# 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ってしまうことがあるからだ。

## 0.1　本書の構成

まぁ、好きに読んでもらったらいいのだが、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い。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い。

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かっこ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してはいけない。

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、$\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}x}$ 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 $\mathrm{d}f/\,\mathrm{d}x$ と書くことがある。

あまり慣れないことかも知れないが、$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}f$ 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「$\partial$」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 $\Delta x$ のように表す。$\Delta$（デルタ）はギリシャ語のアルファベットの大文字であって、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 $\mathrm{d}x$ 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 $\mathrm{d}x$ 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、$\mathrm{A} \equiv \mathrm{B}$ 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 $\boldsymbol{F}$ 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。

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

一昔前はベクトルは $\overrightarrow{F}$ 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らいたい。

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な。

## 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非常な混乱を招くので、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出てくるだろう。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 $\boldsymbol{E}$ 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 $\boldsymbol{E}$ 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ぁ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ることは日頃の経験で分かる。

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。

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

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くる。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 $1\mathrm{m/s}^2$ 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。（最近はそういう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」であると書いたが、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。

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ら。「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？ まぁしかし、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、

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

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。この書き方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」と呼んで差し支えがない。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 $\Delta t$ と、その間のごく短い移動距離 $\Delta x$ を考えて $\Delta x/\Delta t$ という量を作り、$\Delta t$ 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。

$$v = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$$

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 $\Delta t$ 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 $\Delta p$ 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、$\Delta t$ を無限小に近付ければ

$$F = \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}$$

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、

$$F = m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

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、

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

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 $\cdots$ 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て便利だからである。例えば「もっと大きな力があれば $\cdots$ 」「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

もの物体がめちゃくちゃにぶつかって複雑な運動をしたとしても、その全ての運動量を合計したものはいつでも同じ。未来永劫変わらないということである。

**運動量保存の法則**

どんなに複雑に運動しても合計の運動量は決して変わらない。

運動量の合計と言っても、ただの足し算をしたのではだめだ。運動量には方向がある。速度に方向があるのと同じである。上向きの運動量と下向きの運動量が一緒になったとき、打ち消しあう。右向きの運動量と左向きの運動量が一緒になったとき、打ち消しあう。同じ大きさで反対向きなら合わせると 0 になる。この運動量の方向と大きさを長さの違う矢印で表すことにすれば図に書いて理解しやすいし、計算も直感的で計算しやすい。このような表現をベクトルという。ベクトルで足し算をしないとだめなのだ。この文章を読むような人ならベクトルがどのようなものか理解していると思うのでこれくらいの説明しかしない。分からない人もいるかも知れないが、そういう人は高校の数学の教科書を調べて欲しい。

ところで、物体がひとりでに動き始めることがあるだろうか？ ひとりでに動き始めるというのは何の影響も受けないのに自分自身で動き始めるということだ。このようなことは探しても見当たらないのである。（もしあなたの家でいたずら好きな霊がやっているというのならそれは「ひとりでに」ではないと私は考える。）必ず、物体は他から運動量をもらわない限り運動を変化させることが出来ない。

物が落ちる時、物は地球から重力という形で運動量をもらっており、その分、地球は同じように落下中の物体に近づく運動をしている。あなたが地球上でジャンプする時、地球も蹴飛ばされて下向きに移動している。あなたが壁を押して進む時、地球はその反動で回転を始めるし、走る時、蹴飛ばされた地面は走るのと反対方向に回転しているのだ。ごまかしや詭弁などではない。ただ人が地球に与える程度の運動量では地球のような巨大な質量をごくゆっくりとしか動かせないだけである。非常に僅かずつだが

地球は確かにあなたの動きの影響を受けて動いている。

　しかし、いつまでもあなたのせいで地球が運動し続けるわけではないことに注意しよう。あなたはいつか走るのをやめるだろう。その時、再び地球を蹴って止まる事になるのであなたの影響で始まった地球の回転は止まる。

　運動量が一定であるために、いつもこのような反動が必要なのである。**運動量保存則は作用・反作用の法則と同じ内容を含んでいる。**反動というのは相手に運動量をあげた結果である。

