

# AIとの新科学対話 ①

## 資料 「電磁理論の歴史」

那須科学歴史館

館長 田澤勇夫

2023/06/05

AIとの新科学対話①のための参考資料です。

- 電気・磁気の発見から電磁波の発見までの歴史
- 変位電流の導入(1)、(2)、(3)
- マクスウェルの式を理解しよう！(初歩学者の方のために)

### 電気・磁気の実験から電磁波の予言・発見までの歴史

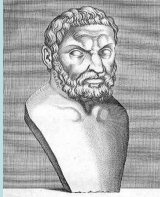
	科 学	技 術	
前6世紀	静電気の実験(タレス)		
11世紀		水上式磁針(中国)	
16世紀		吊下げ式羅針盤(イタリア)	
1600	「磁石について」(ギルバート)		17世紀に近代科学が誕生 アマチュア時代 (知的趣味の時代)
1666	光のスペクトル発見(ニュートン)		
1669	光の粒子説(ニュートン)		
1675	光速の測定(マーレー)		
1678	光の波動説(ホイヘンス)		
1745	ライデン瓶の実験(オランダ)		
1752	雷の研究(フランクリン)		
1780	動物電気の実験(ガルヴァーニ)		
1785	クーロンの法則(フランス)		近代電気学の始まり (動電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

1827	<b>オームの法則</b>		電気回路理論の始まり
1830	自己誘導の発見(ヘンリー)		
1831	<b>電磁誘導の発見(ファラデー)</b>		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	<b>キリヒホッフの法則</b>		
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	<b>電磁場の理論(マクスウェル)</b>		
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 <b>琥珀</b> 樹脂 金属 いろいろ		
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

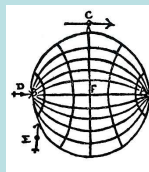


「磁気について」

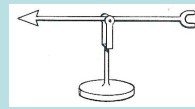


エリザベス女王に磁気を説明

- ・地磁気の発見
- ・鉄を磁化させる方法の発明



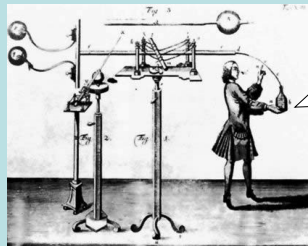
磁鉄鉱による地球模型



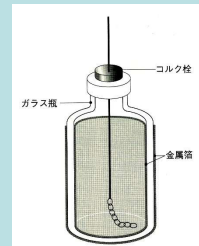
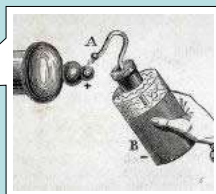
磁鉄鉱の周囲を観測

## 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



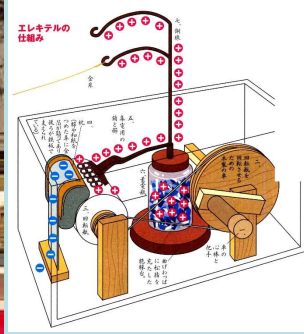
静電気に関する定性的な実験が行えるようになる。

## 平賀源内のエレキテル(1776)



平賀 源内  
1728-1780

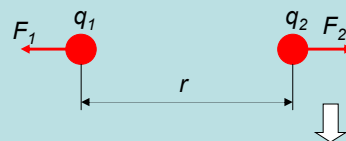
江戸時代中頃に活躍した本草学者、地質学者、蘭学者、医者、殖産事業家、戯作者、浄瑠璃作者、俳人、蘭画家、発明家。



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

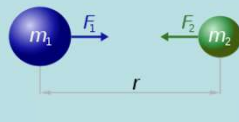


$$F_1 = F_2 = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

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。

## ボルタの電池(電堆)の発明(1800)



Alessandro Volta

1745-1827

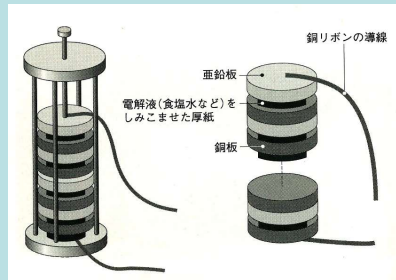
異種金属をくっつけ舌にはさむとピリピリとした刺激がある現象より、1800年にボルタは異種金属間で電気が発生していると推論し、舌の代わりに塩分を浸み込ませた紙を銅板と亜鉛板で挟んだボルタの電池を発明した。



