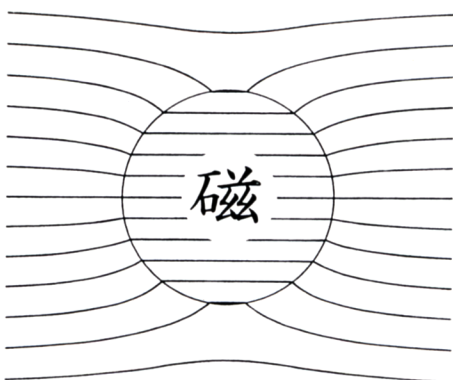
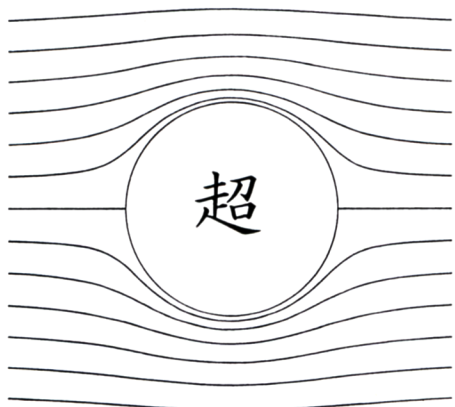
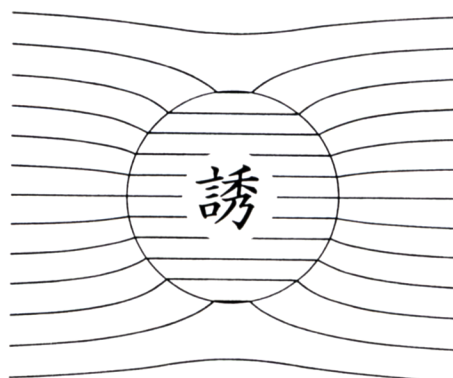
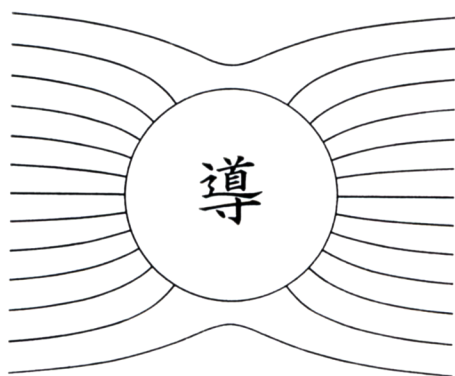


新電磁気学

— 電気・磁気学の新しい体系の確立 —

工学博士 松下 照男 著



コロナ社

新電磁気学

— 電気・磁気学の新しい体系の確立 —

工学博士 松下 照男 著

コロナ社

まえがき

電磁気学は現在の物理学の一角を形成する重要な科目である。そしてまた、この電磁気学ほど多くの教科書が出版されているものはない。これは、よく言われるように、電磁気学はいろいろな現象を数学的にきわめてコンパクトにまとめたものであるが、その抽象性により学生には学びにくいという点があるからである。そのために学生にとって理解しやすいようにさまざまなスタイルの教科書が多数出版されている。にもかかわらず、なぜまた新たな電磁気学の教科書が必要なのであろうか。

電磁気学は20世紀の初めにほぼ完成した、古典的学問である。しかしながら、その理論的体系はいまだになお進歩する余地がある。特に教科書についてはその体系をある程度の限られた範囲内できちんと記述する必要がある、そこに改善の余地が十分にあると考えられる。

例えば、静的現象において、電気現象と磁気現象は形式的に美しい対応関係を示し、その傾向は電磁気学の理解が進むにつれて深まってくる。しかしながら、その初等の段階ではそうした対称性は必ずしも完璧ではない。電気には導体と誘電体があるが、磁気には磁性体はあるものの、電気の導体に対応するものはない。本当であらうか。実際には超伝導体があり、導体が表面に現れる真電荷により外部から加えられた電界 E を内部で0とするのに対して、超伝導体では表面に流れる真電流により外部から加えられた磁束密度 B を内部で0とする。このような電気現象と磁気現象の美しい対応関係の構築が超伝導体の導入によって可能となるのである。

さらに、これまでは静磁気エネルギーを議論するために電磁誘導という動的現象の知識を必要とした。しかしながら、超伝導体の導入によりそうした動的現象の知識は必要ではなくなり、あくまで静的な現象の取扱いで静磁気エネルギーの議論が可能となるのである。そして当然の結果として、一般の磁気力のもとでの準静的な仮想変位と静磁気エネルギーの関係から電磁誘導が予言されることになる。

