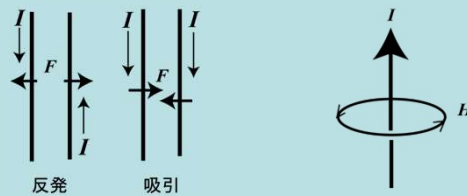
平行した導体に同じ向きに電流を流すと引き合い、反対方向に流すと排斥しあうことを発見



ニュートン力学が電磁気学の創成期に与えた影響

アンペアは電流と発生する磁界の関係を明らかにしたが、電流の方向と作用する力が直行する「アンペールの法則」(1820)は、当時、ニュートン力学が全盛であったので、このような現象を受け入れなかった。

引力は宇宙全体に普遍的に存在するから、“万有”引力、と名づけられたのである。



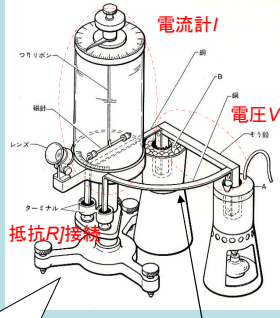
宇宙(地球)は神が創り給うたもの、つまり万有引力は神による法則。
よって

全ての法則は万有引力に基づく。⇒事実より理論が真理(科学理論とは何か?)

オームの法則の発見(1827)



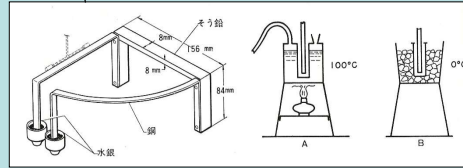
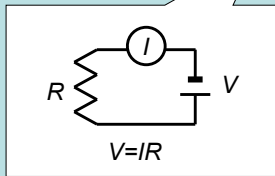
Georg Simon Ohm
1789-1827



オームは
電流 I は電圧 V に比例し
抵抗 R に反比例するとい
うオームの法則を発見
($I=V/R$)



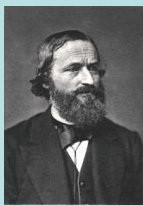
電気回路理論の始まり



ゼーベック効果(熱起電力)

キリヒホッフの法則の発見(1847)

1847年、キリヒホッフは電気回路の基本法則を発見する。



G. R. Kirchhoff
1824-1887

・第1法則(電流の和の法則)

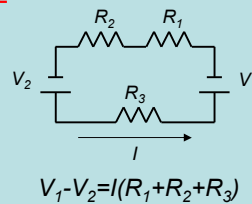
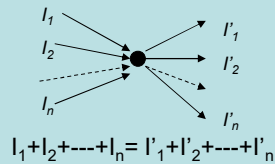
幾つかの導体に入る電流の総和と出ていく電流の総和は等しい。

・第2法則(電圧の和の法則)

閉回路内の電圧の総和と電流と抵抗の責は等しい。

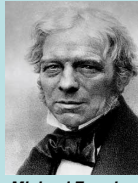


電気回路理論の確立



電流の連続性 ⇒ 電荷の保存則

ファラデーの発見—電磁誘導(1831)、電磁場の概念の確立

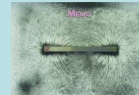
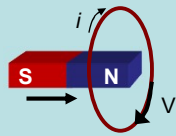


Michael Faraday
1791 - 1867

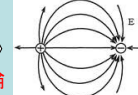
ファラデーは「電気から磁気が発生するのであれば、逆に、磁気から電気が発生するはずだ」と推論。(電磁現象の対称性)



いろいろと実験を行った結果、コイル中に磁石を出し入れすると、つまり、**磁気 H の時間的変化 $\partial H/\partial t$ が存在するとコイルに電流 i が流れる。**



磁力線



電磁力線

磁力線は磁気力が働いている様子を示し、同様に、電気の力の様子を示す電磁力線が存在し、粒子は全空間に広がる力の中心点であると推論。
(電気と磁気の場の概念の確立へ)



