

まえがき

数学と物理が得意であるはずの理工系学部や高専の学生にとっても、電磁気学は難解であると思われて不人気の科目の1つである。その原因は2つあると考えられる。1つは電磁気で扱う物理量が‘目に見えない’ことによるイメージ形成の困難さである。力学における物体の落下や慣性の法則などは日常よく経験することであり、常識として感覚的に受け入れることができる。しかし、電磁気学が対象とする電荷や電流のイメージを描くことは、初めて電磁気学を学ぶ学生にとっては難しい。常識とは一種の‘慣れ’だからである。さらに、電磁気学で初めて登場する電界や磁界といった‘場の概念’は日常の世界とあまりにもかけ離れている。もう1つは、電磁気学で用いられる数学である。電磁気学に限らず物理現象を正確に記述するには数学が不可欠ではあるが、多くの初学者にとってはそれに気をとられて数式の表す物理的内容を見失ってしまう。このため、どちらに重きを置くかによって‘講義の数だけ教科書がある’というくらいたくさんの教科書が出版されている。

前者の電磁気学的イメージ形成に重点をおく教科書は確かにわかったような気にさせてくれるが、いざ実際の問題に直面するとそれを解決するための手がかりが乏しいことに気づかされる。また、電気力線や磁力線は理解の助けにはなるが物理現象を正確に表すものではない。これに対して後者の教科書では、一見難しそうな数式が並んでいるため、最初から‘食わず嫌い’の状態に陥ってしまう。また、数式の物理的意味を理解するには少なからず経験を積む必要があり、初学者にとってやはり高い壁になる。筆者らも決してスムーズに乗り越えてきたわけではなく教科書を何度も読み返した記憶がある。このとき役に立ったのは、丁寧な説明と理解を助ける演習問題であった。要点をまとめた教科書や公式集は、いったん理解した読者には使いやすいが、初心者は行間を埋めるべき講義のペースについていけないこともあり、単なる式の暗記に追われて、結局本質をつかむ機会を失うことがある。このような経験から、冗長との批判を覚悟してできるだけ丁寧な説明を心がけた。また読者がつまづきそうな部分には例題とその詳細な解答を付け加え、何度読み返してもそれに耐え得る教科書になるよう努力した。欧米では決して珍しくないが、本書のような出版社泣かせの厚い本を出版させていただいたのは、偉大な先人達が築き上げた電磁気学的自然観とそれを集約した自然法則の意味をよく理解すると共に、専門分野に進むための知識や問題解決能力を身に付けてほしいという願いからである。また、電磁気学がどのように形成されていったかを伝えるための歴史的事情や、電磁気学が現代生活にどのように生かされているかについても簡単

に紹介した。息抜き程度に読んでいただきたい。

本書は理工系学部や高専の学生向けの教科書・参考書として執筆されたもので、電磁気学的イメージの把握を重視しながらも、高校卒業程度の数学的知識があれば導かれた数式の物理的意味が正確に理解できるように工夫されている。2章では電磁気学を学ぶために必要な最小限度の数学的事項をまとめた。多くの大学や高専ではベクトル解析の講義もほとんど同時期に行われているであろうから、これらに習熟していると思う読者は読み飛ばしても差し支えない。また、初学者にはやや高度であると思われる節、項にはそのタイトルに*マークを付けた。必要に応じて取捨選択してほしい。その後は電荷の運動という観点から、わかった歴史の順番に沿って述べられている。3章から5章までは、電荷が静止している場合に空間にどのような電界ができるかを説明している。‘場’という概念が最初に登場することから、それについて詳しく説明している。3章は自由空間中の電界について、4章は誘電体中の電界と分極について説明する。また5章はやや数学的色彩が強いが、静電界の問題を解く正統的な手法であることと、物性の分野では最初からこのような取り扱いをすることが多いため、章を改めて解説した。初学者は必要な部分だけを選んで読んでほしい。電荷が移動すると電流になるが、6章は最も簡単な定常的に流れる電流の性質を述べている。電流が流れると周りに磁界ができることは周知の通りである。7章と8章は定常電流による磁界と磁性体による磁界について述べた章である。9章からは、電荷が加速度運動して電界と磁界が共に時間的に変化する場合を扱うが、9章はその変化が緩やかな場合にどのような現象が起こるかを説明する。そして10章でマクスウェルの方程式という電磁界を規定する方程式にたどり着いて、いわゆる古典電磁気学が完成する。これで電磁気学は一応完結するが、電磁気学と電気回路や電子回路とは別の分野だと考えている学生も少なくないため、11章をあえて付け加えた。この章ではマクスウェルの方程式をどのような条件の下で近似すると回路方程式が導かれるかを説明して、電磁気学と電気回路との橋渡しを行う。

最後に本書は、いろいろな方々からのご協力、ご支援によって完成することができた。いままでに出版されているさまざまな書籍や学術論文もまた参考にさせていただいた。主なものは巻末に載せた。有益なご助言をいただいた大学の同僚、電子情報通信学会をはじめとする各種研究専門委員会の委員の皆さんに感謝する。また、この本の基礎となった講義ノートの実プリントや講義に関する貴重な意見を下さった学生諸君、さらに出版に際し著者のわがままなお願いを聞いて下さったコロナ社の皆さんに大変お世話になった。ここに記して深く謝意を表す。

