

# まえがき

電気磁気学の教科書はすでに数多くあり、優れたものも多い。しかし、数学的な基礎、特に微分・積分、ベクトル解析などを十分に習得していない初学者にとって、これらの数学的記述が電気磁気学を理解する障害になっていると思われる。微分・積分、ベクトルは、物理現象を簡潔明瞭に記述する非常に優れた表現法ではあるが、これらの数学的記述に慣れない人々を困惑に陥れ、記述されている内容、電気磁気学の法則までも難解であるかのように「錯覚」させてしまうおそれがある。

本書は、電気磁気学の理論を、最初に初級の数学のみで記述することによって、理論の基本的なイメージを把握させ、つぎの段階（★印の節）で、そのイメージを拡張するように意図している。★印の部分を読み飛ばして前に進んでも一向に差し支えない。私の講義では、★印の部分飛ばして9章まで進み、もう一度前に戻って★印の部分で講義した後で10章を教えている。

本書は、初学者にも理解しやすく、さらに電子・電気工学を学ぶ基礎として十分なレベルにまで到達できるよう配慮したつもりである。なお、ベクトルポテンシャル、相対性理論および物性的な電磁気現象については割愛してある。これらについては、巻末の参考文献をご覧ください。

また、解説や法則の導出の多くを例題とすることにより、解説の終着点を読者にあらかじめ明らかにすることを心がけた。

工業高等専門学校を対象に電気磁気学を講義してきた経験を基に、高専および大学向けのテキスト・参考書として本書の執筆を開始したが、思いばかりが溢れ、最初の意図が本書にどれほど反映されているのか気懸かりである。読者

のご批判を仰ぎたい。本書が、電気磁気学の入門書として活用していただければこのうえない幸せである。

最後に、本書の執筆にあたり先輩各位の数多くの文献や資料を参考にさせていただいた。ここに厚くお礼申し上げる。また、出版に際してご尽力いただいたコロナ社をはじめ関係各位に深謝したい。

2000年8月

石井 良博

# 目 次

## 1章 電 荷 と 力

1.1 電 荷 .....	1
1.2 電荷に働く力 .....	2
演 習 問 題	

## 2章 電 界 と 電 位

2.1 電界と電荷に働く力 .....	5
2.2 複数の点電荷による電界 .....	6
2.3 電 気 力 線 .....	9
2.4 電気力線とガウスの定理 .....	11
2.5 電 界 と 電 位 .....	17
2.6 点電荷のまわりの電位 .....	19
2.7 帯電導体の電界と電位 .....	21
2.8 静電しゃへい .....	25
2.9 電 気 影 像 法 .....	26
2.10 一様でない電界と電位 (★) .....	29
2.11 3次元空間で変化する電界と電位 (★) .....	32
2.11.1 勾 配 .....	32

2.11.2	電位の傾きと電界 .....	34
2.11.3	電界の線積分と電位 .....	36
2.12	ガウスの定理と発散 (★) .....	37
2.13	ラプラスおよびポアソンの方程式 (★) .....	41
演 習 問 題		

### 3章 真空中の導体系と静電容量

3.1	静電容量 .....	49
3.2	コンデンサの接続 .....	52
3.2.1	並列接続 .....	52
3.2.2	直列接続 .....	52
3.3	コンデンサに蓄えられるエネルギー .....	53
3.4	静電容量の計算 (★) .....	55
3.5	電位係数 .....	57
3.6	容量係数と誘導係数 .....	58
演 習 問 題		

### 4章 誘電体

4.1	誘電体と誘電率 .....	62
4.2	電気双極子と分極 .....	63
4.3	分極と電束密度 .....	65
4.4	誘電体の境界面における電界および電束密度の条件 .....	69
4.5	静電エネルギー .....	72
4.6	仮想変位法による力の計算 (★) .....	73
演 習 問 題		

