

# 物理入門コースについて

理工系の学生諸君にとって物理学は欠くことのできない基礎科目の1つである。諸君が理学系あるいは工学系のどんな専門へ将来進むにしても、その基礎は必ず物理学と深くかかわりあっているからである。専門の学習が忙しくなってからこのことに気づき、改めて物理学を自習しようと思っても、満足のゆく理解はなかなかえられないものである。やはり大学1~2年のうちに物理学の基本をしっかりと身につけておく必要がある。

その場合、第一に大切なのは、諸君の積極的な学習意欲である。しかしながら、物理学の基本とは何であるか、それをどんな方法で習得すればよいかを諸君に教えてくれる良いガイドが必要なことも明らかである。この「物理入門コース」は、まさにそのようなガイドの役を果すべく企画・編集されたものであって、在来のテキストとはそうとう異なる編集方針がとられている。

物理学に関する重要な学科目のなかで、力学と電磁気学はすべての土台になるものであるため、多くの大学で早い時期に履修されている。しかし、たとえば流体力学は選択的に学ばれことが多いであろうし、学生諸君が自主的に学ぶのもよいと思われる。また、量子力学や相対性理論も大学2年程度の学力で読むことができるしっかりした参考書が望まれている。

編者はこのような観点から物理学の基本的な科目をえらんで、「物理入門コ

ース」を編纂した。このコースは『力学』、『解析力学』、『電磁気学 I, II』、『量子力学 I, II』、『熱・統計力学』、『弾性体と流体』、『相対性理論』および『物理のための数学』の8科目全10巻で構成されている。このすべてが大学の1, 2年の教科目に入っているわけではないが、各科目はそれぞれ独立に勉強でき、大学1年あるいは2年程度の学力で読めるようにかれている。

物理学のテキストには多数の公式や事実がならんでいることが多く、学生諸君は期末試験の直前にそれを丸暗記しようとするのが普通ではないだろうか。しかし、これでは物理学の基本を身につけるどころか、むしろ物理嫌いになるのが当然というべきである。このシリーズの読者にとっていちばん大切なことは、公式や事実の暗記ではなくて、ものごとの本筋をとらえる能力の習得であると私たちを考えているのである。

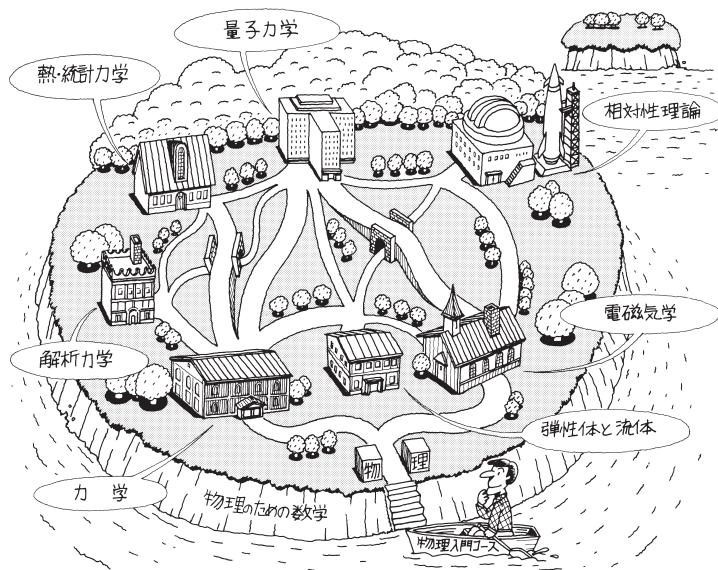
物理学は、ものごとのもとには少数の基本的な事実があり、それらが従う少数の基本的な法則があるにちがいないと考えて、これを求めてきた。こうして明らかにされた基本的な事実や法則は、ぜひとも諸君に理解してもらう必要がある。このような基礎的な理解のうえに立って、ものごとの本筋を諸君みずから努力でたぐってゆくのが「物理的に考える」という言葉の意味である。