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

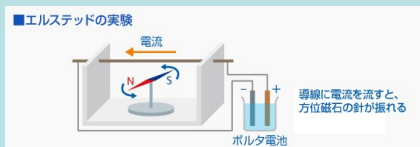


## エルステッドの電流の磁気作用の発見(1820)



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金が動いた。



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)

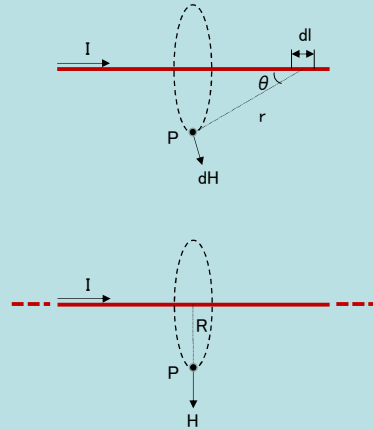
2人の数学者ビオとサバルはエルステッドの論文を手にした  
数週間後に電流と磁場の関係を数式により定式化する。



*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

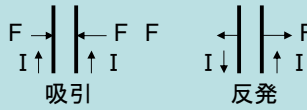
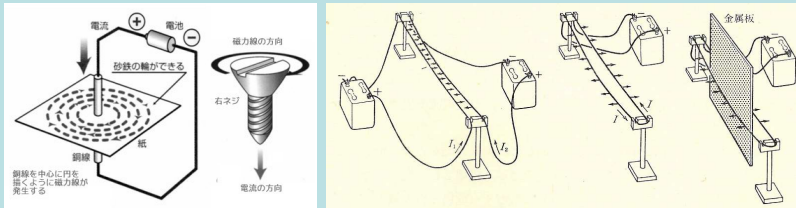
## アンペアの法則(1820)



*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

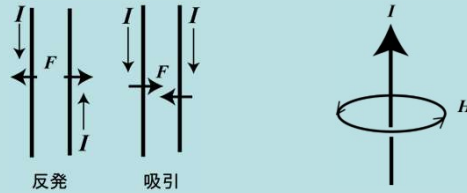
平行した導体に同じ向きの電流を流すと引き合い、反対方向に流すと  
排斥しあうことを発見



## 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。

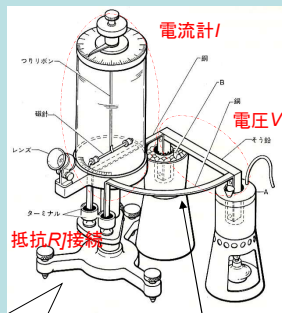


宇宙(地球)は神が創り給うたもの、つまり万有引力は神による法則。  
よって  
全ての法則は万有引力に基づく。⇒事実より理論が真理(科学理論とは何か?)

## オームの法則の発見(1827)



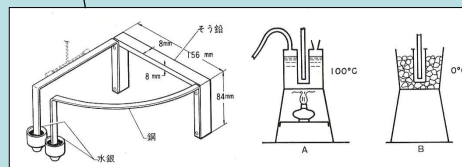
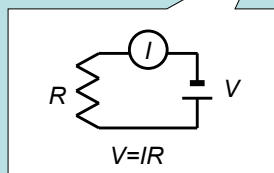
Georg Simon Ohm  
1789-1827



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  
( $I=V/R$ )



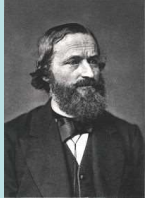
電気回路理論の始まり



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)

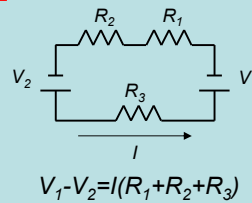
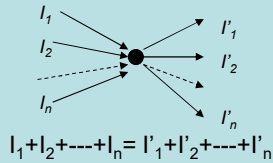
幾つかの導体に入る電流の総和と出ていく電流の総和は等しい。