　地球などという壮大な相手を選んだせいで困惑させてしまっただろうか？同じ事は水の上に浮いた丸太の上を歩く時にも体験できる。そういうことを実際にやってみる人はあまりいないだろうが、想像力は大切だと思う。丸太の端から端まで歩く間に丸太も反対向きに移動する。あなたが止まる時、丸太も止まる。あなたが元の位置に戻れば丸太も元の位置に戻る。走って行って、歩いて戻ってきても結果は同じである。

　運動量保存則から、重心の位置は決して変わらないという原則を導くことが出来る。他から運動量をもらわなければ、という条件付きでだ。誰かの船があなたの乗った丸太にぶつかれば丸太とあなたの重心は、船からもらった運動量で移動を始めることだろう。そういう事がなければ、丸太の上でどのように動こうとも丸太とあなたの重心の位置はいつまでも動くことがない。

　試しにその原則を導いてみせようか。まず重心というのは 2 つの物体の質量を $m_a, m_b$、位置を $x_a, x_b$ であるとしたときに、

$$X = \frac{m_a x_a + m_b x_b}{m_a + m_b}$$

と計算されるような位置のことである。この計算にどんな意味があるのかは、この重心位置を原点とするような座標で 2 つの物体の位置を表せば分かる。それは

$$\begin{aligned} x'_a &= x_a - X \\ x'_b &= x_b - X \end{aligned}$$

のように書けるだろう。

これを先ほどの式に代入すると、

$$
\begin{aligned}
X &= \frac{m_a(x'_a + X) + m_b(x'_b + X)}{m_a + m_b} \\
\therefore\ 0 &= m_a x'_a + m_b x'_b \\
\therefore\ m_a x'_a &= -m_b x'_b
\end{aligned}
$$

となる。これは原点の左右にあるそれぞれの物体の、原点からの距離と質量をかけた値が等しくなるという意味だ。つまりシーソーがちょうど釣り合う条件である。重心位置で支えれば両側の 2 つの質量はちょうど釣り合うのである。

さて、2 つの物体の合計の運動量は $m_a v_a + m_b v_b$ と表すことができ、これは一定である。$v_a$ や $v_b$ は $x_a$ や $x_b$ を微分したものであるから、このことを

$$
\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(m_a x_a + m_b x_b) = \text{定数}
$$

と書くことも出来る。つまり前ページの重心の定義式の分子の値の時間変化は一定であるということだ。すなわち、「重心位置は一定速度で移動する」ことが言えるのである。この速度が初めに 0 だったとしたら、その後もずっと 0 のままであり、移動しないということである。式を変形するだけで色々と面白い事が分かるものだろう？

今までの経験から言って、運動量は必ず保存すると言える。物理というのは自然から学ぶものなので、自然界を観察していてそれに反することが見つかればその法則は捨てなくてはならない。

かつて原子核のベータ崩壊現象を観察していて、これは運動量が保存していないのではないか、という結果が出て大騒ぎになった歴史がある。良く調べた結果、ニュートリノというとても見つけにくい新発見の粒子があることが分かってきた。そいつが運動量を持って行ってしまっていたわけだ。結局、運動量は保存していたわけで一同はほっとした。

このように、物理学で言うところの法則というのは、いろんな実験でいつも確かめる必要がある。物理学者はこれらの法則が「成り立つ」と固く信じてはいるが、それに反する現象が起きた場合、良く確かめた上で変更をするだけの柔軟さも持っている。ある法則が破られるということは物理の体系が崩壊することを意味していなくて、物理学の発展を意味している。

それは新しい法則を自然から学ぶチャンスなのだ。物理学者は今まで知っていた法則が成り立たなくなるのを待ち望んでいるものなのである。しかしいい加減な情報に惑わされることは望んでいない。だから彼らはまず疑ってかかるわけだ。もしあなたが、「科学者たちは既存の法則に固執している」というイメージを持っているとしたら、その考えは少々偏っていると指摘しておこう。

運動量の保存法則は今まで決して破られていない。言い方を変えれば、運動量の保存法則に反する現象は、現時点では見つかったことがないのである。

### 1.1.6　動いてないのに力を感じるのは変じゃないか

ここまでに「力とは運動量を交換する現象である」と書いてきたが、本当にそう言い切れるだろうかと気になり始めたのでこれを書くことにした。違うのではないかと思わせる現象が日常に多く見られるのである。もしこれらを説明できなければ、残念ながらここまでに書いた文章を撤回しなければならない。

