中学生・高校生のための
数式を使わない物理の本

研究者を目指した物理教師による

数式を使わない解説！

蔭山篤司

目次

はじめに

「はじめに」のはじめに書いておきますが、目次の興味あるところから、あるいは興味あるところだけ読んでいただいても構いません。この一冊の中で、何か一つでも心に届けばいいなと思っています。

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！ と思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がしばしばあります。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した。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。計算は一旦置いといて、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。

内容としては、主に力から力学的エネルギー保存則までを中心に話していきます。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で、気楽に読んでいただけたらいいなと思っています。

ところどころ、「余談」を入れましたが、これは高校までで学ぶ物理とは直接は関係ないので、興味なければ飛ばして構いません。教員になりたての頃は、授業のなかで、よく余談をしましたが、やはり授業を進めざるを得なくてなかなか余談もできなくなってしまいました。そういう授業で話せなかったこと、話しきれなかったことを余談として挿入しました。物理が苦手な人は、逆に興味ある余談だけ読んでもらってもいいのではないかと思います。研究者を目指す中学生や高校生には特に余談を読んでいただけたらいいなと思います。

「空想」と「想像」　「定性的」と「定量的」

「空想」と「想像」

「想像力」という言葉がありますが、私はこれを「空想力」とは区別して考えています。「空想」は何にも縛られずに自由に心に思い描けばいいと思いますが、「想像」は、物理的根拠に基づいて、出来る限り現実に起ることを正しく思い描くことだと考えています。「物理を理解する」とは、「現実的な想像が出来るようになること」だと思います。なので、計算はとりあえず出来なくても、正しく想像する力が養えれば良いと考えています。

「定性的」と「定量的」

突然ですが、「定量的」と「定性的」という言葉を聞いたことがあるでしょうか。ここでこれらの言葉、というか概念を説明をしておきます。ざっくりいうと、「定性的」とは「こうすればこうなる」とか、「これを大きくすれば、こっちは小さくなる」等のように、どんな原因があれば、どんな結果が起こるのかとか、大きくなるとか小さくなるとかに着目した内容で、「定量的」とは「こうすれば、これだけこうなる」とか、「〇〇の量がこれだけ変われば、△△の量はこれだけ変わる」といったように、「量がどれだけ」という数値を重要視していう内容になります。この本では、「どれだけ」という量的なことには深入りせずに、「どうなる」とか、「大きくなるのか、小さくなるのか」程度の関係を中心に話していきます。なので、何度も言うようですが安心してください。計算は出てきません。

「定量的」に考えるには、計算が必要になりますが、「定性的」に考えるだけであれば、とりあえず計算はいりません。論理的に考える力を養えば正しく定性的に考えることができるようになります。つまり正しく現実を想像することができるようになります。ただし、少し複雑な内容になると、「どれだけ」という「定量的」な議論が必要になる場合があることも否定はできませんが、ここではそこまでは求めないとします。なので、この本では、このような定性的な考えが出来るように、正しく現実を想像できるように、ということを目指したいと思います。

厳密な定量的な話はしないとしても、ざっくりとした量的な見積もりは大切です。考えている対象に対して影響が無視できるのか、それとも大きな影響があるのかを判断することは重要です。そして、影響が小さくて無視しても大筋が変わらなければとりあえず無視して話を進めることは大切です。重要でない細かいところにこだわってしまうと、重要なことを見失うこともあります。何が重要で、何が重要でないかを見極めるためにはある程度の量的関係を掴むことが必要な場合はあります。このような見積もりが出来るようになればなるほど、生活の中でこれから起こることが正しく想像（ 予想 ）出来ることが増えていきます。それだけでも十分楽しくなると思います。

科学的、論理的に考えるとは？

次に、科学的、あるいは論理的に考えるとか、想像するとは、どういうことかお話します。難しい話ではありません。何か根拠となる法則や原理（これは裏付けがあって、信頼できるものでなければ意味がありません）に基づいて考えを進めれば、それは論理的な考え方と言ってよいでしょう。このことを説明するために、１つ例を挙げてみます。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。

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、答えが変わるでしょうか？ 変わらないでしょうか？ 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のかわからない」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））。この法則を学んだ後、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、今の問に関しては重さ（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しょうが、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思っていいです。すなわち、１秒で何 m/s の速度が変化するの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 ）

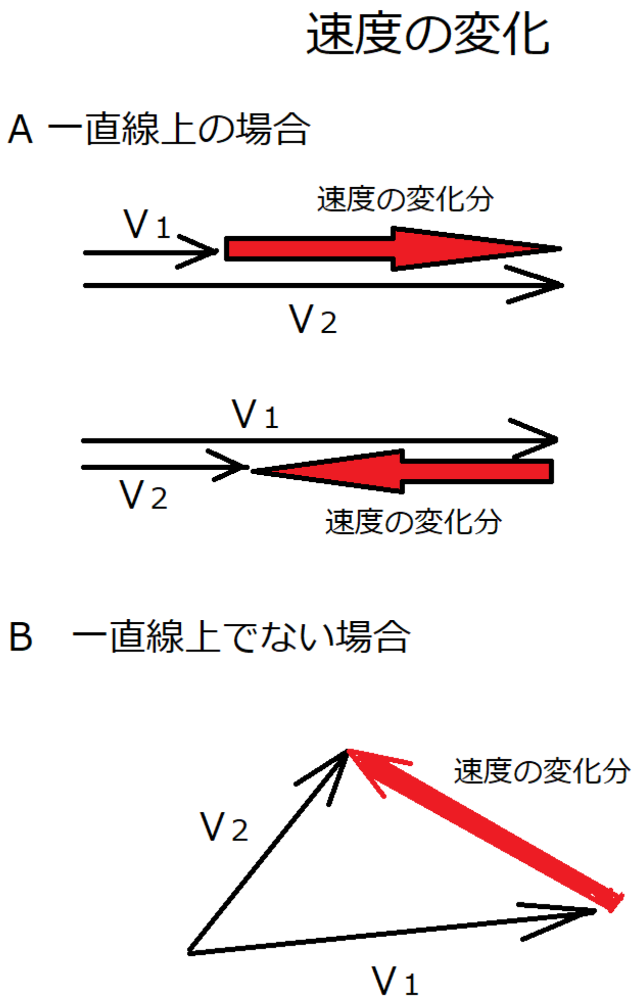

速度の変化
A 一直線上の場合
V1
速度の変化分
V2
V1
V2
速度の変化分
B　一直線上でない場合
速度の変化分
V2
V1

図 1　速度の変化

地図を作る

物理は、実際いろいろなことを積上げて話が進んでいくので、いきなり全体を理解して頭に入れるのは困難です。物理に限らず、他の学問もそうだと思いますが、頭の中に少しずつ物理の全体像の地図を作っていくと、その中で自由に思考することかをできるようになっていきます。

自分が住んでいる家の周辺の地図を白紙に描いてみると、かなり細かいところまでを描けると思います。子供の頃から長く住んでいればなおさら正確に細かいところまでを描けると思います。その中で、新しく何かができたとしても、ちゃんと地図の中に加えていくことができます。特に、車ではなく、自分の足で歩いた道は、よくわかると思います。物理を身につけていくのもこれとよく似ています。足元の、理解して身につけた物理法則から出発して、少しずつ歩き回っているうちに、行動範囲かが広がっていきます。全体像が描けると、通ったことがない道でも、ここを抜ければ目的地に辿り着けそうだ、と予想すらできるようになるでしょう。だから、学んだことはどんどん使っていくのが良いでしょう。

物理を身につけるとは、物理法則を理解して、それを根拠として身の回りの現象を説明できるようになること、あるいは物理法則を根拠として、何か原因となることが起こった時、次に起こることを正確に推測、想像すること、だと私は考えています。一度だけ聞いてすぐに物理法則を使いこなせるようになるのは普通、無理だと思います。私は無理でした。少しずつ慣れえていけばいいと思います。みなさんは、自分の住んでいる家の周辺の地図を思い浮かべることができると思います。あの角を曲がれば何があって、その向かいには何がある、など。何年も住んでいる町内なら、かなり詳しくわかると思いますが、見知らぬ街に行って、車で少し回ったからといって、全体像がすぐに頭に入るわけではありません。頭の中で地図ができれば、目的地まで自分でルートを考えたり、どの道が近道かなど、自分で判断して分かります。物理、あるいはほかの学問でも、その世界の中に住んで慣れ親しみ、自分の知っている範囲をすこしずつ広げていくことで理解が深まっていきます。一度住み慣れた町は、時間が経ってもたどっていけば、どこに何があるかは結構覚えているものです。

物理って何をやるの？

物理って何をするの？

今まで、いろいろな知人から、「物理って、台車とか斜面とかやってて、面白いの？」ってよく言われました。確かに台車や斜面は出てくるけど、それが面白いわけではなく、と思いながら、返す言葉がありませんでした。その人はたぶん、物理の楽しさに触れることなく物理を学び、物理から離れたのだと思います。私は今、高校で主に物理が苦手な生徒達に物理を教えています。計算も苦手な子が多いですが、この子達に本当に理解してもらいたいことは何か、ということを考えながら、なんとか楽しく理解してもらいたいと、授業に取り組んでいます。

この本は、物理の受験問題が解けるようになることを目的としてはいません。楽しく考えることができるようになれればいいな、と思って書いています。自分で身につけた知識や考え方を使って論理的に考え、正しい結果が導けたなら、きっと考える楽しさを実感することができると思います。