### ・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。

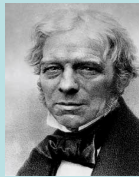


### 電気回路理論の確立



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

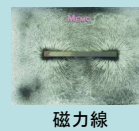
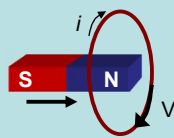


Michael Faraday  
1791 - 1867

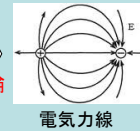
ファラデーは「電気から磁気が発生するのであれば、逆に、磁気から電気が発生するはずだ」と推論。(電磁現象の対称性)



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。



推論



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

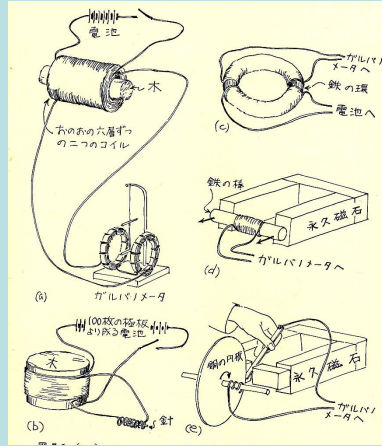
(a) 木の棒に銅線を巻き電池をつなぎ、更にもう一つの銅線を巻き検流計を付けたが、その針は動かなかった。しかし、電流を入り切りした瞬間だけ僅かに針が振れた。

(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。

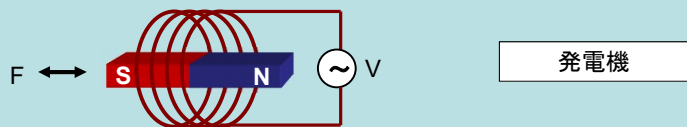
(c) 鉄の輪を作り、輪の半分に絶縁した銅線を巻き電池を接続し、輪の他方si縁銅線を巻き電流計をつなぐ。電池の接続スイッチを入り切りした瞬間だけ電流計の針が振れた。

(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。

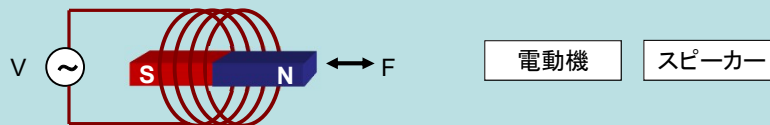


## ファラデー電磁誘導からうまれる様々な技術



発電機

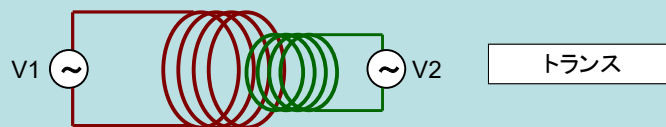
機械的(振動)エネルギーFを電氣的エネルギーVに変換



電動機

スピーカー

電氣的エネルギーVを機械的(振動)エネルギーFに変換



トランス

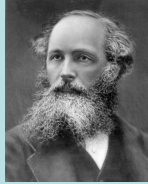
電氣的エネルギーV1を異なる電氣的エネルギーV2に変換

## ファラデーとマクスウェ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ため、学会から高い評価は得られなかった。



マクスウェルは、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。



ファラデーとマクスウェルは親交があり、ファラデー65歳、マクスウェル25歳から文通が始まり、マクスウェルはファラデーの(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、マクスウェル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



マクスウェルの電磁理論の確立(1864)



