

エルステッドの発見から数カ月にフランスのピオ¹⁰とサバル¹¹は電流の強さと導線の形とから、周囲の磁場の強さを与えるピオ・サバルの法則を発見しました。また、フランスのアラゴは導線を巻いた鉄棒に電流を流すと鉄棒が磁化されることを見だし、電磁石の原理を発見しています。

アラゴの実験の手伝いをしていたアンペール¹²は、エルステッドの発見に強い刺激を受け、電気と磁気との統一理論を導きだそうと実験に着手し、数週間後には磁針の振れる方向と電流の流れる方向についての右ねじの法則を、また、2本の平行な導線に流れる電流の方向と導線の間に関係を見だし、1822年には得意の数学を駆使して、平行導線に間に働く力は両電流の大きさの積に比例、導線間の距離に反比例することを示す式を導きました。

今日、電流の磁気作用は「アンペールの法則」と呼ばれ、電気の基本単位である電流の強さを定義する式として有名で、電流の強さの単位 A (アンペア) は彼の名からきています。アンペールは「電気」、「電流」、「電圧」の語彙を創始するなど、こうした業績が電気力学の基礎となり、19世紀の物理学に大きな影響を与えています。

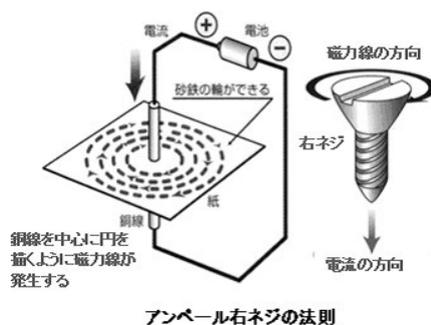


図 9: 右ネジの法則

6 電磁誘導現象の発見

1826年、オームの法則が発見され電圧、電流、電気抵抗の関係が明らかになる

1831年、ファラデーは電磁誘導現象を発見し、その後の電気文明時代の幕開けとなる

ファラデーの電磁誘導現象の発見により電磁気現象の完全な理解が得られ、この発見を契機に電気の実用面での発展が急速に進みます。

ボルタ電池について研究を行っていたドイツのオーム¹³は、フーリエの熱に関する論文¹⁴を読んでいて、電流についても同じ法則が成り立つのではないかとこの着想を得ました。電流の流れを2点間の温度差とその間を流れる熱量の関係に例え、長さや太さの異なった導線を用いて実験を繰り返し、1826年にオームの法則を発見し、電圧と電流と電気抵抗の基本的な関係を明らかにしました。ここに電気回路学の基礎が構築されたこととなります。

エルステッドの電流の磁気作用の研究に触発されたイギリスのファラデー¹⁵は、電気が磁力を生み出すのであれば、磁石から電気が作れるだろうと考え、いろいろな実験を行いました。

¹⁰ジャン＝バティスト・ピオ：フランスの物理学者、天文学者、数学者（1774年 - 1862年）。

¹¹フェリックス・サヴァール：フランスの物理学者（1791年 - 1841年）。

¹²アンドレ＝マリ・アンペール：フランスの物理学者、数学者（1775年 - 1836年）。

¹³ゲオルク・ジモン・オーム：ドイツの物理学者（1789年 - 1854年）。

¹⁴物体を熱が通過するときの電熱速度は、熱の流れに垂直な伝熱面積に比例し、流れの方向に沿った温度勾配の負の値に比例する。

¹⁵マイケル・ファラデー：イギリスの化学者・物理学者（1791- 1867年）。

その結果、1831年、コイルに磁石を近づけたり遠ざけたりするとコイルに電気が発生し、近づけて置いた2つのコイルの一方に電流を流すと他方のコイルに電気が発生するという電磁誘導現象を発見しています。

1832年、米国のヘンリー¹⁶は、ファラデーと独立してコイルに流れる電流を断続したとき、そのコイル自体にも電気が発生する自己誘導現象を発見し、1833年にはロシアのレンツ¹⁷がファラデーの電磁誘導の法則を整理・具体化して「電磁誘導によってコイルに起電力が生じるが、起電力の向きはコイル内の磁力線の数の変化を妨げる方向にある」というレンツの法則を導いています。

