

「趣味で物理学」サンプル

* 本サンプルは、2020 年 2 月 7 日時点のものです。

* 書籍仕様については、以下弊社 web サイトをご覧ください。

<https://www.rikohtosho.co.jp/book/876/>

趣味で
物理学

広江克彦 著

理工図書

「ご趣味は何ですか。」

「物理学です。」

相手は一瞬とまどった様子だ。それでも何か言おうと頑張って記憶をたどっている。

「え、じゃあ… 自宅で台車とか転がして速度を測ったりするのですか。」

意外な反応に思わず少し笑ってしまった。いや誤解しないでくれ… 別に馬鹿にしたわけじゃないんだ。この人にとって物理学なんて未知の世界なんだろうなあ。私も何か気の利いた返事をして助けてやらねば…。

「いや、しないですけど… そんなことして楽しいわけがないです。」

ああ、ごめん！ もっと困らせる返事をしてしまった気がする。

「じゃあ、計算通りに物が動く嬉しいとか、そういうタイプですか！」

コイツいいやつだ。会話を途切らせまいと必死に考えてくれてる…。それに勇気がある。コイツ本当にいいやつだ！

「確かにそういう性格もありますけど、うーん、なんだろう、それだけじゃないんです。」

ああ、頼む。頑張ってもう少し会話を続けてくれ。そうすれば分かるから。私を付き合いにくいやつだと思わないでくれ！ 趣味でやる物理学の魅力をもっと伝えたいんだ！ そして出来ればこの趣味に引きずり込んで一緒に楽しみたい。

難しくなんかない。いや、たまに難しい事もあるけれど、いつか努力は報われる。この趣味がどんどん広がって、国民の代表的な趣味の一つに認められるほどになればいいとさえ思っている。

趣味で物理学

広江克彦 著

理工図書

序文

この本は一体何なのだろう。私もどう分類していいものか良く分からない。一体、書店ではどのコーナーに並べてもらえるのだろうか？

今の私としては「読み物」だという思いが強い。物理の楽しさを伝えたいという気持ちを込めたつもりである。しかし元は「教科書」を書いているつもりだった。その辺りの経緯は少し後で話そう。

ある人は「教科書」と呼べばいいし、ある人は「参考書」と呼んでもいい。読者層は特に意識していない。ページをパラパラとめくるとたくさんの数式が目につくが、恐れる事はない。飛ばして読んでもらっても楽しめると思う。しかし数式を省くわけにはいかなかった。それがなければ伝えきれない思いがそこにある。たとえ数式の意味が理解されなかったとしてもだ。数式が増えればそれだけ編集の手間とコストは増えるわけだが、出版社にはよく理解して頂き、特別な犠牲を払って下さることになった。心より感謝したい。

科学好きな中学生、高校生の目に留まって手に取ってもらえるだろうか。あるいは好奇心旺盛であらゆる事に対して研究熱心なおじさんたちに読んでもらえたりするのだろうか。また今まで物理にはこれっぽちも興味はなかったのだけれど、大学や職場でどうしてもその辺りの知識が必要になってしまったという人にも、この本に幾分かお助けできることがあるかも知れない。そういう人に気付いてもらえたらと願っている。

この本の内容は、元々インターネット上で公開されたものである。インターネットを使える環境にある人は、「EMAN の物理学」というサイトを探してもらえればこの本に含まれている内容のほとんどをそこで無料で読む事が出来る。今回この本に収録できたのはその中のごく一部である。私がこの「趣味で物理」を続ける限り、ネット上の公開記事はこれからも増

え続けることだろう。この本に載せられなかったさらにレベルの高い内容もあるので、関心を持たれた方は是非訪れて頂きたい。

このネット上の記事は6年ほど前に、私自身の個人的な勉強のために書き始めたものである。それから多くの人の支持や励まし、助言によって内容を少しずつ改善し、今まで何とか続けてこられた。

もともと「高校生でも理解できる大学レベルの内容の教科書」作りを目指してきたのだが、今や読者は大学生が最も多いと思われる。それは昼夜関係なくアクセスがあることと、春休み、夏休みにはアクセス数が減ることからも推測できる。さらにテスト期間に突入するとアクセスは激増する。読者の要望に応えるうちに内容はどんどん高度な方へ向かって行き、今や一つの記事を書き上げるのに非常に苦勞している。また最近は大学院生や、物理や数学の専門家、あるいは私と同じく物理を趣味とする「猛者ども」に取り囲まれて、心強さとプレッシャーを同時に感じて大いに楽しんでいる。

さて、このネット上の記事を本として出版して欲しいという要望は今までも何度も寄せられてきた。パソコンの画面では読みにくいので、いつでもどこでも、電車の中でも寝ながらでも読めるようにして欲しいというわけだ。「勝手に印刷して冊子にして友人たちと勉強しています」という高校生からの嬉しいメールももらったりする。

私としてもいつかこれらの記事を一冊の本にして友人や親族に自慢して回りたいという気持ちがあったのだが、私に完璧主義的なところがあるせいか満足の行くところになかなか到達しない。これは物理に限らず学問にはそういうところがあって、やればやるほど先が遠くいつまでも満足できないことによるのかも知れない。

このままでは「コンプリート版」の出版までまだ何年掛かるか見当も付かないので、今の内に多くの人に役に立ちそうな部分を見繕って、「趣味で物理」の仲間を増やそうと考えた次第である。そもそも分厚くて高価な本がいきなり出版されたとして、どれだけの人が買ってくれるだろうか。大人というのは自分の理想よりも、経済の動きや周囲の人々の生活にも十分気を配らないといけなかったりする。これはしがらみや足枷などというものではなく、より賢い現実的な選択ができるようになったということだ。