高校で学ぶ物理というと、最初に速度や加速度が出てきて、そこでいやになってしまう人が多いと思います。でもこれらは物理ではなく、数学です。（数学者には数学ではない！ と言われそうですが..）例えば、「車がある一定の加速度で運動しているとき、10秒後の速度は？ 移動距離は？」のような問題は数学の問題です。小学校の算数であった「○○君は駅まで歩いて△分かかります..」等と同じです。（もし、車やエンジンの構造に着目して議論するのであれば、「物理」だと言えるでしょう。）確かに「加速度」や「速度」を物理で使いますが、これらそのものは物理ではありません。物理の法則を使って計算する際に利用しているだけです。まあ、「定量的」なことを知るにはどうしても計算が必要なので、最初に出てくるのです。でもそのために、まだ物理の内容に入っていないのに嫌になってしまう人が多いと思います。確かに大学入試のことを考えると、計算ができないと乗り越えられないことは事実かもしれませんが、それで物理が嫌いになってしまうのはとても残念です。

この本では主に力学の分野の物理法則について話していき、それを根拠にして考えを進めることを一緒にやっていきたいと思います。物理法則とはどんなものかというと、主に２種類のタイプがあります。１つは、「こうすれば、こうなる」というようなタイプで、もう１つは、「（ある条件のもとで）何々は保存する（一定である）」というタイプです。この本で取り上げる法則は、せいぜい５つぐらいです。「物理は公式がたくさん出

てきて、覚えられない..」とよく聞きますが、定量的な話をしなければ、そもそも公式は出てきません！（ 定量的な話をしたとしても、覚えなければならない（ 公 ）式はわずかしかありません。少なくとも高校までの物理では。中学生の頃に覚えた英語の不規則変化の動詞の数に比べても、圧倒的に少ないです。）

中学、高校で学ぶ物理の分野は大きく分けると力学、熱、波動、電気と磁気、原子の分野に分かれますが、この本では主に力学を中心に扱います。それは、力学が全ての分野の根幹となっていると言っても過言ではないと思うからです。他の分野については、可能な範囲で触れようと思いますが、それを超える部分については別の本で触れたいと思っています。私が中学生の頃は、波動の分野はなかったように思います。高校の物理で波動が出てきて、「なんで波動をやるんだろう？」と思った記憶がありますが、後にその理由は分かりました。現代の物理を支えているのは、相対論と量子論で、量子論は波動が中心的な役割を担う理論だからです。これらについても、別の本で触れたいと思っています。

というわけで、この後の話としては、力学の中でも特に重要なニュートンの運動の３法則と、力学的エネルギーの保存則、エネルギー保存則の５つを中心に話して行きます。これらの話をしながら、物理の考え方を皆さんと一緒に学んでいこうと思います。そうすれば、ものの見方や、考え方が変わっていくと私は思いますし、そうなっていただけるよう、頑張りたいと思います。「はじめに」で述べましたが、わからないものをわかったふりをしないことが大切です。わかるまで考え、それでも分からなければ聞けばいい。わからないことをわかったふりをしないでこだわること。それは実は本当に物理を学ぶ上では、大切な姿勢です。わからないことをじっくり考えてみましょう。間違ってもいいから、自分の論理で結論を出すことに慣れていってほしいと思います。自分のした予測が間違っていたら、論理の何処がおかしかったのかを考えればいいだけです。考えてみないことには何も始まりません。

物理に限りませんが、他の学問でも、用語がいろいろと出てきます。これらは覚えないといけないのでしょうか？ 覚えておいたほうが話がスムーズに進みますが、忘れていてもその時に確認すれば問題ありません。ただし、確認は大切です。というのも、相手と話すとき、あるいは教科書や本を読むとき、ある用語が持つ意味を正確に把握しておかないと、話の内容や教科書や本に書いてある内容が正しく理解できないからです。自分と相手、あるいは教科書を書いている人の間で用語の定義にズレがあれば、必ず混乱が生じて話が噛み合わなくなります。用語の意味や定義を確認することはとても重要です。

用語の意味、定義を覚えておいたほうが話がスムーズに進むのでいいのですが、覚えていないことと、物理を理解できていないことは別なので、用語が分からなくても気にしなくてもいいです。分からなかったときに確認してください。

休憩①（ 余談　心の定義　善と悪の定義 ）

職場で、同僚の倫理の教員と時々倫理の授業の内容に関する話をすることがありました。彼が、物理的な視点での私の考えを聞いたのがきっかけだったと思います。初任でわが校に着任して数年で、まだ若く、いろいろなことに積極的に、前向きに取り組む教員でした。研究授業などで、何度か彼の授業を見学させてもらったことがありましたが、興味深い内容で、面白い授業だと思いました。廊下を歩いているとき、彼の授業を見かけると、少し立ち止まって「どんなことをやってるのかな？」と黒板を見ることがありました。

ある時、彼から「倫理の単元で性善説と性悪説があり、人の本性 (心) は元々善なのか悪なのかっていうのをやるんですけど、(性善説か性悪説か) どう思いますか？」と、問われました。みなさんは、こんなことを問われたらどう答えるでしょうか？ そして、どう考えるでしょうか？ 心については私も興味あることだったので、考えてみました。しかし、このような議論をするときは、まず「心」や「善」や「悪」を定義しなければ議論が始まらないと思いました。お互いに漠然と「心」とはどんなものか、イメージは持ってると思いますが、そのイメージはやはり漠然としたもので人によって違うと思います。「善」や「悪」についても同じです。これらはちゃんと定義しようとすればするほど難しくなります。他の動物は心を持ってるのか、魚や昆虫はどうなのか。その質問を受けるより少し前に、NHK の番組で「ダンゴムシの心」についての内容をやっていたのを見たことがありました。詳しくは触れませんが、それはとても興味深い内容でした。ダンゴムシには脳が無いのに、「心」らしきものがある、というのです。飽くまでそのダンゴムシを研究している研究者の定義による「心」ですが。その研究者 (森山徹) の著書「ダンゴムシに心はあるのか」で詳しく説明されています。

「善」や「悪」も、立場の違いにより変わることも十分に考えられます。世界中で争いが絶えないのもそのためでしょう。そもそも絶対的な「悪の定義」が存在するのか私は疑問に思っています。例えば、人間以外の生物において、「悪」と呼べる行動はあるでしょうか？ もし、幅広い定義として「他の人や生物に対して損を与える行動」を「悪」と呼ぶなら、おそらく全ての生物に「悪」と呼べる行動があると思います。もちろん人間にも。例えば他の生物を食べる行動は「悪」であるはずです。それを「悪」でないとするなら、「悪」の定義の境界線の引き方は人間、あるいは定義する人のさじ加減になってしまいます。また、善か悪かは、「人間の行動」なのか、「人間の思考そのもの」なのか、あるいはもっと別のことで定義されるべきなのかさえ、私ははっきりとは答えられません。人間のある行動や思考が「悪」であるかどうかを判断するには、やはり「悪」が明確に定義されなければ判断できません。ここで私が「善」や「悪」や「心」について明確な

定義を持っているわけではありません。また、性善か性悪かということが、全人類共通に決まっているのか、人それぞれなのか。サルには善や悪があるのか。議論を始めれば、終わりが見えません。「性善説」か「性悪説」かを議論する前に、「善とは何か」「悪とは何か」について十分に議論する必要があると思います。きっと答えは見つからないと思いますが。ただ、その場で議論している人達の間で「善」「悪」「心」のその場での定義をして議論すれば、その場での結論は出るかもしれません。しかし、また違う定義のもとで議論すれば違う結論が出ることもあると思います。それはそれで構わないと思います。どんな定義が妥当な定義なのかは、その場その場で異なり、「その時の議論の目的」、「何のために定義が必要なのか」によって決まると思います。

　ここで話したかったのは、これらを定義しようということではなく、人によって定義が異なるような曖昧さがある事柄について議論するときには、まず、相手と自分との間の定義のずれを埋めておく必要がある、ということです。ただし、曖昧さがあるとわからないままに議論が始まることがあります。「何か、話が噛み合わないな」、ということがよくあります。そんなときは、多くの場合、自分が当たり前だと思っていた定義が、実は相手とずれている事が原因です。「あれ？ なんだか話がわかってもらえないな、噛み合わないな」、と思ったときには、お互いに言葉や概念の定義を確認することが大切です。

物理法則は信じていいの？

物理法則は信じていいの？

そもそも、物理法則は本当に正しいのでしょうか？ どれぐらい信じて良いのでしょうか？ 何か大発見があって現在の物理法則が覆されて、全部間違ってました、なんてことはないのでしょうか？ この疑問に対しては、正しく理解しておく必要があります。正しいのか、正しくないのか。何を信じていいのか、信じてはいけないのか。

少なくとも、今教科書に書かれている物理法則は、かなりの実験の精度まで確認されていて、(その精度で) 正しいです。間違っていません。もし今後、物理がひっくり返るような大発見！ というニュースが飛び込んできたとしても、中学校や高校で学んだ物理がひっくり返り、日常生活の中で今まで起こらなかったことが突然起こるようになるなんてことは決してありません。そういう意味で、高校で学ぶ物理はひっくり返る心配はありません。ただし、日常から大きく離れたところでひっくり返ることはあるかもしれませんが。今から 100 年ほど前にアインシュタインが作った相対性理論によって、それまで完全に正しいと考えられていたニュートンの力学の枠組みが正しくないことが分かりました。しかし、だからといってニュートンの力学が全く役に立たない理論になったわけではありません。現在でも日常生活の中では中心的に使われています。それは、日常生活の中では十分に正しいからです。日常を離れた最先端の技術の領域になると、相対性理論や、量子論でないとうまくいかないことが増えてきています。

さらに、現在の科学技術では、相当高い精度で高校で学ぶ範囲を超えた (相対論や量子論に基づいた) 最先端の物理法則が正しいことが実験的に示されています。具体例で言うと、相対論と量子論を取り入れた素粒子の「標準模型 (Standard Model)」は、信じられない精度で正しさが確かめられています。これは、自然界の４つの力のうち、重力以外の力を扱った理論です。これを超える理論はありますが、実験で確認できているものは今のところまだありません。しかし、現在の実験の精度を超えた範囲で、現在確立している物理法則に従わない現象が見つからないとは言えません。多くの物理学者は、現在確立している物理法則から外れた現象が見つかることを望んでます。私も研究していた頃はその一人でした。残念ながら、今のところ見つかっていません。