電磁気学では電子のスピンや軌道運動による磁性体の磁気モーメントは等価な磁化電流として記述されるが、これは仮想的なものであり、必ずしも十分な説得力をもつとは言えなかった。しかし、超伝導体では現実の電流によって磁気モーメントを生じており、超伝導体の導入はこれまでの仮想的な磁化電流のモデルを支持するうえでも有効であると言える。ただし、磁化の表し方が超伝導と磁性体とで異なるのはその起源が違うからであり、本書では

その相違を明確にしている。

なお、導体における静電遮へいと誘電体における電気分極との関係は超伝導体と磁性体の磁化の関係に対応するが、真電荷と束縛電荷という違いはあるものの同様な電氣的分極であり、定量的な違いは小さい(4章のコラム参照)。これに比べ、むしろ超伝導と磁性体とで同一の用語を用いている磁化のほうが物理的差異は大きく(9章のコラム参照)、ここに学問的混乱の原因があったと考えられる。その意味で、本書における両者の磁化の明確な区別はそうした混乱の収束に寄与するものと考えられる。

また、多くの教科書では磁気現象に関してベクトルポテンシャルは記述されているものの、現象の解析にあたっては実際にベクトルポテンシャルを用いて解くことをせず、電気現象のスカラーポテンシャルによる解が流用されている。確かに効率がよい教育方法のようにみえるが、それでは真の電気現象と磁気現象の対応の教育にはならない。本書では磁気現象においてはベクトルポテンシャルを多用し、電気現象の等電位面に対応した等ベクトルポテンシャル面を議論している。この段階においても電気現象と磁気現象は美しい対応関係を示しており、これによって真の対応関係を学生に理解させることができるものと思われる。

以上のように本書の特徴は静電気現象(第I部)と静磁気現象(第II部)の対応をきちんと目に見える形で整理したことにあり、それは1章と6章、2章と7章、というように具体的に対応させてみれば理解いただけるものと思う。そして9章において現在の E - B 対応のなかで静電磁気学の界を表す基本的物理量を整理し、その性質を比較し、電荷や電流などの源との関係から境界面で満たすべき条件などをまとめている。そして変動する電磁界については、非相対論の範囲で第III部において述べている。ここでは第I、II部におけるほど目新しい点はないが、ポインティングベクトルを用いてエネルギーの流れについて議論することを心がけている。また、従来から行われている、電磁誘導現象から静磁気エネルギーを導くことも示してある。

本書が目指すものは教え方に合わせたコンパクトな教科書や、ある独特の切り口からまとめた個性輝く教科書ではない。あくまで、初等ではあるが、総合的な教科書である。したがって、対象とする学生は理学系でも工学系でもかまわない。理学系の場合、本書を基礎として、より詳細な電磁気学を学ばばよいし、工学系で応用科目に進む場合、本書で応用科目の理解を可能とする役目は十分に果たせると考えられる。

本書を使って講義を行ううえで必要な数学的知識や煩雑な数学的証明などは付録に記してあるので、有効に利用していただきたい。また、一般にはあまり知られていない超伝導体のことについても付録に記してある。そして、それぞれの章では本文中に例題を配し、また、章末には演習問題を掲げてあるので、理解を完全なものにするために、巻末の詳細な解答とともに利用してもらいたい。さらに、各章の末尾にはコラムを設け、現実と想像の定量的違

いや、電磁気学の問題作成の限界などの講義をするうえでの舞台裏、電氣的遮へいと磁氣的遮へいの類似点と相違点、電磁誘導の磁束則と運動則の融合の試み、誘導起電力の測定の問題など、一般の教科書にはあまり出ていないことも読み物として記してあるので、これらも電磁気学の理解の一助となればと願うところである。

2004年3月

著者記す

《カバーデザインの解説》

球の導体および誘電体を一様な電界のなかに置いたときの電束線の様子(上)と、球の超伝導体および磁性体を一様な磁束密度のなかに置いたときの磁束線の様子(下)。これらはそれぞれ、2, 4, 7, 9章で学ぶ。より重要な電気力線ではなく電束線としたのは、線が連続となり、誘電体と磁性体が一つの相似性を有することを強調したためである。電気力線の場合は遮へいのため誘電体内での本数が少なくなる(4章のコラム参照)。また、そうした関係を別の視点からみると、一般に導体や誘電体では表面の真電荷や分極電荷が電気力線を吸い込むようにして遮へいするのに対して、超伝導体では表面電流が磁束線を外に押し出すように遮へいすることがわかる。また、物理的には磁性体だけが遮へいしない特別なものであるとみることができる。