さて、昔書いた記事など気恥ずかしくてなかなか読み返したくはなかつ

たのだが、今回、編集のために読んでみるとこれがなかなか面白い。今の視点でならもっと簡潔に書けてしまうのだろうが、無知ゆえのこの面白さはもう出せないだろうと思う。それで少々厳密でない表現があちこちに残っていることを承知していながらも、書いた当時の「思い」を重視してほとんどそのまま出す事にする。

厳密で完璧な教科書なんてあんまりいいことはない。どんな教科書であっても嘘が含まれていることを常に疑いながら、自分の頭を働かせて読んでもらいたいと、私は読者に願う。私の書くものについてはなおさらである。私の考えの誤りや「もっといい方法」をどんどん見つけて私よりはるか上を目指してもらいたい。

2006年11月15日

広江 克彦

目次

第0章 準備	1
0.1 本書の構成	1
0.2 本書での記号の使い方	2
0.3 どの量をどんな文字で表すか	5
0.4 図が少ないのではないかな	6
第1章 力学	9
1.1 運動量保存則	9
1.1.1 力とは何か	9
1.1.2 「重さ」と「質量」	11
1.1.3 運動方程式の微分形式	13
1.1.4 作用反作用の法則	15
1.1.5 運動量保存の法則	16
1.1.6 動いてないのに力を感じるのは変じゃないかな	20
1.1.7 ニュートンの3つの法則	23
1.2 エネルギー保存則	25
1.2.1 エネルギーとは何か	25
1.2.2 エネルギーと運動量は何が違う	28
1.2.3 エネルギー保存則は基本法則ではない	31
1.2.4 3次元への拡張	35
1.2.5 エネルギーの交換について考える	38
1.2.6 ポテンシャルエネルギーの正体	40
1.2.7 エネルギーは質量を持つ	43
1.3 角運動量保存則	46
1.3.1 てこの原理を考える	46
1.3.2 回転に関する物理量	47

1.3.3	慣性モーメント	51
1.3.4	慣性モーメントを計算する	52
1.3.5	コマはなぜ立っていられる?	58
1.3.6	コマの歳差運動	60
1.3.7	もっと簡単なジャイロ効果	63
1.3.8	ベクトルによる正しい定義	64
1.3.9	角運動量の保存法則	67
1.3.10	運動量保存だけでは不完全?	73
1.4	力学のまとめ	75
	～哲学～ 実在はどこにあるか	78
第2章	電磁気学	81
2.1	目標と方針	81
2.2	マクスウェル方程式の概観	83
2.3	電荷の間に働く力	87
2.4	静電場	90
2.5	静電場の満たす方程式	93
2.6	微分法則を使う理由	97
2.7	電束密度の意味	101
2.8	電流と磁場の発生	106
2.9	ローレンツ力	111
2.10	物質中での磁場	114
2.11	電磁誘導	119
2.12	マクスウェル方程式の完成	123
	～提案～ 部活で「理論物理部」なんてどうだ?	127
第3章	電磁方程式をいじりまわせ	129
3.1	マクスウェルの方程式はなぜ解けるのか	129
3.2	電磁波	132
3.3	電磁波のエネルギー（前編）	138
3.4	電磁波のエネルギー（後編）	144
3.5	マクスウェルの応力	148
3.6	電磁波の運動量（前編）	153

3.7	電磁波の運動量（後編）	157
3.8	エネルギーと運動量	164
3.9	電磁ポテンシャル	166
3.10	ゲージ変換	171
3.11	遅延ポテンシャル	176
3.12	等速運動する点電荷	182
3.13	点電荷が発する電磁波	188
3.14	力学との接点	193
3.15	電磁気学のまとめ	196
	～提案～ 教科書解説という趣味	198
第4章	補習の部屋	201
4.1	外積について	201
4.2	ガウスの定理	205
4.3	ストークスの定理	208
4.4	∇ （ナブラ）を使い！	214
4.5	直線上の電荷が作る電場の計算	217
4.6	デルタ関数	220
4.7	単位系による違い	224
4.8	電気力線の実在性	228
4.9	慣性モーメントテンソル	232
4.9.1	動機と準備	232
4.9.2	素人考え	234
4.9.3	定義に忠実にやってみる	235
4.9.4	慣性乗積の意味	238
4.9.5	角運動量保存則が優先される	241
4.9.6	行列の意味するもの	242
4.9.7	座標の回転	245
4.9.8	回転の安定性	247
4.9.9	地球のポールシフト	249
4.9.10	平行軸の定理	250
	あとがき	251

第0章 準備

この章は理数系の教科書を読み慣れた人は読み飛ばしてもらってもいいような内容だが、それでも心を込めて書く。

この本を高校生、いや、できれば中学生でも読めるようにしたいと考えているので、理系の大人たちがごく当たり前だと思っているような基本的なことから説明したいと思う。

しかしこの章でいきなり分からないことが出てきたとしてもそれほど気にすることはない。この章は安心してもらうために書いているのだが、ついつい目的を忘れて、高度な事まで書きたくなくなってしまうことがあるからだ。

0.1 本書の構成

まあ、好きに読んでもらったらいいいのだが、全体の内容を軽く紹介しておこう。

まず第1章では力学について考える。力学は物理学のあらゆる分野の土台だから、初めに来る。

第2章から電磁気学の話になる。電磁気学というのは力学とともに物理の基礎の二本柱というべき分野である。そこでは微分や偏微分という数学操作を多用するが、別に大して難しい話ではない。それについては第1章の中に説明があるので、軽く読んでもらえれば第2章に進むのに差し支えはないだろう。