このように、物理法則は、どの枠組み、あるいは適応範囲で正しい法則なのかを理解しておく必要があります。この本では、主に高校までで学ぶニュートンのまとめた物理法則について書かれています。これらは、我々の日常から大きく外れない限りは、間違いなく正しいです。ニュートンの理論の適応範囲を超える、日常から大きく外れる場合というのは、物体の速さが光の速さと比較できるぐらい速いときや、原子の大きさぐら

い小さなミクロの世界を扱うときになります。ジェット機の速さでも光の速さの 100 万分の１程度です。原子の大きさは、1cm の１億分の１程度です。身の回りのものであれば、光りより十分遅く、原子より十分大きいので安心して、ニュートンのまとめた物理法則を信じてかまいません。なので、逆にもしこの範囲で物理法則に反することを唱える人がいたら、疑わなければなりません。

物理法則には、実験的な裏付けがありますが、それだけではなく、理解が進めば、理論的な裏付けも付け加わります。理論的な裏付けとは、物理法則が成り立つ理由を説明したものです。物理法則が最初に見つかるときは、現象の観察や実験から「こんなことが成り立っているのではないか」ということが発見され、それが様々な実験で確かめられ、法則として認められるようになります。それと同時に、なぜその法則が成り立つのか、ということを説明するために、理論が作られます。その理論で、その新たに見つかった法則が成り立つ理由を説明できるだけでなく、それまで知られていた法則とも矛盾なく全てが説明できれば、その理論の信頼性が高まります。また、それまでの理論で説明できなかったことまで説明できれば、少なくとも、その理論で説明できない新しい現象が見つかるまでは、その理論は正しいとされ、古い理論に取って代わり、生き残ります。もし、その理論でも説明できない現象が見つかれば、新たにその現象も含めて説明できる新しい理論を作らなくてはなりません。

例えば、エネルギー保存則がありますが、これは空間が時間的に不変であれば、理論的に導かれる保存則です。また、空間の一様性から、運動量保存則が理論的に導かれます。一般に、様々な保存則は、この世界の対称性から導かれます。なので、我々の世界でどんな保存則が成り立つかを知ることは、この宇宙に、どのような対象性があるかを探ることに等しいです。現在実験的にも確立している対称性は、四次元時空のローレンツ変換に対する対称性と、(詳しくは触れませんが、電磁気力、弱い力、強い力に対応した ）内部空間に対する３つの対称性です。ただし、この理論が最終的な理論だとはほとんどの物理学者は思ってないと思います。理由は２つあります。１つは、重力が枠組みから外れていること、もう一つは、理論の中に不自然さが含まれていることです（ 例えば物理定数を不自然なぐらいな精度で微調整しなければならないことや、素粒子の質量の大きさに不自然なくらい桁が違う階層性があること等 ）。この２つの不満を解消しようと現在研究されている理論の１つが、超弦理論（ スーパーストリング理論 ）ですが、これは私がここでお話できるほど易しくなく、私はその専門家でもないので、残念ながらここで触れることはできません。この宇宙の全てを説明する理論（ 究極の理論 Theory Of Everything ）を求めて、多くの物理学者が日々研究を続けています。

エネルギーは増えない？ 減らない？

エネルギーは増えますか？ 減りますか？

エネルギーとは？

エネルギーという言葉はよく聞きますが、エネルギーって何ですか？ と聞かれてもなかなかどう答えていいのかわからない人は多いと思います。電気とか、石油とかのイメージはあると思いますが、やはり少し漠然としたイメージだと思います。「エネルギー」は、物理では明確に定義されています。「どれだけの力を加えながら、物体をどれだけの距離移動させることができるか」で定めています。具体的には「物体に加えている力」Œ「(その力の方向に) 移動させることができる距離」と定義されています。まどろっこしい言い方になりましたが、物理における「仕事」という言葉を使うともう少しすっきり言う事ができます。物理では、「力」が仕事をします。物理における「(ある力がする) 仕事」は、「物体に加えている力 Œ (その力の方向に) 移動させる距離」と定められているので、ある物体が持つエネルギーとは「その物体が、他の物体に対して仕事をする (潜在的な) 能力」と定めめられています。(「仕事」については後の章「仕事って何？」で詳しく述べます。)

このように、「エネルギー」の説明のためには「仕事」を理解することが必要で、「仕事」の説明のためには「力」を理解することが必要になります。これらの「仕事」や「力」については後の章で少し詳しく説明しますので、とりあえず「エネルギーがあれば物体に力を加えて動かせる」と思っていただいておいて、先に進みましょう。

エネルギーは互いに移り変わる！　～エネルギーの様々な形態～

次にエネルギーの様々な形態について少し詳しく説明します。エネルギーには、実は様々な形態があります。例えば、熱エネルギー、電気エネルギー、光エネルギー、核エネルギー、力学的エネルギー、化学エネルギー等があります。様々な形態がありますが、エネルギーであるからには、必ず、物体に力を加えながら移動させる能力、すなわち物体に仕事をする（潜在的な）能力を持っています。少し説明すると、熱エネルギーは、例えばシリンダーに閉じ込めた気体を熱して膨張させて、閉じ込められた気体がピストンを押す力により、何かを動かす仕事をしたり、お湯を沸騰させ水蒸気でタービンを回し、蒸気機関車のように車輪を回したり、電気を起こしたりして、物体を動かすのに利用できます（図２「熱エネルギーがする仕事」)。電気エネルギーは、電流を流してモーターを回し、タイヤやギヤ（歯車）などを回転させることによって、何かを動かすのに利用できます。化学エネルギーは、化学反応を利用したもので、一番シンプルなものは、ガソリンを燃焼させその爆発によりエンジンを動かすことができます。核エネルギーは、大きな原子核が分裂したときに、分裂前より分裂後の質量の和が僅かに減り、その僅かに減った質量の分が莫大なエネルギーとなって放出されます。（相対論からの帰結であるエネルギーと質量の等価性により、減った質量の分が莫大なエネルギーとなって放出されます。）そのエネルギーを利用して発電するのが原子力発電です。過去には原子爆弾に使われたこともありました。力学的エネルギーは、中学校で聞いたことがある人もいると思いますが、運動エネルギーと位置エネルギーからなります。動いているものは止まるまでに他の物体に力を加えながら移動させることができます（図３「運動エネルギーと位置エネルギー」A）。この様に動いている物体が持つエネルギーが運動エネルギーです。また、高いところにある物体が、低いところに移動するまでの間に他の物体に力を加えながら移動させることができます。例えば、ひもで連結した２つの物体のうち一方を机の上に置き、他方を机から落とせば、机の上の物体は糸に引かれて移動します（図３「運動エネルギーと位置エネルギー」B）。この様に高いところにある物体は低いところまで移動する間に机の上の物体を動かすことができます。この、高い所にある物体が持つエネルギーが（重力による）位置エネルギーです。位置エネルギーについては、後の章でもう少し詳しく述べます。

このように、エネルギーの形態は様々ですが、エネルギーというからにはそのエネルギーを利用することによって、物体を動かすという「仕事」ができなければなりません。

そして、エネルギーを利用するとき、エネルギーの形態が変化します。熱エネルギーが電気エネルギーになったり、動いている物体がもっている運動エネルギーが、摩擦力により止まるまでに、摩擦で発生する熱エネルギーに変わったりします。