2010年4月

宇野 亨・白井 宏

目 次

1. 序 章

2. 数 学 的 準 備

2.1 微分と積分	7
2.2 スカラ関数とベクトル関数	11
2.3 座 標 系	13
2.4 ベクトルの積	18
2.5 ベクトル関数の微分	21
2.6 線 積 分	22
2.7 面 積 積 分	25
2.8 体 積 積 分	28
2.9 勾 配	29
2.10 ベクトルの発散とガウスの定理	31
2.11 ベクトルの回転とストークスの定理	36
2.12 幾つかの重要なベクトル公式	42
2.13 簡単な微分方程式	45
章 末 問 題	48

3. 真 空 中 の 静 電 界

3.1 電 荷 の 分 布	51
3.2 クーロンの法則	57
3.3 近接作用と電界	60
3.4 電 気 力 線	67
3.5 ガウスの法則	69

3.6 電界と電位・静電ポテンシャル	82
3.7 電気双極子と電気2重層	96
3.8 多重極展開	100
3.9 静電エネルギーとマクスウェルの静電応力	101
3.10 コンデンサと静電容量	110
章末問題	117

4. 誘電体中の静電界

4.1 静電容量と誘電率	121
4.2 分極と分極ベクトル	122
4.3 分極電荷とコンデンサの中の電界	125
4.4 誘電体中の静電界の基本法則	126
4.5 一様な誘電体中の電界とコンデンサの容量	132
4.6 境界条件	133
4.7 誘電体に働く力*	140
4.8 コンデンサに働く力とMEMS	142
4.9 誘電体のやや微視的考察*	145
章末問題	150

5. 静電界に関する境界値問題

5.1 静電界の基本法則	152
5.2 境界値問題ーラプラス方程式の解法ー	157
5.3 電気映像法	176
5.4 等角写像法*	183
5.5 ラプラスの方程式の近似解法*	186
章末問題	187

6. 定常電流

6.1 定常電流と保存則	190
--------------	-----

6.2 オームの法則	194
6.3 起電力がある場合のオームの法則	199
6.4 定常電流の空間分布	202
6.5 キルヒホッフの法則	209
6.6 導体の熱作用	210
章 末 問 題	212

7. 真空中の静磁界

7.1 磁石による磁気作用と電流による磁気作用	214
7.2 アンペアの力とその応用	218
7.3 ローレンツ力とその応用	221
7.4 ビオ・サバルの法則	229
7.5 ベクトルポテンシャル	233
7.6 静磁界におけるガウスの法則	243
7.7 アンペアの法則	244
7.8 定常電流に働く力	249
章 末 問 題	251

8. 磁性体中の静磁界

8.1 物質の磁化	254
8.2 磁性体に対する基本法則	261
8.3 磁気回路	266
8.4 物質の磁性	272
8.5 永久磁石	278
8.6 磁性体の応用	283
章 末 問 題	285

9. 電磁誘導

9.1 ファラデーの電磁誘導の法則	287
-------------------	-----

9.2	運動する導体に発生する起電力	290
9.3	電磁誘導に起因する現象	293
9.4	電磁誘導を利用した装置	296
9.5	準定常電流による磁界	299
9.6	インダクタンス	302
9.7	インダクタンスと磁気エネルギー	311
	章末問題	313

10. マクスウェルの方程式と電磁波

10.1	変位電流	317
10.2	マクスウェルの方程式	322
10.3	電磁波の伝搬	331
10.4	エネルギー保存則とポインティングベクトル	341
10.5	電磁ポテンシャル	347
10.6	正弦振動する電磁界	349
10.7	アンテナからの電磁波放射	362
	章末問題	368

11. 電磁気学と電気回路

11.1	準定常電流と基本方程式	370
11.2	エネルギー保存則	375
11.3	回路方程式	378
11.4	簡単な電気回路	380
	章末問題	384
	引用・参考文献	386
	章末問題解答	387
	索引	406

1 | 序 章

電気の力と磁気之力

電気の歴史は古い。冬の乾燥した日に衣服が体にまとわりついたり、ドアノブを触ろうとして指先から火花が飛んだりすることがある。これは衣服や人の体が摩擦によって静電気を帯びたためだと説明される。また、子供の頃にわきの下や頭で下敷きを^{こす}擦って、友達の髪の毛を逆立たせたり、小さな紙切れを吸い付ける遊びを経験した読者も少なくないと思う。中学の理科では、擦り合わせる物の組み合わせによって正に帯電したり負に帯電したりすること、同符号の電荷同士には反発する力が働き、異符号の電荷なら引き合う力が働くことを学ぶ[†]。こうした静電気の存在は既に紀元前 6 世紀ころの古代ギリシャ時代には知られていたようで、宝石となる琥珀^{こはく}を磨くために毛皮や毛布で擦ることによって静電気が起き、軽いものを吸い付けることを発見していた。実際、‘電気’を表す英語‘electric’は、‘琥珀質’というギリシャ語‘ηλεκτρον’に由来し、イギリスのギルバート (W. Gilbert) によって名づけられた。漢字の‘電’は、古代中国で‘雨’冠のない文字が稲光を表す象形文字として作られ、それが甲骨文字として刻まれた。

高校生になると、この電気の力をクーロン力とよび、万有引力と同じように距離の 2 乗に反比例することを学ぶ。万有引力との違いは、クーロン力には引力と斥力の両方があることである。もう 1 つの違いはその大きさである。万有引力は、2 つの物体の質量の積に比例し、距離の 2 乗に反比例する。一方、クーロン力はそれぞれの電荷量の積に比例し、距離の 2 乗に逆比例する。2 つの力は全く同じ形をしているが、比例係数が大きく異なる。水素原子のような 1 つの陽子と 1 つの電子がある場合に、その両者に加わる力の大きさを、各種の物理定数を代入して計算すると、クーロン力は万有引力に対して 2.3×10^{39} 倍となり、電気の力が桁違いに大きいという結果が得られる。実感がわからないかもしれないが、陽子と電子に働

[†] 物体と物体を擦り合わせたときの帯電の仕方は、物体を構成している原子の相対的な性質による。例えば、ガラスを絹製の布で擦ると、ガラスには正の電荷、布には負の電荷が帯電する。もともとはデュ・フェがガラスに帯電した電荷をガラス電気、樹脂に帯電した電荷を樹脂電気といったのを、フランクリンがそれぞれを正電気、負電気と命名した。このために、電子の電荷が負となってしまった。帯電しやすさは材質に依存する。ウールやナイロンは正の電荷が帯電しやすく、アクリルやポリエステルは負に帯電しやすい。これに対して紙や革は帯電しにくい。人の体は正に帯電しやすい。

く万有引力が 1 kg を持ち上げる力だったとすると、電気の力は 2.3×10^{39} kg の物体を持ち上げる力になる。太陽の重量は約 1.99×10^{30} kg であるから、この電気の力は約 11 億 6 千万個の太陽を持ち上げる力に相当する。このように電荷にはとてつもなく大きな力が働く。正の電荷だけが集まると、大きな力で反発し合い四方八方に飛び散ってしまう。負の電荷同士でも同じである。これに対して正の電荷と負の電荷とがちょうどうまく交じり合うと、正負の電荷は互いにもすごい力で引き合って、最終的にはいわゆる中性の状態になる。

さて、読者は、髪の毛や下敷きを含めてあらゆる物質は、原子や原子が集まった分子でできていることを知っている。原子は、その直径がおおよそ 10^{-10} m 程度の粒子で、原子核を中心にしてその周りを幾つもの電子が回る構造をしている。そして原子核は、正の電荷をもつ幾つかの陽子と中性の中性子からできていて、負の電荷をもつ電子と合わせて全体としては中性になっている¹⁾。上で述べたように、電気の力が非常に強いなら陽子と電子がぶつかってしまうのではないかと心配するかもしれない²⁾。これを防いでいるのが量子効果である。すなわち、電子が陽子に近づこうとすればするほど、大きな運動量をもたなくてはならないというのが**不確定性原理** (uncertainty principle) の教えるところである。したがって、電子は **図 1.1** のように原子核の周りのあ

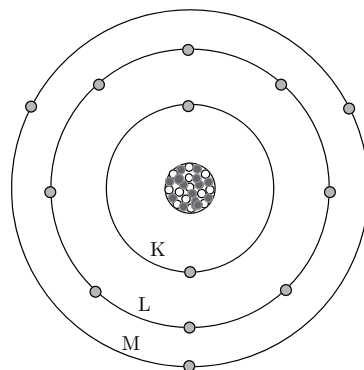


図 1.1 原子模型. 電子の軌道は内側から K, L, M, ..., という名前が付いている. 各軌道に収容される電子の最大数は決まっており、それぞれ 2, 8, 18, ... である. この図は原子番号 13 のアルミニウムの場合で、電子は基本的にはエネルギー準位の低い軌道から詰まっていくので最外殻軌道には 3 個の電子が存在する.

る軌道を回って運動量を確保するようになる。電子はクーロン力によって原子内に留まっているが、外側の電子ほど原子核からの距離が遠いので束縛は弱くなる。物体と物体を擦り合わせると、接触面では物体を構成する原子や分子が激しく振動して、原子核からの束縛が弱い電子が剥ぎとられ、他の物体に移る。その結果、電子の移動先の物体は負に帯電し、残った側は正に帯電する。摩擦による静電気の発生はこのように物体内の電子の過不足によるものである。このことから、どちらが正に帯電するか、負に帯電するかは物体の組み合わせで決まる、ということも理解できるであろう。

¹⁾ 長い間、電子や陽子はそれ以上分割できない基本粒子と考えられてきた。しかし素粒子理論によると、陽子や中性子は、さらに小さなクォーク (quark) という素粒子に分割することができ、現在までに 6 種類のクォークが存在することがわかっている。こうなることの基礎を明らかにした、南部、小林、益川の 3 氏が 2008 年のノーベル物理学賞を受賞したことは記憶に新しい。陽子や中性子はそれぞれ 3 種類のクォークで作られているが、電子については現在のところ、これ以上細かくは分けられないと考えられている。

²⁾ 本書で学ぶ古典的電磁気学を水素原子に適用すると、 10^{-11} 秒という短い時間で電子が陽子に衝突してしまう、という結論になる。これは明らかに誤りで、量子力学が生まれるきっかけの 1 つとなった。

一方、陽子はどのようにして原子核内に局在できるのであろうか。電気のみならず反発し合って、飛び散ってしまうはずである。ところが原子核内では核力 (nuclear force) とよばれる電氣的な力とは異なる引力が働いていて、これが電気のみより強いために陽子を原子核内にとどめているのである。しかし核力は非常に守備範囲が狭く、電気のみより早く減衰する。すなわち、核力は近接の粒子にしか働かないのに対して、電気のみは核力よりも広範囲に働く。そのため、陽子の数が増えるとその分だけ電気のみが大きくなって核力との釣り合いが微妙になる。つまり力のバランスが不安定となる。この代表がウランである。このような不安定な状態の原子に中性子をぶつけると、原子が2つに分裂する。両方とも正の電荷をもつから、電気のみによって飛び散る。これが次々と起こるのが核分裂 (nuclear fission) である。一般には核のエネルギーとよばれているが、実は電気のみなのである。これは上で述べたように、万有引力に比べると気の遠くなるほど大きく、莫大なエネルギーとなるのである。

このように、物質の細かな構造、すなわち物質の性質を決めているのは電気のみと量子力学的効果であるが、その境界はどのくらいであろうか。明確な境界があるわけではないが、大よそ 10^{-13}m 程度までは電氣的な力が支配的だといわれている。しかしながら、この程度になると‘力’という概念さえあやふやになる。そこで本書では原子や分子の構造までは立ち入らないで、それらの電氣的性質が平均的に取り扱える程度までの範囲を扱うものとする。

もう1つの不思議な力は磁氣の力である。磁氣の歴史も電気のみと同じくらいに古い。磁氣を表す英語 ‘magnetism’ は、小アジアのマグネシア地方で産出する特別な石が金属を引き付けたことに由来しているといわれている。磁石 (magnet) は、中国でも古い文献に現れ、漢字の‘磁’は、‘引き付けて次第に強くなる’という意味の‘茲’に‘石’を組み合わせて作られた会意文字である。

よく知られているように、磁石のN極同士、S極同士は反発し合い、N極とS極とは引き合う。そこで、電荷と対応づけて、N極上に正の磁荷、S極上に負の磁荷があると考え、それらの中には電荷に対するクーロン力と全く同じ法則が成り立つ。したがって、これを出発点にすれば電気のみと同様の議論ができそうである。古くはそのようにした教科書もあるが、電気と磁氣の決定的な違いは、正や負の電荷は別々にとり出すことができるのに対して、磁荷は単独では存在できず、必ずペアで発生するということである。このことは図1.2のように、磁石を

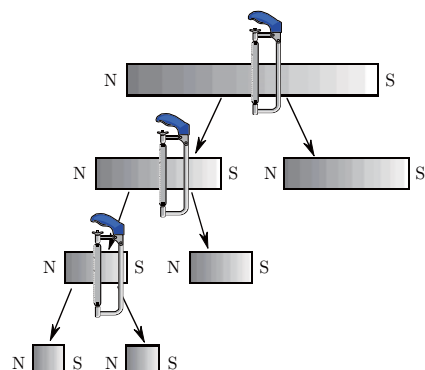


図 1.2 棒磁石の切断。磁石を切断しても N あるいは S 極だけの単極をとり出すことができない。

いくら細かく切っていくても必ず N 極と S 極とが対になって現れることから理解できよう。

また、上で述べたように全ての物質は原子でできているのであるから、磁気に対するクーロン力も電子の運動に起因するものであると考えるのが理にかなっている。実際、電荷に対するクーロンの法則から磁界の法則を導くことも可能であるが、それには相対性理論の知識が必要となる。

一方、電荷が運動するという事は、電流が流れるということである。電流が流れると周りに磁界ができるということは高校の物理で学んだ通りである。本書でもこの事実を基本原理の1つとして磁界に関する諸現象を説明することにする。そうすると、磁石の内部にも永久に流れ続ける電流がなければならないことになる。多くの物質ではこのように考えることができるが、鉄のような強磁性体では、この電流の効果よりも電子のスピンによる量子力学的な効果の方がはるかに大きい。これに関しては、量子力学の詳細には入らずに本書では現象論的な説明にとどめておくことにする。

電氣的な力が電荷（電子）に作用すると、電荷はある速度で運動する。電荷が運動すると磁界が発生し磁氣的な力も作用する。これらの電磁氣的な力が電荷の運動を支配する。これと同時に、運動する電荷は周りの空間に電氣的な作用と磁氣的な作用を及ぼす。これが電波^{†1}であり、光である。電波は目には見えないが、その存在は疑いようのないことである。読者は数十 km 離れた放送局の電波を受けてテレビを見ているし、携帯電話も利用しているからである。ここで想像してみしてほしい。電波を発生しているのは数十 km 離れたアンテナ上を振動する電子であり、それが数十キロメートル離れた読者のアンテナ上の電子を動かしているのである。この現象を理解するのが電磁気学や電磁波工学であり、情報をうまく伝達するためには電子の動きをどのように制御したらよいかを学ぶのが通信工学である。

単 位 系

物理量である質量や長さを測定したとき、それらは数値に単位を付けて、20 kg とか 5 m と表す。一般に物理量を表す記号には、英文字やギリシャ文字の斜体を、また単位には、立体の文字を使って両者を区別して表記する。単位は物の数え方と同様に何かを基準として、その何倍であるかを表すために用いる。足の大きさを基準としたフィートはその典型例である。

いろいろな経緯で過去に使われてきた様々な単位を、国際的に統一する実用計量単位系として、国際 (SI) 単位 (SI unit) が定められている^{†2}。表 1.1 に 7 つの基本単位を示す。電気と関連が深い電流の単位はアンペア [A] で、フランスの物理学者 A.M. Ampère の名前に因んでいる。以前は、硝酸銀の水溶液から電気分解して得られる銀の析出量を基に、電流 1

^{†1} 電波とは、 3×10^{12} Hz = 3 THz (テラヘルツ) 以下の周波数の電磁波のことである。

^{†2} SI は、フランス語の *Système International d'Unités* に由来する。単位とは一朝一夕に決まったものではなく、決まるまでには長い歴史があり、現在でもなお見直しが進められている。詳細については例えば、巻末の引用・参考文献 16) を参照されたい。

表 1.1 SI 基本単位

物理量	記号	基本単位
長さ	l	メートル [m]
質量	m	キログラム [kg]
時間	t	秒 [s]
電流	I	アンペア [A]
温度	T	ケルビン [K]
物質質量	n	モル [mol]
光度	I	カンデラ [cd]

表 1.2 代表的な SI 組立単位

物質質量	組立単位	基本単位による表現
力	ニュートン [N]	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
エネルギー	ジュール [J]	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
仕事率	ワット [W]	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
電荷	クーロン [C]	$\text{s} \cdot \text{A}$
電圧	ボルト [V]	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
静電容量	ファラッド [F]	$\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
抵抗	オーム [Ω]	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$
磁束密度	テスラ [T]	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$
インダクタンス	ヘンリ [H]	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$

A の大きさが決められていた。しかし、1948 年以降は、‘真空中に 1 m 離しておかれた 2 本の細い平行導線のそれぞれに同じ電流を流したときに、長さ 1 m あたり 2×10^{-7} N の力を及ぼす電流の強さ’と定められている。これについてはまた後の章で詳しく述べる。

これらの基本単位だけを用いても物理量を表すことができるが、単位の組み合わせが多くなり、表記も煩雑となる。そこでこれらを組み合わせて作った組立単位も使われる。電磁気学の分野でよく使われる組立単位を表 1.2 に示す。こうした単位には、歴史的な実験や発見に関係した科学者の名前に因んだものが多い。例えば、イタリアのボルタ (A. Volta) が、1799 年にいわゆるボルタの電池を発明した。この発明によって初めて連続的な電流がとり出せるようになった。ボルタ電池は、希硫酸溶液の中に銅と亜鉛の棒を立てたもので、銅が正の電極、亜鉛が負の電極となり、両者の間に 1.10 V の電位差が生じる^{†1}。この電位差が後の 1 V の基になっている。また抵抗の 1 Ω については、ジーメンス (S. Siemens) によって、断面積 1 mm² で長さ 1 m の水銀柱の抵抗値 (0.985 Ω) を標準にしようという提案がなされたこともある。彼の名前は、抵抗の逆数であるコンダクタンス (conductance) とよばれる導電性を表す量の単位として使われている。人名に由来する単位は、その人名の頭文字の英大文字を単位記号とし、英語で単位を綴る際は頭文字も小文字で表記する (普通名詞扱い)。

一方平面角度の単位としては、一般には度 [°] がよく使われているが、本書ではラジアン (radian) を用いる。ラジアンで表される角度の値は、単位円上に射影した周上の弧の長さに相当する。したがって 360° は、円周全部の長さ 2π ラジアン [rad] に対応する。平面内の角度と同じようにして、曲面を見込む角度を立体角といい、単位はステラジアン [sr] を使う^{†2}。この立体角については、3 章で詳しく説明する。

物理量が桁外れに大きかったり、小さかったりした場合には、単位の前に 10 の累乗を表す接頭文字を付けてもよいことになっている。表 1.3 に SI 単位で用いることのできる接頭文

^{†1} 最初にボルタが使ったのは、塩水に銀と亜鉛の電極であったといわれている。彼はいろいろな電極や溶液を試していて、銅と亜鉛の電極で希硫酸を用いた電池の発明は 1815 年といわれている。

^{†2} 角度の単位は SI 補助単位であったが、1995 年の国際度量衡総会において、その区分の廃止が決定され、現在は無次元の組立単位とされている。

表 1.3 SI 単位系で用いる接頭文字

接頭文字	記号	倍数	接頭文字	記号	倍数	接頭文字	記号	倍数
ヨクト	y	10^{-24}	ミリ	m	10^{-3}	メガ	M	10^6
zepto	z	10^{-21}	センチ	c	10^{-2}	ギガ	G	10^9
アト	a	10^{-18}	デシ	d	10^{-1}	テラ	T	10^{12}
フェムト	f	10^{-15}	—	—	—	ペタ	P	10^{15}
ピコ	p	10^{-12}	デカ	da	10	エクサ	E	10^{18}
ナノ	n	10^{-9}	ヘクト	h	10^2	ゼタ	Z	10^{21}
マイクロ		10^{-6}	キロ	k	10^3	ヨタ	Y	10^{24}

字を示す．ここで 10^3 を表すキロ [k] 以下の小さな累乗の接頭文字は小文字を，それより大きな累乗の場合は，大文字を使うことに注意してほしい．

以下本書では，使用する英文字が何を表すかを区別しやすいように，フォントを変える．例えば ‘A’ が点を表したり，電流の単位であるアンペアの意味なら立体フォント A で，変数を表すならば斜体フォント *A* で，そしてベクトル，もしくは行列ならば斜体太字フォント ***A*** で表すことにする．また電磁気学を含め，物理，化学，数学の分野では，多くの物理量や変数を表すのにギリシャ文字を用いる．参考のため，表紙の見返しにギリシャ文字をまとめた．

重ね合わせの原理と電荷保存の法則

重ね合わせの原理は極めて重要な原理である．電荷に働く力を例にとって説明しよう．図 1.3 のような 3 つの電荷 A, B, C があったとする．電荷 A に働く力 F_A は，電荷 B による力 F_B と電荷 C による力 F_C を別々に考えて（もちろんベクトルの意味で）加え合わせたものになる．これを重ね合わせの原理 (superposition principle) という．これは 2 個の電荷間に働く力が，他の電荷によって影響されないということも意味する重要な原理である．重ね合わせの原理は実験事実に基づくものであるが，これに反する事実はいまのところ見出されていない．重ね合わせの原理は電荷が運動していても成り立つし，磁気に関しても成り立つ．したがって，多数の電荷があっても 1 つひとつの電荷に関する原理がわかりさえすればよいことになる．数学では，線形性 (linearity) という言葉を学習するが，ここで使っている重ね合わせの原理と同じと思ってよい．

電荷保存の法則 (conservation law of electric charge) とは，素粒子の領域に至るまでいかなる化学的・物理的反応においても電荷の総量は変わらないという法則であり，電荷保存則ということもある．実験事実に基づく法則であるが現在までに反例は見つかっていない．

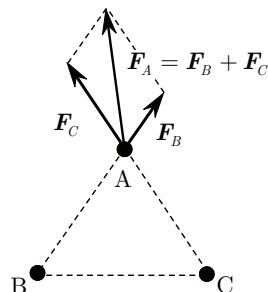


図 1.3 重ね合わせの原理.
 F_B を考えるときには電荷 C は考えなくてよい.
 F_C も同様である．

索引

【あ】		エネルギー		過渡		
アース	94	電磁界——	342	——応答	381	
アインシュタイン	62	——保存則	342	——電流	191	
網目	209	エルステッド	214	カロリー	198	
アンテナ	345	エレクトレット	149	関数		
ダイポール——	365	遠隔作用	60	グリーン——	356	
アンペア	4, 217	演算子		超——	56	
——・ターン	268	ラプラス——	42, 153	調和——	183	
——の力	219	緑端効果	158	デルタ——	55	
——の法則				導——	8	
積分形の——	246	【お】			ベッセル——	163
微分形の——	245	応答		完全反磁性	278	
——・マクスウェルの法則	319	定常——	381	完全導体	78	
——の右ねじの法則	216	オーム	194	環路	209	
		——損	198	緩和時間	191, 300	
		——の法則	194, 197, 267			
【い】		応力		【き】		
位相定数	360	静電——	109	起磁力	267	
一般解	46	オンネス	278	気体放電	96	
移動度	192			起電力	201	
インダクタンス		【か】			基本	
合成——	309	解		——解	45	
自己——	302	一般——	46	——単位	4	
相互——	303	特——	46	逆起電力	202	
インピーダンス	382, 383	特異——	46	キャパシタ	110	
固有——	335	特殊——	46	キャベンディッシュ	58, 93	
波動——	335, 359	開曲面	25	キャリア	192	
		外積	18	球面波	340	
【う】		回転	39	キュリー		
うず電流	295	ガウス	219	——温度	276	
——損	295	——の定理	35	——・ワイスの法則	277	
運動量モーメント	36	——の法則	70, 128, 243, 319	——の法則	147, 273	
		——(積分形)	73	境界		
【え】		点電荷に対する——	73	——値問題	157	
永久		——(微分形)	81, 127	——条件	133, 203	
——磁化	279	分布電荷に対する——	74	強磁性体	255	
——磁石	255, 279	——面	74	鏡像		
——電気双極子	146	角運動量	36	——電荷	176	
映像		拡散電位	188	——法	176	
——電荷	176	核分裂	3	局所電界	123	
——法	176	核力	3	極性分子	146	
エーテル	62	重ね合わせの原理	6	曲面	25	
枝	209	仮想変位法	115	ギルバート	1	

キルヒホッフ 209
 ——の法則 209, 210, 269
 近接作用 60
 金属 77

【く】

空間電荷層 188
 空中線 345
 空乏層 188
 クーロン 57
 ——の法則 57, 80
 ——力 1, 133
 クォーク 2
 屈折 135, 204
 ——の法則 204
 組立
 ——単位 5
 クラウジウス-モソッチの
 関係式 149
 グラスマン 18
 グリーン
 ——関数 356
 ——の定理 44

【け】

ゲージ変換 239
 結合係数 304
 ケルヴィン 177
 減衰定数 360
 原理
 重ね合わせの—— 6
 検流計 221

【こ】

高温超伝導体 211
 効果
 縁端—— 158
 近藤—— 211
 ゼーベック—— 211
 表皮—— 294
 パルティエ 212
 ホール—— 228
 マイスナー—— 211
 AB—— 235
 コーシー・リーマンの関係式 184
 合成インダクタンス 309
 光速 336
 勾配 31, 87
 交流回路理論 371
 国際単位 4
 固有インピーダンス 335

コロナ放電 96
 コンダクタンス 5, 195
 コンデンサ 110, 317
 近藤効果 211

【さ】

サイクロトロン
 ——運動 225
 ——角周波数 225
 サバール 229
 ビオ・——の法則 230
 座標系
 一般直交—— 18
 円柱—— 15
 円筒—— 15
 球—— 17
 直角—— 13
 残留
 ——磁化 275
 ——磁気 275
 ——磁束密度 275

【し】

磁位 265
 ——差 267
 磁化 254, 258
 永久—— 279
 ——ベクトル 258
 誘導—— 279
 ——率 262
 磁荷 214
 単—— 322
 磁界 215, 261
 ——ベクトル 220
 時間
 緩和—— 191
 磁気
 ——エネルギー 312
 ——回路 266
 ——双極子 256
 ——双極子モーメント 220
 ——の力 3
 ——抵抗 267
 ——ヒステリシス現象 276
 ——誘導 254
 ——履歴 276

磁極 214
 磁区 274
 自己
 ——インダクタンス 302
 ——減磁作用 283

——誘導 298
 ——力 81
 磁石 3
 永久—— 279
 磁性体 254
 強—— 150, 255
 常—— 255
 反—— 255
 磁束 219, 243
 ——線 243
 ——密度 219, 220
 時定数 300
 磁場 215
 ——ベクトル 220
 自発磁化 274
 ジャイロ磁気係数 257
 写像 185
 周期 337
 自由空間 332
 周波数分散性 122
 ジュール
 ——熱 198
 ——の法則 198, 199
 循環 37
 準静近似 374
 準静電界 365
 条件
 ローレンツ—— 348
 常磁性体 255
 障壁層 188
 磁力線 214

【す】

スカラ 12
 ——積 18
 ——場 12
 ——ポテンシャル 89
 ストークスの定理 42, 45, 50
 ストラットンの定理 44
 スネルの法則 361

【せ】

静磁界 215
 斉次方程式 45
 静電
 ——エネルギー 105, 130
 ——応力 108, 109
 ——遮蔽 93
 ——界 62
 ——偏向型ブラウン管 226
 ——ポテンシャル 82, 89

——の法則	288	ローレンツ	148	——電界	148
【ろ】		——・クーロン力	222	——力	222, 291
ローレンス-ローレンツの式	149	——ゲージ	348	ロビゾン	58
		——条件	348		

【A】		【C】		Coulomb	
AB 効果	235	CAD	195	——, C.A.	51
active power	384	capacitor	110	——'s law	58
actuator	142	carrier	192	cross product	18
aerial	345	Cartesian coordinate system	13	CRT	226
Aharanov-Bohm effect	235	cathode-ray tube	226	Curie temperature	276
Ampère		Cavendish, H.	58	current	
——, A.M.	4, 217	charge		conduction ——	191
——'s circuital law	245	apparent ——	125	displacement ——	319
ampere-turn	268	free ——	125	eddy ——	295
angular momentum	36	image ——	176	electric ——	190
antenna	345	magnetic ——	214	—— density	192
dipole ——	365	polarization ——	123	induced ——	288
apparent		true ——	125	induction ——	288
—— charge	125	circulation	37	quasi-stationary ——	301
—— power	384	Clausius-Mossotti	149	sationary ——	191
approximation		closed surface	25	transient ——	191
quasi-static ——	374	coercive force	276	cyclotron	
area element vector	26	complex permittivity	358	—— angular frequency	225
associated Legendre function	164	condensator	110	—— motion	225
attenuation constant	360	condition		cylindrical coordinate system	15
【B】		Lorentz ——	348	【D】	
back electromotive force	202	conductance	5, 195	definite integral	10
Barkhausen effect	274	conduction current	191	∇ (del)	29
barrier layer	188	conductivity		demagnetization	
basis vector	14	electric ——	194	self ——	283
battery	200	super——	211	density	
Bessel	163	conductor	78, 121	magnetic flux ——	219
Biot		perfect ——	78	depletion layer	188
—— -Savert's law	230	conformal mapping	185	derivative	8
——, J.	229	conservative field	86	diamagnetic material	255
Bohr magneton	257	constant		diamagnetism	
Boltzman, L.	322	attenuation ——	360	perfect ——	278
boundary		phase ——	360	super——	278
—— condition	133	contact potential difference	200	dielectric	
—— value problem	157	contour integral	22	—— breakdown	96
branch	209	coordinate system		—— constant	121
Braun		Cartesian ——	13	specific ——	121
——, K.F.	317	cylindrical ——	15	—— loss	375
—— tube	226	orthogonal——	18	dielectrics	121
breakdown		rectangular ——	13	differentiable	8
dielectric ——	96	spherical ——	17	differential	7
		copper loss	199	—— coefficient	8