電気と磁気は本質的に同じ物理現象で、電気と磁気には対称性が成立する

ファラデーのいろいろな実験

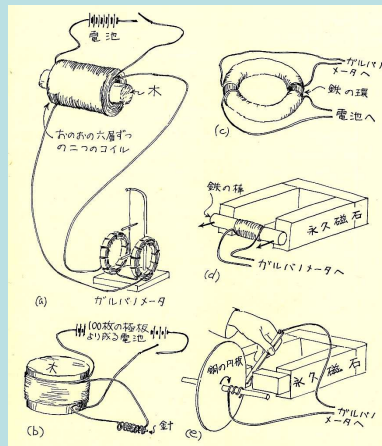
(a) 木の棒に銅線を巻き電池をつなぎ、更にもう一つの銅線を巻き検流計を付けたが、その針は動かなかった。しかし、電流を入り切った瞬間だけ僅かに針が振れた。

(b) 検流計が短いパルス状の電流を検出することにむかえないと考え、コイルに針金を入れたもので検出しようと考えた。

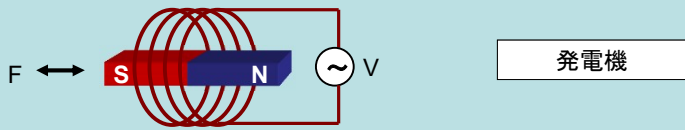
(c) 鉄の輪を作り、輪の半分に絶縁した銅線を巻き電池を接続し、輪の他方絶縁銅線を巻き電流計をつなぐ。電池の接続スイッチを入り切った瞬間だけ電流計の針が振れた。

(d) 鉄の棒に絶縁銅線を巻き電流計を取り付ける。永久磁石に鉄の棒の両端を近づけたり遠ざけたりして動かすとその度に電流計の針が振れた。

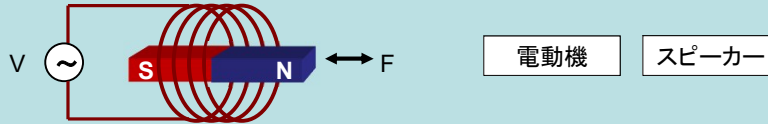
(e) U字型永久磁石の間で銅板を回すと、銅板の中心と端に接続してある電流計が連続して振れた。



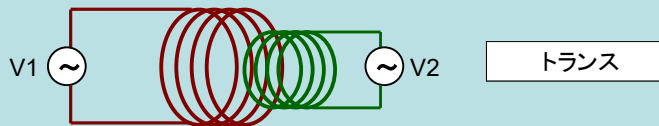
ファラデー電磁誘導からうまれる様々な技術



機械的(振動)エネルギーFを電気的エネルギーVに変換



電気的エネルギーVを機械的(振動)エネルギーFに変換



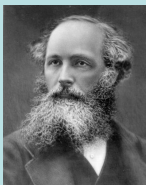
電気的エネルギーV1を異なる電気的エネルギーV2に変換

ファラデーとマックスウエルの研究手法と交友

- ファラデーは“実験から物事の真理を追究する”という立場をとった。
- 電流と磁力に関する多数の実験を行い、電磁場の概念に到達した。
- 数学的な裏付けを行わなかったので、学会から高い評価は得られなかった。



マックスウエルは、ファラデーの場の概念を数学を用いて電磁気学として体系付けた。



ファラデーとマックスウエルは親交があり、ファラデー65歳、マックスウエル25歳から文通が始まり、マックスウエルはファラデーの(電磁)場の概念を学ぶことができた。

文通はファラデーが亡くなる(76歳)6年前のファラデー70歳、マックスウエル30歳まで続いた。



本来、異質な実験科学者(老人)と理論科学者(若者)の融合



マックスウエルの電磁理論の確立(1864)



電磁波の存在を予言

マクスウエルの考えを理解しよう！

クーロンの法則(1785)からガウスの定理へ(場の概念による表現)

距離 r の電荷 q_1, q_2 に働く力 F_1, F_2

クーロンの法則から単位電荷に働く力を電場の強さ E として定義し、その電場はいたる所の空間に存在すると考える。

ガウスの定理

電荷 q を囲む表面のから湧出てくる電場 E の総和

電荷 q に比例する

$F_1 = F_2 = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$

$E_2 = k \frac{q}{r_2^2}$

$E_1 = k \frac{q}{r_1^2}$

$E_{(r)} = k \frac{q}{r^2} \Rightarrow \oint_a E da = \frac{q}{\epsilon_0} \Rightarrow \text{div} E = \frac{q}{\epsilon_0}$