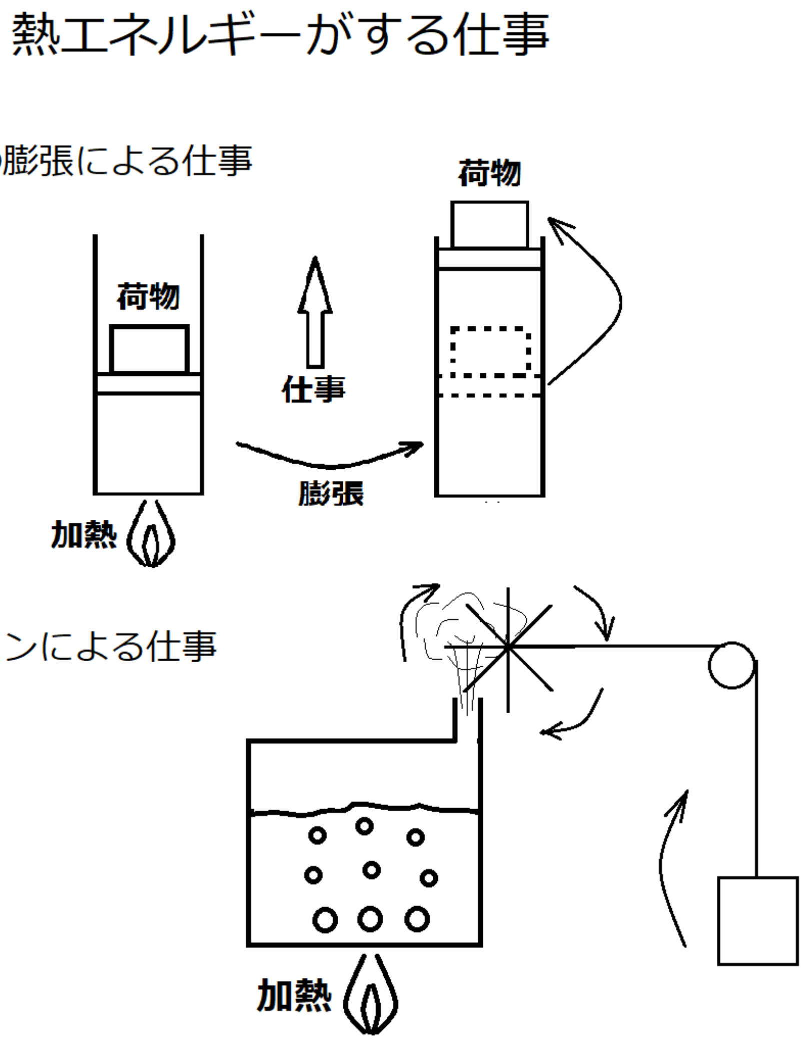


図２　熱エネルギーがする仕事

運動エネルギーと位置エネルギー

A　運動エネルギー

B　位置エネルギー

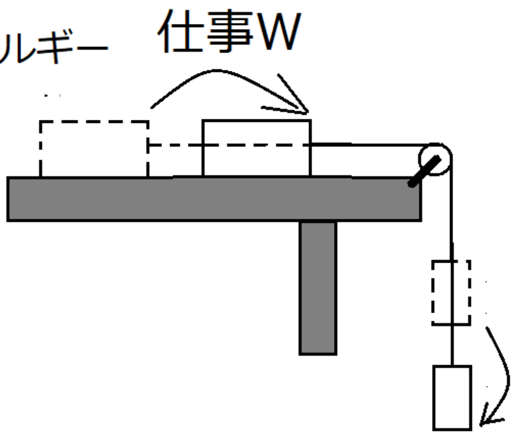


図３　運動エネルギーと位置エネルギー

エネルギー保存の法則

この様にエネルギーの形態は変化しますが、実はエネルギーの量は全く変わりません。増えることもなければ、減ることもありません。必ず変化した後の全てのエネルギーを足せば、元のエネルギーの量とぴったり同じになっています。「それなら、エネルギーをどれだけ無駄遣いしてもいいんじゃないの？」と思いますよね？ このことに関してはとても重要なことなので、後でもう少し詳しく説明します。数百年前までは、エネルギーを増やせるのではないかという考えがあり、エネルギーを増やす装置（ 機関 ）を作ろうと、発明家、研究者が人生をかけていた時代がありました。もし完成すれば、この装置は自分で作り出したエネルギーで自分自身がさらに動くので、永久に動き続けることになります。そのため、「永久機関」と呼ばれています。もしエネルギーを増やすことができる装置を発明できれば、大金を手に入れることができます。多くの人が夢を見て努力をしましたが、どれだけ努力しても、実現はできませんでした。そのような研究の中で、エネルギーに対する理解が進み、どうやらエネルギーは増やせそうにないということがわかってきました。増えないばかりでなく、減ることもない、つまりエネルギーの量は変わらないということが確かめられ受け入れられるようになりました。何百年も前の話ですが。これを法則として表したものが「エネルギー保存則」です。エネルギーは、他の形態に移り変わりますが、その時、増えもしなければ、減りもしません。一見、エネルギーが減ったり、無くなったりしているように見えることがありますが、それは別の形のエネルギーに変わっているだけです。摩擦で熱が発生したり、電流が流れて熱が発生したりします。その熱で熱くなったものはやがて冷めますが、それは周りの空気があたたまること等に使われます。赤外線となって宇宙空間に放出されるものもあります。でも、これらを全て足し合わせれば、必ず元のエネルギーと同じ量になっています。このエネルギー保存の法則を破った現象はこれまで見つかっていません。例外なく、必ずこの法則は成り立っています。例えば昔、原子核の反応であるベータ崩壊（ ある原子が電子を放出して別の原子に変わる反応 ）に於いて、崩壊の前後でどうしてもトータルのエネルギーが減ってしまうことが問題になっていました。そこで物理学者のパウリが、未知の粒子が不足分のエネルギーを持ち去っているという仮説を立てました。後に、この仮説通りの未知の粒子が発見され、不足分のエネルギーを持ち去っていることが確かめられ、やはりエネルギーは保存していることが分かりました。この粒子は現在ではニュートリノと呼ばれている素粒子です。ニュートリノはほとんど物質と反応せずに素通りしてしまうため、当初は実験で捕らえることができなかったのでした。地球ほどの大きさでもらくらくとすり抜けてしまうくらい、ほとんど物質と反応せずに素通りします。

エネルギー保存の法則は、無条件で、例外なく成り立ちます。どう頑張ってもエネルギー保存の法則を破ることはできないのです。これはとても重要なことです。増えるこ

ともなければ、減ることもありません。じゃあ、エネルギーは使っても使っても減らないのであれば、エネルギーがなくなる心配は必要無いのではないかと思いますよね。これも、正しく理解しておく必要があります。確かに、使っても使ってもエネルギーは減りません。トータルの量は全く変わりません。しかし、エネルギーを使えば使うほど、熱エネルギーが増加していきます。熱エネルギーについて、ここでは詳しくは触れませんが、ひと度熱エネルギーに変わってしまったエネルギーは、一部が他のエネルギーに変わることがあっても、全てが他のエネルギーに変わることはできません。エネルギーを利用することで増えるのは、低温の物体が持つ熱エネルギーで、これは利用することが難しく、やはり全てを他のエネルギーに変換することはできません。このため、宇宙の全てのエネルギーは、最終的に全て（ 利用できない ）低温の物体が持つ熱エネルギーに変わってしまう、ということになります。つまり、エネルギーを使えば使うほど、利用できるエネルギーが減り、利用できないエネルギーが増えていきます。

　エネルギー保存の法則は無条件に成り立つ法則ですが、これと別に、力学的エネルギー保存の法則というものを聞いたことがあると思います。これはエネルギー保存の法則とはしっかり区別して理解しなくてはいけません。力学的エネルギー保存則は、条件付きで力学的エネルギーが保存されるという保存則です。詳しくはもうしばらく後で話しますが、この条件とは要するに、「力学的エネルギー以外のエネルギーに変換されなければ」というような内容の条件です。力学的エネルギー保存則は後まわしにして、次に力の話をしましょう。

エネルギーのところで触れましたが、「仕事」の説明で必要な「力」について説明します。その後で「仕事」の説明をします。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。

力とは何か　～力のはたらき～

　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」に関すること、もう１つは「動き」に関することです。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いけませんが、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。

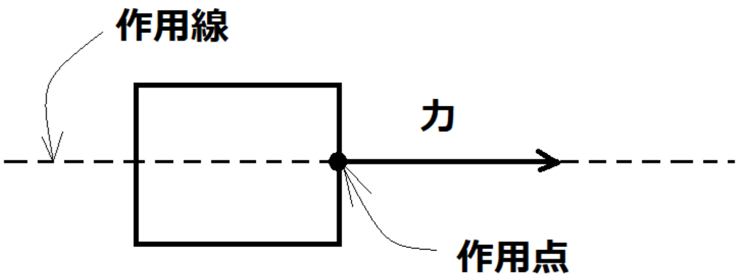


図４　力の作用点作用線

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と、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れば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」と言います。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」と言います。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」と言います。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ると思います。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つ以上の場合は、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。

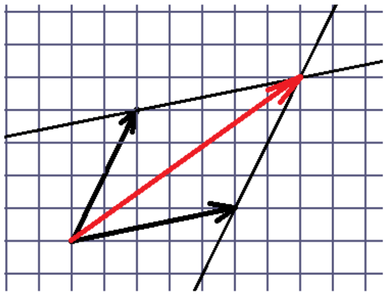
（ 補足３　力の分解 ）

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。何故かというと、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。この直線の方向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

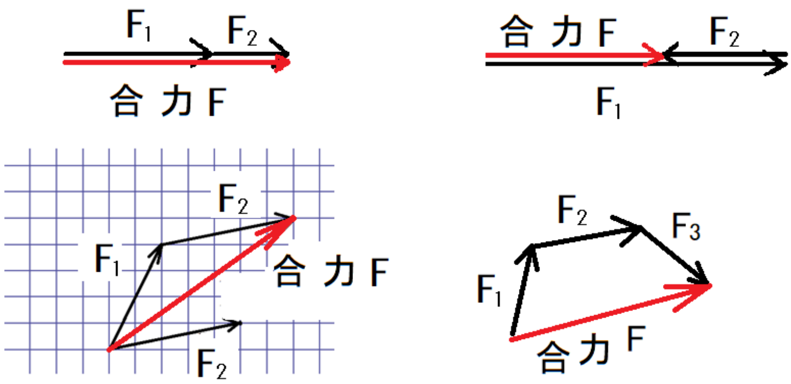


図５　力の合成

力の分解

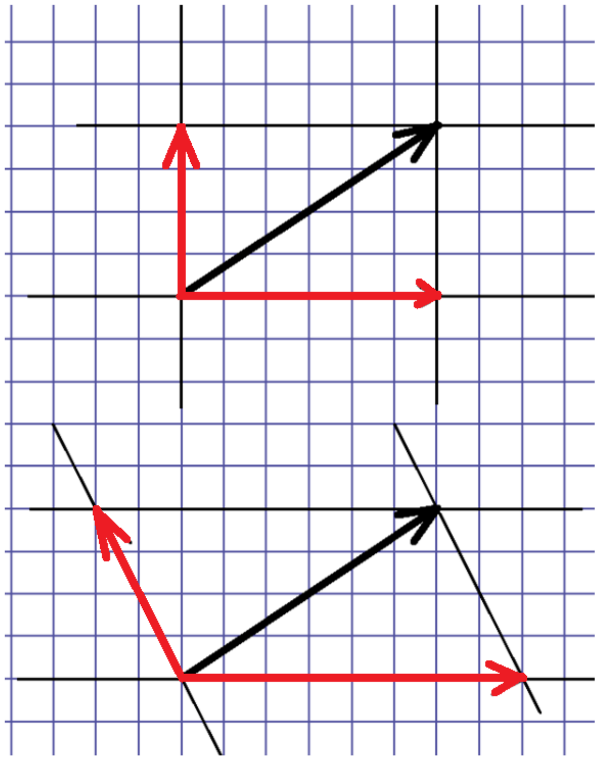


図 6　力の分解

慣性の法則

　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、次のそれぞれの文か正しければ◯、正しくなければ Œ 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。