例えば、磁石はどうだろう。磁石の同じ極同士を近づけると「力」を感じる。それは反発させる力だ。磁石をぐっと近づけて動かないように手で固定したとしよう。依然として力を感じる。しかし動かしていないのだから運動量は変化していないはずだ。どうして運動量が変化していないのに力を感じるのだろう。

これから連想するに、バネも同じだ。バネをぐっと押し縮めてそのまま動かないようにしておくために力が要る。しかし何も動いてはいないのだから運動量は変化していないのではないだろうか？

そうなると、風船に空気を詰めてグッと押しつぶした場合も同じではないか。バネと同じように元に戻ろうとする弾力を感じる。

これらをどう説明したらよいだろうか？ これを書いている今、私は非常に困っているのであるが … 。それでも … おお！ 風船の場合はわりと簡単に説明出来そうだ！

## ゴム風船の弾力

風船をつぶした時、中に押し込められた空気は前より激しい分子運動をする。多数の分子は風船のゴム膜に何度もぶつかって元の位置まで広がろうとする。この内部の空気の分子がゴム膜にぶつかって跳ね返される時、分子の運動量が変化している。もちろん、ぶつかられた風船のゴム膜はその分の運動量を受けている。しかし、風船の反対側でも同じような反対向きの運動量を受けているわけだから風船全体としての運動量は打ち消しあっており、風船は勝手に動き始めることが無いのである。

風船を押した時に手に感じる弾力はこの空気の分子が衝突した時の運動量を風船のゴム膜を通して感じているのである。風船をつぶす時、あなたはこの空気の分子の弾丸を知らず知らず押し返しているわけだ。両手で左右から風船をつぶす時、右手と左手に反対向きの運動量が与えられるから、あなたが運動量をもらったからと言って動き始めることは無い。しかし丈夫なでかい風船に体当たりすれば、あなたはボヨヨンと跳ね返されることだろう。空気の分子から運動量を受けた結果である。

さらに、空気入りのクッションの上に寝転がった場合について考えてみよう。あなたはクッションの上で運動量を受けることなくじっとしていられるように思える。しかし、この場合も運動量の交換は常に行われている。あなたは地球から運動量を受けていつも下に落ちようとしているわけだが、それをクッションの中の空気の分子の無数の弾丸が、そうはさせるかとあなたを下から狙い打っている。その反動であなたはクッションの上に浮いていられるのである。あまりにも微妙なバランスで、しかもそれが高速で行われているので、あなたは止まっているように感じていられるわけだ。しかし、あなたの下では激しい運動量の交換合戦が行われている。空気の分子はクッションの下側でも地球に運動量を与える戦いをしているので地球はあなたの体に与えた運動量をそこできっちり返してもらっている。

## ゴムひもとバネの弾力

さて、ゴムひもの弾力というのも実はゴムの分子の運動の結果であって、同じように説明できる。ゴムの弾力の正体についてここでは詳しく述べないが、熱力学や統計力学の分野の教科書を読んでもらえれば載っているのではないかと思う。少し複雑なので、ここでは省略させてもらおう。

　では、バネの弾力についてはどうであろうか？ これは風船とは少し違う。バネの弾力は金属の分子が変形に対して元に戻ろうとする力で、その原因は元を正せばお互いの分子間位置を保とうとする分子の間に働く電磁力である。これについても詳しくは自分で勉強してもらいたい。私も詳しくないのだ。金属の場合には金属結合が関連しているだろうとは思うが、最近はバネと言ってもプラスチック、セラミック、ゴムのようなものにいたるまで色々違いがある。同じバネでも力の原因がどこまで共通していてどこが違うのかっていうところが説明しきれない。詳しく言えば全く違うのだが、磁石の場合と状況が似ていないこともない。

## 磁石から受ける力

　それで、最も説明が難しいと感じていた磁石の場合についてだが、風船の説明を色々したお陰で、説明が楽に出来るようになった。要するに磁石同士も常に運動量を交換しているのだ。これは素粒子論の考え方なのだが、磁力というのは運動量を持った仮想光子を互いに交換することによって生じている。当然互いを近づければそれだけ交換する量が増えて、強い力を感じるようになる。もし手で支えていなければ、互いに反発する向きに運動量を受けて動き始めることになる。それを動かないように止めておくためには、手で磁石に運動量を与えてやる必要がある。磁石を押さえる手はじっとして動かないように見えるけれども、微妙なバランスで磁石に運動量を与えているのであろう。これが力を感じる原因である。