— magnetization	279
— voltage	288
inductance	
mutual —	303
self —	302
induction	
electrostatic —	79
— field	365
— heating	295
mutual —	298
self —	298
inner product	18
insulating medium	121
insulator	78, 121
integral	
contour —	22
definite —	10
line —	22
volume —	28
internal resistance	201
intrinsic impedance	335
【J】	
Joule	
— heat	198
—'s law	198
junction	209
【K】	
Kelvin	177
Kirchhoff, G.	209
【L】	
Landè g-factor	257
Laplace	
equation	153
—, P.S.	42
Laplacian operator	42
Larmor radius	225
law	
Biot-Savert's —	230
conservation — of electric charge	6, 79
Coulomb's —	58
Faraday's —	289
Joule's —	198
Ohm's —	194
Snell's —	361
leakage magnetic flux	269
Legendre	164
— function	164

Lentz, H.	288
light speed	336
line	
— element	22
— vector	23
— integral	22
transmission —	344
linearity	6
lines	
— of electric force	60
— of magnetic force	214
longitudinal wave	334
loop	209
Lorentz	148
— condition	348
— force	222
Lorenz-Lorentz	149
loss	
copper —	199
— dielectric	375
— tangent	360
【M】	
magnet	3
permanent —	255
magnetic	
— charge	214
dia— material	255
— dipole	256
— domain	274
ferro—	150
ferro— material	255
— field	215, 220
— flux	220
— density	219
leakage —	269
lines of —	243
— hysteresis	
phenomena	276
— lines of force	214
— material	254
— monopole	322
para— material	255
— permeability	263
— pole	214
— potential	265
relative —	
— permeability	263
— susceptibility	262
— resistance	267
— susceptibility	262

magnetism	
residual —	275
magnetization	254, 258
induced —	279
permanent —	279
residual —	275
satulation —	275
spontaneous —	274
magnetomotance	267
magnetomotive force	267
magnetostatic field	215
mapping	185
conformal —	185
Marconi, G.	317
material	
magnetic —	254
Maxwell	
—'s equation	317
—, J.C.	58, 318
mechatronics	142
Meissner effect	211, 278
MEMS	142
mesh	209
metal	77
method	
image —	176
variational —	187
— of virtual work	115
Michell, J.	58
mobility	192
moment	
electric dipole —	98
momentum	
angular —	36
monopole	
electric —	96
magnetic —	322
motor	220
MRI	278
multipole expansion	101
mutual inductance	303
【N】	
∇ (nabla)	29
Neumann, F.	288
node	209
norm	19
nuclear	
— fission	3
— force	3

【T】		【U】			
tesla(T)	219	uncertainty principle		virtual work	
theorem		unit		method of —	115
Gauss' —	35	— normal vector	25	Volta, A.	5
Green's —	44	SI —	4	voltage	
Stokes' —	42	— vector	14	induced —	288
Stratton's —	44			induction —	288
thermocouple	211	【V】		volume integral	28
Thomson W.	177	variational method	187	【W】	
time		vector		wave	
— constant	300	area element —	12	electromagnetic —	336
mean free —	191	basis —	26	— equation	332
relaxation —	191, 300	line element —	14	— impedance	335
total differential	10	position —	23	longitudinal —	334
transient		— potential	14	— number	337
— current	191	Poynting —	235	plane —	334
— response	381	— product	342	spherical —	340
transmission line	344	unit normal —	18	transverse —	334
transverse wave	334	unit —	25	wavelength	337
			14	Weber, W.E.	215

—— 著者略歴 ——

宇野 亨 (うの とおる)

1980年 東京農工大学工学部電気工学科卒業
1985年 東北大学大学院博士課程修了 (電気及通信工学専攻)
工学博士
1985年 東北大学助手
1991年 東北大学助教授
1994年 東京農工大学助教授
1998年 東京農工大学教授
現在に至る

白井 宏 (しらい ひろし)

1980年 静岡大学工学部電気工学科卒業
1986年 アメリカ合衆国ポリテクニク大学大学院
博士課程修了 (電気工学専攻)
Ph. D.
1986年 ポリテクニク大学研究員
1987年 中央大学専任講師
1988年 中央大学助教授
1998年 中央大学教授
現在に至る

電 磁 気 学

Electromagnetics

© Toru Uno, Hiroshi Shirai 2010

2010年6月30日 初版第1刷発行

検印省略

著 者 宇 野 亨
白 井 宏
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 978-4-339-00814-2 (柏原) (製本: グリーン)

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