

# 社会人のための楽しい物理入門

## 第4章：電磁気学

*HENLOU*

2010年4月1日

# 目次

4.7	電磁波	3
4.7.1	マクスウエルの方程式	3
4.7.2	電磁波の発生メカニズム	4
4.7.3	電磁波の種類	4
	偏光	5
4.7.4	電磁波のエネルギー	5

## 4.7 電磁波

電磁波といえばマクスウェルの方程式を思い浮かべ、難しいからや～めたと Give Up される方も多いかもしれません。かくいう私もはじめてマクスウェル方程式を見たときには“ なんじゃこれは ”と敬遠気味になったものでした。しかし、静電場や電磁場のところででてきたクーロンの法則やファラデーの法則、アンペールやピオサパールの法則は全部 Maxwell の方程式からでてきます。つまり、マクスウェルの方程式は電磁現象を説明する基本的な方程式ということで、なにも電磁波だけの方程式ではないということですね。

このセクションではマクスウェルの方程式とその意味を簡単に紹介し、それから電磁波の話に入っていきます。

### 4.7.1 マクスウェルの方程式

マクスウェルの方程式は次の4つの方程式です。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{第1式 (クーロンの法則)} & \text{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \text{第2式 (ファラデーの法則)} & \text{rot} \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt} \\ \text{第3式 (単極子は存在しない)} & \text{div} \mathbf{B} = 0 \\ \text{第4式 (アンペールの法則)} & \text{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \left( \mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{d\mathbf{E}}{dt} \right) \end{array} \right. \quad (4.7.1)$$

$E$ ,  $B$  はそれぞれ電場と磁場で、 $\rho$  は電荷密度で  $J$  は電流を表します。 $div$ ,  $rot$  はそれぞれ発散と回転と呼ばれ、 $div$  は四方八方に突き出す (流れ出す) イメージで、 $rot$  はまさに回転のイメージです。

第1式の意味 電場の発散は電荷に比例するというを表しています。§4.1.7 でやったガウスの法則を思い出してください。電荷  $Q$  から四方八方にでる電気力線の本数は  $Q/\epsilon_0$  本でした。第1式からクーロンの法則

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

がでてきます。 $Q$  は電荷密度  $\rho$  を体積で積分したものになります。

第2式の意味 §4.5.2 のファラデー・レンツの法則を思い出してください。円形コイルの断面積を通過する磁場が時間と共に変化するとき円形コイルに電流が流れることを表しています。電流は電荷の移動で、その電荷の移動は電場によって引き起こされますね。 $rot E$  はそういう意味です。

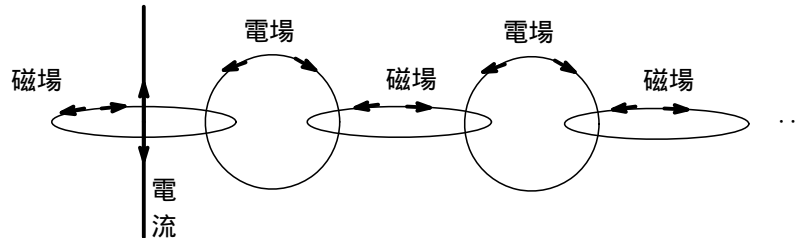
第3式の意味 §4.3.2 の「磁場のガウスの法則」の項を見てください。電荷の場合はプラス電荷とマイナス電荷が単独で存在しますが、磁荷の場合には  $N$  極あるいは  $S$  極という単極の磁荷 (単極子) は存在しないことを表しています。

第4式の意味 §4.3.3 電流と磁場のアンペールの法則を見てください。針金に電流を流すと、電流の方向を右ネジの進む方向として、磁場は右ネジの回る向きに生じるというものでした。ところで第4式の右辺第2項の  $\mu_0\epsilon_0 \frac{dE}{dt}$  は何でしょうか？ これは変位電流と呼ばれます。電流といえば電荷の流れを意味しますが、変位電流は電荷の移動に伴って発生するものではありません。例えば充電されたコンデンサーを放電すると電流が流れますね。しかしコンデンサーの極板間は空間となっており、針金でつないでいるわけではありません。本来なら電流は流れるはずがないわけですが、現実には流れる。そうするとこの空間も電荷の流れではない電流が流れると考えざるを得ない。これを変位電流と呼んでいますが、マクスウェルによって導入されました。

