



運動の法則



物理がわからない人は
物理に向いている！

受験を離れて物理を学びたい人へ

蔭山篤司



目次

はじめに	3
力とは何か	
力とは何か	7
力の「合成」「分解」	10
慣性の法則	
慣性の法則	17
動いていることの痕跡とは	19
慣性の法則と相対性原理	22
運動の法則	
運動の法則	25
自由落下	29
水平投射	33
斜面上の物体の運動	37
斜面上の物体のつりあい	39
作用反作用の法則	
作用反作用の法則	43
ニュートンの運動の3法則	
	49

はじめに

この本は別の「物理が苦手な人のための物理の本」の中から「運動の法則」の部分を抜き出したものです。

物理が苦手だと感じている人はなぜ苦手と感じているのでしょうか。多くの人は、計算がいっぱい出てくるからとか、授業の内容がわからないとか、教科書に書かれていることをそのまま受け入れることができなくて、自分には理解できない！とってしまうからではないでしょうか。でもそのようにわからないことを、わかったつもりにならないで、疑問を持ち、理解できないことを簡単に納得しない姿勢は、実は物理を学ぶ上で、本当にとっても大切な姿勢です。自分は何がわかっていないのか、自分の疑問は何なのかを追求することが大切です。実は、自分の疑問を明確な言葉にできれば、もう答えの近くまで辿り着いています。私がまだ大学院生だった頃、何度となくいくつかの大学の（教授等の）研究者が、「疑問（質問）を明確にできれば答えは既に出ている」と言っているのを聞きました。確かにそういう場合が多くありました。もやもやしている疑問を明確な言葉にできた時、その疑問に対する答えも出てくることしばしばあります。答えが出てこなくても、疑問が明確な言葉にできれば、「自分は何を理解していないのか」、「何が分かれば理解できるのか」がはっきりします。だから、自分の疑問を明確な言葉にしようという努力が大切です。

私がまだ学生だった頃、物理を教えてほしいと、家庭教師を頼まれたことがありました。その子は、三度目の高校1年生でした。というのも、物理で欠点がついて、留年が続き、三度目の高校1年生だったということでした。彼は、授業で聞いたことや、教科書に書いてあることをそのまま飲み込むことができず、納得できないままだったので前に進めずにいたのです。家庭教師を始めてからその納得行かない部分を1つずつ解きほぐしていくと、少しずつですが先へ進むことができました。そのまま進み続けると実力を伸ばしていき、3年後の受験では、とある大学の物理学科を希望し、トップで合格しました。その後、卒業まで成績もよく、卒業時に優秀者に与えられる賞を貰ったそうです。分からないことを分かったつもりになって進んでしまわず、こだわって突き詰めて考えることがとても重要だと教えられました。

この本は、これから物理を学ぼうとしてる人や、物理を学んでいるけど、難しいと感じている人、物理を学び終わったけど、なんだかよく分からずに終わってしまった人、物理は難しそうで今まで避けていた人等、いろいろな方に読んでいただきたいと思って書きました。なので、受験にすぐに役立てたいとか、受験勉強に追われている人にはちょっと向かないかもしれません。一歩さがったところで、少し気持ちに余裕を持って物理を眺めてみたい、ぐらいの感覚で読んでいただけたらと思っています。この本では主に定

性的な話をしていきますが、もちろん、受験では定量的な議論を求められ、そのためには計算がどうしても必要です。ただ、計算ができれば理解できているのかというと、必ずしもそうではないと思います。やはり、定性的な深い理解があって、その上に計算で定量的な議論があるはずなので、計算の前に深い理解が必要です。また、時には計算が邪魔になって理解が進まなくなることもあります。計算は一旦置いて、理解しようという姿勢が大切です。計算はどうしても必要になったときにすればいいです。

数式は使わないので、細かい定量的な話は出てきません。その分、物足りないと思う人も多いと思いますが、式を使わずにとりあえず物理を理解したいという人を念頭において話を進めていきます。というわけで、この本では計算はほぼ出てこないのも、気楽に読んでいただけたらいいなと思っています。

自分の疑問を明確な言葉にすることに全力で取り組んでください。

力とは何か

力とは何か

(この本では扱いませんが) エネルギーを理解するには「仕事」を理解する必要があります。「仕事」を理解するのに必要な「力」についてここで説明します。物理の中でも特に力学の分野では、物体に力がはたらくとどうなるか、ということが主題となります。そこで「力とは何か」から出発します。

おそらく、いきなり「力とは何か」と聞かれても、漠然としていて答えようがないと思うでしょう。なので、物体が力を受けるとどうなるのか、ということから考えてみましょう。まず、物体が力を受けると(補足1) どうなるか、思いつくままに挙げてみましょう。

動く、止まる、折れる、曲がる、伸びる、等々
があげられるでしょうか。まだまだ限りなくあるでしょうが、これらは大きく2つに分けることができます。1つは「形の変化」に関する事、もう1つは「動き」に関する事です。前者は、一言で言うと、「物体が力を受けると変形する」という内容です。後者は単に「動き」と言ってもあまりに漠然としているので、もう少し詳しく考えてみましょう。止まっている物体が力を受けると動き出したり、逆に動いている物体が力を受けると止まったり、力を受ける向きによってはより速くなったり、より遅くなったり、運動の向きが変わったり、いろいろありそうです。他にないか、頭を絞ってみてください。実際に私が思いつかないようなことを挙げる生徒もいます。いろいろ挙げましたが、どれも、速さが変わるか、向きが変わるか、その両方か、ぐらいにまとめられるでしょうか。前の章(「科学的、論理的に考えるとは?」)で話したように物理では、「速さ」と「向き」をあわせて「速度」と呼んでいるので、動きに関する変化は全て一言で、「物体が力を受けると速度が変化する」と表すことができます。(「速さが変化する」という表現では「向きが変化する」という内容が漏れてしまいます。)
「速さ」と「速度」は似ている言葉ですが、区別して使っていることに気をつけてください。というわけで、物体が力を受けた時のもう1つの変化は、「速度が変化する」です。「速度か変化する」とは、上に挙げた全て、止まっているものが動き出したり、逆に動いているものが止まったり、より速くなったり、より遅くなったり、運動の向きが変わったり、これらが全て含まれます。なので、力のはたらきは物体の「変形」と「速度の変化」の2つにまとめられるので、「力とは何か」という問に対する答えは、「物体を変形させるはたらき」と、「物体の速度を変化させるはたらき」である、ということになります。この二つのはたらきを覚えておいてください。忘れないでください。ただし、この本では主に運動について考えますので、「物体を変形させるはたらき」についてはあまり触れることはないと思います。

また物体がどんな力を受けているかを表すためには、「力の向き」と「力の大きさ(強さ)」を表す必要があります。これら両方を同時に表すのに、「矢印」が用いられます。

矢印の向きで力の向きを表し、矢印の長さで力の大きさを表します。物体が力を受けている点を「力の作用点」と言い、作用点を通り力の方向に引いた直線を「力の作用線」と言います（図4「力の作用点作用線」）。

（補足1）

「物体に力を加える」、「物体に力がはたらく」、「物体が力を受ける」等は全て同じ内容を表していますが、経験上生徒は「物体が力を受ける」という表現の場合に一番誤解なく言葉の表す内容を受け止めてくれます。「物体に力がはたらく」という表現は、3、4割の生徒が「力を受ける物体」と「力を及ぼす物体」を逆に受け止めてしまうようです。

（注）物体の大きさを意識しなければならない場合があり、その時は、物体のどこに力を加えたかを明確にしなければならず（同じ物体でも作用線が異なる位置に力を加えると力のはたらきが変わります）、その物体の回転を考えなくてははいけません、この本では物体の大きさや回転については考えなくてよい場合のみを扱います。