**5章 電 流**

5.1 電 流	81
5.2 抵抗とオームの法則	83
5.3 抵抗の接続	83
5.3.1 直列接続	83
5.3.2 並列接続	84
5.4 ジュール熱	85
5.5 起電力	86
5.6 キルヒホッフの法則	87
5.7 抵抗率と導電率	88
5.8 電流密度とキャリア	89
5.9 抵抗の温度係数	91
5.10 電流密度が一様でない場合の抵抗 (★)	92
5.11 電荷の連続式 (★)	93
演習問題	

**6章 磁性体と磁界**

6.1 磁極と磁界	97
6.2 磁気モーメント	101
6.3 磁性体と磁化	102
6.4 磁束密度と磁化, および透磁率と磁化率の関係	105
6.5 自己減磁と反磁界	106
6.6 強磁性体の磁化	108
6.7 磁気におけるガウスの定理と発散 (★)	110
演習問題	

**7章 電流と磁界**

7.1 右ねじの法則	112
7.2 アンペアの周回積分の法則	113
7.3 ビオ・サバルの法則	118
7.4 有限直線電流による磁界 (★)	121
7.5 磁気回路	123
7.6 磁束密度が一定でない場合の磁束の計算 (★)	127
演習問題	

**8章 電磁力と電磁誘導**

8.1 磁界中の電流に作用する力	131
8.2 磁界中の荷電粒子に作用する力	135
8.3 電磁誘導 (★)	137
8.4 渦電流 (★)	142
8.5 表皮効果 (★)	144
演習問題	

**9章 インダクタンスと静磁エネルギー (★)**

9.1 自己誘導と自己インダクタンス	150
9.2 相互誘導と相互インダクタンス	151
9.3 インダクタンスの接続	153
9.4 静磁エネルギー	155
9.5 静磁エネルギーと力	159
9.6 インダクタンスの計算	161

## 演 習 問 題

**10 章 電 磁 波 (★)**

10.1	変 位 電 流 .....	168
10.2	マクスウェルの方程式 .....	172
10.2.1	アンペアの周回積分の法則と第 1 電磁方程式 .....	173
10.2.2	ファラデーの電磁誘導の法則と第 2 電磁方程式 .....	177
10.3	波動方程式と電磁波 .....	179
10.3.1	マクスウェルの方程式と波動方程式 .....	179
10.3.2	平面電磁波 .....	180
10.4	ポインティングベクトル .....	182

## 演 習 問 題

**11 章 特殊な電磁現象**

11.1	接 触 電 気 .....	187
11.2	熱 起 電 力 .....	188
11.3	ペルチエ効果 .....	188
11.4	トムソン効果 .....	189
11.5	圧 電 電 気 .....	189
11.6	焦 電 電 気 .....	189

## 付 表

おもな物理定数 .....	190
よく使われる単位の接頭記号 .....	190
電気磁気に関するおもな単位 .....	191

参 考 文 献 .....	192
演 習 問 題 解 答 .....	193
索 引 .....	210





# 電荷と力

## 1.1 電荷

図1.1のように、プラスチックの板などで頭髪をこすると、プラスチックの板に髪が吸い寄せられる摩擦電気については、日常経験していることである。このとき、激しくこするほど、吸い寄せられる髪の毛が多くなる。この理由は、頭を激しくこすることによって、髪の毛とプラスチックの板に、それぞれ、たくさんのプラス(正)とマイナス(負)の電気がたまった(帯電した)からと考えられる。この、たまった電気の量を、電気工学の専門用語で電荷(electric charge)という。電荷には、つぎの基本的な性質がある。

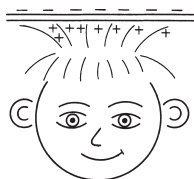
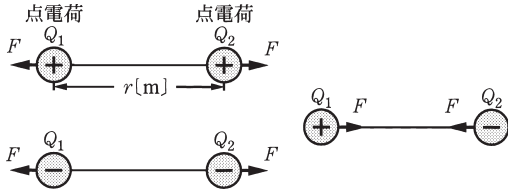