物理学にかぎらず科学のどの分野も、ものごとの本筋を求めているにはちがいないけれども、物理学は比較的早くから発展し、基礎的な部分が煮つめられてきたので、1つのモデル・ケースと見なすことができる。したがって、「物理的に考える」能力を習得することは、将来物理学を専攻しようとする諸君にとってばかりでなく、他の分野へ進む諸君にとっても大きなプラスになるわけである。

物理学の基礎的な概念には、時間、空間、力、圧力、熱、温度、光などのように、日常生活で何気なく使っているものが少なくない。日常わかったつもりで使っているこれらの概念にも、物理学は改めてややこしい定義をあたえ基本的な法則との関係をつける。このわざらしさが、学生諸君を物理嫌いにするもう1つの原因であろう。しかし、基本的な事実と法則にもとづいてものごとの本筋をとらえようとするなら、たとえ日常的・感覚的にはわかりきったこと

であっても、いちいちその実験的根拠を明らかにし、基本法則との関係を問い合わせることが必要である。まして私たちの日常体験を超えた世界——たとえば原子内部——を扱う場合には、常識や直観と一見矛盾するような新しい概念さえ必要になる。物理学は実験と観測によって私たちの経験的世界をたえず拡大してゆくから、これにあわせてむしろ常識や直観の方を改変することが必要なのである。

このように、ものごとを「物理的に考える」ことは、けっして安易な作業ではないが、しかし、正しい方法をもってすれば習得が可能なのである。本コースの執筆者の先生方には、とり上げる素材をできるだけしぶり、とり上げた内容はできるだけ入りやすく、わかりやすく叙述するようお願いした。読者諸君は著者と一緒にになってものごとの本筋を追っていただきたい。そのことを通じておのずから「物理的に考える」能力を習得できるはずである。各巻は比較的小冊子であるが、他の本を参照することなく読めるように書かれていて、



決して単なる物理学のダイジェストではない。ぜひ熟読してほしい。

すでに述べたように、各科目は一応独立に読めるように配慮してあるから、必要に応じてこれから読んでもよい。しかし、一応の道しるべとして、相互関係をイラストの形で示しておく。

絵の手前から奥へ進む太い道は、一応オーソドックスとおもわれる進路を示している。細い道は関連する巻として併読するとよいことを意味する。たとえば、『弾性体と流体』は弾性体力学と流体力学を現代風にまとめた巻であるが、『電磁気学』における場の概念と関連があり、場の古典論として『相対性理論』と対比してみるとよいし、同じ巻の波動を論じた部分は『量子力学』の理解にも役立つ。また、どの巻も数学にふりまわされて物理を見失うことがないよう配慮しているが、『物理のための数学』の併読は極めて有益である。

この「物理入門コース」をまとめるにあたって、編者は全巻の原稿を読み、執筆者に種々注文をつけて再三改稿をお願いしたこともある。また、執筆者相互の意見、岩波書店編集部から絶えず示された見解も活用させていただいた。今後は読者諸君の意見もききながらなおいっそう改良を加えていきたい。

1982年8月

編者 戸田盛和  
中嶋貞雄

### 「物理入門コース／演習」シリーズについて

このコースをさらによく理解していただくために、姉妹篇として「演習」シリーズを編集した。

- |              |                |
|--------------|----------------|
| 1. 例解 力学演習   | 4. 例解 熱・統計力学演習 |
| 2. 例解 電磁気学演習 | 5. 例解 物理数学演習   |
| 3. 例解 量子力学演習 |                |

各巻ともこのコースの内容に沿って書かれており、わかりやすく、使いやすい演習書である。この演習シリーズによって、豊かな実力をつけられることを期待する。（1991年3月）

# はじめに

この『物理入門コース』第3巻と第4巻で学ぶ電磁気学は、力学と並んで物理学の基礎をなす重要な分野のひとつである。電磁気学では、その名の示すように、電気と磁気の現象を対象とする。電磁気の現象といえば、森羅万象の中のひとつの特殊な現象に過ぎないと見えるかも知れないが、じつは決してそうではない。それは、ある意味では自然現象の基本ともいるべき現象なのであるが、そのことはこの2巻を通じて、さらにこのコース全体を通じてだんだんと明らかにされるだろう。