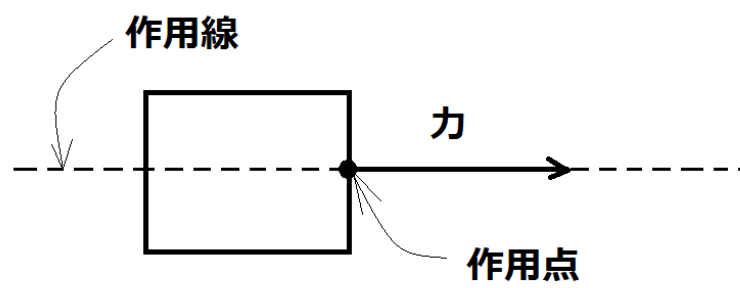


図4 力の作用点作用線

力の 「合成」 「分解」

ここまで、1つの物体が1つの力を受けたらどうなるかを考えましたが、1つの物体が2つ以上の力を受けることもあります。1つの物体が受ける2つ以上の力は、まとめて1つの力にすることができます。どういうことかという、1つの物体が力を2つ以上受けていたとしても、同時に2つの方向に運動できるわけではなく、1つの方向に運動するので、その運動と同じ運動を再現する1つの力が存在するということです。つまり1つの物体が受ける2つ以上の力を、物体の運動が同じものになるような1つの力で置き換えることができるということです。このような2つ以上の力と全く同じはたらきをする1つの力を「合力」と言い、「合力」を求めることを力の「合成」といいます。この合成の方法については「補足2」で詳しく説明しますが、矢印で力を表し、簡単な作図で1つの力にすることができます。2つの力を合成すると1つの力になるので、合成を繰り返せば、物体が力をいくつ受けていたとしても、最終的に1つの合力が得られます。そうすれば、物体に1つの力がはたらいている場合に帰結するので、物体に1つの力がはたらいているときにどうなるがわかっているに十分だということになります。当然ですが、着目している1つの物体が受けている全ての力の合力によって、物体がどのような運動をするかが決まります。ですから、着目している物体が受けている力を全て把握しなければ、どんな運動になるかは（厳密には）分かりません。（ただし、影響が小さな力であれば、無視してもほとんど物体の運動に影響がありません。後で話しますが、どのくらいの精度で物体の運動について知る必要があるのかによって、どこまで小さな力を考えなければならないか変わります。）また、特に「合力=0」の場合、この物体が受けている力は「つり合っている」といいます。この場合については、後の「慣性の法則」のところで話します。

合成とは逆に1つの力を2つの力に分けることもできます。これを力の「分解」といいます。分解によって得られた2つの力を元の力の「分力」といいます。このとき、力を好きな2つの方向に分解することができるので、分解の仕方は無数にあります。2つの力を合成して得られる合力は唯1つに決まりますが、1つの力を2つの力に分解する分け方は無数にあるということです（少し違う話ですが、 $3 + 5 = 8$ ですが、和が8になる2つの数は無数にあるのと似ています）。分解して得られた力を「分力」といいます。分解の方法は合成の逆の操作をすることになります（補足3）。

何のためにわざわざ合成したり分解したりするんだと思う人もいます。これはこの章の後で説明します。

（補足2 力の合成）

（方法1 平行四辺形を描く）

力を矢印で表したとき、2つの力を表す2つの矢印の始点を一致させて、それが2辺となる平行四辺形を描きます。その平行四辺形の矢印の始点から対角線の矢印を描くと、それが合力を表す矢印になります（図5「力の合成」A）。力が3つ以上の場合、どれか2つの力を先に合成し、できた合力と残った力をもう一度合成します。これを繰り返せば、全ての力を合成することができ、最終的に1つの合力が求まります。

（方法2 矢印をつなぐ）

もちろん方法1と結果は同じになりますが、もう1つの合成の方法は、1つの力の矢印の先端（終点）にもう1つの力の矢印の根本（始点）を一致させて（繋ぎ）、1つ目の矢印の始点と2つ目の矢印の先端を結んでできる新しい矢印が2つの力の合力を表す矢印になります（図5「力の合成」B）。力が3つ以上あっても、同じように全ての矢印をつないで、最後に1つ目の矢印の始点と、最後の矢印の終点を結ぶ矢印が合力を表します。

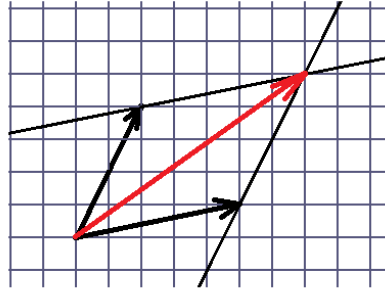
（補足3 力の分解）

力を分解するには、力の合成の逆の操作をしますが、分解の仕方は一通りには決まらず、無数にあります。何故かという、分解したい力が対角線となる平行四辺形は無数に存在するからです。始めに、分解したい力の矢印の始点を通る直線を2本引きます。この直線の方が力を分解する方向になります。この2つの直線はどんな方向でもよいので、必要に応じて方向を選んでも構いません。次に、今引いた2本の直線にそれぞれに平行で、矢印の終点を通る直線を2本引きます。これで平行四辺形が描けました。分解したい元の力の矢印の始点から延びるこの平行四辺形の2辺に矢印をつければ分解した力（分力）が求まります（図6「力の分解」）。

力を分解する2つの方向は、その場合毎に、必要な方向を選びます。多くの場合は、物体が運動する方向（物体が面上にあれば面に沿った方向等）とそれに垂直な方向に分解して、物体の運動がどうなるか調べます。

力の合成

A 平行四辺形による合成



B つなぐことによる合成

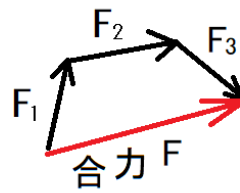
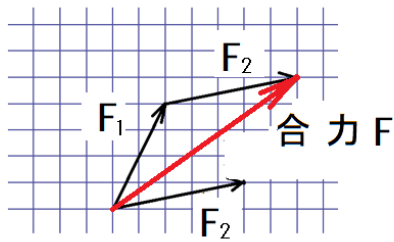
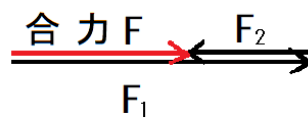
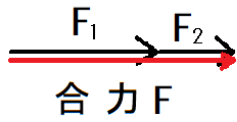


図5 力の合成

力の分解

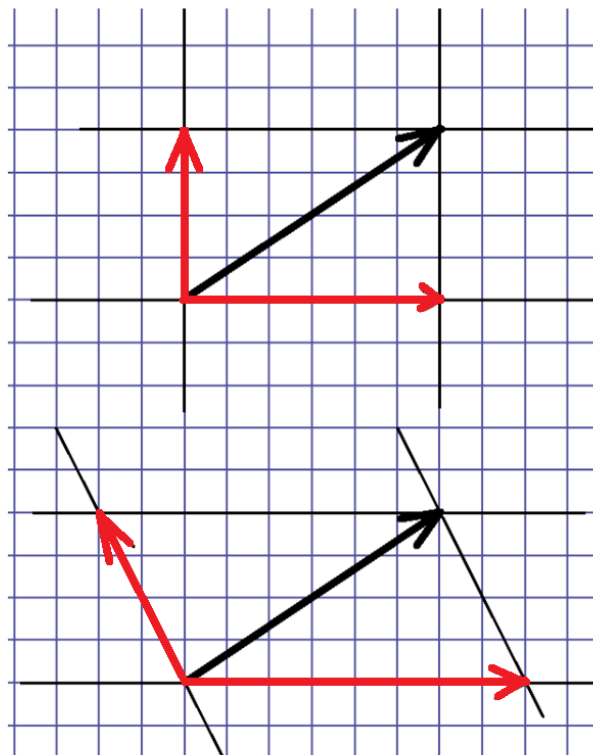


図6 力の分解

慣性の法則

慣性の法則

ここから「物体の運動」と「力」の関係について話していきますが、まず物体が受けている全ての力の合力が0になっている場合どうなるのか、どんなことが言えるか、ということから考えてみましょう。合力が0になるのは、力をそもそも何も受けていないか、あるいは受けている全ての力を合成した結果0になっている場合になります。また、前に述べたように「合力が0」のとき、これらの力は「つり合っている」と言います。はじめに（論理的な思考ではなく）直感で構わないので、次のそれぞれの文が正しければ○、正しくなければ×をつけてみてください。