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たちません。

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が、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。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つの力は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定めました。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 と定めました。なので、それまでの力の定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 œ 質量」という式で表せます。また、同じ式ですが「力＝質量 Œ 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　摩擦力 ）

　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「静止摩擦力」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。静止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つ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止摩擦力はつり合っています。引っ張る力が 0 であれば静止摩擦力も 0 であり、引っ張る力が大きくなれば、静止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、静止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。静止摩擦力の限界値（ 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「静止摩擦係数」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 ）と定めました。「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。

水平投射

「科学的、論理的に考えるとは？」の章で自由落下について考えましたが、ここで、もう１つ、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、「飛ぼうとする力」と答えてくれます。「飛ぼうとする力」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。

エネルギーは増えない？減らない？

水平投射

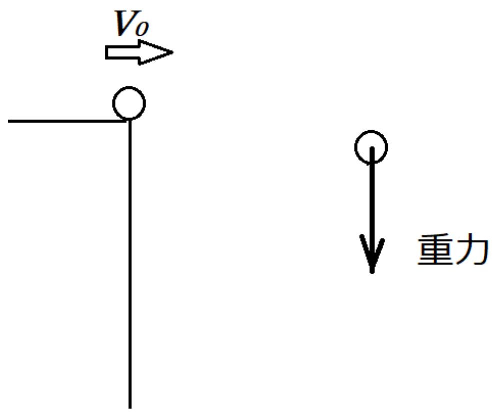


図７　水平投射

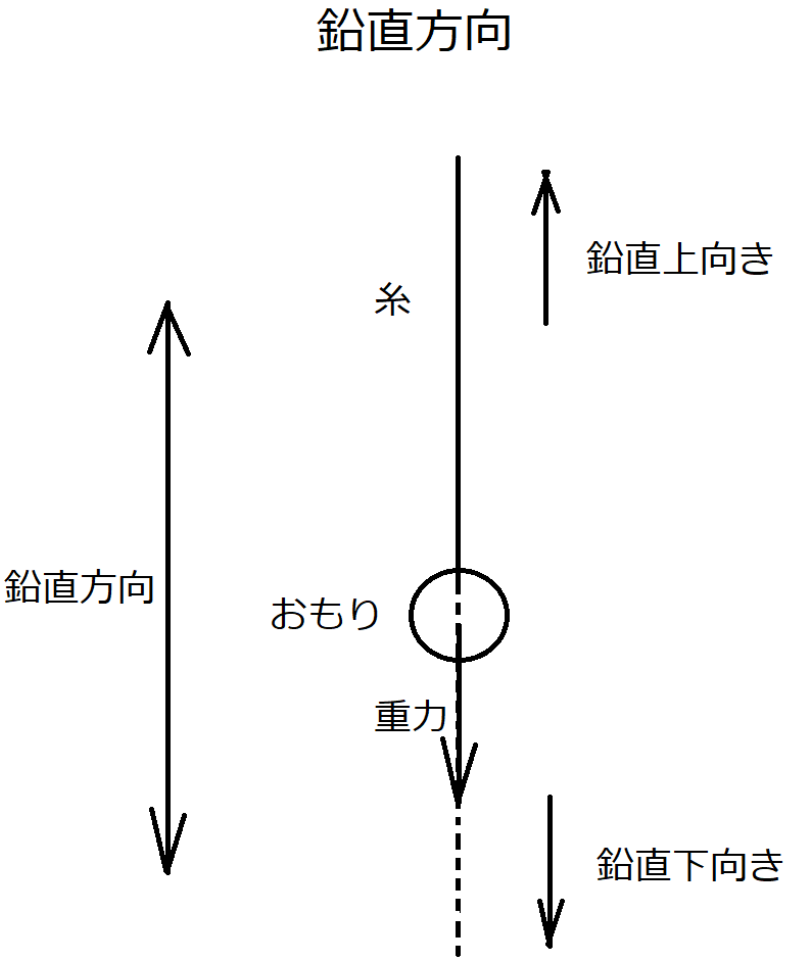


図 8　鉛直方向

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が、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か？ 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。

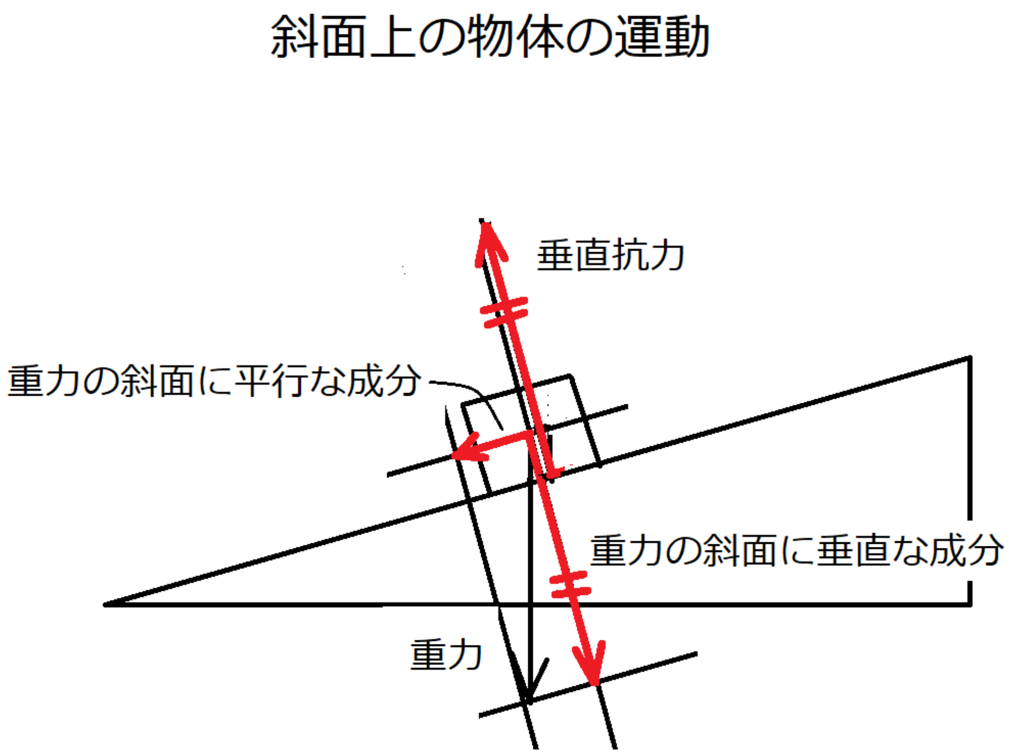


図 9　斜面上の物体の運動

斜面上の物体のつり合い

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。

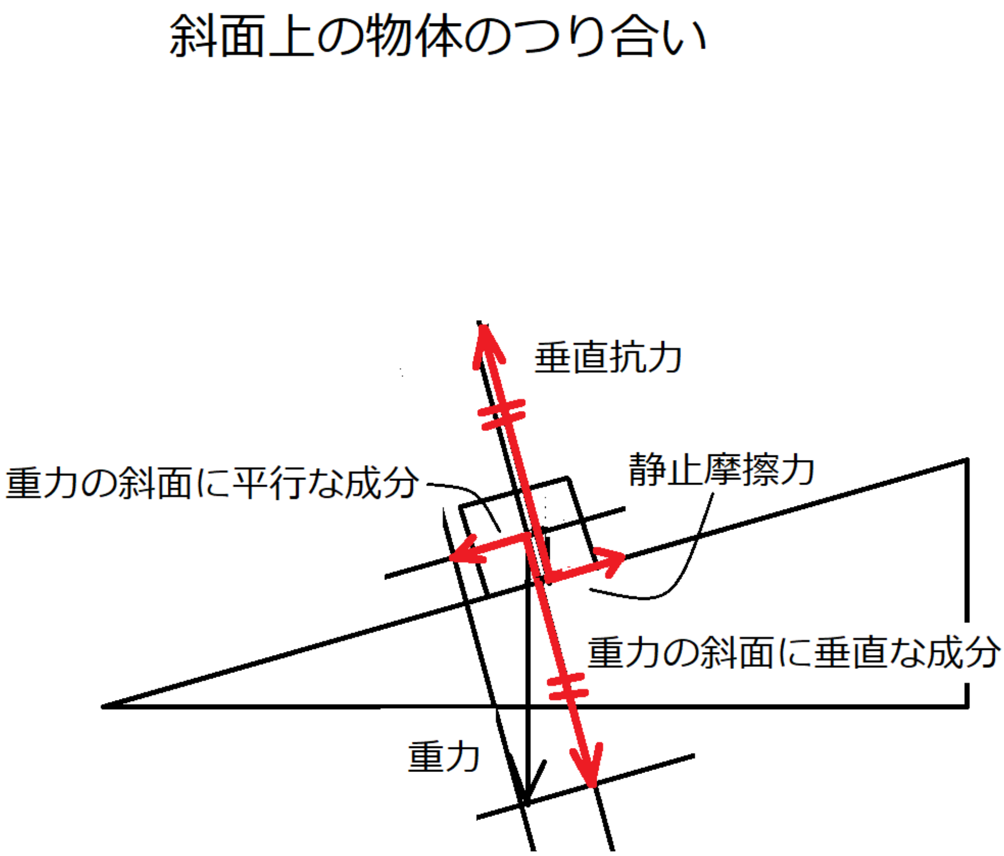


図 10　斜面上の物体のつり合い

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 Œ 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 Œ をつけてもらうと、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か？ 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ない」、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、引っぱ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。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。