目 次

第 I 部 静電気現象

1. 静電界

1.1 真空中の電荷	2
1.2 クーロンの法則	3
1.3 電 界	6
1.4 ガウスの法則	8
1.5 電 位	13
1.6 電気双極子	18
演習問題	23

2. 導 体

2.1 導体の電氣的性質	25
2.2 静電界の特殊解法	31
2.3 静電誘導	35
演習問題	39

3. 真空中の導体系

3.1 導体系の電位係数と容量係数	41
3.2 コンデンサ	45
3.3 静電エネルギー	49
3.4 静 電 力	53
演習問題	55

4. 誘電体

4.1 電気分極	57
4.2 電束密度	63
4.3 境界条件	66
4.4 誘電体の静電エネルギー	72
演習問題	73

5. 定常電流

5.1 電流	75
5.2 オームの法則	77
5.3 電気抵抗の微視的考察	79
5.4 定常電流の基礎方程式	82
5.5 起電力	87
5.6 キルヒホッフの法則	88
演習問題	91

第 II 部 静磁気現象

6. 電流と磁束密度

6.1 電流による磁束密度	94
6.2 ビオ・サバールの法則	95
6.3 電流に働く力	98
6.4 磁束線	102
6.5 アンペールの法則	103
6.6 ベクトルポテンシャル	107
6.7 微小閉電流	110
6.8 磁荷	112
演習問題	116

7. 超伝導体

7.1 超伝導体の磁氣的性質	118
7.2 静磁界の特殊解法	124
7.3 磁 化	128
演 習 問 題	133

8. 真空中の電流系

8.1 インダクタンス	134
8.2 コ イ ル	139
8.3 磁気エネルギー	144
8.4 磁 気 力	148
演 習 問 題	150

9. 磁 性 体

9.1 磁 化	152
9.2 磁 界	157
9.3 境 界 条 件	160
9.4 磁性体の磁気エネルギー	167
9.5 静電気現象と静磁気現象の対応	168
演 習 問 題	171

第 III 部 時間変化する電磁界**10. 電 磁 誘 導**

10.1 電磁誘導の法則	174
10.2 ポテンシャル	180
10.3 境 界 条 件	180
10.4 磁気エネルギー	181
10.5 表 皮 効 果	184

演習問題	190
------------	-----

11. 変位電流とマクスウェル方程式

11.1 変位電流	192
11.2 マクスウェル方程式	194
11.3 境界条件	197
11.4 電磁ポテンシャル	197
11.5 ポインティングベクトル	199
演習問題	202

12. 電 磁 波

12.1 平面電磁波	203
12.2 平面電磁波の反射と屈折	206
12.3 電磁波のエネルギー	211
12.4 導波管	211
12.5 球面波	215
12.6 遅延ポテンシャル	216
演習問題	218