- ア 物体が全く力を受けていないとき、物体の速さはだんだん遅くなる
- イ 物体が全く力を受けていないとき、等速直線運動している物体は、やがて静止する
- ウ 物体が受けている力がつり合っているとき、物体は必ず静止している
- エ 物体が等速直線運動しているとき、物体が受けている力はつり合っていない
- オ 物体が力を全く受けていないとき、物体は必ず静止している
- カ 物体が受けている力がつり合っているとき、物体は必ず等速直線運動している
- キ 物体が全く力を受けていないとき、物体は静止または等速直線運動を続ける
- ク 物体が受けている力がつり合っているとき、物体は静止または等速直線運動を続ける

力のはたらきを思い出してもらおうと、合力が0でなければ合力の方向の速度が変化しますが、合力が0であれば、速度は変化しません。速度が変化しないということは、物体の運動の速さや向きが変わらない、ということです。言い換えると、静止している物体は静止し続け、動いている物体はまっすぐ同じ速さで動き続ける（「等速直線運動を続ける」と言います）ということです。そしてこの「合力が0であれば速度は変化しない」ことを「慣性の法則」といいます。また逆に、「物体の速度が変化していなければ、物体が受けている力の合力は0である」ことも成り立っています。

合力が0の場合の法則が「慣性の法則」（またこの法則を「ニュートンの運動の第1法則」ともいいます）で、合力が0でない場合の法則が次に説明する「運動の法則」（またこの法則を「ニュートンの運動の第2法則」ともいいます）、というわけです。先程述べたように、1つの物体が受けている全ての力の「合力が0である」ことと、「これらの力がつり合っている」ということは同じことなので、「合力=0」＝「速度は変化しない」＝「つり合っている」ということです（補足4）。日常生活においては、「物体が力を2つ以上受けているのに静止している」状態を「力がつり合っている」と言いますが、「静止」の他に「速度を変えずに運動（等速直線運動）している」場合も「力がつり合っている」と言います。物理的には「静止」と「等速直線運動」は見る人の立場が違うだけで、同等になります。これについては後で少し詳しくお話します。（「動いていることの痕跡とは？」）

上の選択肢のアは、力を受けていなければ速度は変化しないので正しくありません。イは、力を受けていなければ動いている物体はそのままの速度で動き続けるので正しくありません。ウは一見正しそうですが、「必ず静止」ではなく、等速直線運動をしている可能性もあるので正しくありません。エは、力がつり合っていなければ合力が0でないので、速度が変化することになり等速直線運動にはなりませんから正しくありません。オも一見正しそうですが、合力が0のとき、等速直線運動の可能性もあるので、必ず静止しているわけではなく、やはり正しくありません。カも力がつり合っているとき、静止の可能性もあるので正しくありません。結局、正解はキとクの2つです。

動いていることの痕跡とは

ここでは、一つ想像してみることから始めましょう。この想像は、これまでの経験を思い出し、経験に基づいた想像をしてみましょう。

あなたは今、窓のない乗り物の中にいるとします。立っていても、座席に座っていてもいいです。寝台列車の個室でもいいし、バスでも構いません。その乗り物が動いていることを、どんな手掛りから判断するでしょうか？ ガタガタ揺れれば動いているのかな？ と思うでしょう。しかし、地面、もしくはレールがとてもなめらかで、全くガタガタしなければどうでしょうか？ 昔、大学生の頃、卒業旅行でヨーロッパに行った時、イタリアからフランスに入るとき、電車に乗りました。既に暗くなっていたのと、カーテンを閉めていたのとで外は見えませんでした。そろそろ発車の時間だけだな、と思って外を見ると、既に発車していました。一本一本のレールが日本に比べてとても長く、レールのつなぎ目もなめらかだったので、全く揺れませんでした。そのため動いてることに全く気づきませんでした。加速度がとても小さくて、加速を感じず、ガタガタもしなければ、その時は動いてることを知る手掛りはありませんでした。もちろん、人間の感覚には限界があるので、何かもっと精密な実験をすれば、動いていることを確認できたかもしれません。もし、乗り物の中で、動いてる気配を何も感じていなかったときに突然、後ろに倒れそうになったり、横に倒れそうになったり、あるいは前に倒れそうになったりすればどうでしょうか？ 減速したか、後ろ向きに加速したか、カーブを曲がったか、あるいは前方に加速したか、等と動いてる痕跡を見つけることができるのではないのでしょうか。

このように、速さが変わったり、進んでいる向きが変わったりすればそれを感じたり、確認することができます。人間が感じ取れないぐらいゆっくりとした加速でも、床にビー玉を置いてみれば、前に転がったり、後ろに転がったり、横に転がったりして、何かその乗り物の速度に変化があったときにはそれを確認できます。あるいは、天井からおもりをぶら下げてみても良いでしょう。そのおもりの傾き方を観察すれば、速さや運動の向きが変わったか、変わっていないかの判断はできます。また、御存知の通り、地球は自転しているので、地球上にいる人は全て、宇宙空間に対して少しずつですが向きを変えながら回転しています。だから、地球上であれば、外が見えなくても、少しずつ向きが変わっていることは確かめることができます。例えば振り子を往復運動させ続ければ、振り子の往復する面が少しずつ回転していきます。一日で一周回ります。何かもっと精密な実験をしてみても良いでしょう。そうすれば、速さや運動の向きに、ほんの僅かであっても変化があれば必ず測定によりその痕跡を見つけることができます。

しかし、速さも運動の向きも変わらなかったら（この運動を等速直線運動と言います）どうでしょうか？ 何か、動いているか止まっているか確かめる方法はあるでしょう

か？何か「動いている痕跡」を見つけることができるでしょうか？地球から離れた宇宙空間で、速さも運動の向きも変わらなかった時、動いていることを知る手掛かりはあるのでしょうか？もし「静止している」のか「まっすぐ同じ速さで動いている（等速直線運動している）」のか確かめる方法があるとすれば、この宇宙の中に静止しているかどうかの基準となる「静止している座標系」を見つけることができるはずですが、もしこの「静止している座標系」が存在するとすれば、これを「絶対静止系」と言います。ガリレオやニュートンが、こんな座標系は存在しない、と考えていたのかどうかははっきりとはわかりませんが、少なくとも、ガリレオもニュートンも静止しているとしても、等速直線運動しているとしても、その違いを確認する方法はなく、運動を決定する法則は全く同じである、と考えていました。つまり、静止している系と、等速直線運動している系を区別することはできない、と考えていました。絶対静止系の存在を確かめる方法がないのであれば、存在しないのと同じだと思いますが、区別できないけど、絶対静止系が存在すると考えていた可能性はあるかもしれません。

電磁波の存在がわかってきた頃、そして光が電磁波の一種であることがわかってきた頃、「絶対静止系は存在するのではないか」と考える学者もたくさんいました。そう考えるのには理由がありました。それは、光が真空中を伝わるからです。波動が伝わるためには媒質が必要で、光は電磁波であることがわかっていたので、光が伝わるための媒質が存在するはずであると、多くの物理学者が考えていました。当時、この「媒質」は「エーテル」と呼ばれていました。このエーテルが静止して見える系が絶対静止系ではないかと考えられました。光がエーテルを媒質として進むのであれば、光を発する物体の動きによらず、発せられた光はエーテルに対して同じ速さで進むはずですが（ということは、エーテルに対して動いている観測者には光の速さが違って見えるはずですが）。これは、風がない時、すなわち空気が静止しているとき、音を発する物の動きによらず、音は空気に対して同じ速さで伝わるのと同じです。地球は自転や公転をしているので、もしエーテルがあるとすれば、エーテルに対する地球の速さは、季節や、一日の中でも違うはずですが、だとすれば、公転や自転により光の速さが違った値として観測で確認できるはずだと考えられていました。しかし、いつ、どのように光の速さを測定しても、光の速さは常に同じ速さで観測されました。結局、エーテルの存在は否定され、絶対静止系を見つけることはできませんでした。現在では、絶対静止系は存在しないと考えられています。それは、静止しているのか、等速直線運動しているのかを区別する方法がないということです。静止しているように見えるか、等速直線運動しているように見えるかは、見る人の立場（見る人の動き）によって違って見えるだけで、どちらも同等です。この様な、静止している座標系や等速直線運動している座標系をまとめて「慣性系」と呼びます。