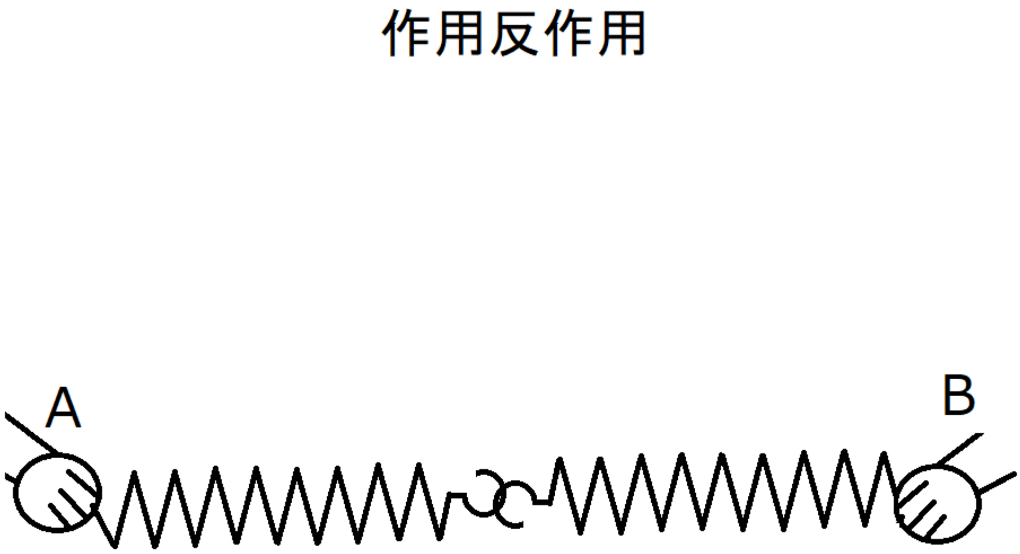


図 11　作用反作用

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。

重要でないものを無視して考える

重要でないものを無視して考える

ある着目している物体が、この後どの様な運動をするのかを考えるとき、その物体が受けている「全ての力」を考慮しなければ、正しい予測はできません。しかし、ほとんどの場合、「全ての力」を厳密に考慮することは難しいか、場合によっては不可能です。「全ての力」を厳密に考慮することが難しいとしても、物体の運動に寄与する力のうち、全てが同程度の寄与するわけではない場合が多いです。一番大きな寄与を与える力に対して、0.1 %程度、あるいはそれ以下の寄与しかなければ、まずは無視してかまわないでしょう。もちろん、どの程度の精度で物体の運動を知りたいかによりますが、使っている測定器（ ものさしとかストップウォッチなど ）の最小の目盛りの単位がメートルとか、秒なのに、ミリメートル、あるいはマイクロメートルの寄与しかなければ、考えてもあまり意味がありません。まずは一番大きく寄与する力は何かを捉え、どんな運動になるか考えます。もし他に、無視できない程度の力が寄与を与えるとするなら、その力を加えて考えます。更に高い精度で考える必要があれば、更に小さな寄与も入れて扱います。この様に段階を踏んで物事を捉えることが必要です。最初からどうでもいいような寄与まで考えていたら、大切なものを見落としたり、見通しが悪くなったりするので、重要なものにまず着目することが大切になります。

例えば、崖の上から小石を落とします。地面に到達するまでの時間を測定して、崖の高さを測定するとします。この時、落下する小石が受ける力を思いつくまま全て挙げてみましょう。まず、重力があるでしょう。空気の抵抗もあるでしょう。無風の時を選んで落としたとしても、その時の気圧も空気抵抗に影響もあるでしょう。もっと広く見ると、地球の自転による遠心力もあるでしょう。しかも、緯度によってその影響は違います。太陽の周りを公転していることによる遠心力もあるでしょう。太陽系も銀河系の中心の周りをまわっているからその遠心力もあるでしょう。他にも何かあるかもしれません。これらの影響を全て取り入れないと崖の高さを計算できないのでしょうか？ これは結局、どのくらいの精度で高さを知る必要があるか、ということによって違ってきます。1cm 程度の誤差はあってもいいのか、1mm 程度の誤差まで知る必要があるのか、原子１個程度の誤差も許されないのか、ということによって、どこまで考えなければならないのか変わってきます。とりあえず主な効果だけを取り入れて計算し、実験と比較して無視できない誤差があるなら次にどの効果を取り入れる必要があるのかを考えます。そうやって、必要な効果までを取り入れていきます。日常生活のレベルであれば、重力加速度を二桁の 9.8 メートル毎秒毎秒として計算すればほぼ問題ないでしょう。

ちょっと極端な話ですが、何年か前に重力波を捉えた実験がノーベル賞をもらいましたが、その観測においては、太陽と地球の距離に対して、原子１個分の違いも測定でき

る程の精度だったようです。現代の人類の科学技術は私の想像を超えたところにありました。そのくらいの精度が求められるのであれば、考えられる寄与について全て考慮しなければならないかもしれません。しかし、日常生活の中で、そこまでの精度が要求されることはないでしょう。まずは大きな寄与を与えるものだけを考えて、おおよそどうなるのかを見積もることが大切です。

ニュートンはりんごが木から落ちるのを見て
万有引力を発見できたのか？

ニュートンはりんごが木から落ちるのを見て、万有引力を発見できたのか？

ニュートンが木からりんごが落ちるのを見て万有引力を発見したと聞いたことがある人は多いと思います。私も幼い頃、テレビか何かで見た記憶があります。これが事実か、そうでないかはどちらでも構いませんが、このことを少し考えてみようと思います。

水平な机の上に、りんごが置いてあります。りんごと机は静止しています。ここでりんごに着目して、「りんごが受けている力」と「りんごが及ぼしている力」を考えてみます。ただし、空気の圧力は考えないとします。もちろん、もし必要なら考えてもよいですが、ここでの話には重要ではないので、考えないとします。りんごと机という２つの物体があるので、物体１つずつに着目して、力を１つずつ考えていきます。まずりんごに着目して「りんごが受けている力」には、どんな力があるか考えてみましょう。多くの人がまず思いつくのは「(りんごが受けている) 重力」だと思います。実際、生徒のほとんどがもれなく重力を見つけてくれます。鉛直下向きの力ですね。りんごが受けている力は、他にないでしょうか。もし、重力しか受けていなければどうなるでしょうか？落下してしまいますよね。しかし、りんごは机の上にじっとしています。りんごが重力を受けているのに落ちないで静止していられるのは、りんごが受けている全ての力がつり合っているからであるはずです。そして重力とつり合うためには、重力と反対向きの力を受けていなければなりません。そして、この時りんごが受けている重力と反対向きの力は、机がりんごを鉛直上向きに支えている力 (垂直抗力) です。これを簡単に「机がりんごを押す (支えている) 力」と言っておきましょう。りんごが受けている力は、「りんごが受けている重力」と「机がりんごを押す (支えている) 力」の２つの力です。次に、机に着目してみましょう。「机が受けている力」には、どんな力があるでしょうか。りんごが机の上にあることから、机はりんごから力を受けていることがわかると思います。この力は何でしょうか。生徒に聞いてみると、「りんごの重さ」と答える生徒が多いです。気持ちは分かります。でも、言葉が正しくありません。これは、曖昧にしてはいけないところなので、なんと言えばいいのか、落ち着いて考えましょう。物理において「りんごの重さ」と言うと、「りんごが受けている重力の大きさ」のことを指します。つまり、「りんごの重さ」は、「りんごが受けている力」です。では、机が受けている力は何かというと、りんごが重力を受けたことによって生まれた、りんごが机を下向きに押している力です。これは「りんごが及ぼしている力」です。この力を簡単に「りんごが机を押す力」と言っておきましょう。確かに、りんごが受けている重力がもとになって発生した力ですが、飽くまで「机が受けている力」なので、「りんごが受けている重力」とは別の力として考えなくてはいけません。これがわかりにくいところだと思いますが、とても大切なことです。力を受けている物体が異なれば、その力の原因がどうであれ、当

然、別の力として区別して考えなくてはいけません。ここまでで、「りんごが受けている力」２つと、「机が受けている力（＝りんごが及ぼしている力）」１つが見つかりました（図 12「りんごと机が受けている力」）。視野を広げていけば、机が受けている重力、机が置かれている床が受けている力等、まだまだたくさん出てきますが、それは今知りたいことから離れていくことになるので、やめておきましょう。

ここで、まず、つり合いについて考えてみます。りんごに着目してつり合いを考えると、りんごが受けている力が２つありました。「りんごが受けている重力」と、「机がりんごを押す（支えている）力」です。これらは同じ大きさで逆向きでつり合っています。すなわち合力は０になっています。これは、りんごが静止していることによって保証されています。次に、作用反作用の関係にある力を考えてみます。机とりんごが力を及ぼし合っているので、ここに作用と反作用の力があるはずです。これらは、「りんごが机を押す力」と「机がりんごを押す力」です。前に説明した作用とその反作用の力の見つけ方の通り、「りんご」と「机」を入れ替えればこれらの対の力になっています。