　このように、止まっているように見えても運動量が交換されていることはいくらでもある。机の上に箱が置かれているような日常の光景の中でも、箱は重力によって地球から運動量を常にもらっているし、机と箱の接する面ではお互いの分子がお互いを蹴飛ばしあって運動量を交換して箱が机にめり込まないように抵抗している。これが中学校で習うところの「垂直抗力」である。

　力というのはやはり、運動量の交換のことだと言って良いようだ。力とは単位時間に移動する運動量のことであり、力が釣り合っているというのは、微小時間内に外から与えられた運動量の合計が打ち消し合っている状態のことを言うのである。

### 1.1.7 ニュートンの 3 つの法則

現代は、過去に例を見ないほど多くの知識を容易に手に入れることが出来るようになった。そしてその知識は洗練されている。そのせいか、現代人が歴史上もっとも知性的であるという錯覚に陥っている人々が多いことだろう。

私も過去の偉人に対して今の土台を築いてくれたという理由で感謝はしていたが、尊敬するほどの理由を最近まで見出せないでいた。ニュートンについても昔の人ということで軽く見ていたところがある。これらはすべて私の勉強不足による。ニュートンの業績は思うよりもはるかに大きいものである。それだけではない。彼の定式化は今見ても見事なほどであり、ひょっとして彼が現代に蘇ったとしても、天才として活躍できるのではないか、とさえ思う。

ニュートンは自身が発見した力学体系を 3 つの法則としてまとめ上げた。

**第 1 法則（慣性の法則）**

物体は外部から作用を受けなければその速度は一定である。動いているものは動き続け、止まっているものはいつまでも止まっている。

**第 2 法則（力の定義）**

物体の加速度は物体に作用する力に比例し、物体の質量に反比例する。数式で表すと次の通りである。

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

**第 3 法則（作用反作用の法則）**

物体が他の物体に力を及ぼす時、その物体は同じ大きさの反対向きの力を他方の物体から受けている。

これらは現代的に洗練した形のものであって、初めからこれほど分かり易く表現されていたわけではないし、厳密でない部分もあった。しかし私

は先駆者のあら捜しをするのは良く思わない。過去の誤りを正すのは大切な仕事ではあるが、鬼の首を取ったかのように騒ぎ立てるのは正しい態度とは思わない。

上の 3 法則はここまでの私の説明にもすでに出てきたものである。ニュートンは運動量という概念を多分私より良く知っていたはずだが、それを基本法則としては使わなかった。そこには色々な事情がある。

まず第 1 法則から見てみよう。第 2 法則で $F=0$ だとすれば、加速度は 0 であることが分かるので、第 1 法則は不要であるかのように思われる。しかしこの法則は別名、「慣性系の定義」とも呼ばれており、続く第 2、第 3 法則が成り立つ舞台設定をしている重要な部分である。

当時は「力」というものについてギリシャのアリストテレスの時代からの考え方が強く残っていた。槍を投げた時、遠くまで飛んでいくのは力が働いているからであり、力は働き続けている … そして力が完全に消え失せたところで落下する、という考えである。この考え方には非常に共感できる。私自身も小学生の頃までは向かいの畑に棒を投げながら同じ考え方をしていたのである。学研の伝記漫画でガリレオガリレイの話を読んだときには相当驚いた。何もしていないのに物体がどこまでも動き続けるなんて、あり得ない !!

つまり、第 1 法則でこれまでの世界観を打ち砕く必要があったのだ。いや、これはすでにガリレイがやったことなのだが、当時はまだ念を押しておく必要があった。だが、第 1 法則の意義はそれだけではない。

我々は電車の中で、電車が動き始めるときに体が倒れそうになるのを感じる。直接体に力が働いていないのに体が加速を受ける。また回転する台の上に乗っていると遠心力を感じる。これらは誰かが自分を引っ張っているわけではなく、そう感じるだけである。これらの見かけの力を感じない立場を「**慣性系**」と呼ぶ。

第 1 法則は慣性系を説明しているのであって、それが大前提。それ以外の状況の中では続く第 2、第 3 法則をそのまま適用すべきではない、ということを言っているのである。