あなたがじっとして、目の前のテレビや本棚などが同じくじっとしているように見えていると思いますが、地球を離れたところ、例えば公転の中心の太陽の位置から見ると、地球の公転のため、およそ秒速 30km で動いているように見えます。本当に静止しているといえる座標系はないのです。

慣性の法則と相対性原理

「物体が受けている力の合力が0のとき、物体の速度は変化しない」というのが慣性の法則ですが、「速度が変化しない」というのが、実は誰から見て「変化しない」のかがこれだけでははっきりしていません。もし、この宇宙に絶対静止系があるのなら、絶対静止系に対して「静止」や「等速度」と言えばいいのですが、絶対静止系は存在しないと考えられています。そこで、何も力を受けていない物体が速度を変えないように見える座標系が存在すると考えて、この様な座標系を「慣性系」と名付けます。つまり、慣性の法則が成り立つ座標系を「慣性系」と言います。なので、慣性系に於いて「慣性の法則」が成り立つのは定義により明らかです。ただ、この様な「慣性系」が存在するかどうかは自然界が決めることで、存在しなければそれまでです。慣性の法則は、「慣性系」が存在するという主張でもあります。そして、この「慣性系」で見ると、ニュートンの運動の第2法則である「運動の法則」が成り立ちます。そして、全ての慣性系は対等で、絶対静止系のような特別な座標系はありません。全ての物理法則はどの慣性系に於いても同じ形で表されます。特にニュートンの運動の法則が全ての慣性系で同じ形で表されるということをガリレイの相対性原理と言います。これは物体の速度が光の速さに比べて十分小さい状況に於いては良い精度で成り立っています。しかし、物体の速さが光の速さ程度になると、ニュートンの運動の法則は成り立たなくなります。光の速さ程度の状況でも全ての慣性系が同等で、物理法則が同じ形で表されるべき、というのがアインシュタインの相対性原理です。

「慣性系」、「慣性の法則」が全ての土台となっているのです。もし、慣性系が存在しなければ、物体が力を受けていないのに速度が変化したり、加速度が力に比例しなかったりと、慣性の法則も運動の法則も成り立ちません。

運動の法則

運動の法則

ここで1つ次の質問をしてみます。これは実際に「力とは何か」を学んだ後、生徒にしている質問です。今度は二択です。

問 物体が「1つの」一定の力を受け続けるとどんな運動をしますか？

A 一定の速度で動き続ける

B だんだん速くなる

どうでしょうか？ 力とはどんなはたらきかを思い出せば自然に答がでてきますが実際に質問してみると回答は2つに分かれます。適当な勘ではなく、頭で想像して考えて答えたのであれば、良いと思います。学んだことを踏まえて考えたのであればなお良いと思います。中には、学んだことを踏まえて考えたのに、想像と違って、分からなくなってしまう生徒もいます。それも良いと思います。その時は、なぜ想像と学んだことが違ったのか、考えてみましょう。聞いてみると、Aを選んだ生徒が、物体に1つの力を加え続ける実験として思い描いたもの（思考実験）は、例えば（水平な）机の上の筆箱を一定の力で押し続けるような実験でした（実際に机の上で筆箱を押しながら考えていました）。確かに、この実験をすれば、一定の速度で動き続けることが予想されます。でも、この想像（思考実験）は、質問に対する想像（思考実験）として正しいでしょうか？ この実験の例において、この筆箱が受けている全ての力を改めて考えてみましょう。あなたが押し続けている力だけでしょうか？ 実は、あと、少なくとも3つの力を受けています。考えてみましょう。

1つは、地上のあらゆる物体が受けている力で、重力です。もう1つは、筆箱が机の面から受けている重力と逆向きの力（垂直抗力と呼ばれる力です）です。自分の言葉で「机が筆箱を支えている力」と言っても気持ちは伝わるので正解です。そしてもう1つは摩擦力（補足5）で、物体が動いている向きと逆向きに受けています。重力と垂直抗力は、どちらも机の面に垂直な方向の力で、逆向きで同じ大きさなので合成すると0になります。もし0でなければ、どちらか大きな力の方へ（机の面にめり込むか面から離れ

て面に垂直な方向に)速度を変化させながら運動(加速度運動)をすることになります。机の面に沿って運動するはずなので、机の面に垂直な重力と垂直抗力の合力は0であるはずですが、残った机の面に沿った方向の2つの力(摩擦力と、あなたが筆箱を押している力)が同じ大きさであればやはり合力は0になり、あなたが押している力は打ち消され、一定の速度で動き続けることになります(押す力が摩擦力より大きければ加速度運動になりますが)。想像としては正しいのですが、1つの力を受けているときの実験には適していません。

では、どんな実験を想像すれば良いのでしょうか。地上では無重力の状態は実現が難しいので、どうしても重力はかかってしまいますが、重力は垂直抗力と合成すると0になるので、この2つの力のはたらいてない場合と結果は変わりませんから、重力ははたらいていてもよいとしましょう。とすると、摩擦力が邪魔な力になります。摩擦力も、全くなくするのは難しいですが、できるだけ小さくして、無視できるような実験であれば、質問の答を確かめる実験として利用できるでしょう。そこで、摩擦力が小さくなるような、車輪の付いた台車を引っ張る実験を想像すれば、想像により、正しい答えを導けたと思います。実際、Bを選んだ生徒が想像した実験は台車を引っ張るような実験でした。

この台車に力を加えて、生じる加速度を詳しく測定する実験を行うことにより、最初の章(「科学的、論理的に考えるとは?」)で話しました「運動の法則」を導き出すことができます。まず、台車を一定の力で引き続けると、力の向きに一定の加速度が生じます。引く力の大きさを2倍にすると台車の加速度も2倍になります。このように台車を引く力を大きくすると、その力に比例して加速度が大きくなります。また、引く力を変えずに、おもりを乗せて台車の質量を大きくすると、台車とおもり全体の質量に反比例して加速度が小さくなります。この時、加速度の向きは、力の向きに一致しています。こうしてニュートンは運動の法則を導き出しました。2つの実験の結果をまとめると、「物体に生じる加速度は物体に加える力に比例して、物体の質量に反比例する」ということになり、これを1つの式で表すことができます。この式において比例定数が出てきますが、ニュートンはこの比例定数が1になるように新しく力の単位を作りました。この様にしてニュートンが定めた力の単位が「N」(ニュートン)です。力の単位に「N」を用いれば、運動の法則の比例定数は1なので顔を出しません。それまでの力の単位は、「重さ」すなわち地球が地上の物体を引く力(重力)と比較して定めていましたが(補足6)、ニュートンは、物体に生じる加速度の大きさによって力の大きさを決めました。具体的には、質量1 kgの物体に1メートル毎秒毎秒の加速度を生じさせる力の大きさを1 Nと決めました。なので、それまでの力の決め方とは全く違う考え方で力の大きさを定義したことになります。この時、「物体に加えた力」と「物体の質量」と「物体に生じる加速度」の関係(加速度は力に比例して質量に反比例する)を表した式を「運動方程式」といいます。比例定数が1で、「加速度は力に比例して質量に反比例する」ので、「加速度=力 \propto 質量」という式で表せます。また、同じ式ですが「力=質量(B加速度)」とも書けます。

改めて「運動の法則」を整理すると、
「物体に力を加えると力の向きに加速度が生じて、その加速度の大きさは加えた力に比例し、物体の質量に反比例する」となります。着目している物体が複数の力を受けている時、運動方程式に出てくる「力」は、着目している物体が受けている全ての力の「合力」となります。