図1.1 摩擦電気

### 電荷の性質

- (1) 電荷には正(+)と負(-)の2種類がある。
- (2) 正と負の電荷の間には引力が働くが、同種類の電荷はたがいに反発する(図1.2参照)。

2 1. 電 荷 と 力



(a) 反発力  $Q_1, Q_2$  同符号 (b) 引力  $Q_1, Q_2$  異符号

図 1.2 点電荷の間に働く力(クーロン力)

- (3) 電荷は、エネルギーと同様に保存量であり、生成したり消滅することはないが、正負の電荷が合わさると、たがいに打ち消し合って消滅したように見える。
- (4) 電荷の量(大きさ)は、クーロン[C] (Coulomb) という単位を用いて表す。

**【例題 1.1】** 陽子 1 個の電荷は  $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$  である。1 C の電荷は、陽子の何個分に相当するか。

**解答** 1 C の電荷を陽子の電荷の大きさで割ることにより得られる。

$$N = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} = 6.25 \times 10^{18} \text{ 個} \quad (1.1)$$

1.2 電荷に働く力

図(a)のように、点と見なせるような微小な電荷(点電荷)  $Q_1, Q_2$  [C] が、真空中に  $r$  [m] の距離で置かれているとき、両電荷の間にはつぎのような力が働く。

クーロンの法則

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = 9 \times 10^9 \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad [\text{N}] \quad (1.2)$$

この関係式をクーロンの法則 (Coulomb's law) といい、この力をクーロン力 (Coulomb force) または静電力 (electric force) という。

ここで、 $\epsilon_0=8.85\times 10^{-12}$  F/m は真空の誘電率である。誘電率については4章で詳しく述べる。このように、クーロン力は電荷の積に比例し、距離の2乗に反比例する。そして、図(a)に示すように  $Q_1$  と  $Q_2$  が同じ符号であれば、 $F$  は正で反発力となり、反対の符号であれば  $F$  は負で引力となる (図(b))。

**【例題 1.2】** 水素原子では、図 1.3 に示すように陽子を中心とする半径  $5.29\times 10^{-11}$  m の円軌道を描いて、電子が回転している。陽子と電子の間の引力を計算せよ。ただし、陽子と電子の電荷は、それぞれ  $+1.6\times 10^{-19}$  C、 $-1.6\times 10^{-19}$  C である。

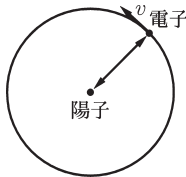


図 1.3 水素原子

**解答** 式(1.2)から、式(1.3)となることがわかる。

$$F=9\times 10^9\times \frac{(1.6\times 10^{-19})^2}{(5.29\times 10^{-11})^2}=8.23\times 10^{-8} \text{ [N]} \quad (1.3)$$

**【例題 1.3】** 辺の長さが  $a$  [m] の正三角形の頂点に同じ大きさの電荷  $Q$  [C] が置かれているとき、電荷に働く力を計算せよ。

**解答** 図 1.4 のように、1 個の電荷は、他の 2 個の電荷から方向の異なる力を受ける。これらの力を、大きさと方向の両者を考えて合成する。最初に、1 個の電荷から受ける力  $f$  は

$$f=\frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 a^2} \text{ [N]} \quad (1.4)$$

である。2 個の電荷から受ける力を合成した力は、三角形の相似の関係から





# 電界と電位

## 2.1 電界と電荷に働く力

前章では、電荷の間に直接力が働くと考えたが、この章では、電荷に働く力を電界 (electric field) という概念を導入して考え、さらに電界の性質について議論する。すなわち、図 2.1 に示すように、電荷  $Q$  のそばに置かれた電荷  $q$  が力を受けるのは、電荷  $q$  の場所に電界というものが作られていて、その電界から力を受けると考える。そして、その電界を作っているのは電荷  $Q$  である。このことをまとめると、つぎのようになる。