$a = 4\pi r^2$

磁場についての表現

磁場についても、電場同様クーロンの法則が成立とし、磁場の強さ H を定義。しかし、実際は単磁荷は存在せず、磁気双極子の状態のみで存在する。

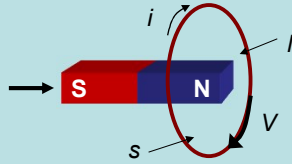
磁気双極子を囲む表面のから湧出てくる磁場 H の総和はゼロ

$H_1 = k \frac{m}{r^2}$

$H_{(r)} = k \frac{(m^+ + m^-)}{r^2} \Rightarrow \text{div} H = 0 \dots (2)$

$a = 4\pi r^2$

ファラデーの電磁誘導を表現すると

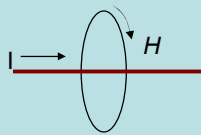


$$V = \oint_l E dl = - \frac{d \left(\int_s \mu H ds \right)}{dt} \Rightarrow \text{rot} E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \dots (3)$$

起電力V、すなわちコイルの円周上lの電場Eの総和

コイルの断面Sを単位時間当りに横切る磁場Hに比例

アンペアの法則の表現は



$$\oint_l H dl = I \Rightarrow \text{rot} H = i$$

電流により生じる磁場の強さHの周回分の総和

電流の強さI

電磁理論の非対称性と不完全性

$$\operatorname{div} E = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \dots(1) \quad \text{クーロンの法則 (ガウスの定理)}$$

$$\operatorname{div} H = 0 \quad \dots(2) \quad \text{単磁荷は存在せず}$$

$$\operatorname{rot} E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad \dots(3) \quad \text{ファラデーの電磁誘導}$$

$$\operatorname{rot} H = i \quad \dots(4) \quad \text{アンペアの法則}$$



フラデーの考えの電磁現象の対称性が壊れている
とマックスウエルは考えた。



アンペアの法則は不完全

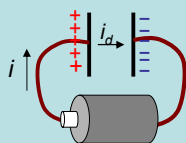
電磁現象の対称性と変位電流

ファラデーが言うところの電磁現象の対称性が成立すれば、
電場の時間変化により磁場が発生すると考えられる。

$$\operatorname{rot} H = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$



更にキリヒホッフの電流の連続性により、
コンデンサの電極間においても電流 i_d が流れると考える。



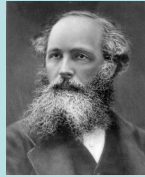
$$\operatorname{rot} H = i + i_d$$

$$i_d = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (\text{変位電流})$$



マックスウエルは、
真空中の光の伝搬と同じように電磁現象においても媒体としてエーテルが存在し、
エーテル中の分極が存在し、その時間的変動により変位電流が発生すると考えた。

マクスウエルによる電磁波の予言(1864年)



James Clerk Maxwell
1831 - 1879

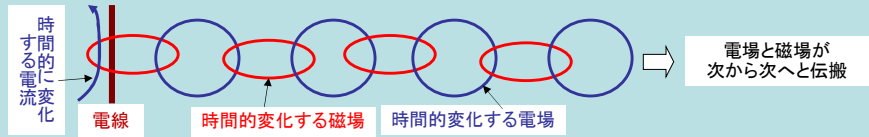
ファラデー65歳、マクスウエル25歳から文通を通じた親交が始まり、マクスウエルはファラデーの電磁場の概念を学ぶ。



ファラデーの電磁場の対称性の概念に基づきマクスウエルは磁場の時間的変化により電場が発生するのであれば**電場の時間的変化により磁場が発生する**と考えた。



電磁場の対称性の概念に基づき、電磁現象の理論体系を構築することにより**理論的に電磁波の存在を予言した**。



電磁現象の対称性に基づき理論構築することにより電磁波の存在を予言

全く別の物理現象と思われていた電気・磁気と光が融合

修正された電磁理論の4つの公理

$$\text{div}E = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \text{rot}E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (\text{ファラデーの法則})$$

$$\text{div}H = 0 \quad \text{rot}H = i + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (\text{アンペアの法則の修正})$$



$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$



$$\nabla^2 E = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad \nabla^2 H = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad \therefore C = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}, \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$



(電磁波の速度)=(光の速度)



光は電磁波である