少し補足すると、運動の法則において、生じる加速度の方向は合力の方向に一致しており、合力に垂直な方向の合力の成分は0なので、合力に垂直な方向の加速度は0であり速度は変化しません。これは慣性の法則と同じ内容になります。つまり合力を求めた後、合力の方向とそれに垂直な方向に分けて、それぞれの方向毎に運動の法則や慣性の法則を用いて運動を調べることができる、ということになります。合力の方向には「運動の法則」によって加速度が生じ、合力に垂直な方向は「慣性の法則」によって速度は変化しない、ということです。

（補足4 「慣性の法則」と「運動の法則」）

先程も話したように「慣性の法則」は「運動の法則」における「合力=0」の場合になります。運動の法則により、加速度の大きさは合力の大きさに比例するので、「合力=0」なら「加速度=0」、すなわち「速度は変化しない」ということになります。

（補足5 摩擦）

日常生活に於いて摩擦の影響を受けることがしばしばあると思いますが、この摩擦はどのように扱えばよいのかというと、摩擦は「摩擦力」という力であり、物体が受ける「力」として取り入れます。というわけで、物体が受けている力の1つとして扱います。

摩擦力には2種類あります。物体が静止しているときに受けている摩擦力を「静摩擦力」と言い、物体が面上を滑っているときに受けている摩擦力を「動摩擦力」と言います。静摩擦力は物体が静止しているということから、物体が受けている他の力と釣りあってなければなりません。物体が水平な面に沿った方向に引っ張られている時、その引っ張る力と静摩擦力は釣り合っています。引っ張る力が0であれば静摩擦力も0であり、引っ張る力が大きくなれば、静摩擦力も同じ大きさで大きくなります。引っ張る力がある限界を超えると物体は滑り始め、静摩擦力から動摩擦力に切り替わります。動摩擦力の大きさは、引っ張る力を変えても、ほぼ変わらず通常一定であるとみなします。静摩擦力の限界値（これを最大摩擦力と言います）や動摩擦力の大きさは、面と物体が押し合う力の大きさに比例します。すなわち、物体が重かったり、物体が面に押し付けられたりしていれば、最大摩擦力や動摩擦力は大きくなります。この時の比例定数を「静摩擦係数」や「動摩擦係数」と言います。

（補足6 力の単位）

ニュートン以前の人たちは力の大きさを重力と比較して表していました。例えば、ばねばかりで質量 2 kg のものを吊るせば、ばねは伸びます。今度は手でばねばかりを引っ張り、それと同じだけ伸びたとすれば、手が引く力の大きさは質量 2 kg の物体にはたらく重力と同じ大きさの力です。この力の大きさを 2 kg 重（2 キログラムじゅう）と決めました。「重さ」は本来重力の大きさなので、力の単位で量るべき量ですが、日常生活の中では、「重」を省略して「kg」や「g」のように質量と同じ単位で表しています。そのため、重さと質量が混同して使われています。

自由落下

唐突ですがちょっと想像して、考えてみてください。できるだけ、理由も考えてみましょう。空気の抵抗は無視できるとします。これは「運動の法則」を学んだ後に生徒にしている質問です。

問 重いものと軽いもの（質量の大きなものと質量の小さなもの）を同じ高さから同時に落とすとき

- A 重いほうが先に地面に到達する
- B 軽いほうが先に地面に到達する
- C 同時に地面に到達する

これは、どこかで聞いたことがあるという人も多いと思います。先に「空気抵抗は無視できるとします」と言ってしまいましたが、もし「空気抵抗は無視できるとします」と言われなかったらどうでしょうか？ その場合、重いものと軽いものを何と何にするかによって、答えが変わるのでしょうか？ 変わらないのでしょうか？ ここから考えるのも面白いと思いますが、話が難しくならないようにここでは空気抵抗の影響が無視できる場合で考えてみましょう。落とす物体の具体的な例として、400 gの砂袋と、数gの短くなったチョークで考えてみてください。重さは数百倍違います。授業では、しばしばこの2つで実験してみせます。

この空気抵抗を無視できる場合の答えを知っている人も、理由を考えてみて下さい。と言われても「知ってるか、知らないかだけじゃないの？」とか、「理由と言われても何から考えたらいいかかわからない」という人も多いと思いますから、考える手掛かりを1つ示しましょう。それは、ニュートンの運動の第2法則で、「運動の法則」と言います。名前だけ聞くと、運動全般に関する法則であるかのように聞こえますが、そうではありません。この法則は、「物体に力がはたらくと、力の方向に（のみ）加速度（注1）が生じる。その加速度は、物体に加えた力に比例し、物体の質量に反比例する」というものです。どういうことかということ、物体にはたらく力が2倍になると、加速度が2倍になり、物体の質量が2倍になると、加速度が半分になる、ということです（※重さと質量は全く異なる概念ですが、重さは質量に比例します（補足2参照））。この法則を踏まえて、生徒に上の質問をすると、ほとんどの場合回答は、3つに分かれます。みなさんは、どうなるか、予想ができたでしょうか？ 理由も考えることができたでしょうか？ 生徒に自分が選んだ答えの理由を聞くと、理由を答えてくれます。私は、その理由、すなわち論理が正しければ、3つのうちのどれを選んでも少なくとも半分は正

解だと思っています。逆に、正解であっても、理由が、「以前に聞いたことがあったから」では正解とは言えないと思います。まず、Aを選んだ人に理由を聞くと、「重いほうが。重力が大きいから、加速度が大きくなるため」と答えてくれます。ガリレオ以前の多くの人は、実験することなく、あるいは実験をしたとしても鳥の羽と鉄球を落とすような実験により、「重いほうが先に落ちるに決まってる！」と考えていたようです。「鳥の羽が後から落ちる」のは空気抵抗が無視できない場合になりますが、この結果を根拠に「全ての場合において重い方が先に落ちる」とガリレオ以前の人は考えていたのでしょう。

先程の「A」を選んだ生徒の考えは、運動の法則の前半部分、「力が大きくなると、加速度が大きくなる」を理解して論理的に考えることに役立てています。なので、その部分に関しては正しいと言えるでしょう。ただ、少し正しくないのは、ニュートンの法則では、同じ物体に対して加える力を変えた場合の話であって、物体が異なる場合にはこの法則を正しく使ったとは言えないということです。

次にBを選んだ生徒に理由を聞くと、「質量が小さいほうが加速度が大きくなるから」とか、「軽いほうが加速しやすいから加速度が大きくなる」と答えてくれました。この答えは、ニュートンの法則の後半、「加速度は物体の質量に反比例する」ことを理解して答えられています。結果を知らずに自分で考えてBを選んだ人は結構、物理のセンスがある方だと思います。ただ、少し正しくないのは、ニュートンの法則において、質量が2倍になると加速度が半分になるのは、同じ大きさの力がはたらいている場合の話で、今の間に関しては重さ（質量）が違う物体であり、それぞれの物体にはたらく重力が違っているので、やはり正しく使ったとは言えないということです。

最後にCと答えた生徒に理由を聞くと、「前に聞いたことがあったから」という返事の生徒が多いです。答えは正しいのですが、論理的な理由がないので十分な正解とは言えないでしょう。結局、正解はCです。重くなると、確かに重力は大きくなります。ただし、その分質量が大きいので、加速しにくくなります。例えば、質量が10倍になると、重力が10倍になりますが、質量が10倍なので加速度が10分の1になり、結果として、同じ大きさの加速度になります。すなわちどんな質量の物体でも、結果として同じ加速度で落下することになります。飽くまで、空気抵抗が無視できる場合ですが。

私が今までに見たことのある全ての高校の物理の教科書では、運動の法則より前に、加速度運動を学んだところで、落下を扱い、「地上のあらゆる物体は等しい加速度9.8メートル毎秒毎秒で落下する」と、唐突に書かれています。考える余地を与えず、事実が述べられています。これには理由があるのですが、せっかく運動の法則を学ぶのだから、考えて加速度が等しくなることに辿り着かせたいところです。まあ、落下運動を加速度運動の練習問題として扱いたいのと、ゆっくり考えさせる時間的余裕が無いからだとはわかりますが。