そして第3章こそが本当の電磁気学である。前の章で一揃いしたマクスウェル方程式を使って、そこから何が言えるのかを調べる内容になっている。残念ながらそれだけでこの本は終わりだ。

最後の第4章は普通の教科書でいうところの「付録」のようなものである。本文中に差し挟むと話の流れが悪くなると判断した話題はこの章の中

にごちゃ混ぜに押し込んである。しかしどれも他の章の本文と同じくらいに力を込めて書いてあるので、単なる付録とは呼びたくなかった。それで「補習の部屋」と名付けてある。1～3章の本文中には、第4章にある記事を先に読むように誘導している部分が幾つかある。つまり、第4章も他の章と同じく、なくてはならない部分だということだ。

0.2 本書での記号の使い方

本当は記号なんて何を使ってもいいのだ。例えば、この本では足し算を「+」ではなくて「♡」を使って表しますと宣言して使っても間違いじゃない。しかしそれでは読みにくくなるだけなので得策ではない。なるべく多くの人が慣れている記号を使う方がいい。

義務教育では「こうしなきゃダメ」「これは間違い」などと、やたら書き方の作法を重視する傾向があるが、もっとも大切な基準は、相手に分かり易く伝えられるか、使いやすいか、ということである。正式でない書き方が少々紛れ込んでいたとしてもあまり気にしてはいけな。むしろ、その意味を素早く受け止める柔軟さと判断力が必要だ。言い訳するのではないが、本には誤植が付き物だ。ちょっとしたミスをいちいち気にしていたら先へ進めなくなるだろう。できるだけ気をつけてはいるが、あまり私を信頼してはいけな。

それから私は、大カッコ、中カッコ、小カッコを使う順番についてはあまり気を付けていない。その時の気分や見易さ、印象を考慮して選ぶ。作法よりもそれが示す意味の方に集中して欲しい。

割り算について

割り算は普通、 $\frac{a}{b}$ のように分数で表す。しかし十分なスペースが取れない場合や、あまり高く積み上げると見た目がカッコ悪いと感じる時には a/b のように崩して書く。仕方なくそうすることもあるし、わざとそうすることもある。

微分について

微分は高校で学ぶ数学的なテクニックである。しかし少々勘のいい小学

生になら十分教えられるんじゃないかと私は思う。時々「微分のできる小学生」がテレビに出てきたりするが、私は「おお、すごい！」などとは全然思わない。読者がまだ中学生で微分を分かり易く教えてくれる大人が近くにいない時は、もうしばらく我慢して今の勉強に集中するか、ちょっと背伸びして分かり易そうな参考書を手に入れて自分で勉強してみるのがいい。どうするかは自分で選ぶのだ。自分が置かれた環境のせいにはしていない。

微分の具体的な計算方法が分からなくても心配は要らない。意味だけはこの本の中で説明しているので、完璧に理解しようと望まなければ読み進めることができるだろう。そもそも完璧な理解など簡単にできるものではない。

そんなことより記号の説明だ。関数 $f(x)$ を x で微分する時、 $\frac{df}{dx}$ と書く。ダッシュを付けて $f'(x)$ と書くこともある。スペースが足りない時は、割り算と同じように崩して df/dx と書くことがある。

あまり慣れないことかも知れないが、 $\frac{d}{dx}f$ という書き方も時々行われる。これは f にあたる部分が長ったらしい式になった場合に分数の上に乗せるとややこしくなるからである。

時間微分について

変数 x を時間 t で微分する時、微分の記号を使うと式がごちゃごちゃして面倒なので $\dot{x}$ のように変数の頭にドットをつけて表すことがある。この書き方を使うときにはそこでもう一度説明する。いきなり使うことはないので身構えなくてもいい。他の教科書でもたまに使う記法である。

偏微分について

偏微分とは何であるかについて、詳しくは第1章で説明してある。例えば関数 f を x で偏微分するとき、 $\frac{\partial f}{\partial x}$ と書く。微分と同じようにスペースの都合で $\partial f/\partial x$ と崩して書くことがある。ちなみにこの「 ∂ 」という記号は「デル」「パーシャル」または「ラウンドディー（丸っこいD）」と呼ばれる。短く「ラウンド」とか「ディー」とか呼ぶこともあって、統一されていない。

これも微分と同じように $\frac{\partial}{\partial x}f$ という書き方が行われることがある。また、 $\frac{\partial}{\partial x}$ という部分だけ取り出して、「この後に続く式を x で偏微分しなさい」

という意味の記号として使われることもある。

微小量について

ある量 x の微小変化を Δx のように表す。 Δ （デルタ）はギリシャ語のアルファベットの太文字であって、D に相当する。これを使うのは difference の頭文字に由来している。この微小変化が無限に小さいというニュアンスを表したい時には dx と書く。微分や積分の中で使われている d も同じニュアンスを表したものだ。

最近、活字で表す時は dx ではなくて dx というフォントを使うべし、という教科書の規格統一化を重んじる風潮があり、厳しい意見を持つ人が増えてきている。どうせ手書きの時にはそんな区別はしないのだし、私は dx の方が見た目かっこいいとさえ思うのだが、少しの手間で批判がかわせるものなら従っておこう。実はこれ以外の記号についても色々あるようなのだが、気にしない。私は良い見本ではないと思って欲しい。