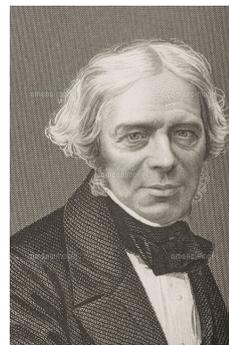


図 10: M. ファラデー

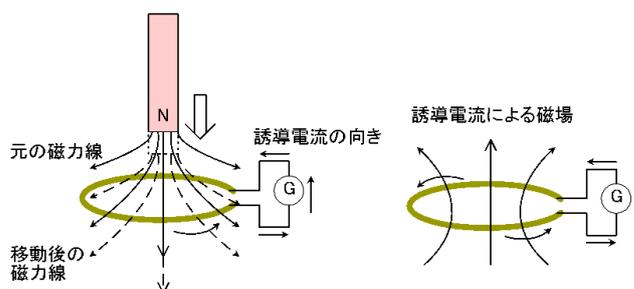


図 11: レンツの法則

ニュートンの影響が色濃く残っていた当時、電気力、磁気力は瞬間的に伝わる遠隔力と考えられていた中で、1837年、ファラデーは近接作用説を唱え、電気力や磁気力を視覚的に表現する電気力線、磁力線を考案しています。電磁気現象はファラデーの電磁誘導の発見により十分な理解が進み、特に近接作用の考えは後述するマクスウェル¹⁸に引き継がれ、古典電磁気学の完成へと至っていきます。

7 近接作用説から場の概念へ

ファラデーの近接作用説から電磁場という「場」の概念が生まれる

場の考えを引き継ぎマクスウェルは電気と磁気の統一理論・マクスウェル方程式を完成

ファラデーは電気力や磁気力は途中の媒質によって運ばれるという近接作用説を提案し、この考えはマクスウェルの電磁場の統一理論に結実していきます。

¹⁶ジョセフ・ヘンリー：アメリカの物理学者（1797年-1878年）。

¹⁷ハインリヒ・レンツ：ロシア-エストニアの物理学者（1804年-1865年）。

¹⁸ジェームズ・クラーク・マクスウェル：イギリスの理論物理学者（1831年-1879年）。気体分子運動論や熱力学、統計力学などの研究でも多大の貢献をしている。熱力学第2法則でのマクスウェルの悪魔の思考実験は有名。

ファラデーの近接作用説はどのようにして生まれたかを概観しておきます。ファラデーは初期のころ電流の化学作用としての電気分解の実験研究に傾倒し、その後、エルステッドの発見に触発されて電気、磁気の研究に没頭していきますが、ここで初期のころの研究で得た知見が生きてきます。つまり、電気や磁気的作用は、電気分解のときのイオンのように、隣り合った部分が次々と力を働かせて伝わるのではないかと考えたわけです。それを視覚的に表わしたのが電気力線や磁力線で、帯電した物体の間に働く力はその間の媒質を通して作用し、その力は媒質の影響を受けるという近接作用説のアイデアに至ります。

ファラデーの近接作用という考えからは、電気力線で満たされた空間が「電場」、磁力線で満たされた空間が「磁場」、電気力線と磁力線で満たされた空間が「電磁場」というように、空間に充満する「場」という、現代物理学の中核をなす概念が生まれてきます。

次節で述べますが、若きマクスウェルはファラデーの『電気の実験的研究』という論文を詳読して感銘を受け、ファラデーとのいく度かの手紙のやりとりを通して、当時、革新的な考えであったファラデーの「場」の考え理解していきます。

マクスウェルは電磁現象を統一的に理解しようと「電磁場」の力学的モデルを通して苦闘を続け、1864年に『電磁波の動的理論』を完成させ、20個の方程式からなる「電磁場の一般方程式」(マクスウェル方程式)の導出に成功しました。1873年にそれまでの研究成果をまとめた『電気磁気論』が刊行され、ここに古典電磁気学は完成を見ることとなります。

8 マクスウェルの予言

ファラデーの近接作用を指導原理にマクスウェルは電磁場の統一理論を構築する
その帰結として電磁波の存在を明らかにし、光は電磁波の一種であることを予言

マクスウェルはファラデーらが明らかにした電場、磁場についての統一理論を構築し、電磁波の存在を明らかにするとともに、光は電磁波であることを予言しました。

マクスウェルは、1831年、スコットランドの首都エジンバラで生まれています。この年はファラデーが電磁誘導の法則を発見した年で、歴史の不思議な因縁を感じさせます。48歳の短い生涯でしたが、その業績は、数学的才能をいかに発揮し、力学、天体物理学(土星の輪の研究)、色の知覚についての研究(マクスウェルの三原色)、気体分子運動論、熱力学、