このように、物理法則のような考える手がかりを根拠として考えを進めることが、論理的な思考です。この、根拠となる物理法則を正しく理解して使い慣れることが論理的な思考を助けてくれます。とにかく、理解した法則を使い慣れることです。そうしていく中で、法則の理解も深まっていくと思います。始めのうちは、誤った使い方もあると思いますが、その時は何が正しくなかったのかを振り返る必要がありますが、次から修正すればいいだけのことです。そうやって間違いを繰り返しながら、より深い理解に進

んでいくので、恐れずに物理法則をつかって考えてみましょう！

(注1) 加速度

単位時間あたりの速度(注2)の変化。高校の物理では単位時間はほとんどの場合1秒とするので、1秒あたりの速度の変化と書いていいです。すなわち、1秒で何m/sの速度が変化するかを表す量になります。加速度には向きがあります。その向きは速度の変化の向きに一致します。直線運動のときは、加速すれば加速度の向きは運動の向きと同じで、減速しているときは加速度の向きは運動の向きと逆向きになります(図1「速度の変化」)。

(注2) 速度

「速さ」と「運動の向き」を合わせて考える量を、「速さ」と区別して「速度」といいます。例えば、「10メートル毎秒」は「速さ」であり、「東向きに10メートル毎秒」は「速度」です。「速さ」は速度の「大きさ」です。

(補足1)

一般に「向き」と「大きさ」を持つ量をベクトルといいます。「力」や「加速度」も「向き」と「大きさ」を持つのでベクトルです。ベクトルは矢印で表すことができます。ベクトルの「大きさ」を矢印の「長さ」で表します。

(補足2) 「質量」と「重さ」

「重さ」とは、地上の物体にはたらく「重力の大きさ」のことなので、単位は「力」の単位で[N]や[kg重]等です。重力は地上と月面上等、場所によって違う値となります。なので「重さ」も場所によって異なります。月面上での重さは地上での重さの約6分の1です。ばねばかりではかれます。一方、「質量」は「物質の量」であり、場所によって変わることはありません。単位は[kg]や[g]であり、天秤ではかれます。

(まとめ)

ベクトル = (向き、大きさ)

(例)

速度 = (向き、速さ)

※速さは速度の大きさ

力 = (向き、力の強さ)

※力の強さは力の大きさ

重力 = (向き、重さ)

※重さは重力の大きさ

加速度 = (向き、加速度の大きさ)

水平投射

ここで、水平投射について考えてみましょう。新たに学んだ法則も使って考えてみましょう。

水平投射とは、ある高さの崖の上から、ボールを水平に投げることを言います。まずボールに力を加えて水平に投げるところから想像してみましょう。手からボールが離れるまでの間は、手からボールに力が加わり、止まっていたボールが速度を持ちます。そして手からボールが離れた後、どのような運動をするのか考えるためには、手から離れたボールがどのような力を受けているのか考えてみる必要があります。ここでも話が複雑にならないように空気の抵抗は無視できる場合について考えてみます。ボールはどんな力を受けているのでしょうか？ 最初に思いつくのは重力でしょう。ボールは重力を受けていますね。これは、鉛直下向き（補足7）の力です。他にボールが受けている力はないのでしょうか？ 実際に生徒に図の中に力の矢印を描いてもらおうと、重力と、他にもう1つ飛んでいく向き（水平方向）に矢印を描いている生徒がたくさんいます。集団によっては約9割の生徒が描き込む場合があります。それがどういう力か聞いてみると、「飛ばうとする力」と答えてくれます。「飛ばうとする力」とは何でしょうか？ 何かがボールに力を及ぼしているのでしょうか？ 確かに、投げる瞬間は手でボールに水平方向の力を加えたので水平に飛び出しました。しかし、手から離れたボールには、もはや手から力を及ぼすことはできません。なので、実は水平方向には力ははたらいていないのです。そうすると、手から離れたボールが受けている力は、鉛直下向きの重力のみということになります（図7「水平投射」）。

投げ出されたボールはその後、文字通り、放物運動をすることになりますが、これがどんな運動なのか、考えてみます。曲線を描く運動なので、難しそうですが、このような平面内（水平方向にx軸、鉛直方向にy軸をとったときのxy平面内）での運動を簡単に考える方法があります。それは、考える方向を分けて考えることです。というのは、ボールが受けている力は鉛直下向きの重力のみなので、力を受けている鉛直方向と、それに垂直な、力を受けていない水平方向に分けて考えます。

始めに水平方向から考えてみましょう。ボールは水平方向には力を受けていません。それなのに飛んでいくのは何故でしょうか？ ここで、力がはたらいていない場合の法則を思い出してください。これは、「慣性の法則」（ニュートンの運動の第1法則）でした。「力がはたらいていない場合は、速度が変化しない」という法則ですね。手から力を受けて速度を得て、その後手から離れると手から受ける力はなくなります。すると水平方向には、慣性の法則により、手から離れる瞬間に得た速度を維持しながら水平方向に進んでいきます。力を受け続けているから飛んでいくのではなく、慣性の法則に従って進んでいくのです。

次に、鉛直方向について考えてみます。鉛直方向には重力がはたらいているので、「運動の法則」（ニュートンの運動の第2法則）に従います。重力を受ければ加速度が生じます。このときの加速度は、自由落下のときに話したように、質量に関係なく等しい加速度9.8メートル毎秒毎秒です。結論として鉛直下向きに加速しながら落下し、水平方向には等速で飛んでいく、そんな運動であることが理解できます。

（補足7 鉛直方向）

おもりを糸で吊るして静止させた時、この糸の方向を「鉛直方向」と言います。鉛直方向のうち、地面（地球の中心）を向く向きを「鉛直下向き」と言い、その逆向きを「鉛直上向き」と言います（図8「鉛直方向」）。（この2つの向きを合わせて「方向」と言います。似ている言葉ですが、「向き」と「方向」は区別して使われます。例えば、「東向き」、「西向き」であり、「東西方向」です。）単に「下向き」や「上向き」と言うと、状況により指している向きが異なるので曖昧さがあります。それに対して「鉛直下向き」や「鉛直上向き」は誰に対しても唯一つに定まった向きを表すので、曖昧さがありません。なので物理ではこの様な表現を使います。

水平投射

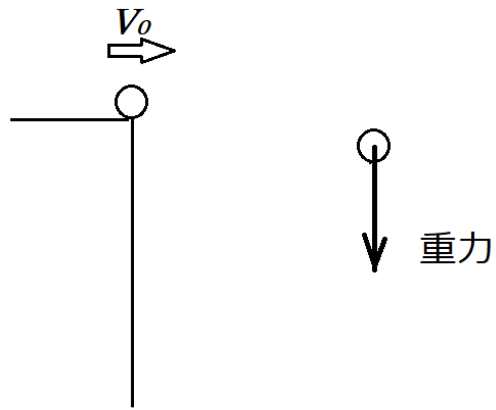


图 7 水平投射

鉛直方向

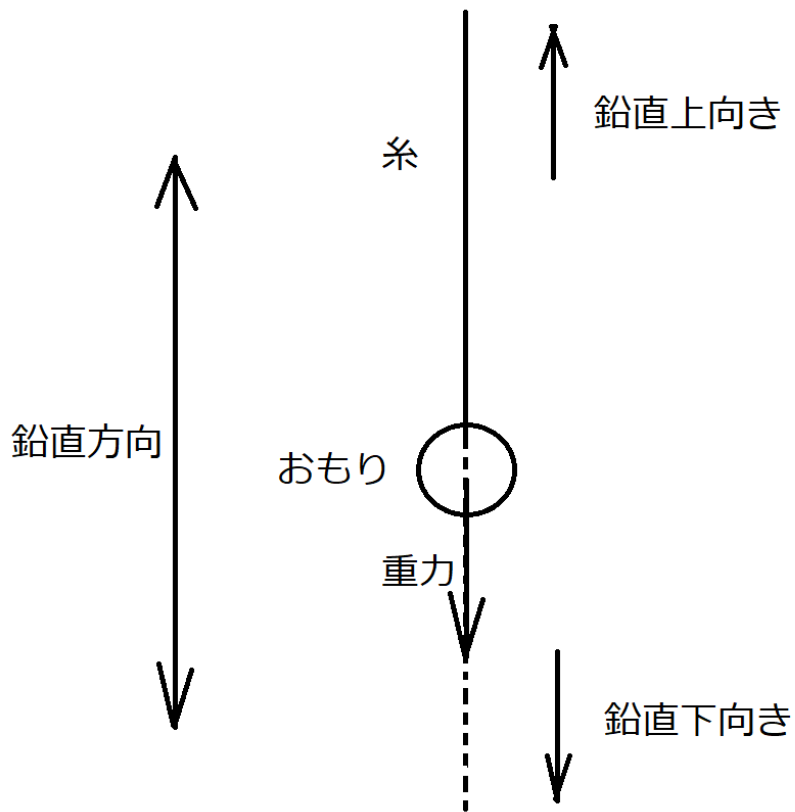


図8 鉛直方向

斜面上の物体の運動

先程、力の合成や分解の話をしました。なんでわざわざ合成したり分解したりするのか、例を挙げて説明します。その例として、斜面上の物体の運動を考えてみましょう。最初に、摩擦がなくて、斜面上を滑り降りている場合を考えてみます。この時、まず斜面上の物体が受けている力を挙げてみましょう。生徒に図の中に物体が受けている力を描き込んでもらおうと、まず重力を描きます。鉛直下向きに矢印を描きます。中には垂直抗力（斜面が物体を斜面に対して垂直に押している力）を描く生徒もいます。確かに物体はこの力を受けていますね。この他に、斜面に沿って下向きの力を描き込む生徒もいます。「この力はどういう力ですか？」と聞くと、「斜面に沿って降りようとする力」と答えてくれます。重力とは別に、このような力があるのでしょうか？確かに斜面に沿って滑っていくので、斜面に沿って下向きの力がありそうです。この力は何なのでしょう？下に降りていこうとするので、重力に関係していそうですが、重力は鉛直下向きの力です。今、斜面上の物体が受けている力は、「鉛直下向きの重力」と「斜面に垂直な垂直抗力」の2つです。この2つの力の合力の方向に運動していくことになり、それは斜面から離れることなく斜面に沿った方向での運動となるので、この2つの力の合力は、斜面に沿って下向きになっていなければなりません。重力と垂直抗力は互いに斜めの方向なので、単純に足したり引いたりはできません。そこで、もう少し合力を求めやすくするために、重力を「物体が実際に運動する方向（斜面に沿った方向）」と、「それと垂直な方向（斜面に垂直な方向）」に分解してみます。この時、物体は斜面に垂直な方向には運動しない（斜面に垂直な方向の速度は変化しない）ので、斜面に垂直な方向の合力はゼロになっているはずです。つまり、垂直抗力と、重力の斜面に垂直な分力は足すとゼロになっているはずです。そして、残った力が、求めたかった合力で、斜面に沿って下向きの力になります。というわけで「斜面に沿って下向きの力」の正体は、重力を斜面に沿った方向と斜面に垂直な方向に分解したときの「斜面に沿った方向の分力」だったということになります（図9「斜面上の物体の運動」）。

結局、ここでやったことは、力を合成しやすくするために力を分解したということになります。力を分解すれば、分解した方向毎に単純に足したり引いたりできるのです。また実際に運動する方向の合力がどれだけになるのかを知る必要があるので、分解する方向として採用するのは、「実際に運動する方向」と「それに垂直な方向」ということになります。

合力が斜面に沿って下向きの力なので、運動の法則により、斜面に沿って下向きの加速度が生じる運動になります。

斜面上の物体の運動

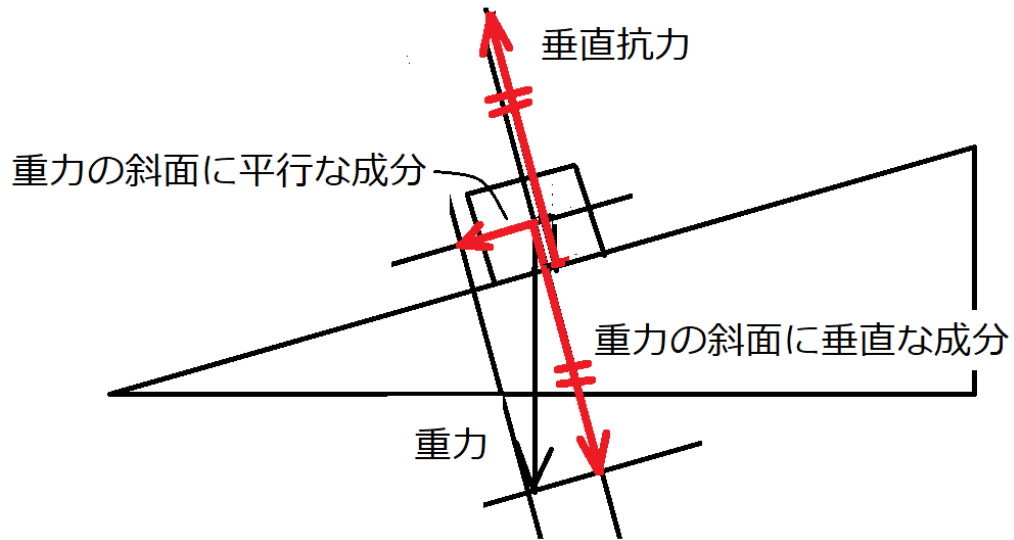


図9 斜面上の物体の運動

斜面上の物体のつりあい

今度は、先程と似てますが、斜面上に物体があり、さらに斜面と物体の間に摩擦力がはたらき、物体が静止している場合について考えてみます。「静止している」ということから、慣性の法則に従うことになります。静止しているということは、合力が0であり、力がつり合っているということが言えます。

まず、斜面上の物体が受けている全ての力を挙げてみます。重力と、垂直抗力が先程と同様に物体が受けている力として挙げられます。これらの他にもう1つ、摩擦力（静止摩擦力）が斜面に沿って上向きにはたらいています。物体はこの3つの力を受けています。この3つの力は、どのように合力が0になっているのでしょうか？ やはりこのままではわかりにくいので、重力を先程と同様に分解してやります。「斜面に沿った方向」と「斜面に垂直な方向」に分解してやります。この2つの方向について別々につり合いを考えます。このように分解すれば、方向ごとのつり合いが分かりやすくなります。斜面に垂直な方向では、先程と同様に垂直抗力と、重力の斜面に垂直な成分があり、この2つの力が同じ大きさで逆向きで、足すと0になっています。（物体が静止しているので0になっていなければいけません。）斜面に沿った方向では、静止摩擦力と重力の斜面に沿った方向の成分があり、この2つの力が同じ大きさで逆向きで足すと0になっています。（物体が静止していることからこれもやはり0になっていなければいけません（図10「斜面上の物体のつり合い」）。）このように、3つの力でどのようにつり合っているかということが、力を分解することによって分かりやすくなります。方向ごとに力の関係を調べるために、力を分解します。

斜面上の物体のつり合い

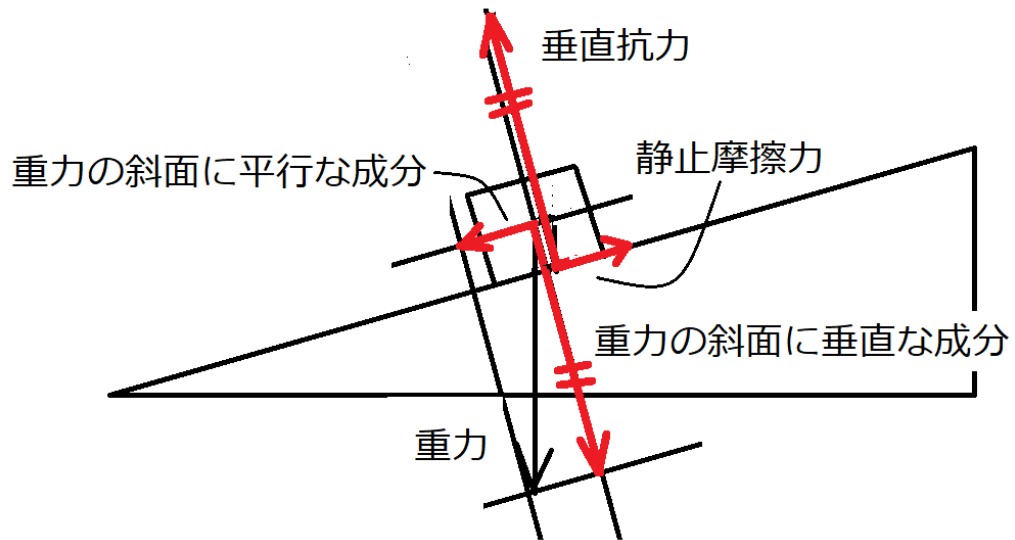


図 10 斜面上の物体のつり合い

作用反作用の法則

作用反作用の法則

この章の最後にもう1つ、力について重要なことを説明する必要があります。その説明の前に、1つ質問をしますので、○か☒を付けてみてください。

質問

AさんとBさんが全く同じばねばかりを持って互いのばねばかりのフックをかけています（図11「作用反作用」）。Bさんはただばねばかりを持っているだけとします。Aさんが自分のばねばかりでBさんのばねばかりを引っ張ります。Bさんのばねばかりは引っ張られて伸びます。この時、Aさんのばねばかりはどうなりますか？

ア Bさんのばねばかりに引っ張られて伸びるが、Bさんのばねばかりの伸びよりも伸びが小さくなることもある

イ Aさんのばねばかりは、伸びることもあれば、伸びないこともある

ウ 必ず（例外なく）Aさんのばねばかりは、Bさんのばねばかりと同じだけ伸びる

エ ほとんどの場合Aさんのばねばかりは伸びるが、例外的に伸びない時もある

オ Aさんのばねばかりは伸びることはない

実際に生徒に○か☒をつけてもらおうと、アやイやエに○をつける生徒は多いです。実際にはどうなのでしょう？ このことについて次に説明します。

力について、もう1つの重要なこととは、「力が発生するには、必ず2つの物体がなければならぬ」、ということです。物体が1つしかないのに、力が現れることは決してあ

りません。力が現れるとき、接触した2つの物体が押し合ったり、引き合ったりしていることもあれば、離れた2つの物体が引き合ったり、押し合ったりすることもあります。例えば、磁石が金属を引き付けたり、磁石と磁石が引き合ったり反発し合ったり、静電気でビニールや紙がセーターに引きつけられたりするとき等は、離れた2つの物体が力を及ぼしあっています。重力も同様です。押し合ったり、引き合ったり、2つの物体どうしが力を及ぼし合っています。違った言い方をすると、1つの力に着目したとき、必ず「力を受けた物体」と「力を及ぼした（与えた）物体」が存在します。そして、「力を受けた物体」もまた必ず、例外なく「自分に力を及ぼした物体」に対して自分が受けた力と同じ大きさで、逆向きの力を及ぼします。すなわち、力が1つ存在すれば、必ず（例外なく）もう1つ力が存在することになります。力は必ずペアで存在（発生）し、このペアの力は必ず（例外なく）互いに同じ大きさで、逆向きで、しかも、一直線上の力です。これを「作用反作用の法則」と言います（またこの法則を「ニュートンの運動の第3法則」とも言います）。先ほどから、「必ず」とか「例外なく」と繰り返し強調しましたが、それは作用反作用の法則においては、「必ず」であり、「例外なく」であることがとても重要だと私は考えているからです。ペアの力のうち、一方を「作用」と言い、他方を「反作用」と言います。これらは互いに全く対等です。そして、どちらが原因でも結果でもなく、同時に現れます。相手を押せば必ず押し返され、引れば必ず引っ張り返される、ということです。作用と反作用は全く同じ大きさで逆向きで一直線上の力です。少しくらい大きさが違うこともあるかもしれないと思う人もいるかもしれませんが、しかし、実際にはそんなことは決して起こりません。これが「作用反作用の法則」です。「質問」のように、あなたがばねばかりを引くと、相手のばねばかりとあなたのばねばかりは、正確に同じ値を指します。どう頑張っても、違う値にはなりません。もし値が少し違ったとすれば、どこかに摩擦力がかかっているか、また別の原因があるはずです。（実際に生徒がばねばかりで試してみると、一方のばねばかりの値が少し小さくなったことがありました。しかし、それぞれのばねばかりに同じおもりをぶら下げると、少し違う値を示しました。そもそも一方のばねばかりが正しい値を示していませんでした。）

摩擦力など、他の要因を全て取り除けば、必ず同じ値になります。もし、どれだけそのような要因を取り除いても違う値になったとすれば、それこそ、現在の物理がひっくり返る大発見になります。極端な例として、あなたが相手に引っ張り返されずに相手を引っ張ることができたとすれば、それは、相手のばねばかりは伸びるけどあなたのばねばかりは伸びない、ということになります。すなわち、自分のばねばかりは伸ばされずに、相手のばねばかりを伸ばすことができるということになります。そんなことができれば、それは魔法、もしくは超能力のようなものです。それぐらいありえないことです。だから、「必ず」であり、「例外はない」ことなのですが、これを強調しなければ、例外があると考える人も多いと思います。例外があるかもしれないと思うその気持ちはとても分かります。でも、例外はないのです。

もし作用反作用の法則が成り立っていなかったら、ある1つの物体が、突然どこからともなく力を受けて動きだしたりすることになります。このようなことが起こると、運動量（質量と速度の積）が保存するという法則が成り立たなくて、空間の並進対称性も失われてしまうことになります。

最後に、作用・反作用の関係にある力のペアの見つけ方を説明しておきます。これは、後で使うことになるので、覚えておいてください。作用と反作用は、2つの物体が及ぼし合っている力であるので、2つの物体にそれぞれ A、B と名前をつけましょう。「A が B を押す力」の反作用は、A と B を入れ替えて、「B が A を押す力」となります。「引く力」の場合も同様です。

作用反作用

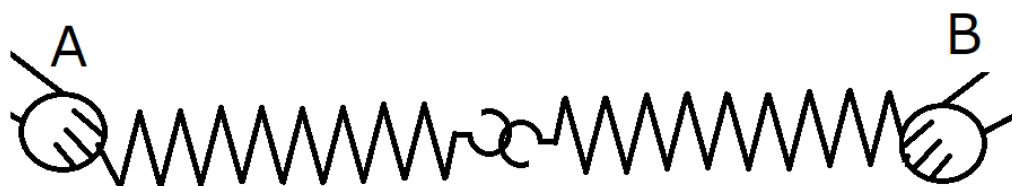


図 11 作用反作用

ニュートンの運動の3法則

この章でニュートンがまとめた物体の運動についての3つの法則について説明しました。この3つの法則により物体がどんな運動をするのかが決まります。まとめておくと、物体が受けている力の合力が0の場合の法則が「慣性の法則」（ニュートンの運動の第1法則）で、この時物体の速度は変化しません。そして、合力が0でない場合の法則が「運動の法則」（ニュートンの運動の第2法則）で、この時物体が受けている力の合力の大きさに比例し、物体の質量に反比例する加速度が生じます。そして、ニュートンの運動の第3法則が「作用反作用の法則」で、力は必ず（例外なく）2つの物体の間で及ぼし合うようにペアで発生し、この対の力は必ず同じ大きさで逆向きで一直線上の力です。

運動の法則

著 藤山篤司

制作 Puboo
発行所 デザインエッグ株式会社