付 録	219
-----------	-----

付1. ベクトル解析	219
付2. 証 明	234
付3. 超伝導	238

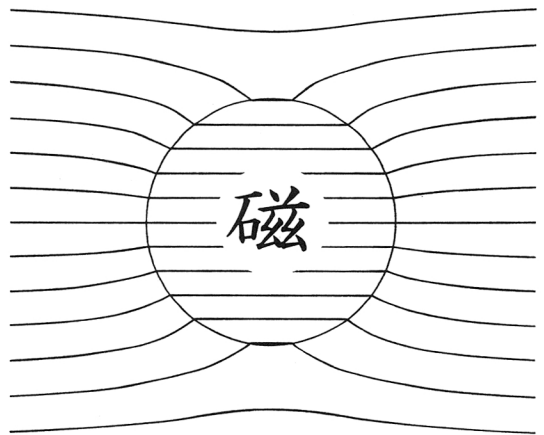
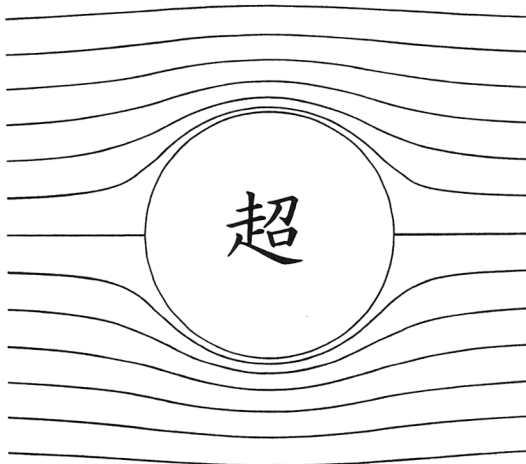
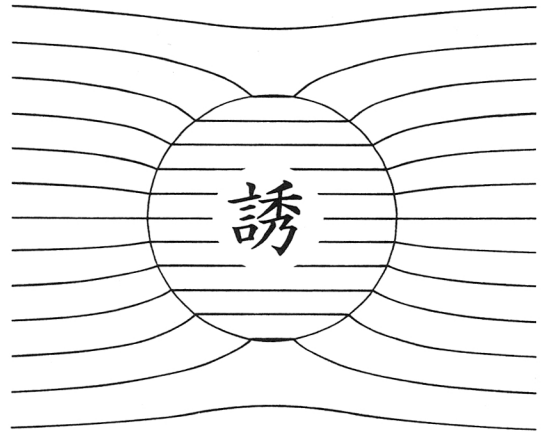
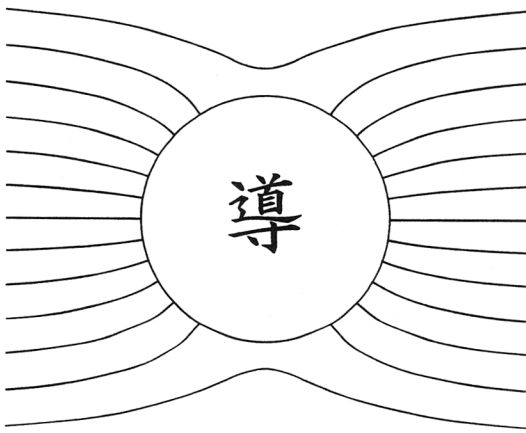
参 考 文 献	244
---------------	-----

演習問題解答	245
--------------	-----

索 引	273
-----------	-----

第 I 部

静電気現象



1 | 静電界

1.1 真空中の電荷

乾燥した日に靴でじゅうたんの上を歩き、ドアの取っ手に手を触れた瞬間に、パチッと音がして指先にショックを感じることもある。暗いところではドアの鍵穴にキーを差し込もうとした瞬間にキーと金具の間に青白い稲妻が走るのを見ることができる。これは雷と同じ現象である。こうした現象は物質のなかの電荷 (electric charge) によってもたらされる。日常でよく経験する摩擦電気もこうした電荷によるものである。

電荷とは上に述べたものを含むあらゆる電気現象の源となる実体である。力学における実体は物質であり、それを定量的に表すものが質量である。力学における物質の質量に対応するものが、電荷の場合は電気量であり、電気現象は電気量によって定量的に記述される。

ただし、電荷の場合は質量と違って、正の電荷と負の電荷がある。電荷の実体の基本は負の電気量をもつ電子と正の電気量をもつ陽子である。陽子の電気量を素電荷または電気素量 (elementary electric charge) といい、その大きさは

$$e = 1.602\,189\,2 \times 10^{-19} \text{ C}$$

である。ここで単位 [C] はクーロン (coulomb) という。電子の電気量は $-e$ である。この e が電荷の最小単位であり、すべての電荷はこの倍数である。一般に e は十分小さく、したがって多くの場合、電荷は連続的な量とみなすことができる。日常において水の量を連続的な量とみなすのと同様である。

原子レベルでは、陽子と電氣的に中性な中性子が原子核を構成して正の電気量をもち、この周囲に電子が存在する。物質中においてはこうした正負の電荷が無数に存在するが、現実のマクロなスケールからみれば、一つの原子の大きさが非常に小さいので、電子と原子核の電荷はそれぞれの原子の同じ中心位置にいて、正負の電荷が打ち消し合って、まったく中性であるように見える。また全体で電荷をもつイオンであっても、正のイオンと等量の負のイオンからなるイオン結晶においては、たがいの距離が十分小さいので、これも電氣的に中性であるように見える。こうした正負の電荷のバランスが崩れることがあり、打ち消されずに残った部分だけが「電荷」として存在しているとみなせ、電気現象を引き起こす原因となる。