第 2 法則は、加速度を基にした「力の定義」。アリストテレス的な見方を否定した以上、それに代わる定義が必要だ。第 1 法則がなければ、この定義はあいまいなものになるであろう。力がどれだけ加わった時にどれだけ

の加速を受けるか、という説明に過ぎない気もするが、科学思想史の視点から分析した場合、やはりこれは力の定義という意味が強い。

ニュートンは天体の運動や我々が地球に引き付けられている力を「万有引力」として統一的な理解ができるようにまとめ上げた人であるから、力を中心とした世界観を表に出してまとめるのはごく自然なやり方であろう。また運動方程式を数式ではっきり表現した意義は大きい。

第 3 法則は、思想的には彼のオリジナルである。すでに定義された力というものが持つ性質を簡潔に言い表している。慣性系以外で感じる「見かけの力」はこの法則を満たしていない。第 1 法則の存在がいかに大切かが分かるというものだ。

## 1.2　エネルギー保存則

### 1.2.1　エネルギーとは何か

運動量保存の法則の他に、物体の運動を理解するために大切な法則がもう一つあって、**エネルギー保存の法則**と呼ばれている。この法則は、物が勝手に宙に浮いたり何も理由がなく突然はじけたりといったポルターガイスト（騒霊）現象みたいなことが起こることを防いでいる。ちなみに、もしこのようなことが起こっても運動量保存の法則にとってはまるで問題ない。物がふわりと宙に浮いても、その分だけ地球が下向きに移動すれば済むことであるし、物がはじけても、全体の重心の位置さえ同じなら全く構わないのである。

静止している 2 つの物体がお互いを押し合うことで動き始めても、合計の運動量が 0 のままならば運動量保存則に反することにはならない。しかしそこら中のものが勝手に相手を突き飛ばして動き始めるようなことが起きないでいてくれるのは、物体の運動がエネルギー保存則というもう一つの条件に従っているからである。

物体はエネルギーが与えられない限り勝手に動き始めることが出来ないのである。どうしてそうなっているか私は知らないが、とにかくこの世界はそのようになっているのだ。⋯ 物体は与えられたエネルギーの分しか運動できない。そして、そのエネルギーという量は他から他へ移動することがあっても、決して無くなることはなく、いつまでも一定である。これが

エネルギー保存の法則である。私たちは普段、「エネルギーを使い切った」「エネルギーが無くなった」という表現を使うが、正確には「エネルギーが他に移った」と言うべきものである。

なぜ、エネルギーが他から与えられなければ運動できないのだろう？ 普段、当たり前に思っているこのエネルギーというものを考え直してみようと思う。何か別の理由があって、エネルギーが保存しているように見えているだけかも知れない。

ここまで何の説明もなしに「エネルギー」という言葉を使ってきたが、そもそも「エネルギー」とは何なのだろうか？ その説明の為にまず「仕事」という概念を定義することから始めよう。あらかじめ言っておくと、この「仕事」という概念が「エネルギー」と同じものを表すことになるのである。

**仕事の定義**

物体に力が加わっており、その物体が、加えられた力の方向に移動した場合、その力と移動距離をかけあわせた量を「**仕事**」と呼ぶ。

うまく定義したものである。いくら物体に力を加えても物体が動かなければ仕事をしたことにはならないというのだ。これは私たちの日常の感覚と少し違うかも知れない。私たちは物が動こうが動くまいが、一生懸命力を加えたらそれだけで筋肉に疲れを感じる。そして大仕事をしたと感じることであろう。

しかし、力を加えられた側の物体にとっては（そしてその物体を動かす為に人を雇った側の人間にとっては）何にも変化していないのだ。これでは仕事をしなかったのと同じである。

この「仕事」という概念はいかにも効率を重んじる文化圏らしい考えだと思う。精神論に傾きがちな日本では「やる気があって実際に物体を押してみたのだから評価してやるべきだ」という考えに陥って、もし日本で独自に物理学が誕生したとしてもそれ以上先へ進めなかったのではないかと思ってしまう。

この仕事という概念が、物理をうまく説明できるように試行錯誤を経て徐々にこの形で定義されるようになったのか、それとも初めから文化的な背景を基にしてこのような形で現われたのかについては興味があるが、とにかく「仕事」という量はつじつまが合うようにうまく定義された量なのである。