**電磁波の存在を予言**

## 電磁理論の非対称性と不完全性

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

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

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

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



**ファラデーの考えの電磁現象の対称性が壊れている  
とマクスウェルは考えた。**



アンペアの法則は不完全

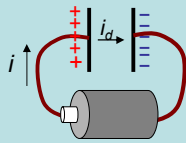
## 電磁現象の対称性と変位電流

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。

$$\text{rot}H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$



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。



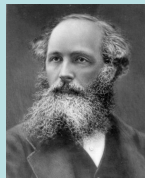
$$\text{rot}H = i + i_d$$

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



マクスウェルは、  
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。

## マクスウェルによる電磁波の予言(1864年)



James Clerk Maxwell  
1831 - 1879

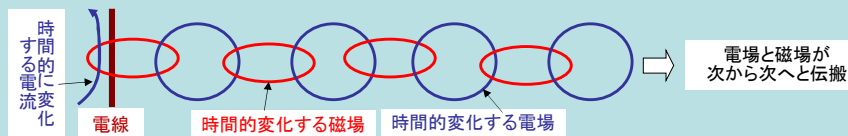
ファラデー65歳、マクスウェル25歳から文通を通じた親交が始まり、マクスウェルはファラデーの電磁場の概念を学ぶ。



ファラデーの電磁場の対称性の概念に基づきマクスウェ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\*

$$\begin{aligned} \operatorname{div} E &= \frac{q}{\varepsilon_0} & \operatorname{rot} E &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (\text{ファラデーの法則}) \\ \operatorname{div} H &= 0 & \operatorname{rot} H &= i + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (\text{アンペアの法則の修正}) \end{aligned}$$

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

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

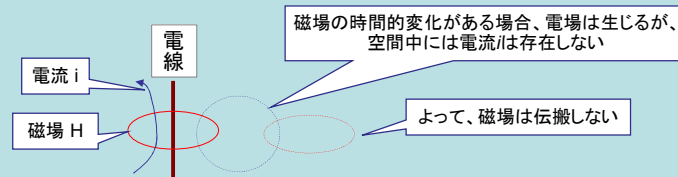
(電磁波の速度)=(光の速度)

**光は電磁波である**

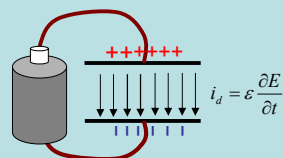
\* マクスウェルは8つの式としたが、ヘビサイドが4つの式としてまとめた。

## 変位電流の仮説から電磁波の予言

変位電流  $i_d = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}$  が存在しないと  $\operatorname{rot} H = i \Rightarrow$  電磁波は存在せず



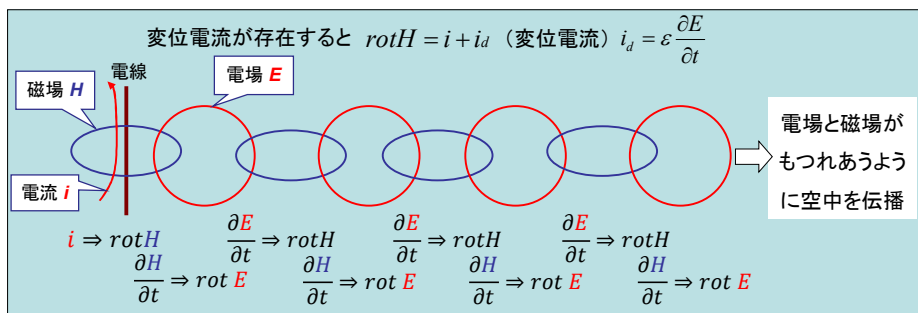
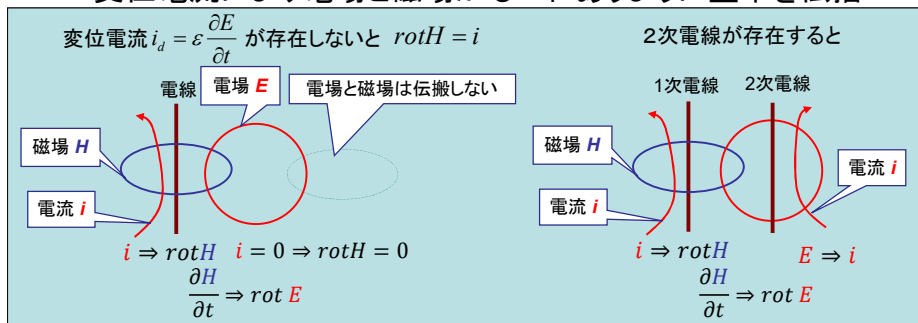
電磁波の実証以外に変位電流の存在を証明することは難しい