電荷  $Q$  → 電荷  $Q$  のまわりに電界が作られる → 電荷  $q$  は電界から力を受ける

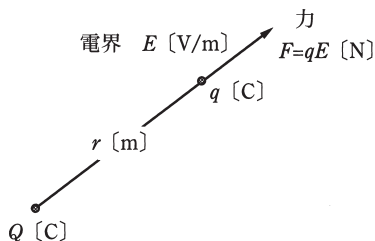


図 2.1 点電荷と電界

最初は、わざわざ面倒なことをしているように感じられるが、電界を考えることによって電荷に働くいろいろな力を容易に計算できることが次節以降に見

られる。そして、章を追うごとに電界が実在することをしだいに理解し、電界が「見える」ようになってくるであろう。

### ----- 電界の大きさや方向の定義 -----

真空中に置かれた電荷  $q$  [C] に  $F$  [N] の力が働くとき、電荷  $q$  の置かれた場所の電界の強さ（大きさ）  $E$  [V/m] は式(2.1)のように定義される。

$$F = qE \quad [\text{N}] \quad (2.1)$$

電界は力と同様にベクトル量である。電荷  $q$  が正であれば力と電界の方向は等しく、負であれば力と電界の方向は反対である。電界の単位は、式(2.1)からは [N/C] となるが、一般的には [V/m] を用いる<sup>†</sup>。

図 2.1 のような 2 個の点電荷  $Q, q$  [C] の間に働く力は、クーロンの法則により

$$F = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad [\text{N}] \quad (2.2)$$

であるので、式(2.1)と式(2.2)を比較することにより、点電荷  $Q$  のまわりの電界は

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad [\text{V/m}] \quad (2.3)$$

で、電荷の大きさ  $Q$  に比例し、点電荷からの距離  $r$  の 2 乗に反比例することがわかる。電荷  $Q$  が正のとき、電界の方向は点電荷から遠ざかる方向、 $Q$  が負のときの電界の方向は、点電荷に向かう方向である。

## ●●●●●●●●●●●●●●●●●●●● 2.2 複数の点電荷による電界 ●●●●

電気磁気学では多くの場合、**重ねの理** (principle of superposition) が成り立つ。すなわち、原因となるもの（電荷）が複数個ある場合には、それぞれの結果（電界）を重ね合わせることによって、全体の結果が得られる。電界の場

<sup>†</sup> 電界の単位が [V/m] になる理由については、2.5 節でわかる。

# 索引

<b>あ</b>	
圧電気効果	189
アポロニウスの円	28
アンペア	81
——の周回積分の法則	114
<b>い</b>	
位相速度	181
移動度	90
<b>う</b>	
ウェーバ	98
渦電流	142
渦電流損	143
<b>え</b>	
影像電荷	26
影像力	28
<b>お</b>	
オーム	83
——の法則	83
温度係数	91
<b>か</b>	
回 転	176
ガウスの線束定理	40
ガウスの定理	11
重ねの理	6
仮想変位法	74, 159
環状ソレノイド	115

<b>き</b>	
起磁力	124
起電力	86
逆起電力	86
キャパシタ	50
キャリヤ	89
強磁性体	104
<b>く</b>	
クーロン	2
——の法則	3
屈折率	180
<b>け</b>	
結合係数	153
減磁率	107
<b>こ</b>	
勾 配	34
固有インピーダンス	182
コンダクタンス	83
コンデンサ	50
<b>さ</b>	
サイクロトロン角周波数	137
鎖 交	116
差動結合	155
残留磁束密度	108
<b>し</b>	
ジーメンス	83
磁 化	102, 103