以上でマクスウェルの方程式の話が終わります。今まで学習してきたいろいろな法則との関係が分かったと思います。

#### 4.7.2 電磁波の発生メカニズム

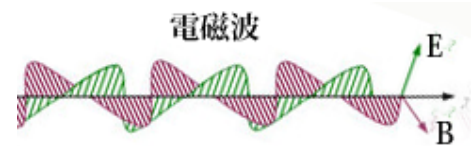
アンペールとファラデーの法則により，振動する電流により発生した磁場が電場を生みだし，その電場が次に磁場を生み出し，という具合に次々と連鎖的に電場と磁場が発生し，電場と磁場は空間を横波として伝搬していきます。この波を電磁波と呼んでいます。電場  $E$  の変化が伝わる波を電気波，磁場  $B$  の伝わる波を磁気波といいます。



電磁波の速度は通常  $c$  と書かれ，真空中での速さは

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.997925 \times 10^8 \text{ m/s}$$

で，秒速約 30 万 Km となります。 $\epsilon_0$  は真空の誘電率， $\mu_0$  は真空の透磁率です。

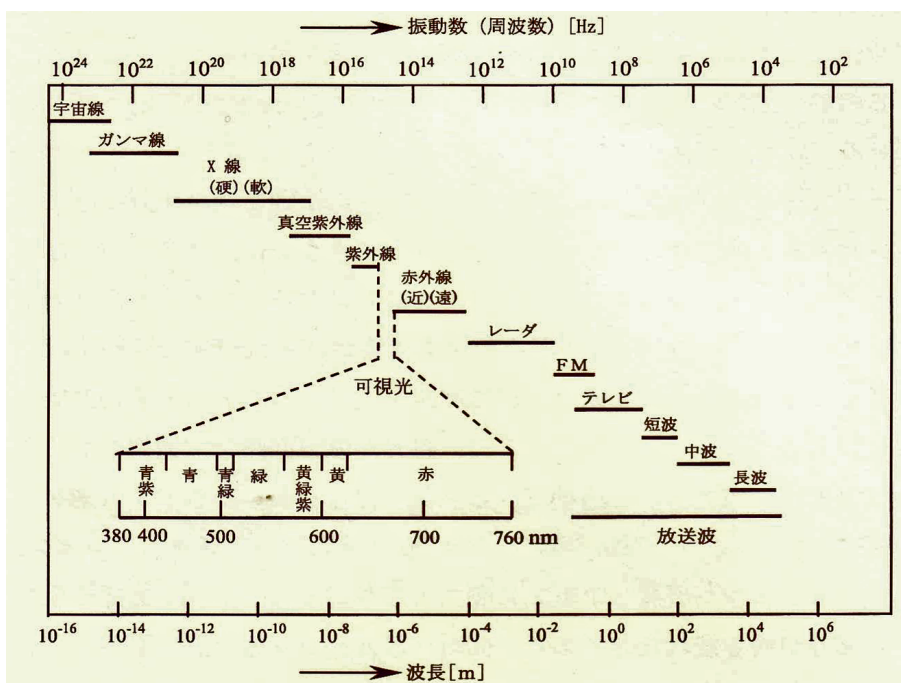


#### 4.7.3 電磁波の種類

電磁波の波長を  $\lambda$ ，周波数を  $f$ ，振動数を  $\nu$  とすると

$$c = f\lambda \quad \text{or} \quad c = \nu\lambda \tag{4.7.2}$$

光は電磁波の一種ですが，光以外に下表のような種類があります。



## 偏光

太陽の光や照明灯から出たいわゆる自然光は、いろいろな振動面をもった光が混じっています。この(電場の)振動面が一つの平面に限られている光を偏光と呼んでいます。偏光板は特定の振動面の光だけを透過するもので、この振動面と直角になる偏光は透過しません。これはいわゆるクロスニコルといわれるものです。

### 4.7.4 電磁波のエネルギー

§4.4.1 でフレミングの左手の法則を学習しました。左手の親指, 人指し指, 中指をそれぞれ直角に広げ, 人指し指を磁場の方向にとり, 中指を電場の方向にとると, 親指の方向に力が作用するというものでした。これは親指方向にエネルギーが流れたということを意味します。このように, 直交する電場と磁場の中では, それらに直交する方向にエネルギーが運ばれますが, これをポインティング<sup>1</sup>の法則といいますが, ポインティングの法則はフレミングの左手法則と同じことを表していることになりましたが, フレミングの法則より 10 年早く発表されています。

電磁波も電場と磁場が直交しているので, ポインティングの法則により電磁エネルギーが運ばれ, その方向は電磁波の進行方向と一致します。真空の場合, 電磁場のエネルギー密度(単位体積あたりのエネルギー)  $U$  は

$$U = \frac{1}{2} \left( \epsilon_0 \mathbf{E}^2 + \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B}^2 \right) \quad (4.7.3)$$

で与えられます。

---

以上をもって第 4 章・電磁気学のお話を終わります。お疲れ様でした

*GOOD LUCK!  
SEE YOU AGAIN!*

by *KENLOU*

---

<sup>1</sup> イギリスの物理学者 (1852-1914)