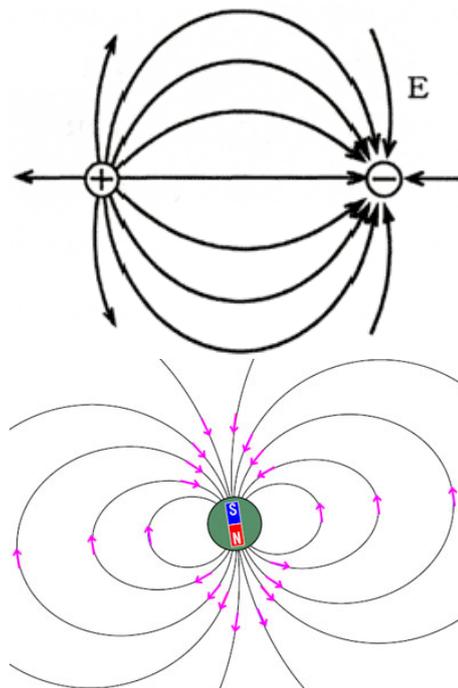


図 12: 電気力線と磁力線

電磁気学など、広範囲な分野で傑出した成果を上げています。

ファラデーやアンペールが明らかにした電場や磁場の関係を統一的に把握し、数学的に表そうと電磁場の統一理論の構築に取り組み始めたのはマクスウェルが24歳の時(1855年)といわれています。当時はニュートン力学の圧倒的な影響が残っていて遠隔作用説が当然視されていましたが、ファラデーの近接作用説を指導原理として、さまざまなアイデアとモデルを試み、約10年近くの苦闘の歳月を経て、1864年にそれまでに知られているすべての電磁現象を統一的に説明できる基礎方程式(マクスウェル方程式)を導くことに成功しました。

この方程式から、電気と磁気の波である電磁波が存在することと、それが横波であることが導かれます。さらに、マクスウェルは電磁波の真空中の速度を計算し、その値は約30万Kmになることを知りました。

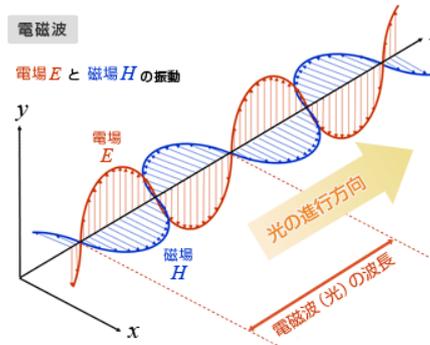


図 13: J.C. マクスウェルと電磁波

回転数が小さいときは、もどってくる光が同じ歯の間を通り抜ける。

回転数が大きくなると、もどってくる光は次の歯にさえぎられる。歯の数が n の歯車は、すき間の数も n 個であり、このとき歯車は $1/(2n)$ 回転している。

フィゾーの実験

光源からの光は、ハーフミラー(半透明の鏡)で反射され、歯の数が n の歯車 G の歯の間を通り抜ける。この光は、反射平面鏡 M で反射されて G にもどる。光が往復する間に、歯車が $1/(2n)$ 回転すると、光は次の歯 N にさえぎられる。このとき、歯車の 1 s 間の回転数を f [回/s] とすると、歯車が $1/(2n)$ 回転する時間 t は $1/(2nf)$ と表される。これは、光が GM 間の距離 l を往復する時間 $2l/c$ に等しい。したがって、光速 c は、次のように求められる。

$$\frac{1}{2nf} = \frac{2l}{c}$$

$$c = 4nfl$$

第一学習社「物理基礎」教科書より引用

図 14: フィゾーの実験

光の速度は1849年にフランスのフィゾー¹⁹によって31万4千Kmという値が得られており、マクスウェルは電磁波の速度が光速とほとんど同じであることに注目し、1861年10月19日のファラデー宛ての手紙の中で、『電磁波の速度を計算から求めると1秒間に31万740Kmとなります。フィゾー氏は光パルスを遠距離間で往復させて回転歯車を使って光の速度を31万4千Kmと算出しました。計算から求めた値とフィゾーの測定値との違いは僅かに1%です。この一致は偶然ではなくて光は電磁波の一種であると結論せざるを得ないのです。』と書き送り、理論の帰結として光は電磁波であると予言しました。この予言はそれから約20年後の1888年、ドイツのヘルツによって証明されますが、マクスウェルはその結果を知ることなくこの世を去っています。