こうした電気現象に関係する電荷には2種類あって、物質の外に取り出すことができる電荷を真電荷 (true electric charge), 物質の局部に束縛されて取り出すことができない電荷を分極電荷 (polarized charge) という。前者は2章で取り扱う導体の表面に現れる電荷であり、後者は4章で取り扱う誘電体の表面に現れる電荷である。この両者の和、すなわち電気現象に關与する電荷を自由電荷 (free electric charge) という。

一般には電荷はある密度をもって物質の内部や表面に分布するが、大きさが点とみなせるほど小さい電荷を点電荷 (point charge) という。これは力学における質点に対応する。また断面積が無視できるほど細い線の上に分布する電荷を線電荷 (line charge), 厚さが無視できるほど薄い面の上に分布する電荷を面電荷 (surface charge) という。

電荷に関する基本的な法則に電荷保存則 (principle of conservation of charge) がある。これは力学における質量の保存則に対応し、閉じた系における全電気量は不変であると記述される。この場合、正の電荷と負の電荷が一緒になって一部もしくは全部が電気的中性になっても、電荷の正負を考慮した電気量は保存される。

なお、電荷という用語は電気量を意味することもある。すなわち「電気量 Q の電荷」という意味で「電荷 Q 」と表現することがある。

1.2 クーロンの法則

電荷の間には電気力が働き、これをクーロン力 (Coulomb's force) という。これは質量をもつ物体間に働く万有引力に類似している。真空中にある二つの点電荷の間に働くクーロン力は以下のように整理される。

- 同種の電荷間には斥力が、異種の電荷間には引力が働く。
- 力の強さは二つの電荷の積に比例する。
- 力の強さは二つの電荷間の距離の2乗に逆比例する。
- 力の方向は二つの電荷を結ぶ直線方向にある。

第1の点は万有引力と異なる。これを式で表せば、二つの点電荷 q, q' が距離 r だけ離れている場合、たがいの電荷間に働くクーロン力の大きさは

$$F = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1.1)$$

で、 $F > 0$ の場合は斥力を、 $F < 0$ の場合は引力を表す。これをクーロンの法則 (Coulomb's law) という。ここで、後で示すように 4π は全立体角であり、比例定数 ϵ_0 を真空の誘電率 (permittivity of vacuum) という。SI 単位系では

$$\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c_0^2} = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2 \quad (1.2)$$

である。ここで、 $c_0 = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ は真空中の光速である。

クーロン力はベクトルであるので、ベクトル形式で記述することができ、それが一般的である。図 1.1 のように点電荷 q' から q に向かう位置ベクトルを \mathbf{r} 、その大きさを $r = |\mathbf{r}|$ とすると、 q' から q に向かう単位ベクトルは $\mathbf{i}_r = \mathbf{r}/r$ であり、 q が q' から受ける力は

$$\mathbf{F} = \frac{qq'\mathbf{i}_r}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{qq'\mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (1.3)$$

と書ける。なお、式 (1.3) より、点電荷 q' が q から受ける力は $-\mathbf{F}$ となり、作用・反作用の法則を満たす。

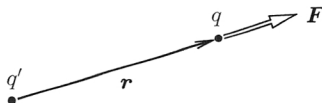


図 1.1 点電荷 q が点電荷 q' から受けるクーロン力

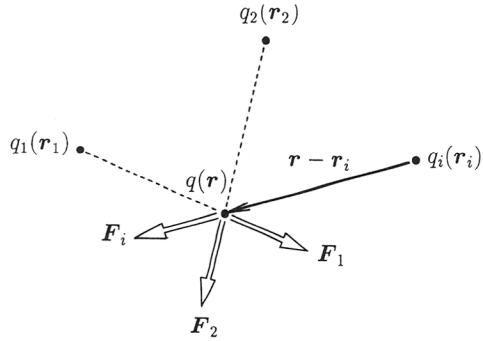


図 1.2 点電荷 q が n 個の点電荷から受けるクーロン力

いくつかの質点がある場合に働く万有引力についてはベクトルの合成ができ、重ね合せの理が成立する。クーロン力も同様である。まず、図 1.2 のように真空中に n 個の点電荷 q_1, q_2, \dots, q_n が分布し、別の点電荷 q に及ぼすクーロン力は個々の点電荷によるクーロン力の和で与えられる。すなわち点電荷 q_i の位置ベクトルを \mathbf{r}_i ($i = 1, 2, \dots, n$)、点電荷 q の位置ベクトルを \mathbf{r} とすれば、点電荷 q_i が q に及ぼすクーロン力は式 (1.3) より

$$\mathbf{F}_i = \frac{qq_i(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)}{4\pi\epsilon_0 |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^3} \quad (1.4)$$