電磁気学は、初めて学ぶものにとって、とりつきやすいものではないと思う。力学の場合であれば、私たちはたとえば物体を押して動かすという、きわめて単純な力学現象に日常出会っている。私たちには、力とか物体の運動というものが、力学を学ぶ以前から経験的にある程度わかっている。力学を学びながら、そこで扱う現象を実感できるのである。力学的な機械なら少々複雑なものでも、たとえ力学法則を知らなくても、見ればその機構はだいたい理解できるものだ。たとえば、昔風のゼンマイ式の振り子時計であれば、振り子が揺れてゼンマイがほどけ、歯車により運動が針に伝わる仕掛けは、それほど不思議ではない。

電磁気学では、この本の副題にも示したように、電磁場を対象にする。電磁場は電荷や電流のはたらきによって空間に生じるある種の変化であり、それは

物体の運動と違って、目には見えない。たしかに、私たちの日常にも電磁気の現象は起こっており、身のまわりには電気を利用した器具があふれている。しかし、摩擦電気の放電でビリッとくるあのいやな経験をいくら重ねても、そこから電磁場の存在を実感することはできないだろう。電気器具にしても、電磁気の法則を知らないものにとっては、単純な電気洗濯機の場合でさえ、スイッチを入れると回転が始まるというだけで、その間は全くのブラック・ボックスである。まして、デジタル時計は中をのぞいても、それがなぜ時刻を示すのか理解できない。

要するに、電磁気学を学ぼうとする私たちには、電磁気についての日常経験、電磁場に対する実感というものが皆無に等しいのである。力学の場合のように、あらかじめもっている経験に助けられながら学ぶことができない点に、電磁気学の難しさがあるのだと思う。

では、どうしたら電磁気学が‘わかる’ようになるだろうか。じつのところ、私にも名案があるわけではない。「物理入門コースについて」で編者が述べているように、学習を重ねることによって経験を補い、あるいは経験を広げていく以外に方法はないだろう。いろいろな場合について電磁場を求めながら、電磁場の法則が導かれていく過程を丹念にたどることだ。この本もそのことを目的とし、そのように書かれている。

ただ、つぎのことはいえると思う。私自身が初めて電磁気学を学んだときに感じた一種のとまどいは、電磁場のような目に見えない、実感できないものをなぜわざわざ導入しなければならないか、ということであった。読者も、たとえば高校の物理で電場や磁場のことを学ばれたと思うが、そのときに同じような疑問をもたれたのではなかろうか。じつは、それがたしかに必要なことで、電磁場もひとつの物理的実在なのだということを実感するには、簡単な静電場や静磁場について学ぶだけでは足りないのである。時間的に変動する電磁場を取り扱ってみて、初めて電磁場の実在性が理解できてくるものなのだ。つまり、多少腑におちないところがあっても、最後までひと通り学び通してほしい。そして、学びおえたところで、もう一度考え直してほしいのである。それが電磁

気学を学ぶ上での大変な心がまえではないかと思う。

この『電磁気学』は I と II の 2 冊に分かれている。I では、時間的に変動しない静的な電場と磁場を取り扱う。II では、時間的に変動する電磁場の問題と、物質中の電磁場の問題とを取り上げる。2 冊を合わせて電磁気学になるのであるから、上で述べたような意味でも、一体のものとして通読してほしい。

この入門コースの方針に沿って、この本でも電磁気学の基本ができるだけ平易に叙述するように努めた。数学的なことも、高校の数学の範囲を超える場合には、ていねいに説明を加えるようにした。高校程度の物理と数学の基礎知識があれば、他書を参考にすることなく読み通せるようにしたつもりである。

本書の執筆に当って、このコースの編者である戸田盛和、中嶋貞雄の両氏に多くの点でご教示いただいた。心からお礼申し上げたい。岩波書店編集部、とくに片山宏海氏には種々貴重なご意見をいただき、また出版にいたるまでの間ひとかたならずお世話になった。深くお礼申し上げる。