定義の記号について

A という新しい記号を導入してその意味が B という式で表せるのだと定義するとき、 $A \equiv B$ という記号で表すことがある。この記号は義務教育では図形の合同を表す記号として使われているものなので違和感があるかも知れない。普通の等号を使えば済むことじゃないかと私もよく思ったものだ。これは要するに等号を強調したものであり、「これはこう決めたのだから疑う余地無く証明なしで常に等しいのだ」という意味である。

ベクトル、行列について

ベクトル量は太字で表す。例えば、力をベクトルとしてではなく 1 成分だけで考えている時には F を使うが、3 次元ベクトルであることを表すときには $\mathbf{F}$ を使う。この活字の太さの差に注意して欲しい。

また、ベクトルの各成分は通常の太さで表して、右下に添え字でどの方向の成分であるかを示すことにするから、次のような表記になる。

$$\mathbf{F} = (F_x, F_y, F_z)$$

一昔前はベクトルは $\vec{F}$ のように表すことが多かったらしいが、活字の進歩にともなって太字で表すものが増えてきたようである。こんなことまで

わざわざ説明するのは、この本が趣味で物理を学び始めることを勧める本だからである。これから趣味として物理をやっていくと、少し昔に書かれた文献にも目を通す機会がきっと訪れるだろう。色んな流儀があることを知っていてもいい。

また、本書では行列も太字で表現する。行列とベクトルを掛け合わせることがあるが、行列の方が成分が多くて大きい気がするのに、太さで負けていては不恰好だと感じるからである。あまり参考にすべき意見ではないかも知れない。

0.3 どの量をどんな文字で表すか

物理を学び始めたばかりの人から、どのアルファベットがどの物理量を意味するのですか、と質問される事がよくある。実に、そんな決まりはない。好きに使ったらいいのだ。しかしあまり個性的な使い方をするとは非常に混乱を招くので、なるべく伝統に従った方がいいだろう。

この伝統というのが簡単には説明しきれない。force の頭文字が F だから、力には F または f が良く使われるとか、質量は英語で mass だから m がよく使われるだとか、由来が分かり易いものも多くある。一方、有名な論文や教科書でなぜか初めにその記号が使われたから、それ以来それが定着したというだけの理由のものもある。

アルファベットは大文字、小文字合わせて 52 もあるが、それでも色んな量があり過ぎて記号が足りない。例えば、力を F で表すといっても、色んな場所に色んな力が掛かっていたらそれぞれを別の記号で区別する必要があるだろう。ギリシャ語のアルファベットにも手を出したりするがまだ足りない。それで一つの物理量にいつも一つの記号を割り当てるというわけに行かず、記号を使い回したりするわけだ。

本書ではエネルギー E と電場 $\mathbf{E}$ が同じアルファベットを取り合うところだった。これらは両方とも伝統的に E をよく使うのである。しかし電場と言えば $\mathbf{E}$ というのがかなり定着しているので、仕方なくエネルギーを U で表した。

なぜ U を使ったかって？ これも伝統の一つだ。エネルギーは E が予約済みの場合には、アルファベットの後ろの方に並んでいる U 、 V 、 W 辺り

のいかにも強そうな大文字を使って表す傾向がある。これを a とか b とかで表すのはいかにもしょぼくてイメージに合わないのだ。しかし X 、 Y 、 Z などは座標の記号とかぶるので使わないことが多い。今回は V が体積を表す記号として良く出てくるのでこれも避けた。 W もその小文字を他で使っているので紛らわしい。

こんな具合にあちこちに気を配りながら、その場その場で記号を使い回して割り振っているのである。決まった記号などはない。

「本書での記号一覧」なんてのを作ったら読者にとって便利だろうかと検討してみたが、下手な誤解を招きそうなのでやめにした。記号の割り当ては本文中で新しい記号が出て来るたびにしているので、そちらに頼るようにしてほしい。一部、同じ記号を違う意味で使っているところもあるが、前後の説明文を読めば混乱はしないはずだ。

0.4 図が少ないのではないか

しーっ！このことをあまり気にしてはいけない。なぜって、私も気にしているのだ。それで近くの書店に偵察に行って来たわけだが、最近の初心者向けの物理の本では2、3ページに一つの割合で必ず図が入っているようである。売れるために必要な戦略なのだろうか。ちょっと心配だ。

図は役に立つ。あの面白そうな絵のところまでは頑張って読んでみようと考えたり、前にどこまで読んだかを思い出す目印になったりもする。

しかしいい事ばかりでもない。あまり理解の助けにならない漠然としたイメージだけの図だとか、図の意味を考えるのに時間を食ってしまう割には本文以上のことが表現されていない図だとかがたまにあるわけだ。先の方にある図の意味が知りたい一心で読み進んだのに、がっかりさせられる事もある。

読者によっては違う意見もあろうかと思うが、私はイメージを大切にすることが故に図を最小限にとどめる。高度な概念は絵にすると嘘が混じるものだ。読者自身の頭の中に3次元に縛られない自由な図を描いて欲しい。その代わり私は文章で出来る限りのサポートをする。

私が図を描くときは、自身の文章表現の弱さを認めた場合であると考えてもらおうと別の意味で楽しめるかも知れない。ああ、もういっそのこと開

き直ってしまおう。数式というのは、言葉で表すと複雑になってしまう概念を記号を並べて簡潔に表したものである。この本に出てくる数式はすべて図であると考えてみてはどうだろうか。

この本で「図が多い＝分かり易い」という常識を覆すことができれば愉快だなあという試みの気持ちを持っていないでもない。

「準備」の名を借りて、あらかじめ言いたい事を全て言わせてもらったのですっきりした。わざわざ読んでくれて本当にありがとう。では本文へと進むことにしよう。

第1章 力学

1.1 運動量保存則

1.1.1 力とは何か

力学は、簡単だ。要は、止まっている物体はいつまでも止まっている。動いている物体は、摩擦などがなければいつまでも同じ速度で動いている。これが**慣性の法則**。

止まっている物体は力を与えられると動く。動いている物体は、力を与えられると速さを変える。うまく行けば止まることもある。私たちの身の周りには「摩擦」があるので物体が止まるのは日常茶飯事だが、もし摩擦がなければ物を止めるのは非常に難しい作業なのである。

次に、力とは何かということだが、これを深く突き詰めれば哲学的になる。これについては「軽い読み物」を書いたので後で是非読んで頂きたい。気になる人は今すぐ読んで下さっても問題ない。(→ 78 ページへ)

物理なんて、視点を変えればいくらでも別の議論ができるものだ。現に私はこれから普通の教科書とは違うアプローチを取ろうとしている。科学的な議論には定義が大切だ。違う土台に立って話し合うと混乱が生れる。時々その土台をコロコロと変えて議論する人がいるが、そういう人の議論は怪しい。疑ってかかった方がいい。

ここでは、「**物体が運動を変化させる時、そこには力が働いている**」と考えることにしよう。「物体の運動を変化させるもの」それが力だ。

力には大きさがある。力の大きさはどうやって決めようか？ 物体の運動がどれくらい変化したかで決めることにしよう。では、物体の運動っていうのは何だろう？ 速さのことか？ 速さだけではいけない。同じ速さでも重いものと軽いものがある。重いものを動かすのに強い力が要することは日頃の経験で分かる。

第1章 力学

例えば… 速いボールを止めるよりも、ゆっくりと動く列車を素手で止める方が疲れる。… はずだと思う。こんな経験はしたことないからな。車くらいなら、エンジンを止めた車を押したことがある。動き始めた車を止めるのはなかなか手ごたえがある。蒸気機関車をターンテーブルの上で人力で反転させるのを見たことがあるが、あれも大変そうだ。

そこで、重さと速さを掛けることにする。これは物理の世界で「**運動量**」と呼ばれている。重いほど運動量は大きいし、速いほど運動量は大きい。

$$p = mv \quad (\quad p : \text{運動量} \quad m : \text{重さ} \quad v : \text{速さ} \quad)$$

この式を見ると、例えば重さが2で速さが1の物体の運動量と、重さが1で速さが2の物体の運動量は同じだと言える事になる。本当にそうになっているのだろうかという疑問を持って考えるのは素晴らしいことだが現段階ではあまり意味がない。ただそう言えるように「運動量」という量を定義しただけであって、うまく行かなければその時にはもっと便利な量を考えればいいだけのことである。物理はそうやって発展してきたわけだ。実際、このように定義した「運動量」はとてもうまく行く。この「運動量」の概念は自然を矛盾なく単純に理解するための大きな助けになるのである。

話を戻そう。力とはこの運動量がどれだけ変化するかを表すものである。しかし同じ力を長い時間かけているのと短い時間かけているのとでは結果が違って来る。当然、長い時間力をかけていた方が同じ力でも大きな変化をもたらすことになる。そこで、時間と力を掛けて「**力積**」と呼ぶことにしよう。力積は運動量と等しい。いや、言い方を変えた方がいい。「**力積は運動量と等しい**」と言えるように力の単位を決めることにしたのだ。

$$p = Ft$$

この式はつまり $mv = Ft$ ということであり、言葉で表現すれば力の単位を次のように決めたことに相当する。「1kg の物体を 1 秒の内に秒速 1m の速さにまで加速できるだけの力を 1 ニュートンとする。」

こいつを変形してやれば、

$$F = mv/t$$

となって、 v/t は加速度を意味するので、

$$F = ma$$

という、高校で習う式を得ることができる。

学校の教え方ではわざわざ運動量を持ち出さないでいきなり「1kg の物体を 1m/s^2 で加速する力を 1 ニュートンとする」と定義する。私はこの教え方に反対するつもりはなくて、直接的な分かりやすい方法だと思う。しかし、その後で習うことになる運動量とは全く別個の概念であるかのような印象を与える可能性がある。物理にはいろんなアプローチがあって、それぞれ利点欠点があるものだ。生徒がそれぞれの違いを理解できた時、本当に分かったと言えるのだろう。

1.1.2 「重さ」と「質量」

先ほど私は運動量を定義するのに「重さ」という言葉を使った。初めて物理を学ぶ人にとってはその方が分かり易いと思ってそうしたのだが、これは物理学では非常にまずいのである。なぜなら重さというのは環境によって変化してしまう量だからだ。

例えば、月の表面に行けば重力が小さいために物体の重さは地球上での $1/6$ に減少する。また、エレベータが急上昇、急降下するときには体が重くなったり軽くなったりするのを感じるだろう。（最近はそのような不快感を感じさせないエレベータが出てきたので、これからの物理の教育上、不都合が生じることになりはしないかと心配している。）

このように外からの影響に左右され易い量を、物体そのものが持つ性質だと考えてしまってもいいものだろうか。このままでは運動量も重力の強弱によって変化するものだという事になってしまうが、それでは非常に扱いにくい量となる。

例えば重力がないところでは物体の重さが 0 になるが、そのような状況でも物体はまだ「重さ的な量」を持ち続けているようなのだ。「重さ」に非常に似てはいるが、重力に左右されることのない量。それを「質量」と呼ぶことにしよう。前節の運動量の定義のところで m を「重さ」として書いたが、これを「質量」と読み替えてもらいたい。それが運動量の正しい定義である。

第1章 力学

よくよく考えてみると、「重さ」というのは地球が物体を引っ張る力のことである、と解釈できそうだ。いや、地球だと限ってしまってはだめか。月に行けば、月が物体を引っ張る力を「重さ」と呼ぶことになるのだろうか。 「重さ」というのは物理学的には「力」を表す言葉だったのだ。

地球の表面近くで物体を落とすと、物体は 9.8m/s^2 の加速を受ける。これを地球の「重力加速度」と呼ぶ。先ほど求めた式によれば、質量 m と加速度とをかけたものは力である。つまり地球の重力が質量 1kg の物体を引っ張る力の大きさは、 9.8 ニュートンであると言えるわけだ。これが重さの正体である。

しかしこういう話を聞いたからといって神経質になる必要はない。日常生活では重さと質量はほぼ同じ意味であり、区別なんかしなくていい。両方とも単位は「 kg 」がよく使われる。ただ、物理をやっている時だけは概念の違いに気を付けて言葉を正しく選び、間違いが混じらないように気をつけることが大切なのである。

工業系では力の単位として「 kg 重 」（キログラムじゅう）という単位を使うことがある。プレス機などの性能表示では「 kgf 」または「 kgw 」と書かれている事が多い。 1kg の物体にかかる重力の大きさは 9.8 ニュートンだが、これと全く同じことを 1kg 重 だと表現するわけだ。この方が 9.8 をかけなくてもいいので直感的に分かり易い。「ああ、 1kg のおもりを持ったときに手に感じる力と同じだな」とすぐに分かる。

しかし物理ではこの単位は使わない。「ニュートン」という単位で統一している。学校というのは人に知識を与えるための単なる慈善事業ではなく、産業を支える人材を育て上げて国の力を維持することが主目的であるため、こういう産業界からのニーズに応えた内容も教え込まれることになるのである。え？ 最近の中学では「 kg 重 」を教えるのをやめたの？ まあしかし、知っておいて無駄ではなかろう。自分がこれからやろうとしていることに関係あることもないことも色々知っていれば、それだけ幅の広い見方ができるというものだ。

1.1.3 運動方程式の微分形式

先ほどは加速度を a と表して $F = ma$ という式を導いたが、大学ではこの式を微分を使って、

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

と表すのが普通である。これを「**ニュートンの運動方程式**」と呼ぶ。この書きの方が深い意味を含んでいて状況を正しく記述できる。一度これに慣れたらもう戻れないほど便利なのだ。力学が誕生したニュートンの時代からこの方法は存在する。なぜなら微分というのはニュートンやライプニッツなどが力学を正確に書き表すために独自に編み出した方法だからである。

この先まだしばらくは微分の知識を必要とすることはないが、物理では非常によく使う大切な概念なのでここでごく簡単に説明しておこう。少しずつ慣れておいた方がいい。

まず、速さとは何であろうか。簡単に言えば物体が動いた距離をその移動に掛かった時間で割ったものである。しかし長い距離を移動する間、ずっと同じ速さだとは限らない。速さは変化するのが普通である。すると「今の速さ」は幾つだ、ということが気になり始める。しかしどう考えたらいいのだろう。「今この瞬間の速さ」と言われても、ある瞬間には物体はただそこにあるだけであって、動いてはいない。いや、本当に動いていないわけではない。「ほとんど動いていない」だけだ。ごく短い一瞬の時間内に、ごくわずかに動いた距離さえ分かれば速さは計算できる。無限に小さい時間間隔を考えて計算した値はほとんど「その瞬間の速さ」と呼んで差し支えない。ごく短い時間内には速さはほとんど変化しないのだから気にしてはいけない。

つまりごく短い時間間隔 Δt と、その間のごく短い移動距離 Δx を考えて $\Delta x / \Delta t$ という量を作り、 Δt を無限に 0 にまで近付けたときのこの量の値を微分記号で表して瞬間の速さ v であると定義するのである。

$$v = \frac{dx}{dt}$$

0 で割り算することは数学的に矛盾が出るので反則になるのだが、分母の値を徐々に 0 に近付けて、その値がどうなるかを考えることは許されて

いる。

この考えを使って、もう一度先ほどの力積の話からやり直してみよう。力の大きさと時間を掛けたものを力積と呼ぶのだったが、先ほどのやり方では物体に加える力 F の大きさが t 秒間ずっと変わらず一定だという仮定の中で計算していたことになる。そんな珍しい状況は受験問題にはよく出てくるが現実には滅多にないことだ。普通は一瞬のパンチにしても、徐々に力が加わり、徐々に力が抜けて行くものだ。

このような現実的な場面にもちゃんと当てはめることのできる議論をするために微小時間の考えを使うのである。本当に短い一瞬の時間 Δt だけに限れば、その間の力 F はほとんど一定で変化しないと見なせる。そのごく短時間の力積を $F\Delta t$ と表そう。その力積によって運動量はわずかに変化するから、それを Δp と書こう。つまり、 $F\Delta t = \Delta p$ が言える。これを変形して $F = \Delta p / \Delta t$ と書き、 Δt を無限小に近付ければ

$$F = \frac{dp}{dt}$$

が言える。力とは運動量の時間的な変化率であるという意味だ。ニュートンの運動方程式をこのように書き表すこともあるので心のどこかに留めておいてもらいたい。

しかし運動量の変化というのは、普通は物体の速度変化だけが原因である。物体が壊れでもしなければ質量 m の値が勝手に変化する事はないからだ。それで運動量の変化は $\Delta p = m\Delta v$ と書くことができるだろう。つまり、 $F\Delta t = m\Delta v$ であり、変形すれば $F = m\Delta v / \Delta t$ であり、

$$F = m \frac{dv}{dt}$$

だとも言える。 v は移動距離を時間で微分したものであり、ここではその v がさらにもう一度微分されているのだから、

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

と書けるわけである。この式は加速度が一定でない場合にも使える。力が変化するような場面であっても、そのどの瞬間にも当てはめて使える式だということである。

加速度を一定値 a で表す幼いやり方は早い内に卒業しておこう。何しろ力学は生まれたその時から、もう何百年も微分の考え方を使ってきたのだから。

1.1.4 作用反作用の法則

ここまでで「力」の定義については話した。しかし「力」というものは実際には存在しないものであって、運動量が変化する現象を見て「力が働いていると考えよう」と人間が勝手に決めた概念である。このことを理解できるだろうか？

例えば、2つの運動する物体があってこれらが衝突したとする。そのときこれらの物体は運動を変化させるだろうが、私たちが観測できるのは運動が変化したという事実だけである。力というものが見えるわけではない。力という何かが飛び出してくるわけでもない。運動の変化を見て「互いの間に力が働いた」ことを間接的に知るだけである。

これは実際のところ、ただ「運動を変化させるもの …… 力」がお互いの間に働いたと考えよう、としているだけのことに過ぎない。私たちはこの考えに慣れてしまっているだけなのである。**「運動量を交換する現象」を私たちは「力」と呼んでいるに過ぎない。**

ではなぜ、そのような概念をわざわざ物理に持ち込む必要があったのだろうか。それは人間の日常の直観にとって分かりやすく便利だからである。例えば「もっと大きな力があれば…」「この部分に強い力がかかっている」などは、日常でも良く使う台詞である。これら普段使う言葉の意味と物理における「力」の概念は似通った部分が多いのである。

この「力」という概念を使えば物体同士が与え合う影響について次のように簡単にまとめることができる。

作用反作用の法則

力を他に及ぼした物体は、同じ大きさの反対向きの力を及ぼされる。

これと同じ事を「力」という言葉を使わないで言い表そうとすれば、ちょっと苦労する。実はこの後に説明する運動量保存の法則がこれに当たるのだ。

また、この「力」という概念を定義しておけば、物体の重心や釣り合いなどを扱う「静力学」の分野で大変役に立つし、「電磁気学」でも共通して使うことが出来る。「力」というのは大変応用性の広い概念なのである。この分野のことを日本語で「力学」と翻訳しているのは奥が深い。「力」はこの力学という分野の主題であることは間違いない。

— 豆知識 —

力学を意味する言葉は英語では複数あって、物体の衝突などを扱う分野を dynamics と呼び、物体の重心やバランスを扱う分野を statics と呼ぶ。普通はどちらも「力学」と訳すればいいのだが、これらの違いを区別したい時や議論の視点によって、前者を「運動学」あるいは「動力学」、後者は「静力学」と訳し分けることがある。

他にも幾つかあって例えば mechanics という単語もある。これは「構造学」というニュアンスが強いがやはり「力学」と訳されることが多い。例えば量子力学という単語は時に「quantum dynamics」と表現されるが、「quantum mechanics」と表現されることもある。前者はミクロの世界での粒子のぶつかり合いの法則を議論することに主題が置かれ、後者は原子の内部構造、あるいはこの世の内部構造を解き明かす学問であるというニュアンスを多く含んでいるのだろう。

1.1.5 運動量保存の法則

運動量保存則という有名な法則がある。これは簡単にいえば、物体の運動量の合計はずっと一定で決して変わらないということである。運動量が変わらないということは物体がひとりでに速度を変えたりしないということであって、慣性の法則に似ている。実は**慣性の法則は運動量保存法則の一部**なのである。

運動量保存法則には慣性の法則以上の意味がある。2つの物体が衝突する時、衝突前と衝突後の2つの物体の合計の運動量は同じだという意味もある。実に2つの物体の衝突に限らない。いくつの物体でもいい。いくつ

感謝したい。またこの本を作るために様々なツールを使用させて頂いたが、このような便利なものを開発して下さっている皆様にも感謝したい。

「これからも助け合って前へ進んで行きましょう！」

参考文献

この本を書くに当たって参考にさせて頂いた教科書を以下に挙げる。これは私がこの本の執筆中にこれらの本を明らかに「見た」ことを白状するものであり、同時にその著者への個人的な感謝を表すものである。よって初めて物理を学ぼうとする読者に対して、これらの本を参考にするようにと強く薦める意図はない。これらはもちろん良い教科書ではあるが、他にも沢山あるだろうし、私は他の教科書をあまり読まなかったので良くは知らない。もしここで人に薦めるために私の知っているごく一部だけを挙げるならば不公平になるだろう。

原 康夫 著「物理学通論 I」 学術図書出版社（1988）

砂川重信 著「電磁気学」 岩波書店（1987）

砂川重信 著「理論電磁気学（第3版）」 紀伊国屋書店（1999）

外村 彰 著「電子波で見る世界—電子線ホログラフィー」 丸善（1985）

私はこれら以外にも色々な教科書から影響を受けており、それらの著者にも同様に感謝している。しかしまことに勝手ながら本書の内容とは直接関係がないと判断し略させて頂く。

索引

■あ■

アハラノフ・ボーム効果	170
アンペア (単位)	87
アンペールの力	111
アンペールの右ねじの法則	85
esu	226
emu	226
運動学	16
運動方程式	13
運動量	10
運動量保存の法則	17
運動量密度	165
X 線	190
SI 単位系	225
エネルギー	27
エネルギー密度	165
MKSA 単位系	225
MKSA 有理単位系	88
MKS 単位系	225
演算子	214
遠心力	24

■か■

外積	65, 201
解析力学	73, 195
回転 (ローテーション)	84
ガウス (単位)	225

Gauss 単位系	226
ガウスの定理	94
ガウスの法則	
積分形	94
微分形	95
角運動量	49
角運動量ベクトル	60, 66
角加速度	51
角速度	51
慣性系	24
慣性主軸	246
慣性乗積	238
慣性テンソル	238
慣性の法則	9
慣性モーメント	51
慣性モーメントテンソル	238
球状コマ	246
キログラム重	12
首振り運動	59
グラデーディエント	215
クーロン (単位)	87
ゲージ変換	172
光子	165, 197
剛体	236
勾配 (グラデーディエント)	215
古典的電子半径	140

■さ■

歳差運動	59
作用反作用の法則	15
cgs Gauss 単位系	227
cgs 静電単位系	228
cgs 対称単位系	227
cgs 単位系	225
cgs 電磁単位系	228
磁化電流	116
磁化率	118
磁気モノポール	84, 110, 131
仕事	26
自己場	92
自己力	92, 188
質点	46
質量	11
磁場の強さ	114, 117
ジャイロ効果	60
重心	18
重力加速度	12
重力子	41
ジュール熱	145
真空の透磁率	118
真空の誘電率	104
シンクロトロン放射	191
垂直抗力	22
スカラー積	202
ストークスの定理	96
スピン	72, 115
静電単位系	226
制動放射	190
静力学	16
先進波	178

先進ポテンシャル	178
----------	-----

■た■

対称コマ	246
ダイバージェンス	85
ダイン (単位)	228
遅延ポテンシャル	177
力のモーメント	47
地球ごま	60
超関数	224
テスラ (単位)	112
δ (デルタ) 関数	158, 221
電位	98
電位差	98
電気感受率	103
電気力学	81, 194
電気力線	94
電磁単位系	226
電磁波	125
電磁方程式	83
電磁ポテンシャル	169
電子ボルト	99
電束電流	125
電束密度	101
テンソル	150
電流の定義	112
電流密度	108
透磁率	118
動力学	16
特異点	92
トルク	48

■な■

内積	201
----	-----

ニュートン
 人名 13, 23
 力の単位 10
 ネーターの定理 73
 ノイマン (人名) 119

■は■

場 91
 発散 (ダイバージェンス) 85
 波動方程式 134
 場の理論 91
 ビオ・サバールの法則 107
 非対称コマ 246
 微分演算子 214
 非有理系 225
 ファラデー (人名) 90
 ファラデーの誘導法則 120
 フランクリン (単位) 228
 分極 102
 分極ベクトル 103
 分子磁石 115
 分子電流 115
 平行軸の定理 57
 ベクトル積 202
 ベクトルポテンシャル 108
 ベータ崩壊 19
 変位電流 125
 偏微分 1, 3, 37
 ポアッソン方程式 100
 ポインティングベクトル 146,
 165, 188
 保存力 35
 ポテンシャルエネルギー 30, 35

ポールシフト 249
 ボルト (単位) 98

■ま■

マクスウェルの応力テンソル 152
 マクスウェルの方程式 82
 みそすり運動 59
 モノポール 226

■や■

誘電体 102
 誘電率 104
 有理系 225

■ら■

ライプニッツ (人名) 13
 ラザフォード 191
 ラプラシアン 100, 134, 217
 ラプラス演算子 217
 ラプラス方程式 217
 リエナール・ヴィーヘルト・ポ
 テンシャル 181, 183,
 188
 力学的エネルギー保存則 32
 力積 10
 レンツの法則 119
 レントゲン写真 190
 ローテーション 84
 ローレンツゲージ 175
 ローレンツ条件 174
 ローレンツ・ヘヴィサイド単位系
 227
 ローレンツ力 114

【著者紹介】

広江 克彦（ひろえ かつひこ）

1972 年生まれ。岐阜県出身。

静岡大学理学部物理学科卒。

同大学院修士課程修了。

'00 年より、物理学を解説するウェブサイト

「EMAN の物理学」の運営を開始。

その内容が徐々に評価され、

'07 年に『趣味で物理学』を、

'08 年に『趣味で相対論』を、

'15 年に『趣味で量子力学』を上梓。

EMAN（エマン）は中学の頃からのあだ名であり、
ネットでも主にその名前で活動している。

2007 年 3 月 14 日 初版発行

2017 年 4 月 17 日 初版 7 刷

検印省略

著 者 広 江 克 彦

発 行 者 柴 山 斐 呂 子

発 行 所

〒 102-0082 東京都千代田区一番町 27-2

電 話 03 (3230) 0221 (代表)

理工図書株式会社

F A X 03 (3262) 8247

振込口座 00180-3-36087 番

©2007 年 広江克彦

印刷・製本 藤原印刷

ISBN 978-4-8446-0716-8

* 本書の内容の一部あるいは全部を無断で複写複製（コピー）することは、法律で認められた場合を除き著作権者および出版社の権利の侵害となりますのでその場合には予め小社あて許諾を求めて下さい。

* 本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製は著作権法上の例外を除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することは、たとえ個人や家庭内の利用でも著作権法違反です。

自然科学書協会会員★工学書協会会員★土木・建築書協会会員

Printed in Japan