では仕事の定義が出来たので、簡単な例を計算してみることにしよう。

質量 $m$ の物体を高さ $h$ にまで持ち上げる時の仕事を計算してみよう。計算と言っても簡単である。物体には重力がかかっており、その大きさは $mg$ である。持ち上げる時にはその重力に逆らって上向きの力を加えなくてはならない。$mg$ の力で距離 $h$ だけ持ち上げたのだからそれをかけてやれば、仕事の量は、

$$W = mg \times h = mgh$$

となる。これが高校で習うところの位置エネルギーである。

次に、速度 $v$ で運動する質量 $m$ の物体を止めるのに必要な仕事の量を計算してみよう。計算が簡単になるように、終始一定の力 $F$ をかけて止めることにする。質量が $m$ の物体に力 $F$ をかけたら、そのときの加速度は $a = F/m$ である。$v = at$ であるから、物体は $t = v/a$ 秒後に停止するであろう。$t$ 秒後には物体は $s = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}av^2/a^2 = \frac{1}{2}mv^2/F$ だけ進んでいるから、距離 $s$ と力 $F$ をかければ、仕事の量は

$$W = F \times s = \frac{1}{2}mv^2$$

となる。これが高校で学ぶ、運動エネルギーの式である。動いている物体は止まるまでに $\frac{1}{2}mv^2$ の仕事を他の物体にすることが出来るし、高いところにある物体は、落ちながら他の物体に対して $mgh$ の仕事をすることが出来る。

ここまで来るとエネルギーの説明もしやすい。**エネルギーというのは、物体が仕事をする能力のことである。**つまり「仕事」という言葉と「エネルギー」という言葉は実は同じものを表しているのであって、ただ言葉の使い方の違いだけである。「仕事」の方を動詞的に使い、「エネルギー」の方は名詞的に使う。「エネルギーがある」という表現をするが「仕事がある」とは言わない。「仕事をする」という表現はするが「エネルギーをする」と

は言わない。しかし「エネルギーを与える」という言葉と「仕事をする」という言葉は同じ意味である。

ちなみに「エネルギー」の語源は、ギリシア語の en（「中へ」の意を表す接頭語）＋ ergon（仕事）から来ている。

エネルギーという概念が大切なのは、それが保存する量だからである。しかしここまではエネルギーの定義を説明しただけであり、なぜこの量が保存するのかという肝心な部分については何も説明していない。学校でも状況は同じである。中学や高校では、実例をいくつか紹介して「確かに保存しています」と説明するだけであり、大学では「自分で考えなさい」と教えられることになる。つまり、教えられないということなのだが、学生はそれまでに「エネルギーは保存するもの」と納得させられているので特に疑問にも思わないで進むことになる。

実はこの問題を考えると少々深い議論へと踏み込む必要があり、少なくとも日本の教育では軽く見られているようである。多くの人にとってこのような議論は無用なことなので仕方ないのかも知れないが、物理学の学生にとっては鵜呑みにすべき問題ではないと思う。だが私もこの説明文を書き始めるまでは鵜呑みにしてきたので偉そうなことは言えない。

エネルギーが保存する理由にはいくつかの側面があって、場合分けして考える必要があり、今すぐ簡単に説明できそうもない。少し休憩して、一つずつゆっくり考えてゆくことにしよう。

### 1.2.2　エネルギーと運動量は何が違う

前節の文章を書いている途中でふと次のようなことを考えた。エネルギー保存則は、運動量が 0 の状態の 2 つの物体がお互いを突き飛ばすことによってそれぞれが運動量を持つようになることを禁止しているようだ。

もしこの考えが、止まっている状態の 2 つの物体だけでなく、動いている場合にも拡張できるのならば、わざわざエネルギーなどという新しい概念を作らなくても、代わりに「運動量の絶対値の保存法則」とかを作ってやればよさそうであり、より直観的に理解し易くなるのではないだろうか？

もしこういったことが出来るなら、物理から「エネルギー」と言う言葉を完全に消し去ってやることが出来るわけで、代わりに「運動量」だけで全

てを説明してやれるではないかと目論んだのである。しかし、この試みはうまく行かなかった。運動量だけではどうしてもエネルギー保存法則の代わりになるような法則を作ることが出来ないのである。衝突の前後で保存する量を作ろうとすると、質量も入れる必要が出てきて、結局エネルギーと同じものを定義する羽目になってしまう。