となる。したがって n 個の点電荷から q が受ける力は

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^3} \quad (1.5)$$

で与えられる。さらに、この結果を電荷が連続的に分布する場合に拡張することができる。すなわち図 1.3 のように真空中の領域 V 内の空間に電荷が密度 ρ で連続的に分布する場合、位置 \mathbf{r}' の周囲の微小な体積 dV' 内の電荷 $dq' = \rho dV'$ を点電荷とみなせば、これが \mathbf{r} にある点電荷 q に及ぼすクーロン力は

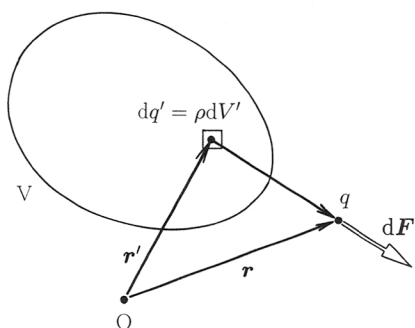


図 1.3 点電荷 q が微小体積内の電荷から受けるクーロン力

$$d\mathbf{F} = \frac{q(\rho dV')(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{4\pi\epsilon_0|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \quad (1.6)$$

となり、分布する全電荷からのクーロン力は

$$\mathbf{F} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho(\mathbf{r}')(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV' \quad (1.7)$$

となる。ただし、 $\int dV'$ は \mathbf{r}' に関する体積分を表す。

例題 1.1 図 1.4 のように半径 a の半円の線上に線密度 λ で電荷が一様に分布しているとき、半円の中心 O に置いた点電荷 Q に働くクーロン力を求めよ。

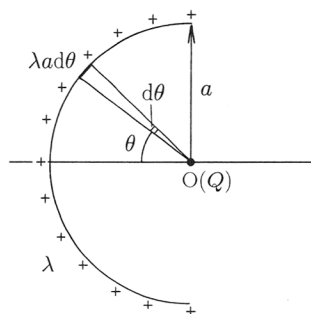


図 1.4 線密度 λ で半円上に一様に分布する電荷と中心 O にある点電荷 Q

[解] 図のように角度 θ を定義する。 $\theta \sim \theta + d\theta$ の微小部分にある電荷 $\lambda a d\theta$ を点電荷とみなせば、これと中心 O における電荷 Q との間のクーロン力は

$$dF = \frac{Q\lambda a d\theta}{4\pi\epsilon_0 a^2} = \frac{Q\lambda d\theta}{4\pi\epsilon_0 a}$$

となる。これと上下対称の $-\theta \sim -\theta - d\theta$ の微小部分からのクーロン力を考えたとき、両者の間で縦方向の力は打ち消し合い、残るのは横方向の力だけである。これは $dF' = dF \cos \theta$ となるので、全体のクーロン力は

$$F = \frac{Q\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \theta d\theta = \frac{Q\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} [\sin \theta]_{-\pi/2}^{\pi/2} = \frac{Q\lambda}{2\pi\epsilon_0 a}$$

となる。



1.3 電界

原点に点電荷 Q があるとき、位置 \mathbf{r} にある点電荷 q が受けるクーロン力は式 (1.3) より

$$\mathbf{F} = \frac{qQ\mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (1.8)$$

となる。この力は q に比例し、任意の q に対して成立するので、一般的に

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (1.9)$$

のように書ける性質のものであると考えられる。この作用 \mathbf{E} は点電荷 Q が存在するために空間にもたらされた電氣的なひずみによるものとみることができ、点電荷 q に働くクーロン力はその点電荷が空間の電氣的なひずみを感じて受けるものであるとみなせる。この作用 \mathbf{E} を電界 (または電場) (electric field) といい、量 \mathbf{E} を電界の強さ (または電場の強さ) (strength of electric field) という。例えば、原点にある点電荷 Q が位置 \mathbf{r} につくる電界の強さは

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{Q\mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (1.10)$$