1982 年 8 月

長岡洋介



# 目次

## 物理入門コースについて

### はじめに

<b>1 電荷にはたらく力</b>	1
1-1 電荷を担うもの	2
1-2 クーロンの法則	6
1-3 電荷の単位	9
1-4 ベクトル	12
1-5 スカラー積とベクトル積	16
1-6 遠隔作用と近接作用	22
<b>2 静電場の性質</b>	25
2-1 電場	26
2-2 いろいろな静電場	31
2-3 電気力線	36
2-4 ガウスの法則	38
2-5 ガウスの法則の応用	43
2-6 保存力の条件	47

2-7 静電ポテンシャル	52
2-8 静電エネルギー	60
2-9 電気双極子	65
2-10 静電場と流れの場	68
<b>3 静電場の微分法則</b>	73
3-1 積分形から微分形へ	74
3-2 微分形のガウスの法則	75
3-3 微分形の渦なしの法則	83
3-4 ポアソンの方程式	90
3-5 ポアソンの方程式の解	94
<b>4 導体と静電場</b>	101
4-1 導体と絶縁体	102
4-2 導体のまわりの静電場	103
4-3 境界値問題	106
4-4 導体のまわりの静電場の例	110
4-5 電気容量	113
4-6 コンデンサー	118
4-7 静電場のエネルギー	120
<b>5 定常電流の性質</b>	125
5-1 電流	126
5-2 定常電流と電荷の保存	128
5-3 オームの法則	131
5-4 導体中の電流の分布	134
5-5 電気伝導のミクロな機構	137
<b>6 電流と静磁場</b>	143
6-1 磁石と静磁場	144
6-2 磁場中の電流にはたらく力	145

6-3 運動する荷電粒子にはたらく力	150
6-4 電流のつくる磁場	153
6-5 磁場と磁束密度	159
6-6 電磁気の単位	160
6-7 磁気双極子	162
6-8 アンペールの法則	167
6-9 アンペールの法則の応用	175
6-10 ベクトル・ポテンシャル	178
問題略解	189
索引	211

## コーヒー・ブレイク

クオーク	5
場	28
空中電気	127
金属電子論	139
加速器	152
地球の磁場	155
ファラデー	219
磁気单極はあるか	257
空洞放射とフォトン	270
原子と光	276
超伝導	301
磁性と量子論	306

(イタリック体の数字は『電磁気学II』  
のページを示す)

## 電磁気学II 目次

- 7 電磁誘導の法則**
  - 8 マクスウェルの方程式と電磁波**
  - 9 物質中の電場と磁場**
  - 10 変動する電磁場と物質**
- さらに勉強するために  
問題略解  
索引

# 1

## 電荷にはたらく力

正負の電荷を担うものは、陽子や電子などの素粒子である。素粒子の数は変わることがあるが、電荷の総和はいつも一定に保たれる。電荷の間にはたらく力は、距離の2乗に反比例する点で、万有引力に似ている。しかし、電荷の場合には、同符号の電荷の間には斥力、異符号の電荷の間には引力がはたらき、その強さは万有引力に比べてはるかに強い。

### 1-1 電荷を担うもの

いま私たちの周囲では、じつに多種多様な形で電気が利用されている。家の中を見ただけでも、照明器具、トースター、洗濯機、テレビなどのいわゆる家庭電化製品から、腕時計、電卓、電子オルガンなどにいたるまで、数えきれないほどである。そのテレビには衛星中継によって外国のできごとが映し出され、外に出ると電車や工場の機械は電気で動き、銀行預金はコンピューターで支払われる。利用の仕方も、単純な熱源、光源、動力源としての利用から、電磁波による通信、あるいはエレクトロニクスの高度な利用とさまざまである。今日の私たちの生活は、もはや電気をぬきにしては考えることができない。

しかし、電気がこのように広く利用されるようになったのは、そう古いことではない。ほんの40年ほど前、私がまだ子どものころ私の家で使っていた電気製品は、白熱電灯とラジオだけであった。人間が電気を利用し始めたのはほぼ1880年以降のことだから、その歴史はまだ1世紀を経たばかりなのである。