変位電流があまり大きくないとコンデンサ周辺の磁場  $H$  に対する変位電流による寄与の総和は0

↓  
当時、変位電流の存在を実験的に証明することは困難

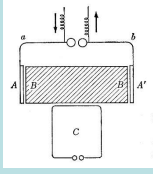
## 変位電流により電場と磁場がもつれあうように空中を伝播



## Herzの実験 (1888年)



**H. R. Hertz**  
1847-1894



1879年の電磁波証明の懸賞問題への取組を恩師ヘルムホルツより勧められヘルツは取り組んだが、なかなか良い成果を得られないでいた。

ところが、導線ループに取付けた火花ギャップにより磁場の強さを測ろうとした時、磁気誘導で考えられるより離れた距離にループを置いても火花放電することに気付く。

ループアンテナ

また、その時、用いた誘導コイルを用いた高電圧発生装置が電磁波発生装置になることも気付く。


連続電磁波発生

そして、コイルのインダクタンスと先端の板C,C'のコンデンサによる共振周波数が放射されていることにも気づく。

同調

更に、電磁波は光と同じなので反射鏡を置けば、一方方向に電磁波を放射できると考えた。

指向性アンテナ(パラボラなど)



電磁波の発見だけでなく、現代でも最も重要な無線技術の発明を行う。

## マルコニーの大西洋横断通信実験



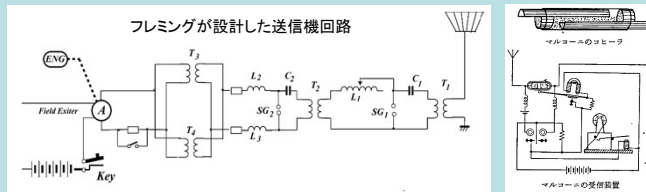
G. Marconi

1874-1934

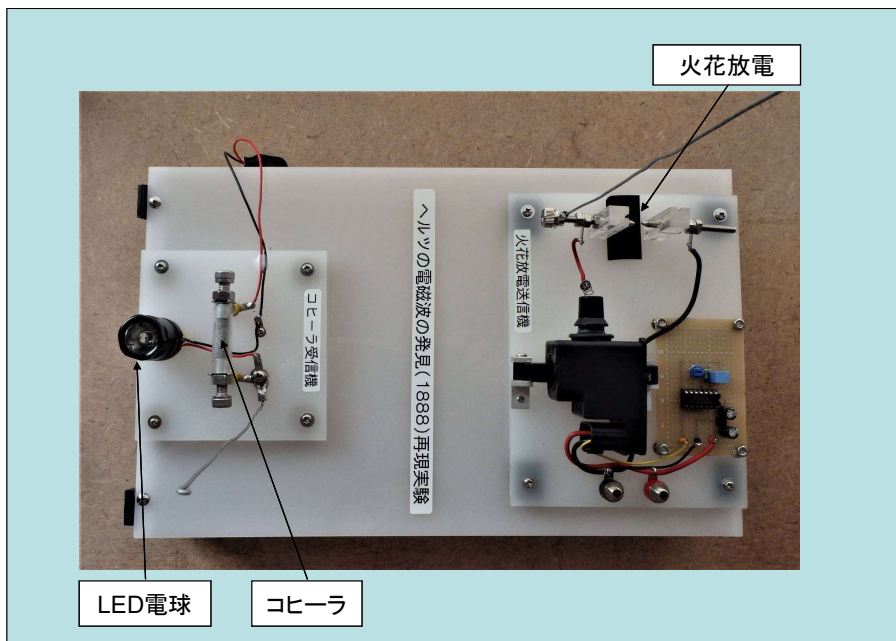
1899年、フレミングが設計した送信機により、  
当時、予想していなかった長距離の大西洋横断通信に成功した。