磁 荷	97
磁 界	98
磁化曲線	108
磁化率	104
磁気回路	123
磁気双極子	101
磁気抵抗	123
磁気モーメント	101, 133
磁 極	97
自己インダクタンス	150
自己減磁	107
自己減磁力	107
自己誘導	150
磁性体	102
磁 束	105
磁束鎖交数	139
磁束密度	105
周回積分	36
充 電	50
自由電荷	21
ジュール熱	85
ジュールの法則	85
常磁性体	104
焦電気	189
磁力線	99
磁 路	123
真空の誘電率	3, 63
真電荷	66
<b>す</b>	
ステラジアン	172
ストークスの定理	177

<b>せ</b>	
静磁エネルギー	157
静電エネルギー	73
静電しゃへい	25
静電誘導	22
静電容量	49
ゼーベック効果	188
接触電位差	187
線積分	36
<b>そ</b>	
相互インダクタンス	152
相互誘導	151
相反性	152
<b>た</b>	
帯電	1
<b>て</b>	
抵抗率	88
テスラ	105
電圧	18
電圧降下	86
電位係数	57
電位差	18
電荷	1
電界	5
電荷密度	13
電気影像法	26
電気双極子	34, 63
電気双極子モーメント	36, 63
電気抵抗	83
電気伝導度	88
電気力線	9
電子走行時間	31
電磁波	179
電子ボルト	46
電磁誘導	137
電磁力	136

電束	67
電束密度	67
伝導電流	169
電流	81
電流密度	89
電力	86
電力量	86
<b>と</b>	
透磁率	98, 105
導体	21
導電率	88
特性インピーダンス	182
トムソン効果	189
<b>な</b>	
長岡係数	161
ナブラ	34
<b>ね</b>	
熱起電力	188
熱電対	188
<b>は</b>	
発散	39
波動方程式	179
反磁界	107
反磁界係数	107
反磁性体	104
<b>ひ</b>	
ビオ・サバルの法則	119, 146
比磁化率	104
非磁性体	104
ヒステリシス	108
ヒステリシス損	142, 159
比透磁率	106
微分透磁率	108
比誘電率	62
表皮効果	145

<b>ふ</b>	
ファラデーの電磁誘導の法則	139
ファラド	49
フレミングの左手の法則	131
分極	64
分極電荷	64, 66
<b>へ</b>	
ペルチエ効果	188
ヘルムホルツ・コイル	129
変位電流	169
ヘンリー	150
<b>ほ</b>	
ポインティングベクトル	183
放電	50
飽和	108
ホール効果	146
保磁力	108
ボルト	18
<b>ま</b>	
マイナーループ	109
<b>む</b>	
無限長ソレノイド	117
<b>め</b>	
メジャーループ	109
面積ベクトル	176
<b>ゆ</b>	
誘電体	62
誘電率	63
誘導係数	58



<b>よ</b>		<b>り</b>		<b>ろ</b>	
容量係数	58	立体角	172	ローレンツカ	136
<b>ら</b>		リラクタンス	123	<b>わ</b>	
ラブラシアン	42	<b>れ</b>		和動結合	155
		レンツの法則	140		
◆ ◆					
<b>B</b>		<b>C</b>		<b>D</b>	
<i>B-H</i> 曲線	108	curl	176	div	39
				<b>R</b>	
				rot	176

— 著者略歴 —

1972年 北海道大学工学部電子工学科卒業  
1974年 北海道大学大学院修士課程修了（電子工学専攻）  
1981年 函館工業高等専門学校助教授  
1990年 工学博士（北海道大学）  
1992年 函館工業高等専門学校教授  
現在に至る

電気磁気学

Electricity and Magnetism

© Yoshihiro Ishii 2000

2000年9月28日 初版第1刷発行

2010年4月10日 初版第11刷発行

検印省略

著者 いし い よし ひろ  
石 井 良 博  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 三美印刷株式会社

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 978-4-339-00725-1 (牛来真) (製本：愛千製本所)

Printed in Japan



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替えいたします