このように広汎な電気の利用が可能になるためには、まず電気現象に関する自然法則が明らかになる必要があった。私たちは力学の法則を知らなくても、経験によって道具や簡単な器械を作ったり使ったりできるが、電気の場合はそうはいかない。長い研究の歴史のあと、電気、磁気の従う基礎方程式がマクスウェル (J. C. Maxwell) によって明らかにされたのは、1864年のことである。その後わずか100年余の間に、これだけ広汎に利用されるようになったことは、驚異というほかはない。

人間がはじめて電気現象に注目したのはギリシアの時代であったといわれる。コハクを毛皮などで擦ると、物を引きつける不思議な働きをもつようになると気付いたのである。英語の *electricity* という語は、コハクを意味するギリシア語 *ἤλεκτρον* を語源にしている。この摩擦電気の現象には、私たちも日常よく出会うし、またしばしば悩まされもしている。

電気現象について系統的な研究が始まるのは、16世紀以後のことである。摩

擦によって生じる電気には2種類あって、同種の電気は反発し、異種の電気は引き合うことが明らかになった。異種の電気が触れ合うと中和して消えてしまうことから、2種類の電気は電気を担う流体の過剰な状態、不足な状態と考えられ、それは**正の電気**、**負の電気**と呼ばれるようになった。物体に生じる電気の実体は、それが物体に担われているという意味で、**電荷**(electric charge)と呼ばれる。

今日私たちは、電荷を担うものが**電子**(electron)や**陽子**(proton)というミクロな粒子であることを知っている。物質はすべて多数の原子で構成されており、原子は正の電荷をもつ原子核の周囲に負の電荷をもつ電子が結合した構造をしている。原子核は電荷をもたない**中性子**(neutron)と正の電荷をもつ陽子とかなる。電子、陽子、中性子などは物質を構成する基本粒子であり、**素粒子**(elementary particle)と呼ばれる。この電子と陽子とが電気を担う粒子なのである。

電子と陽子のもつ電荷は、符号が逆で大きさは全く等しい。正負の電荷は強く引き合うから、原子はふつう原子核内の陽子と同数の電子を周囲に結合させている。正負の電荷は中心に正、周囲に負と分布しているが、全体としてはちょうど打ち消しあい、原子は電気的に中性の状態にある。その電子がなにかの理由で不足すると原子は正のイオンになり、余分になると負のイオンになる。マクロな物質もこれと同じことで、ふつうは正負の電荷が同量あって中性であるが、2つの物質、たとえばコハクと毛皮を擦り合わせたときに、電子が一方の物質から他方の物質に移ると、電子を失った物質は正に、余分に得た物質は負に帯電することになる。電気を担う流体とは、実体はこの電子である。

このように、電荷の量は電子や陽子のそれが最小の単位であり、その大きさを**電気素量**(elementary electric charge)という。マクロな物質が摩擦によって帯電するときも、電気分解で陽極・陰極間を電気が移動するときも、その電荷は電気素量の整数倍でなければならない。しかし、電気素量  $e$  は1-3節で述べるクーロン(C)の単位で

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

(1.1)

であり、マクロに見れば非常に小さい。したがって、これからこの本で取り扱うマクロな電気現象では、電荷は連続的な量と見なして構わない。

ここで、電気についてひとつの重要な性質に触れておきたい。それは、電荷が保存されること、すなわち正負の電荷の総和はいかなる場合も不変に保たれることである。高エネルギーの現象では、素粒子の数は一定に保たれない。たとえば、ある種の放射性元素の原子核では、 $\beta$ 崩壊といって中性子が陽子に変わる現象が起こる。しかし、このときには同時に電子が1個放出される。結局、中性子が1個減って陽子と電子が1個ずつ増えるが、電荷はプラス・マイナス・ゼロで変化しないのである。ふつうの化学変化では不変と見られる質量が、原子核や素粒子が関与する高エネルギーの変化では保存されることはよく知られている。しかし、電荷に関してはそれが保存されない変化は見つかっていない。このような意味で、電荷は素粒子のもつ最も基本的な性質のひとつなのである。

今日では、ミクロな粒子の振舞いは量子力学によって明らかにされている。電子は電気の力によって原子核に引きつけられ、また電子どうし反発し合いながら、量子力学の法則に従って運動する。そして、このようなミクロな粒子の振舞いが、金属は電気を通すがガラスは通さない、ガラスは透明だが金属は不透明であるといった、いろいろな物質の性質を決めている。それだけでなく、はるかに複雑な生命現象も、ミクロに見れば電子の動きが基本となっている。ギリシアの時代、擦ったコハクが物を引きつける現象はひとつの特殊な現象と見られていた。だがじつは、電気現象は自然の中でもっとも基本的な現象というべきものだったのである。

あとでわかるように、電気現象は磁気の現象と密接に結びついている。そこで、私たちは両者を合わせて**電磁気**(electromagnetism)と呼び、それを取り扱う物理学をこの本の表題にあるように**電磁気学**と呼ぶ。これからこの本で学ぼうとしている電磁気学は、最初に触れたような電気の応用の面からだけでなく、

## クォーク



物質のミクロな構造が明らかになり始めた1930年代、物質を構成する基本となる素粒子は、陽子、中性子、電子などほんの数種類にすぎないと考えられていた。それが第2次世界大戦後、実験手段の進歩に伴って新しい素粒子の発見があいつぎ、現在では100種類を超える素粒子の存在が知られている。そして、これら多種の素粒子の性質を統一的に理解するために、素粒子のうちの陽子や中性子などはより基本的な粒子が結合したものだとする考えが生まれてきた。この基本粒子がクォークである。

クォークも何種類があるが、それらクォークのもつ電荷は電気素量 $e$ の整数倍ではなく、 $\pm\frac{2}{3}e$ 、 $\pm\frac{1}{3}e$ という半端なものである。しかし、それが結合して素粒子になるときには、たとえば陽子の場合には電荷 $\frac{2}{3}e$ のクォークが2個、電荷 $-\frac{1}{3}e$ のクォークが1個というように、電荷の和がちょうど $e$ になるような集まり方をする。陽子が3個のクォークの結合したものであるなら、陽子を強い力でたたけば、壊れてクォークが飛び出してくるだろう。そう考えて実験がなされたが、陽子をいくらたたいてもクォークは出てこない。現在では、クォークどうしは絶対にたち切ることのできない特別な力で結ばれていて、クォークが単独で素粒子の外に出てくることはないと考えられている。そうだとすれば、クォークの電荷は半端でも、实际上は $e$ が電荷の最小単位であることに変わりはない。

しかし、宇宙の生まれた初期、素粒子ができる時期に結合しそこねたクォークが、いまでもどこかに残っているかも知れない。クォーク探しはいまもなされているが、クォークが見つかったという信頼できる報告はまだない。

広く自然現象、物質構造を支配する基本法則という点からも重要であることを忘れてはならない。

## 1-2 クーロンの法則

電気現象の研究は長い間定性的なものに止まっていたが、クーロン(C. A. Coulomb)の実験(1785年)によって新しい時代を迎えることになった。クーロンは図1-1のように2つの小さな球に電荷を与え、その間にはたらく力が小球間の距離と電荷の大きさによってどう変わるかを測定したのである。

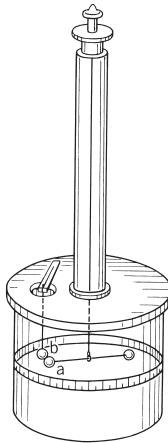


図1-1 クーロンの実験。

ガラス容器の中に電荷を与えたコルクの小球bを下り、別に細い金属線で水平につり下げた棒の一端に取りつけた小球aと接触させる。aにも電荷がうつると、2個の小球は反発して離れる。力は金属線のねじれで測定する。

クーロンが実験に用いた小球は、小さいとはいえ有限の大きさをもっている。しかし、小球が小球間の距離よりもずっと小さいときには、大きさを無視して点状の電荷、**点電荷**(point charge)と見なしてもそう悪くない。クーロンは実験によって、つぎのことを見出した。

静止した2つの点電荷の間にはたらく力は、両者を結ぶ直線の方向を向き、その大きさはおのおのの電荷の量の積に比例し、電荷間の距離の2乗に反比例する。

これをクーロンの法則(Coulomb's law)という。式に表わすと、2つの電荷を $q_1, q_2$ 、距離を $R_{12}$ とすれば、両者の間にはたらく力 $F_{12}$ は比例係数を $k(>0)$ として

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{R_{12}^2} \quad (1.2)$$

となる。力の向きは図1-2のようになる。もちろん、ここでも作用・反作用の法則が成り立ち、 $q_1$ が $q_2$ に及ぼす力と、 $q_2$ が $q_1$ に及ぼす力とは大きさが等しく、向きが逆である。同種の電荷の間には斥力、異種の電荷の間には引力がはたらくから、 $q_1, q_2$ を正電荷のときは正、負電荷のときは負の値で表わすことにすれば、 $F_{12}$ は正のとき斥力、負のとき引力を表わす。

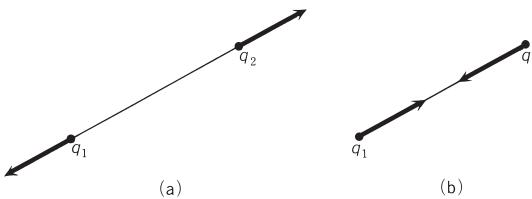


図1-2 電荷の間にはたらく力。

(a) 2つの電荷が同符号のとき( $q_1 q_2 > 0$ )。

(b) 2つの電荷が異符号のとき( $q_1 q_2 < 0$ )。

電荷 $q_1$ にはたらく力が、電荷 $q_2$ に比例することは何を意味するだろうか。いま $q_2$ を取り除いて同じ位置に別の電荷 $q_3$ を置いたとしよう。このとき、 $q_1$ にはたらく力は

$$F_{13} = k \frac{q_1 q_3}{R_{13}^2}$$

になる。つぎに、2つの電荷 $q_2, q_3$ を同じ位置に同時に置いたとすれば、これは大きさ $q_2 + q_3$ の電荷を置いたことになるので、 $q_1$ にはたらく力は

$$F = k \frac{q_1(q_2 + q_3)}{R_{12}^2} = F_{12} + F_{13} \quad (1.3)$$

である。この式は、2つの電荷を置いたときに受ける力が、それを別々に置いたときに受ける力の和になることを示す。

このような単純な関係が成り立つのは、決して自明なことではない。一般には、2つの原因があるとき、その結果が、1つ1つの原因が孤立してあるときに期待される結果を単純に足し合わせたものになるとは限らない。ふつうは原因が重なるとその相乗効果があるので、たとえば2人で仕事をすれば1人でする仕事の2倍以上のことができる場合がある。電荷の間にはたらく力について(1.3)式のように単純な関係が成り立つのは、実験によって確かめられたことなのである。

この関係は、2つの電荷 $q_2, q_3$ を離して置いた場合にも成り立つ。ただし、今度は $q_2$ による力と $q_3$ による力とでは向きが違っているので、 $q_1$ にはたらく力は(1.3)式のような単純な和にはならず、図1-3のように2つの力の合成をしなければならない。

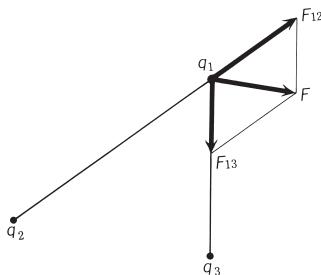


図1-3 クーロン力の重ね合わせの原理。

2つの電荷 $q_2, q_3$ があるとき $q_1$ にはたらく力 $F$ は、 $q_2, q_3$ が個々にあるときはたらく力 $F_{12}$ ,  $F_{13}$ の和になる。

クーロンの力のこのような性質を重ね合わせの原理(principle of superposition)という。重ね合わせの原理は、電磁気学全体を通していろいろな場面で成り立ち、重要な役割を果すことになる。

クーロンの法則(1.2)は、実験的に決められた経験則である。したがって、分母の指数2もそれがほんとうに2であるのかどうか、実験の精度が問題になるだろう。クーロン自身の実験は誤差が10%ほどもあって、あまり精度のよいものではなかった。しかし、現在では指数の2からのずれは、あったとしても $2 \times 10^{-9}$ 以下であることが確かめられている。正確に2だと信じてまず問題はない。またこの法則が、どんなに短い距離、どんなに長い距離でも成り立つものかどうかも自明ではない。しかし、現在のところ、短い距離でも長い距離で

も、クーロンの法則が成り立たないことを示す実験事実はない。

電荷の間にはたらく力が電荷間の距離の2乗に反比例するという性質は、クーロンの実験より前にプリーストリー(J. Priestley)とキャベンディッシュ(H. Cavendish)により、間接的な方法で知られていた。そのことについては、2-5節で触れることにしたい。

### 1-3 電荷の単位

力学に現われる物理量の単位は、長さ、質量、時間の単位をもとにして組み立てることができる。ふつう使われる単位は、長さにメートル(m)、質量にキログラム(kg)、時間に秒(s)を用いるもので、これを**MKS 単位系**と呼ぶ。たとえば力の単位は

$$1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = 1 \text{ N} \quad (\text{Newton, ニュートン})$$

である。

電荷は力学的な量と異なる物理量だから、それを測るには新しい単位を導入しなければならない。単位の決め方は勝手だが、クーロンの法則(1.2)を電磁気学の基本法則と考えるなら、この関係がなるべく簡単になるように決める方法もある。それには(1.2)式の比例係数  $k$  が 1 になるように電荷の単位を決めればよい。しかし(1.2)式は電荷が静止している特別な場合に成り立つ関係に過ぎない。あとで見るよう、電磁気学の基本法則はもっと違った形に書かれることになる。したがって、この本ではそのような単位の決め方は採用しない。

現在もっとも広く使われている電荷の単位はクーロン(C)である。基本単位としては、電荷そのものより測定の容易な電流が選ばれ、アンペア(A)がその単位として採用されている。電荷の単位は、1 A の電流が 1 秒間に運ぶ電荷の量として定義される。単位の関係は

$$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s} \quad (1.4)$$

となる。MKS 単位系に電流の単位 A を加えたものを**MKSA 単位系**といい、

この本ではそれを用いる。

これで、力、長さ、電荷の単位が決まつたので、(1.2)式の比例係数  $k$  の大きさも決まるうことになる。あとで導かれる基礎方程式の形を簡単にするには、比例係数を

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

と置く方がよい。実験によって決められた  $\epsilon_0$  の大きさは

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad (1.5)$$

である。この定数  $\epsilon_0$  を**真空の誘電率**(permittivity of vacuum)という。ここでわざわざ  $4\pi$  という係数を引き出しておいたわけは、こうすればあとに出てくる式で  $4\pi$  が打ち消されて、式が簡単になるからである。無理数  $4\pi$  が式から消えるので、誘電率をこのように定義する単位系を、**MKSA 有理単位系**といいう。

$\epsilon_0$  の大きさは実験により決めると述べたが、クーロンの法則に基づいて電荷の間にはたらく力を測定して決めたわけではない。8章でわかるように、 $\epsilon_0$  は真空中の光の速さに関係しており、その値は光速の測定から決められている。

このように、MKSA 単位系では真空の誘電率は非常に小さな値になる。したがって、1 m を隔てて置かれた 1 C の電荷の間にはたらく力は約  $10^{10}$  N にも達する。逆にいふとこれは、1 C という電荷の単位が静電気の現象を取り扱うときの単位としては大き過ぎることを意味している。落雷のとき放電する電荷の量は、せいぜい数クーロンの程度に過ぎない。

**例題 1** 質量 1 g の 2 個の小球に同量の電荷を与え、1 cm 隔てて置いたところ、小球間にはたらくクーロンの力が小球に作用する地球の重力と同じ大きさになった。小球に与えた電荷の大きさを求めよ。

[解] 重力の加速度は  $g=9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  であるから質量  $m=1 \text{ g}=0.001 \text{ kg}$  の物体にはたらく地球の重力は

$$\begin{aligned} F &= mg = 0.001 \times 9.8 \\ &= 9.8 \times 10^{-3} \text{ N} \end{aligned}$$