図 15: A. フィゾー

9 電磁波の実証実験と無線通信時代の幕開け

マクスウェルの予言した電磁波はヘルツの実験によりその実在が証明される

電磁波の産業的利用が急速に進み、無線通信時代へと急速に発展していく

ヘルツ²⁰により電磁波の存在が実証され、無線通信時代の幕開けを迎えます。

ヘルツはある日の実験中に、ライデン瓶に溜めた電荷を1つの渦巻きコイルの端子間で放電させると、隣に置いてあったもう一つの渦巻きコイルの端子間でも火花が飛ぶことを発見しました。かつて恩師ヘルムホルツ²¹から与えられていた「マクスウェルの電磁理論を実験的に証明する」という課題が頭に浮かんだと思います。



図 16: H.R. ヘルツ

ヘルツは、この現象は火花放電を起こしたところから電磁波が発生し、少し離れたところに伝播して他方の渦巻きコイルに火花放電を発生させた、つまりマクスウェルが予言した電磁波が介在しているのではないかと考えました。ヘルツは数カ月間にわたる実験を通してマクスウェルの予言した空間を伝搬する電磁波の存在を証明することができ、電磁波は、速度、反射、屈折、偏光について光と全く同じ性質をもつことを実験的に明らかにしました。

ヘルツが電磁波の存在を実証した後、いろいろな国の科学者が電波を利用した無線通信の可能性に注目しはじめました。名声や個人的利益には全く関心を示さなかったヘルツは、自

¹⁹アルマン・イッポリット・ルイ・フィゾー：フランスの物理学者（1819年 - 1896年）。地上で初めて光速を測定したことで有名。

²⁰ハインリヒ・ルドルフ・ヘルツ：ドイツの物理学者（1857年 - 1894年）。

²¹ヘルマン・フォン・ヘルムホルツ：ドイツの生理学者、物理学者（1821年 - 1894年）。

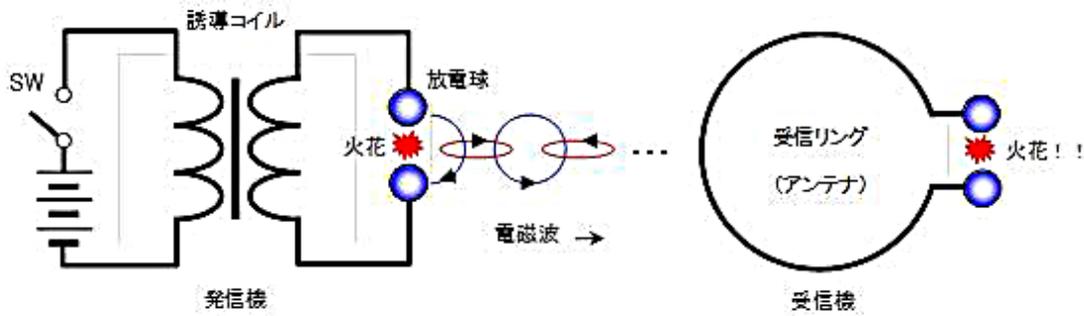


図 17: ヘルツの電磁波確認実験

分の実験の実用的価値について問われた際、「それは何の役にも立っていない……単にマックスウェル先生が正しかったことを証明しただけの実験です。我々の肉眼では見えない不思議な電磁波は確かに存在する。しかし、単に存在するというだけです」と答え、また、発見の成果の今後について聞かれると、「たぶん、何もありません」と答えています。

ヘルツの発見後、電波を通信に利用しようと最初に着想したのは英国のロッジ²²といわれていますが、遠距離通信の実用的システムを開発したのは、イタリアのマルコーニ²³で、1897年5月13日に南ウェールズのラバーノック岬からプリストル海峡に浮かぶフラットホルム島までの約6km、世界初の海を越えての無線通信に成功しています。その後の電波を使った応用面での実用開発の進展はいうまでもないでしょう。



図 18: G. マルコーニ

補注：フィゾーの光速度測定実験

歯車の歯の総数を n とし、歯車の毎秒あたりの回転数を f とします。回転する歯車のある定点位置で観測すると、1回転で歯車の歯は n 個通過するので1秒間あたり nf 個の歯が通過するのが観測されますね。1個の歯が通過してから次の歯が来るまでの時間 T は、したがって

$$T = \frac{1}{nf} \text{ [秒]} \quad (1)$$

となります。歯と歯の間隙から次の歯が来るまでの時間は、この半分の

$$t = \frac{1}{2}T = \frac{1}{2} \times \frac{1}{nf} = \frac{1}{2nf} \text{ [秒]} \quad (2)$$

となりますね。

さて、下図に示すような実験装置で歯車を回転させます。回転がゆっくりな場合は、歯の間隙を通り抜けた光は鏡で反射して再び隙間を通り抜けて帰ってくるので明るく見えますが、回転数を徐々に

²²オリバー・ロッジ：イギリスの物理学者、著述家（1851年-1940）。英国の生んだ世界的物理学者であると同時に、その物理学的概念を心霊現象の解釈に適用した最初の心霊学者と言われている。1894年、初期の無線電信の実用的な検波器（コヒーラ）を発明し、その年の8月にはこの装置で55メートル離れた所にモールス信号を送ることに成功したが、これによって無線電信を実用化しようとはしなかった。

²³グリエルモ・マルコーニ：イタリアの無線研究家、発明家（1874年-1937年）。

上げていくと、ある特定の回転数の時、歯車の隙間を通過した光が鏡で反射されて戻ってきたちょうどその時に、次の歯車がきて光を遮断してしまいます。また回転を上げると明るく見えます。このように、観測者は歯車の回転数に応じて光が明るく見えたり暗く見えたりしているわけですね。

明暗を生じる歯車の回転速度 f 、歯数 n 、歯車から反射鏡までの距離 ℓ から次のようにして光速 c ²⁴を計算できます。光が歯の隙間からでて戻ってくるまでの時間は $2\ell/c$ です。一度明るくなって、次に初めて暗くなった時の歯車の回転数が f であったとします。歯の隙間から次の歯が来るまでの時間は (2) で与えられています。この両者が等しいときに明暗を生じるので

$$\frac{1}{2nf} = \frac{2\ell}{c} \quad (3)$$

これから光速 c は

$$c = 4n\ell f \text{ [m/s]} \quad (4)$$

と求まります。フィゾーの実験では、歯車の回転数 $f = 12.6$ [Hz]、歯の総数 $n = 720$ 、距離 $\ell = 8633$ [m] として $c = 3.133 \times 10^8$ [m/s] という値を得ました²⁵。

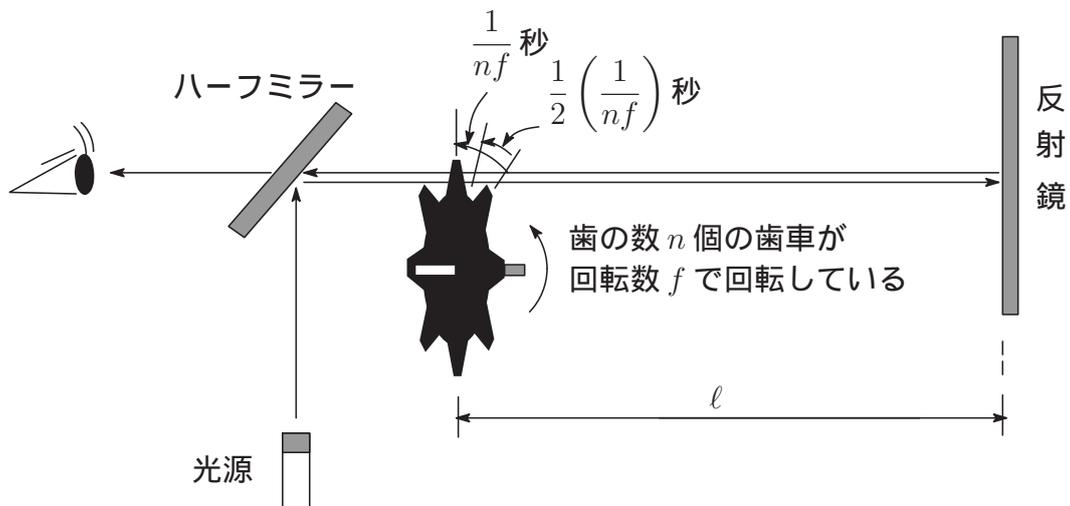


図 19: フィゾーによる光速度測定の実験

参考文献

- [1] 高橋雄造, 『電気の歴史』, 東京電機大学出版局, 2012 年
- [2] 長田好弘, 『近代科学を築いた人々(中)』, 新日本出版社, 2003 年
- [3] 金原寿郎, 『基礎物理学選書 電磁気学 (I)』, 裳華房, 昭和 60 年
- [4] 吉岡安之, 『マグネットワールド』, 日刊工業新聞, 1998 年
- [5] 青木国夫, 後藤満監修, 『学研まんが 電気のひみつ』, 昭和 60 年

²⁴光速を表す c はラテン語で速さを意味する *celeritas* に由来しています。

²⁵現在, 真空中における光速の値は $299,792,458$ m/s と定義されています。