である。電界の強さの単位は [N/C] であるが、後に示す電位の単位 [V] (ボルト: volt) を用いて [V/m] と表せる。なお、この章題となっている静電界 (electrostatic field) とは時間的に変化しない電界で、かつ電荷により生じる電界を表しており、10章で述べる電磁誘導により生じる電界は含まない。

一般に電界の強さはその位置に 1 C の単位点電荷を置いたときのクーロン力に等しく、したがって、電界の強さを求める問題はクーロン力を求める問題に帰着できる。

つぎに電荷が分布する場合の電界について示しておこう。図 1.2 のように位置 \mathbf{r}_i にある点電荷 q_i ($i = 1, 2, \dots, n$) が位置 \mathbf{r} につくる電界の強さは、式 (1.5) より

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^3} \quad (1.11)$$

となる。

また図 1.3 のように領域 V 内の空間に密度 $\rho(\mathbf{r}')$ で連続的に分布する電荷が位置 \mathbf{r} につくる電界の強さは、式 (1.7) より

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho(\mathbf{r}')(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV' \quad (1.12)$$

となる。ただし、 $\int dV'$ は \mathbf{r}' に関する体積分である。これらの電界の強さを与える式 (1.11)、(1.12) もクーロンの法則という。

索引

【あ】	
アース	30
アンペア	75
アンペールの法則	
積分形	104, 158
微分形	105, 158, 192
【い】	
イオン分極	58
インダクタンス係数	135
【う】	
ウェーバ	102
運動則	176
【え】	
エネルギーの連続の式	199
円柱座標	232
円偏波	206
【お】	
オーム	77
——の法則	77, 78
【か】	
回 転	225
ガウスの定理	229
ガウスの法則	
積分形	11, 63
微分形	11, 64
完全反磁性	118
【き】	
起電力	87
キャパシタ	45
キャパシタンス	46
球形コイル	140
球面波	215
境界条件	
磁 界	161, 197
磁束密度	119, 160
電 界	26, 67, 180
電束密度	66

強磁性体	153
鏡像電荷	32
鏡像電流	125
鏡像法	
磁性体	166
超伝導体	125
導 体	32
誘電体	70
鏡像力	33
強誘電体	58
極座標	233
キルヒホッフの法則	88
【く】	
屈折の法則	
磁性体	164
電磁波 (スネルの法則)	209
誘電体	69
グリーンの定理	232
クーロン	2
——の条件 (クーロンゲージ)	107
——の法則	3, 6
クーロン磁界	115
クーロン力	3
【け】	
ゲージ変換	198
結合の法則	220
【こ】	
コイル	
球形コイル	140
ソレノイドコイル	140
トロイダルコイル	151
ヘルムホルツコイル	142
交換の法則	220
光速度	203
勾 配	224
混合状態	241
コンダクタンス	78
コンデンサ	45

【さ】	
サイクロトロン運動	101
サイクロトロン角周波数	102
【し】	
磁 位	113
磁 化	
磁性体	152
超伝導体	130
磁 荷	112
磁 界	94, 157
——の強さ	157
磁化電流	152
磁化電流密度	156
磁荷密度	114
磁化率	152, 158
磁気エネルギー	144, 181
磁気エネルギー密度	
磁性体	167
真 空	145
磁気遮へい	133
磁気双極子	113
磁気双極子モーメント	113
磁気モーメント	100, 111
自己インダクタンス	134
自己誘導	181
磁性体	118, 152
磁 束	102
——の連続の式	188
磁束線	102
磁束則	175
磁束に対するガウスの法則	
積分形	103
微分形	103
磁束密度	94
磁 場	94, 157
——の強さ	157
自発磁化	153
自発分極	58
シーメンス	78
遮断角周波数	215
自由電荷	3
常磁性体	153