なぜ私がエネルギーという概念を素直に受け入れようとせずに、「運動量」だけで何とか説明できないだろうか、と抵抗するかと言うと、「エネルギー」というものが一体何なのか、うまく説明できないからである。もちろん、定義や数式を使って説明することは出来る。しかし、突き詰めていくと納得のいく簡単な言葉での説明が難しいのである。最後には「エネルギーはエネルギーだ、慣れろ」としか言いようが無い。

なぜうまく説明できないかと言えば、それは、根本の部分でエネルギーと運動量があまりによく似ているからである。

一体、「エネルギー」と「運動量」は、何が違うと言うのだろうか？ 運動エネルギーだけに関して言えば、エネルギーと運動量は両方とも「運動の勢い」を表す量であって、こいつらを分解すれば両方ともただの「質量」と「速度」の組み合わせに過ぎない。「運動の勢い」を表すだけならどちらを使っても差し支えないではないか。それであるのに、2 物体の衝突後の速度を求める時には「運動量保存則」と「エネルギー保存則」の二つの条件が必要になってくる。

もし物体が 2 種類の独立した全く性質の違うものをそれぞれ持っているというのならば法則が 2 つあってもそれほど不思議ではないのだろうが、なぜこの同じような意味を持つ量が別々に物体の運動を規定しているのだろうか？

言葉を替えて言い直そう。物体はなぜ衝突の前後で「運動量保存則」と「エネルギー保存則」の二つを律儀に守ろうとするのであろうか？ 衝突の前後で「速度」がどう変化するかだけを求めたいのに、法則は 2 つ必要。そこが気持ち悪さを感じる原因である。

物体自身はこの 2 つの法則を別々に考えて従っているわけではないであろう。何か一つのそうせざるを得ない仕組みが裏に隠されていて、結果として自動的に 2 つの保存法則を守ることになっているに違いない。それを人間の理解しやすい形式で解釈すると、あたかも 2 つの法則に従っている

ように見えるだけなのである。私はそれを何とかして一つの法則として理解したいと思うのである。

エネルギーが運動量と違う点は、運動していなくても「どこかに蓄えられている」事だ。例えばバネをギュッと押し縮めた時、運動はしていないがこれは元に戻ろうとする力を秘めている。そしてこの力は物体を運動させることが出来る。

磁石の同じ極同士を近づけた時にも、再び反発する力があり、エネルギーが蓄えられている。運動はしていないが、エネルギーは「在る」のである。

この蓄えられている状態のエネルギーを、運動エネルギーに変化する「潜在能力（ポテンシャル）」があるという意味で**ポテンシャル・エネルギー**と呼ぶ。位置エネルギーはポテンシャルエネルギーである。

ポテンシャルエネルギーは運動エネルギーとは意味合いが違うようだ。しかしポテンシャルエネルギーと運動エネルギーは相互に変換することが出来るし、これらの合計はいつも変わらないのだ。運動エネルギーが減ればどこかにポテンシャルエネルギーが蓄えられているし、ポテンシャルエネルギーが減る時には運動エネルギーが増えることになる。これは「運動量」と「エネルギー」の大きな違いである。

また、相対性理論では $E = mc^2$ という大変美しい公式が導かれていて、エネルギーが質量と同じであることを表している。

どうやらエネルギーという何かは力学で定義される以上のもっと深い意味を持っているようであり、運動量と一緒にして葬り去ってしまうにはあまりにもったいなすぎる概念のようである。このあたりは後で相対論について考えようとする時には突き詰める必要がありそうだ。

さらに専門的には運動量は「力」を時間で積分したものであり、エネルギーは「力」を空間座標で積分したものである。相対論では時間と空間座標を対等の立場のものとして考えるので、運動量もエネルギーも同じ形式で表現することができる。この形式を使えば、エネルギーも運動量も「エネルギー運動量テンソル」と呼ばれる一つの実体として表され、保存則も一つにまとめることが出来る。運動量保存則とエネルギー保存則という 2 つの大切な法則が一つにまとめられるのは大変素晴らしいということで、私も初めはこの形式に話を持って行くつもりでいたが、この形式は「力」を