マルコニーの技術の基礎の多くはテスラー、ロッジ、フレミングら  
によるものであり、電離層により長距離伝送の認識もなかった。



## ヘルツの電磁波の発見の再現実験装置



## 変位電流の導入(1) マクスウェルの分子渦と荷電粒子のモデルから

ファラディの磁力線に関する考えに基づきマクスウェルは論文「物理的力線について」において

磁場においては何か回転していると推測

流体中の回転する渦からの類推と転がり軸受からの類推により

分子渦(セル)とその間にある荷電粒子(ビーズ)からなるモデルを提案

回転力が異なるセル間のビーズは動くが、セルとビーズに弾性が働くと動かず、ビーズを動かそうとする力が取り除かれると、弾性によりビーズが変位すると考え

真空中のビーズの変位による変位電流の存在を仮定

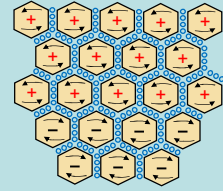
$$\text{電気変位 } \frac{\partial E}{\partial t} \Rightarrow \text{変位電流 } i_d = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

次にマクスウェルは論文「電磁場の力学的理論」において、セルとビーズのモデルは数学的説明を確立するための手段にすぎないため、このモデルを捨て去り、

エーテル中に変位電流が流れると考えた

しかし、マイケルソン・モーレーの実験結果とこれに基づくアインシュタインの特殊相対性理論によりエーテルの存在は否定された。

電場の時間的変化より磁場が生じるだけで変位電流は存在しないと考えることもでき、また、真空中の電荷の変位による変位電流が存在するモデルを仮定することもできるが、このモデルにおいては、真空中の分極の存在を実証する必要がある



マクスウェルによるセルとビーズによるモデル

## 変位電流の導入(2) 電荷の保存則と電流の連続則を前提とする論理体系から

変位電流の存在を前提とすると電荷の保存則・電流の連続則を導くことができるが、逆に、電荷の保存則・電流の連続則の存在を前提とする。

電流の連続則により、電線の任意の箇所を取り囲む閉曲面から湧き出ていく電流の総和はゼロであるので、

$$\text{div } i = 0$$

その閉曲面内に電荷 $q$ が存在する場合は

$$\text{div } i = -\frac{\partial q}{\partial t}$$

が成立する。これを電荷の保存則と言う。

また、

$$\text{div } E = \frac{q}{\varepsilon}$$

であるので

$$\text{div} \left( i + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) = 0$$

が成立する。電荷 $q$ が存在する閉曲面についても電流の連続則が成立するモデルでは

上式第2項も電流を表すことになり、

$$i_d = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

も電流を表し、これをお変位電流と言う。よって、アンペアの法則の電流項を次のように変更する。

$$\text{curl } H = i + i_d = i + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

### 変位電流の導入(3) ファラデーの電場と磁場の対称性の概念から

電場と磁場との間には対称性が成立し、電場と磁場は波のように振動しているという  
ファラデーのモデルが成立すつとすれば、

電荷 $q$ 、電流 $i$ が存在しない空間の電磁場をアンペアの法則の修正項が存在しない場合  
電磁場は次に式で表される。

$$\begin{aligned} \operatorname{div} E &= 0 & \operatorname{rot} E &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ \operatorname{div} H &= 0 & \operatorname{curl} H &= 0 \end{aligned}$$

しかし、これらの4つの式では電場と磁場の対称性が成立しておらず、  
ファラデーの電場と磁場の対称性が成立するために次のように修正する。

$$\begin{aligned} \operatorname{div} E &= 0 & \operatorname{rot} E &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ \operatorname{div} H &= 0 & \operatorname{rot} H &= \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \end{aligned}$$

よって、電荷 $q$ 、電流 $i$ が存在する場合における電磁場は次に式で表される。

$$\begin{aligned} \operatorname{div} E &= \frac{q}{\varepsilon_0} & \operatorname{rot} E &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ \operatorname{div} H &= 0 & \operatorname{rot} H &= i + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \end{aligned}$$

### マッ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)

$F_1 = F_2 = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$   
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  
 $\oint_a E da = \frac{q}{\varepsilon_0} \Rightarrow \operatorname{div} E = \frac{q}{\varepsilon_0}$   
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



### 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。

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

$m^+ m^-$

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

$a = 4\pi r^2$

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

### ファラデーの電磁誘導を表現すると

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

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