- ジョセフソンの式 188, 242
 磁力線 159
 真空の透磁率 94
 真空の誘電率 3
 真電荷 3
 真電流 75
 侵入深さ 239
- 【す】
- スカラー 219
 スカラー 3 重積 222
 スカラー積 221
 ストークスの定理 231
 スネルの法則 209
- 【せ】
- 静電エネルギー 49
 静電エネルギー密度
 真空 52
 誘電体 72
 静電界 6
 静電遮へい 30
 静電ポテンシャル 13
 静電誘導 26, 35, 72
 静電容量 41, 46
 静電力 53
 絶縁体 25, 57
 接地 30, 123
 線状磁気双極子 114
 線状磁気双極子モーメント 115
 線状電気双極子 21
 線状電気双極子モーメント 22
 線積分 226
 線電荷 3
 全微分 223
- 【そ】
- 相互インダクタンス 135
 相互誘導 182
 相対論 217
 素電荷 2
 ソレノイドコイル 140
- 【た】
- 楕円偏波 206
 多重極展開 21
 単極誘導 179
- 【ち】
- 遅延ポテンシャル 218
- 超伝導状態 118
 超伝導体 118
 直線偏波 206
- 【て】
- 抵抗 77
 抵抗率 77
 テスラ 96
 電圧降下 88
 電位 13
 電位係数 41
 電荷 2
 電界 6
 —の強さ 6, 180
 電荷保存則 3
 電気感受率 60
 電気双極子 18
 電気双極子モーメント 19
 電気素量 2
 電気抵抗 77
 電気伝導度 78
 電気分極 58, 60, 72
 電気力線 7
 電源 87
 電磁波
 球面波 215
 平面波 204
 電子分極 58
 電磁ポテンシャル 197
 電磁誘導の法則
 運動則 176
 磁束則 175
 統合則 188
 微分形 176
 ファラデーの法則 175
 電信方程式 195
 電束 63
 電束線 64
 電束密度 63
 点電荷 3
 電場 6
 電流 75
 —の連続の式 76
 電流密度 75
 電力 81
- 【と】
- 統合則 188
 透磁率 158
 導体 25
 等電位面 16
- 導電率 78
 導波管 211
 等ベクトルポテンシャル面 109
 トロイダルコイル 150
- 【な】
- 長岡係数 140
- 【に】
- 2階微分 226
- 【ね】
- 粘性係数 79
 粘性力 79
- 【の】
- ノイマンの公式 136
- 【は】
- 配向分極 58
 発散 224
 波動インピーダンス 204
 波動方程式 196
 反強磁性体 153
 反磁性体 153
 反射の法則 209
- 【ひ】
- ビオ・サバルの法則 95, 158
 微小閉電流 110
 比抵抗 77
 比電気感受率 60
 比透磁率 158
 比誘電率 63
 表皮効果 184
 表皮深さ 186
- 【ふ】
- ファラッド 41
 ファラデーの法則 175
 フェリ磁性体 153
 分極電荷 3, 58
 分極電荷密度 61
 分極電流密度 201
 分配の法則 220
- 【へ】
- 平行板コンデンサ 45
 平面波 204
 ベクトル演算 219

結合の法則	220
交換の法則	220
スカラー三重積	222
スカラー積	221
線積分	226
全微分	223
2階微分	226
分配の法則	220
ベクトル積	221
偏微分係数	223
面積分	227
ベクトル積	221
ベクトルポテンシャル	107
ヘルムホルツコイル	142
変位電流	192
偏波	206
偏微分係数	223
ヘンリー	134
【ほ】	
ポアソン方程式	
真空	17
ベクトルポテンシャル	108, 159
誘電体	64

ポインティングベクトル	199
ホール効果	258
ホール電界	258
ボルト	6

【ま】

マイスナー効果	118
マイスナー電流	240
マクスウェル方程式	194

【め】

面積分	227
面電荷	3

【ゆ】

誘電体	25, 57
誘電分極	58
誘電率	63
誘導起電力	149, 175, 188

【よ】

容量係数	43
横波	204

【ら】

ラプラシアン	16
ラプラス方程式	17

【ろ】

ローレンツの条件 (ローレンツゲージ)	198
ローレンツ力	
電荷に働く力	99
電流に働く力	98
ロンドン方程式	239

【わ】

ワット	81
-----	----

【E】

<i>E-B</i> 対応	99
<i>E-H</i> 対応	171

【T】

TEM波	213
TE波	213
TM波	213

— 著者略歴 —

- 1970年 九州大学工学部電子工学科卒業
1972年 九州大学大学院修士課程修了（電子工学専攻）
1973年 九州大学助手
1980年 工学博士（九州大学）
九州大学助教授
1990年 九州工業大学教授
2011年 九州工業大学名誉教授

新電磁気学—電気・磁気学の新しい体系の確立—

Electricity and Magnetism

—New Formulation by Introduction of Superconductivity—

© Teruo Matsushita 2004

2004年5月6日 初版第1刷発行

2015年2月25日 初版第4刷発行

検印省略

著者 松 下 照 男
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 壮光舎印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00764-0 (大井) (製本：グリーン)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします