

# 技術者のための 電磁気学入門

博士（工学） 安永 守利 著

コロナ社

# まえがき

筆者は、筑波大学情報学群情報科学類2年次生の講義の一つである「電磁気学」を担当している。本講義は必修科目であるが、本学類の専門が情報科学であるため、講義単位数は2単位と少ない。また、受講学生もプログラミングや数学といった抽象度の高い科目が得意な反面、物理的な考え方が苦手な学生が少なくない。このため、これまでの電磁気学の教科書を使っても、せっかくの良書でありながら、それを全部消化しきれずに終わってしまう。

このため本講義では、さまざまな試行錯誤を繰り返し、講義内容、スライド、配布資料などをブラッシュアップしてきた。本書は、この本講義内容を一冊にまとめたものである。本書の特徴はつぎの4点である。

- ① 情報学科や機械学科、生物学科など、非物理系、非電気電子系の学生をターゲットとし、従来の電磁気学の教科書で解説されている一部の内容を思い切って割愛した（割愛箇所は後述する）。
- ② ①で割愛した分、基本法則の成り立ちなど、電磁気学の面白さ、不思議さを丁寧に説明した。
- ③ メモリ集積回路やスマートフォン、加速度センサ、MRI（核磁気共鳴医療装置）など、最先端の機器とその電磁気学の関係（応用技術）について、独立な章を設け、詳しく説明した。
- ④ 携帯通信端末や無線LANなどの普及により、電磁波がこれまで以上に身近になっていることから、電磁波と情報伝達の関係についても言及した。

本書では、前述の理由から、従来の多くの電磁気学の教科書が解説している以下の内容については割愛した。

- [1] 誘電体の議論から導かれる電束密度  $\vec{D}$  と電束密度を用いたガウスの法則

[2] 磁性体内の磁場  $\vec{H}$  と磁束密度 (磁場)  $\vec{B}$  の関係

この2点は、誘電体と磁性体という物質 (材料) の電磁現象と密接に関係している。読者には、[1]と[2]については、他の電磁気学教科書によって理解を深めてもらいたい。なお、本書では[1]と[2]に触れていないため、電磁気学の教科書では必ず説明されるマクスウェル方程式も、誘電体や磁性体内を含まず、真空中のみを対象としたマクスウェル方程式にとどめている。

電磁気学は基本法則が多いため、非物理系、非電気電子系の学生には理解しづらい面が多々ある。本書は、上記のような新たな切り口で執筆された教科書であり、非物理系、非電気電子系の学生はもちろん、多くの学生や初学者に電磁気学の面白さを知ってもらえる入口となれば幸いである。

なお、章末の演習問題の詳細な解答例は、Web ページ<sup>†</sup>からダウンロードすることができるが、是非、解答を見る前にじっくり考察することを勧める。

最後に、本書の企画から校正まで、コロナ社の方々に大変なご尽力をいただいた。ここに感謝の意を表する次第である。

2017年7月

著者

† 解答例のダウンロードについて

<http://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339009040/>

(本書の書籍ページ。コロナ社のトップページから書名検索でもアクセスできる。)

# 目 次

## 1. 電 荷 と 電 場

1.1 電 荷	1
1.1.1 電荷とクーロン力	1
1.1.2 帯電と電荷量の保存	2
1.1.3 電荷量の単位	3
1.1.4 クーロンの法則と重ね合わせの法則	4
1.1.5 帯電のしくみ	6
1.2 電 場	7
1.2.1 電場の導入と重ね合わせの法則	7
1.2.2 電場の湧き出し	10
1.2.3 電 気 力 線	15
演 習 問 題	17

## 2. ガウスの法則

2.1 ガウスの法則とその導出	19
2.1.1 流れと閉曲面	19
2.1.2 ガウスの法則の導出	22
2.1.3 クーロンの法則とガウスの法則	23
2.2 ガウスの法則を用いた電場の計算	25
2.2.1 帯電した無限直線による電場	25
2.2.2 帯電した無限平面による電場	27
2.2.3 導体内の電場と導体の帯電	31
2.2.4 帯電した導体表面の電場	32
2.2.5 帯電した2枚の平行導体平板間の電場	33
演 習 問 題	36

### 3. 電 位

3.1 電位と位置エネルギー	38
3.1.1 電位の定義と単位	39
3.1.2 一様な電場による電位	40
3.1.3 電位とエネルギー（位置エネルギー）	41
3.1.4 電位からの電場の導出	44
3.2 電位の計算	45
3.2.1 一つの点電荷による電位	45
3.2.2 複数の点電荷と連続的な電荷分布による電位	46
3.3 電位の計算例	47
3.3.1 電気双極子	47
3.3.2 線電荷による電位	48
3.3.3 面電荷による電位	49
3.4 等電位面と導体の電位	52
3.4.1 等電位面	52
3.4.2 導体の電位	53
演習問題	55
4. 静電容量とコンデンサ	
4.1 静電容量	58
4.2 コンデンサ	60
4.3 コンデンサの静電容量の計算	62
4.3.1 平行平板コンデンサの静電容量	62
4.3.2 球殻コンデンサの静電容量	64
4.3.3 平行導線コンデンサの静電容量	65
4.4 複数コンデンサの接続	68
4.4.1 コンデンサの並列接続	68
4.4.2 コンデンサの直列接続	69
4.5 コンデンサに蓄えられるエネルギー	70
4.6 誘電体とコンデンサ	72

4.6.1 誘電体と誘電分極	72
4.6.2 誘電体を用いたコンデンサ	74
演習問題	77

## 5. 電流と抵抗

5.1 電 流	79
5.1.1 正味の電荷の移動	79
5.1.2 電 流 密 度	81
5.1.3 電流と電流密度	82
5.2 抵 抗	84
5.2.1 抵抗と抵抗率	84
5.2.2 抵 抗 器	86
5.2.3 抵抗とオームの法則	87
5.2.4 複数の抵抗器の接続	87
5.2.5 回路の電力	89
演習問題	90

## 6. 応用技術その1

6.1 コピー機（複写機）とレーザープリンタ	92
6.2 静電塗装	94
6.3 静電モータ	95
6.4 避雷針	96
6.5 タッチパネル	98
6.6 メモリ集積回路（DRAM）	100
6.7 加速度センサ	102
6.8 AED（自動体外式除細動器）	104
6.9 ピエゾ素子とスマートフォン	106

## 7. 磁荷と磁場

7.1 磁石のモデル	108
------------	-----

7.1.1	磁荷と電荷の一致点と相違点	108
7.1.2	磁気双極子モデル	110
7.1.3	電流ループモデル	111
7.1.4	磁気双極子モデルと電流ループモデルの等価性	111
7.1.5	磁性体 (磁石)	113
7.2	ローレンツ力と電流に働く力	114
7.2.1	ローレンツ力と磁束密度	114
7.2.2	電流が流れる導線に働く力	115
7.3	ローレンツ力と磁場についてのさらなる知識	116
7.3.1	ローレンツ力に関する疑問	116
7.3.2	磁場の本質	117
	演習問題	118

## 8. 電流と磁場

8.1	ビオ・サバルの法則	120
8.2	ビオ・サバルの法則を用いた磁場の計算	121
8.2.1	直線電流がつくる磁場	121
8.2.2	円弧電流がつくる磁場	124
8.3	アンペール (アンペア) の法則—周回積分の法則—	126
8.4	アンペールの法則を用いた磁場の計算	128
8.4.1	直線電流がつくる磁場	128
8.4.2	ソレノイドコイルに流れる電流がつくる磁場	133
8.5	磁場におけるガウスの法則	135
	演習問題	136

## 9. 誘導とインダクタンス

9.1	ファラデーの法則とレンツの法則	139
9.1.1	磁束	139
9.1.2	ファラデーの法則とレンツの法則	141
9.1.3	誘導と座標系	144

9.2 誘導電場	146
9.2.1 誘導起電力の本質	146
9.2.2 クーロン電場と誘導電場	147
9.2.3 渦電流	148
9.2.4 表皮効果	149
9.3 インダクタンス	150
9.3.1 自己誘導と自己インダクタンス	150
9.3.2 相互誘導と相互インダクタンス	151
演習問題	153
<b>10. マクスウェル方程式と電磁波</b>	
10.1 変位電流とアンペールの法則の拡張	157
10.1.1 変位電流	157
10.1.2 アンペールの法則の拡張—アンペール・マクスウェルの法則—	160
10.2 マクスウェル方程式	160
10.2.1 積分形式によるマクスウェル方程式	160
10.2.2 微分形式による真空中のマクスウェル方程式	161
10.2.3 発散と回転, およびベクトル演算子を用いた表記	163
10.3 電磁波	164
10.3.1 電場と磁場の波動方程式	164
10.3.2 一般的な1次元波動方程式の解	165
10.3.3 電場と磁場の1次元波動方程式の解	166
10.3.4 電磁波の導出	167
10.4 電磁波の利用	169
10.4.1 電波の送信と受信	170
10.4.2 変調と復調	171
演習問題	173
<b>11. 応用技術その2</b>	
11.1 磁気ディスク装置	175
11.2 モーター	178



viii 目 次

11.3 発 電 機 .....	183
11.4 マイクロフォンとスピーカ .....	184
11.5 電磁加熱調理器 .....	185
11.6 MRI（核磁気共鳴画像）診断装置と CT 診断装置 .....	187
<b>演習問題略解</b> .....	190
<b>索 引</b> .....	192

目次

# 電荷と電場

乾燥した日には紙束の紙どうしがくっついてしまい、なかなか紙の枚数が数えられなかったり、衣服が体にまとわりついたりすることがある。これらの現象は、物質の原子レベルで生ずるクーロン力という力によるものである。電磁気学は、まず、このクーロン力を定式化し、説明することから出発する。

## 1.1 電荷

### 1.1.1 電荷とクーロン力

物質は図 1.1 に示すように、原子 (atom) で構成されており、さらに原子は、電子 (electron) と原子核 (atomic nucleus) から構成されている。そしてさらに、原子核は陽子 (proton) と中性子 (neutron) で構成されている。

電子と陽子の間は離れているが、両者の間には引力 (引き合う力) が働く。一方、電子どうし、または、陽子どうしの間には斥力 (反発する力) が働く。

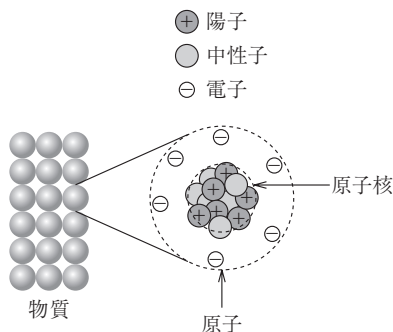


図 1.1 物質の成り立ち

## 2 1. 電荷と電場

この原子レベルでの力は、クーロン力 (Coulomb's force) と呼ばれる。クーロン力が物質全体で現れると、離れている物質どうしても力が働く。紙と紙がくっついたり、衣服がまとわりついたりする現象もこの力の現れである。

「電磁気学」は、クーロン力を定量的に解析することから出発する。そこで、はじめに、陽子と電子を「電荷量」という物理量を持つ粒子としてモデル化する。電荷量は、クーロン力の基となる物理量であり、それぞれの粒子は、正電荷 (positive charge) と負電荷 (negative charge) と呼ばれる。あるいは、正の荷電粒子 (positive charged particle) と負の荷電粒子 (negative charged particle) と呼ばれる。

### 1.1.2 帯電と電荷量の保存

原子の中の陽子と電子の数は等しい。したがって、ある物体の総電荷量は基本的に0となる。しかし、電荷の移動が起こり、物体の総電荷量が0でなくなることがある。この電荷のバランスの崩れた状態を帯電と呼ぶ。図 1.2 は、正電荷と負電荷 (モデル化した陽子と電子) による帯電の状態を示している。図 (a) は電荷量が等しいため、帯電していない状態である。一方、図 (b) は正電荷のほうが多く、図 (c) は負電荷のほうが多く、それぞれ、物体は、正に帯電している状態と負に帯電している状態である。

また、一つの物体でその総電荷量が0であっても、局所的に電荷が集中して

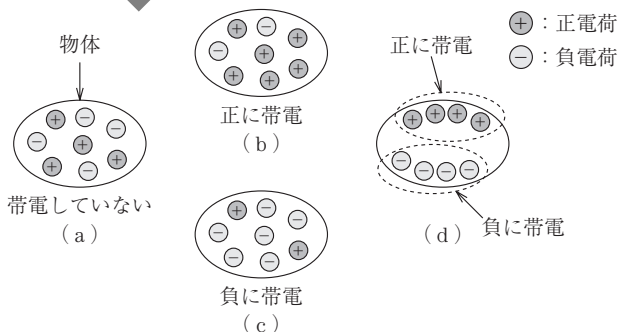


図 1.2 帯電

いることがある (図 1.2 (d))。これは、局所的な帯電である。図 (d) の場合、上部は局所的に正に帯電していて、下部は局所的に負に帯電している。

物理現象や化学反応の前後で、その電荷量の総和に変化はない。例えば、図 1.3 に示すように負に帯電していた物体 A が化学反応の後に B と C になった場合、物体 B と物体 C の電荷量の総和は、反応前の物体 A の電荷量と等しくなる。

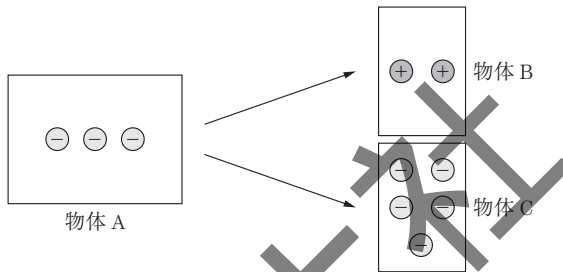


図 1.3 電荷量の保存

このように現象や反応の前後で変化しない物理量は保存量と呼ばれる。保存量にはエネルギーや運動量などがあり、物理現象の解析において重要な物理量である<sup>†1</sup>。

### 1.1.3 電荷量の単位

電荷量の単位はクーロン [C] である。陽子 1 個、または、電子 1 個が持つ電荷量が最小であるから、陽子 1 個と電子 1 個の電荷量をそれぞれ、 $1\text{C}$  と  $-1\text{C}$  することが自然と考えられよう。しかし、実際は、後述する「電流 (電荷の流れる量)<sup>†2</sup>」の概念から逆に求められた電荷量から  $1\text{C}$  の大きさが定義され、これより

$$\text{陽子} : +1.6 \times 10^{-19} \text{C}, \quad \text{電子} : -1.6 \times 10^{-19} \text{C}$$

†1 重要な物理量の一つである質量は、化学反応においては保存されるが、保存量ではない。

†2 電流については、5章で詳しく説明する。

## 4 1. 電荷と電場

と計測される。電流は、原子が  $10^{20}$  個以上も集まった、私たちの日常生活レベルで用いられる物理量である。このため、電流から逆に求められた陽子1個と電子1個の電荷量の値は、このように非常に小さな値となる。

また、陽子と電子の電荷量が最小であることから、物質の総電荷量は、陽子と電子の電荷量の整数倍となる。しかし、私たちの生活レベルから見た陽子と電子の数は上述のように膨大で、しかも電荷量の大きさ（絶対値）は非常に小さい。このため、電磁気学では、いくらでも小さな電荷を想定することとして、電荷量は連続量として取り扱う。

### 1.1.4 クーロンの法則と重ね合わせの法則

図 1.4 に示すように電荷量  $q_1$  [C] と  $q_2$  [C] を持つ電荷（電荷  $q_1$ 、電荷  $q_2$  と表記する<sup>†</sup>）が存在すると、それぞれの電荷には大きさが同じで向きが逆のクーロン力  $\vec{F}$  と  $-\vec{F}$  が働く。クーロン力においても、作用・反作用の法則が成り立っている。なお、電荷  $q_1$ 、電荷  $q_2$  は、図に示すように空間内の1点にある電荷（非常に小さく、大きさは無視できる）であり、この電荷は点電荷と呼ばれる。

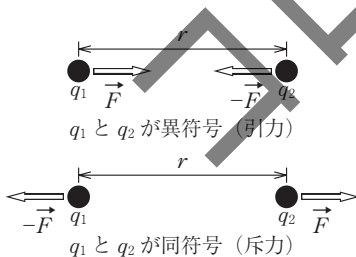


図 1.4 電荷の間に働く力（クーロン力）

この電荷の間に働くクーロン力の向きと大きさを表す法則がクーロンの法則（Coulomb's law）である。クーロン力  $\vec{F}$  と  $-\vec{F}$  の方向は両電荷を結ぶ直線の

<sup>†</sup> 電磁気学を含む物理学では、対象を表す記号がその対象の物理量を同時に表すことが多い。例えば、「電荷  $q$ 」と標記した場合、 $q$  は、その電荷を示す記号であると同時に、その電荷の量（電荷量）が  $q$  [C] であることも示す。本書でも、この慣例にならった表記を行う箇所が多くあるので注意されたい。

方向であり、両電荷の符号が異符号の場合は引力となり、同符号の場合は斥力となる。

クーロン力  $\vec{F}$  の大きさは、電荷間の距離を  $r$ 、比例乗数を  $k$  とすると

$$|\vec{F}| = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (1.1)$$

で表される。ここで、比例定数  $k$  の値は  $k = 8.99 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$  である。

複数の電荷が存在した場合、各電荷に働くクーロン力には、重ね合わせの法則が成り立つ。すなわち、図 1.5 に示すように複数の電荷  $q_1, q_2, \dots, q_n$  が存在したとき、電荷  $q_i$  に対して電荷  $q_j$  から働くクーロン力  $\vec{F}_{ij}$  と表すと、電荷  $q_1$  に働く力  $\vec{F}$  は、 $q_1$  の周りの各電荷との間のクーロン力の総和（ベクトルの重ね合わせ）

$$\vec{F} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \dots + \vec{F}_{1n} \quad (1.2)$$

となる。

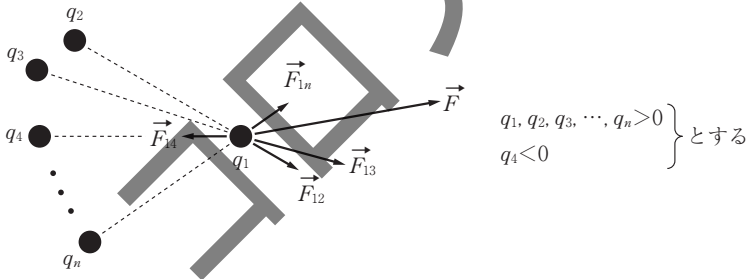


図 1.5 複数の電荷によるクーロン力

### 【例題 1.1】

二つの電荷  $q_1$  と  $q_2$  が距離  $r$  離れて置かれている。電荷量が  $q_1 = 1 \text{ C}$ 、 $q_2 = -1 \text{ C}$  で、距離が  $r = 1 \text{ m}$  のとき、両電荷に働くクーロン力の大きさ  $|\vec{F}|$  を求めよ。

# 索引

<b>【あ】</b>		ガウス面	23, 136	コピー機	92
		核磁気共鳴	188	コンデンサ	
圧電素子	75, 106	核磁気共鳴画像法	187		60, 98, 101, 103, 104
アンテナ	170	重ね合わせの法則	5, 9	コンデンサ型マイクロ	
アンペア	82	可視光	170	フォン	185
——の周回積分の法則	127	加速度センサ	102	<b>【さ】</b>	
——の法則	127	<b>【き】</b>		鎖交	126
アンペールの周回積分		キャパシタ	60	作用・反作用の法則	
の法則	127	キャパシタンス	59		4, 117, 124
アンペールの法則	127, 157	強磁性体	114	<b>【し】</b>	
アンペール・マクスウェル		共振	171	磁荷	108
の法則	160	共鳴	188	磁荷量	109
<b>【い】</b>		強誘電体	106	磁気回路	177
位置エネルギー	38	金属	31, 79	磁気双極子	110
インダクタ	150	<b>【く】</b>		磁気ディスク装置	175
インダクタンス	151	グラディエント	45	磁気ヘッド	177
<b>【う】</b>		クーロン	3	磁気モーメント	111
ウェーバ	109, 141	——の法則	4, 23, 121	次元解析	43
渦電流	148, 185	クーロン電場	9, 147	自己インダクタンス	151
運動エネルギー	42, 70	クーロン力	2, 4, 94, 95	仕事関数	6
<b>【え】</b>		<b>【け】</b>		自己誘導	141, 151
エッジ効果	34	傾斜磁場	188	自己誘導起電力	151
エーテル	12	原子	1	磁石	113
<b>【お】</b>		原子核	1	磁性体	113
オーム	84	<b>【こ】</b>		磁性体薄膜	175
——の法則	87	コイル	150	磁束	140
<b>【か】</b>		合成静電容量	68	磁束密度	115
回転	163	合成抵抗	87	時定数	106
回路	89	光速	169	磁場	109, 136
ガウスの法則	22, 135, 160	後退波	166	周回積分	43, 146
		勾配ベクトル	44	周回線積分	126
				充電	61, 101
				ジュール熱	90, 185

常磁性体 114  
 磁力線 136  
 進行波 166  
 真電荷 73  
 振幅変調 172

【す】

ステータ 179  
 ストロボ発光 105  
 スピーカ 106, 184  
 スマートフォン 98, 100, 106

【せ】

静磁場 115, 167, 187  
 正電荷 2  
 静電遮へい 55  
 静電塗装 94  
 静電場 12, 167  
 静電モータ 95  
 静電誘導 32  
 静電容量 59  
 静電容量 100  
 正の荷電粒子 2  
 整流子 181  
 絶縁体 73  
 接地 55, 100  
 線積分 39  
 線電荷 13, 25, 47, 48

【そ】

双極子モーメント 13, 112  
 相互インダクタンス 151  
 相互誘導 152  
 相互誘導起電力 152  
 ソフトウェアラジオ 173  
 ソレノイド 133, 150  
 ソレノイドコイル 133

【た】

ダイオード 87  
 帯電 2, 6, 92  
 ダイポールアンテナ 170  
 タッチパネル 98

グランペールの解 165  
 単極磁荷 109  
 単極誘導 155

【ち】

蓄電 61  
 チップコンデンサ 61  
 中性子 1

【て】

抵抗 70, 84  
 抵抗器 70, 86  
 抵抗率 84  
 テスラ 115  
 電圧 60  
 電位 38  
 電位差 39  
 電荷 2  
 電界 8  
 電荷量 2, 3  
 電気双極子 12, 47  
 電気抵抗 31, 84  
 電気力線 15  
 電子 1  
 電磁加熱調理器 185  
 電磁的横波 168  
 電磁波 161  
 電磁誘導の法則 140  
 電池 60  
 点電荷 4, 46  
 伝導電流 159  
 伝導率 84  
 電場 8, 12, 44  
 電波 170  
 電場束 23, 159  
 伝搬速度 164  
 電流 3, 81  
 電流素片 121  
 電流密度 82  
 電流ループ 111  
 電力 90

【と】

透磁率 109, 168  
 導体 31, 54, 58, 79  
 同調回路 171  
 等電位面 52  
 トランジスタ 102  
 トランスフォーマ 152  
 ドリフト運動 81  
 トルク 112

【な】

ナブラ 163

【ね】

熱エネルギー 70

【は】

場 12  
 パソコン 98, 100  
 発散 163  
 発信回路 170  
 発電機 183  
 波動法的式 164  
 ハードディスク装置 175  
 波面 166  
 反磁性体 114  
 搬送波信号 172

【ひ】

ピエゾ素子 75, 106  
 ビオ・サバールの法則 120  
 微小電荷要素 14, 47  
 比誘電率 75  
 表皮効果 149  
 避雷針 97

【ふ】

ファラデーの電磁誘導の法則 140  
 ファラデーの法則 140  
 ファラド 59  
 輻射 169



複写機	92	<b>【め】</b>	amplitude shift keying	173		
復調	171	メモリ集積回路	101	ASK	173	
復調回路	172	面積分	22	atom	1	
フーコー電流	148	面積ベクトル	20	atomic nucleus	1	
負電荷	2	面電荷	27, 47, 49	<b>【B】</b>		
負の荷電粒子	2	<b>【も】</b>	Biot-Savart law	120		
ブラシ	181	モータ	178	<b>【C】</b>		
ブラシレスモータ	182	<b>【ゆ】</b>	capacitance	59		
フレミングの左手の法則	116	誘電体	73	capacitor	60	
分極	73	誘電分極	73	coil	150	
分極処理	106	誘電率	10, 168	computed tomography	189	
分極電荷	73	誘導起電力	140	condenser	60	
<b>【へ】</b>		誘導磁場	161	conduction current	159	
平面波	166	誘導電荷	32	conductivity	84	
ベクトル演算子	163	誘導電場	146	conductor	31	
ベクトル場	163	誘導電流	140	Coulomb's force	2	
変圧器	152	<b>【よ】</b>	陽子	1, 187	Coulomb's law	4
変位電流	159	<b>【ら】</b>	落雷	96	CT 診断装置	189
変調	171	ランダム運動	79	current density	82	
変調回路	171	<b>【れ】</b>	<b>【ろ】</b>	<b>【D】</b>		
変調波信号	171	レーザプリンタ	94	D-A 変換器	173	
ヘンリー	151	レンツの法則	141	diamagnetic material	114	
<b>【ほ】</b>		<b>【ろ】</b>	ロータ	179	dielectric constant	75
棒磁石	108	ローレンツ変換	117	dielectric polarization	73	
放射	169	ローレンツ力	115, 144	dielectrics	73	
放電	61, 101	<b>【A】</b>	A-D 変換器	173	displacement current	159
放電現象	96	AED	104	div	163	
保存量	3	AM	172	divergence	163	
保存力	44	Ampère's circuital law	127	DRAM	101	
ホール効果	119, 177	Ampère's law	127	<b>【E】</b>		
ボルト	40	amplitude modulation	172	eddy current	148	
<b>【ま】</b>				electric current	81	
マイクロフォン	107, 184			electric dipole	12	
マイクロマシン	96			electric potential	38	
マクスウェル方程式	161			electric power	90	
<b>【み】</b>				electrical field	8	
右手のルール	122			electron	1	
右ねじのルール	122			electrostatic capacity	59	
				electrostatic induction	32	

electrostatic shielding	55	magnetic resonance imaging	187	resistor	86
<b>[F]</b>		magnetostrictive	177	rot	163
Faraday's law	140	Maxwell's equations	161	rotation	163
ferromagnetic material	114	MEMS	102	<b>[S]</b>	
Foucault	148	MRI 診断装置	187	self induced electromotive	
<b>[G]</b>		MR 素子	177	force	151
Gauss' law	22	mutual induced electromotive		self inductance	151
grad	45	force	152	self induction	151
<b>[I]</b>		mutual inductance	151	skin effect	149
IH cooker	149	mutual induction	152	solenoid coil	133
induced charge	32	<b>[N]</b>		S 極	108
induced current	140	negative charge	2	<b>[T]</b>	
induced electric field	146	negative charged particle	2	TEM wave	168
induced electromotive force	140	neutron	1	transverse electromagnetic	
induced magnetic field	161	N 極	108	wave	168
inductance	151	<b>[O]</b>		true charge	73
induction heating cooker	149	Ohm's law	87	<b>[W]</b>	
inductor	150	<b>[P]</b>		wave equation	164
insulator	73	paramagnetic material	114	<b>[X]</b>	
interlinkage	126	polarization	73	X 線	170, 189
<b>[J]</b>		polarization charge	73	<b>[その他]</b>	
Joule heat	90	positive charge	2	$\nabla$	163
<b>[L]</b>		positive charged particle	2	$\gamma$ 線	170
Lenz's law	141	proton	1		
<b>[M]</b>		<b>[R]</b>			
magnetic moment	111	relative permittivity	75		
		resistance	84		
		resistivity	84		

— 著者略歴 —

1981年 筑波大学第三学群基礎工学類卒業  
1983年 筑波大学大学院工学研究科修士課程修了（物理学専攻）  
1983年 株式会社日立製作所（中央研究所）勤務  
1994年 博士（工学）（筑波大学）  
1996年 筑波大学助教授  
2004年 筑波大学教授  
現在に至る

技術者のための電磁気学入門  
Introduction to Electromagnetics for Engineers

© Moritoshi Yasunaga 2017

2017年11月20日 初版第1刷発行

★

検印省略

著者 やすなが もりとし  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 萩原印刷株式会社  
製本所 有限会社 愛千製本所

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 978-4-339-00904-0 C3054 Printed in Japan

(森岡)



JCOPY

< 出版者著作権管理機構 委託出版物 >

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-3513-6969, FAX 03-3513-6979, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

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います。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いません。落丁・乱丁はお取替えいたします。