ここで、もう１組作用と反作用の関係にある力の組を探してみましょう。作用があれば、「例外なく」反作用があるはずですから。相棒（ペアの相手）がまだ見つかっていない「りんごが受けている重力」の反作用は何でしょうか？ ヒントは、「作用に対する反作用の見つけ方」を使ってみることです。ただし、「重力」という言い方では「A」と「B」を入れ替えることができないので、「重力」を別の言い方に言い直す必要があります。「りんごが受けている重力」とは何だったかというと、「地球がりんごを引っ張る力」です。ということは、この反作用は、「地球」と「りんご」を入れ替えて、「りんごが地球を引っ張る力」ということになります。「え？、りんごが地球を引っ張るの？」と思うかもしれませんが、作用反作用の法則に「例外がない」と強く信じれば、りんごが地球を引っ張る力も必ず存在するはずです。ニュートンは、私が思うに、作用反作用の法則は例外なく成り立つと強く信じていたから、りんごが地球を引っ張る力もある、と確信したのだと思います。りんごが木から落ちるのを見て、「りんごが重力を受けて落下している。この力の反作用は何だろうか？」と考えたことにより、「りんごが地球を引っ張る力が存在するはずだ！」と、りんごが地球を引っ張る力を持っているはずであるという考えに辿り着いたのでしょう。「作用と反作用」という概念がなければ、りんごが落ちるのを見ても、「りんごが地球に引っ張られる力（重力）」には気付けても、その逆に「りんごが地球を引っ張る力」には辿りつきません。ただし、この段階では、「りんごが地球を引っ張る力」の存在を信じるか信じないかの話です。というのは、地球がりんごを引っ張る力は直接測定できますが、りんごが地球を引っ張る力は測定のしようがないからです。ニュートンは、とりあえず「りんごが地球を引く力」の存在を信じて、さらに考えを進めて、りんごも地球も大きさの違いはあるものの、どちらも物体であることは変わらない、ということは、「地上の物体同士も互いに引っ張り合っているのではないか」と考え、この引き合う力は、「りんごと地球に限らず、あらゆる物体に当てはまる力であるはずだ」、と考えたことでしょう。今でこそ、私達は地球を外から眺めた写真や映像を見ることができ、地球も大きいけど１つの物体に違いないと思えますが、ニュートンの時代に、自分が立っている大地を１つの物体と考えることができたのは、とても柔軟な発想で天才的な洞察力だと思います。このようにしてニュートンは、りんごと地球に限ら

ず、あらゆる物体が互いに引き合う力を持っていることを発見したのだと私は思います。飽くまで私の想像ですが。この力は、地球だけが特別なのではなく、全ての物体、すなわち万物が持つ（ 有する ）引力であり、「万有引力」と呼ばれます。りんごが木から落ちるのを見て、重力の存在には気づくかもしれませんが、「作用反作用」という考え方をもち、そして、作用反作用の法則に例外がないと強く信じていなければ、決して万有引力の発見には辿りつかなかったと思います。

地球はめちゃめちゃ大きいので、地球が地上の物体を引っ張る力も普通のばねばかりとかで測定できるくらいですが、地球に比べて、地上の物体はとても質量が小さいので、小さい物体同士が引っ張り合う力はとても小さいです。だから普通に生活してる中では、感じることはできないくらい小さな力です。あなた自身も物体なので、あらゆる物体を引き付けていますし、あなた自身もあらゆる物体に引きつけられています。りんごが地球を引っ張る力の大きさは直接測定することはできませんが、地上の物体と物体同士が引き合う力はその後、実験で測定できるようになりました。この実験は、キャヴェンディッシュの実験といいます。この実験で、鉄球と鉄球の間にはたらく万有引力を測定することができました。そして、万有引力の存在がはっきりとは証明されたのでした。しかも、万有引力が、互いの質量の積に比例して、互いの離れている距離の２乗に反比例することも確認されました。

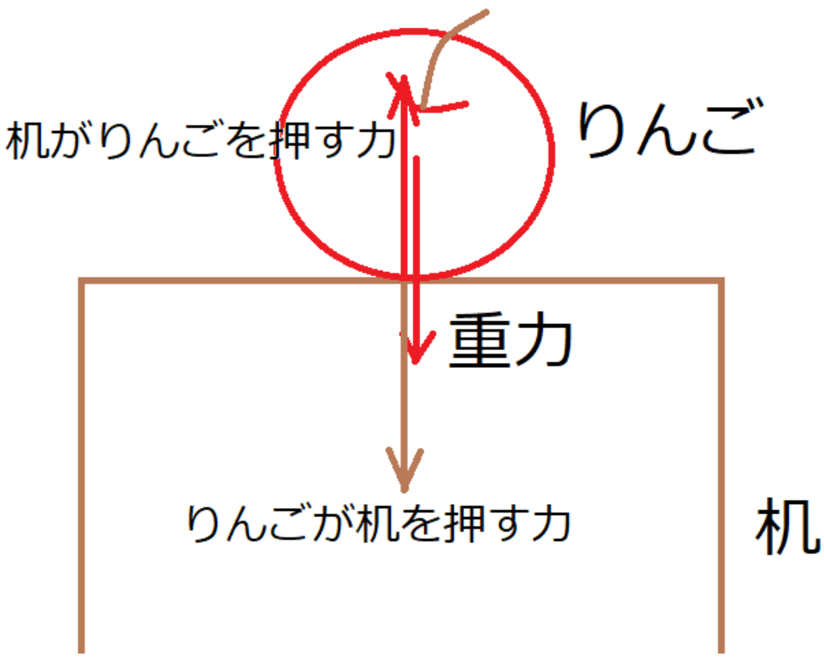


図 12　りんごが受ける力

ニュートンはりんごが木から落ちるのを見て　万有引力を発見できたのか？

休憩②（余談　学級文庫で出会った4次元の世界）

　私が小学校３年生の頃、教室に学級文庫がありました。クラスのみんなが持ち寄った本だったのか、担任の先生が用意したのかはっきりとは覚えていません。結構いろんな本がありましたが、その中で「驚異　なぞだらけの四次元」という本がありました。もちろん、子供向けの本で、絵やマンガを使って書かれていました（昭和 50 年代の話なので、そんな古い本の情報なんてないだろと思って検索してみると、なんと正にその本が出てきました！（フレーベル館のナンバーワンブックス））。当時、もちろんまだ何も知らない小学３年生の私でしたが、とても興味を惹かれました。

次元の話

最初に、次元の話が出てきました。ゼロ次元から始まり、１次元、２次元、３次元、とそれぞれの次元についてアリの視点から説明があります。次元の説明するときに、よくアリの視点が用いられます。おそらくその理由は、人間の視点では常に３次元空間を見て認識しているので、３次元空間の中の２次元の面や、２次元面に描かれた１次元の線、という見方になってしまうからだと思います。もちろんアリも３次元の生物ですが、アリの視点では、全体が見えておらず、目の前の世界だけが知ることのできる世界なので、イメージするのに都合が良いのだと思います。アリの視点とは、その次元の空間に貼りついた目で見た視点、ということです（もちろん、１次元は長さしかないので、そもそも生物は存在できない、とか左右の目など持てないとか細かいことは考えない立場での話です）。私はその時初めて「次元」という概念を認識しました。このアリの話は、後に、宇宙飛行士の野口聡一さんが著書「宇宙においでよ」の中で触れていたり、コミック「宇宙兄弟」の中でも野口聡一さんのエピソードとして登場してます。野口聡一さんがこの本を読んだかどうかはわかりませんが私が知る限りにおいては「驚異なぞだらけの四次元」がアリの話としては一番古いです。野口聡一さんは単なる次元の説明を超えて、発想や視点の転換について話をされており、とても面白いと思いました。

後で必要になるため、ここで少し次元の話をしておきます。「〇〇次元空間」は、実際に存在するかしないかはおいといて、飽くまで数学的な「〇〇次元空間はこんな世界だ」というように理解しておいてください。（実際に存在が考えられている次元もあります。あるいは、『理論的に矛盾のない世界を構成できる次元はこの次元だけだ』という理論もあります。我々の宇宙も、３次元空間と時間を合わせた四次元時空ですが、さらに見えないほど小さく丸まったたくさんの次元が存在してる、とか。いずれにしても、これらの実験的証拠はまだありません。）

ゼロ次元は、広がりのない、点の世界です。「点なんて、何も無いのと何が違うのか？」と言われるかもしれませんが、確かに、何も違わないのかもしれません。そこに１つ次元が加わると、１次元の世界になります。線の世界です。直線でも曲線でも構いませんが、その線に沿ってのみ進むことができます。線の上は、進むか戻るかしかできません。３次元に住む我々がイメージすると、面に描かれた線を思い浮かべますが、１次元に住む人にとって、線から外れた世界は見えません。「あるのに見えない」のではなく、１次元に住む人にとってはそもそも線の外の世界は存在していません。（そして、その線の世界に住んでいて、線の世界の情報しかなければ、直線なのか、曲線なのか判断できません。）その線の上のどこかに障害物があれば、それより先に進むことができません。戻ることしかできないのです。ここで、この世界にもう１つ方向が加わると、２次元の面の

世界になります。もう１つの方向が加わるとは、２つの方向を組み合わせることにより面内のどの位置にも移動できる、ということです。例えば、東西方向と南北方向の組み合わせで、地球の表面上のどこにでも行けるということです。この面は、平面でも曲面でも構いません。先程の線の上に障害物があっても、線から外れて障害物を避けて通ることができます。これが２次元の世界です。もし、あなたが線から外れて障害物を避けて通れば、１次元の人には、あなたが突然何処かへ消えてしまったかのように見えます。

２次元のあなたは線の上の障害物を避けることはできましたが、今度は、あなたの前に左右方向に無限に延びる壁があります。そうなると、その壁の向こうへ行くことはできません。無限に延びる壁でなくても、あなたの周囲をぐるっと壁で取り囲まれれば、壁の外へ出ることはできません。ここに面の方向とは別の、面に垂直なもう１つの方向が加わると３次元の世界になります。高さの方向が加わったと思えばいいです。高さの方向が加わると、３次元空間内のどこへでも移動することができます。東西南北に加えて、高さの方向にも移動できるからです。３次元のあなたは、面から離れて、壁を登ることができます。そして、壁の向こうへ行くことができます。この時、３次元のあなたが面から離れて壁を登り始めたとき、２次元の人には、突然あなたが何処かへ消えてしまったかのように見えます。

まだこれで終わりではありません。次に、左右方向に無限に延びるとともに、高さの方向にも無限に延びる壁があると、あなたはその壁の向こうへ行くことができません。あるいは、無限に延びる壁でなくても、壁があなたの周りをぐるっと、そして天井も、地面もあなたを取り囲めば、あなたはその外へ出ることはできません。しかし、この３次元の３つの方向全てに垂直な４つ目の方向が加わり、４次元空間になれば、４次元目の方向へ移動して、この壁の向こうへ行くことができます。３次元のあなたがその人を見ていると、突然何処かへ消えてしまったかのように見えるでしょう。そして、また、壁の向こう側に突然現れます。この４次元目の方向は、もう１つの空間としての方向でもいいし、時間の方向と思ってもいいですが、時間は空間と「少し」性質が違うので、「もう１つ別の空間の方向」と考えた方がイメージはしやすいと思います。

ここでの話は、先程も言いましたが、飽くまで数学的な空間の話であって、現実の世界のどこかに１次元や２次元の世界があると言っているわけではありません。ただ、我々の住んでいる世界は、時間を含めて４次元時空だと考えられていますが、ものすごく小さく丸まった空間の存在も否定できないので、それらも含めると我々が住んでいる世界が実際に何次元空間なのかはわかっていません。私が大学院生の頃、小さくなっている１次元を加えた５次元で考える理論が流行ったこともありました（Large Extra Dimension とか、Small Extra Dimension など。）。

小学生だった頃の私は、この世界の他に、見えない、行くことのできない別の方向があるのだろうか、と思いましたが、想像もできませんでした。４次元目の方向は、我々の３次元の世界に直交する方向にあります。もちろん、どこを向いても我々にはその方向は見えません。当時、そんな方向が実在するんだろうか、と思っていました。本当に存在するかどうかは置いといて４次元空間や４次元の立体を想像することはできませんが、その輪郭（断面など）をイメージすることはできます。４次元立方体の断面をイメージするために、一旦、次元を落として想像し、そこから類推して高次元のものをイメージ

することができます。例えば、線を切ると切り口は点になり、面を切るとその切り口は線になり、立方体を切るとその切り口は面になります。この様に、切り口（断面）は１つ次元が落ちた世界になります。それから類推すると、４次元立方体を切ると切り口は３次元の立体になる、というわけです。当時の私にとってイメージすることは難しかったですが、理屈は分かりました。

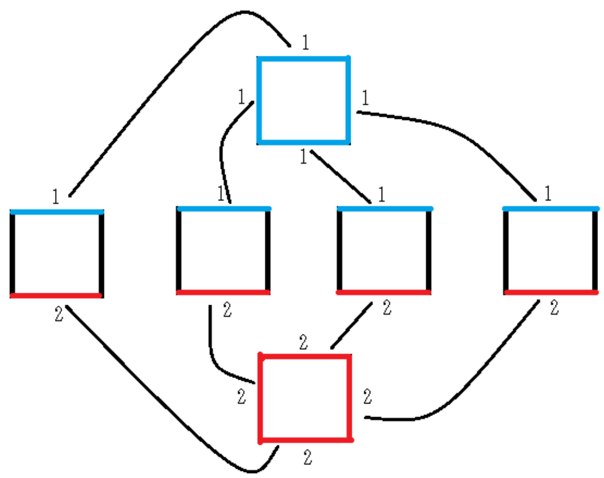
次にそれぞれの次元の『立方体』の展開図を考えてみましょう。２次元の『立方体』は正方形です。正方形は、同じ長さの４本の線（辺）で囲まれています。なので同じ長さの４本の線をつないだものが、２次元の『立方体』の展開図になります。３次元の『立方体』は我々のよく知るサイコロの形の正六面体の『立方体』です。３次元の立方体の展開図は、立方体には正方形が６面あるので、６つの正方形の辺と辺をはり合わせてつないだ形になります。これは小学生の頃、見たことがありました。この展開図を少し分析してみましょう。まず、正方形を６つ用意します。貼り付け方がわかりやすくなるように、辺に色を付けましょう。６つのうちの４つの正方形のそれぞれにおいて、向かい合う一組の２辺のうち、一方を青、他方を赤に色付けします。そして残りの２つの正方形のうちの一方の４辺を全て赤、他方の正方形の４辺を全て青にします（図13[A]）。まず、辺が全て赤の正方形の４辺に、４つの正方形の赤い辺をはり合わせます。これで５つの正方形がくっつきました。この５枚のうち、何もはり付いていない青い辺が４つありますが、このうちのどれか一つに、全てが青い辺の正方形の一つの辺をはり合わせます。これで立方体の展開図が完成します（図13[B]）。次にこの展開図を折り曲げて立方体をつくりましょう。ただし、当然ですがこの「折り曲げ」は平面内ではできず、面に垂直な方向に折らなければ立方体はできません。まず、色のついてない辺を隣同士ではり合わせます。最後に４つの青い辺にすべての辺が青の正方形の辺をはり合わせれば、立方体が完成します。（最初に正方形を６つ用意したのは、１組の向かい合う２つの正方形と、正方形の辺の数の分の４つで合わせて６つでした。）

同様に、次元を一つ上げて４次元の立方体の展開図を作ってみます。はじめに立方体を８個用意します（２つの向かい合う立方体と、立方体の面の数６つで合わせて８個です）。そのうち６つの立方体のそれぞれの向かい合う一組の２面のうち、一方を青、他方を赤く塗ります。残りの２つの立方体のうち一方の６面全てを赤、他方の立方体の６面全てを青く塗ります（図14[A]）。次に６面全てが赤の立方体のそれぞれの面に６つの立方体の赤い面をはり合わせます。何もはり付いていない青い面が６つありますが、このうちどれか一つの面に６面全てが青の立方体の１つの面をはり合わせます。これで４次元の立方体の展開図が完成しました（図14[B]）。この展開図を折り曲げて面どうしをはり合わせれば４次元の立方体が完成しますが、もちろん３次元空間の中で折り曲げてはり合わせることはできません。この展開図を４次元空間の中で折り曲げて４次元立方体をつくりましょう。４次元空間の中で折り曲げて色のついていない面を隣同士ではり合わせます。最後に６つの立方体の青い面を、全ての面が青の立方体のそれぞれの面にはり合わせれば４次元の立方体が完成します。

完成した４次元の立方体を想像することはできませんが、次元の低いところでのイメージを類推して４次元や、さらに高い次元の想像が可能になることを知りました。直接イメージできなくても、類推はできることがわかりました。

さらにその本には、今でこそいろいろな本に書かれている、アインシュタインの相対性理論の話で出てくる、双子のパラドックスの話が漫画で描かれていました。ある教授が若い助手を連れて、光速に近いロケットで片道 10 光年の旅に出る、というストーリーです。相対性理論の効果により、地球に戻った時、地球では 20 年経っているけど、ロケットの中では時間がゆっくり進み、（ロケットの速さによりますが、例えば）0.6 年しか経っていないということが起こります。その当時、タイムマシンに憧れを持っていた私は、こんなことが理論的に考えられているのかと、衝撃を受けました。その時から、相対性理論に興味を持ち、将来は物理の研究者になりたいと考えました。しかしその後、30 歳を過ぎるまで研究を続けましたが、最終的に叶わず、違う道に進みました。そして現在は高校の物理の教師してと生徒に接しています。

【A】



1　青
2　赤

【B】

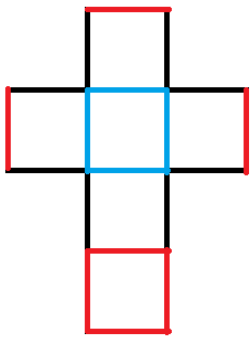
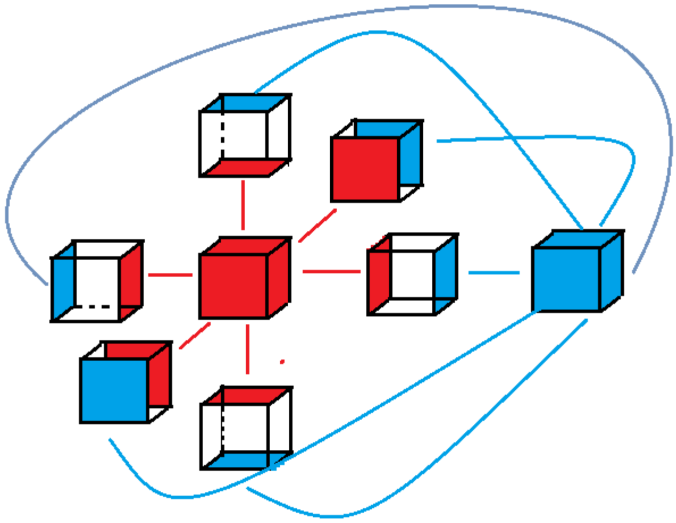


図 13　三次元立方体の展開図

【A】



【B】

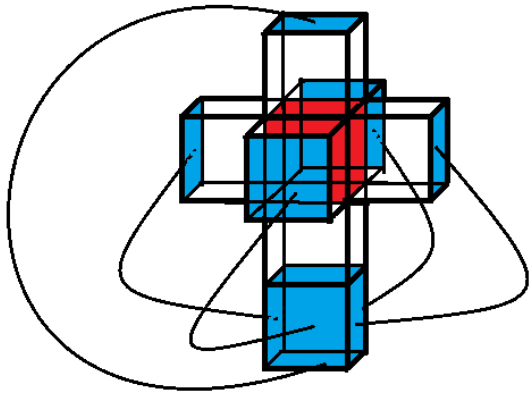


図 14　４次元の立方体展開図

動いてることの痕跡とは？　　～慣性系～

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どな、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。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（ 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 ）。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。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いて、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みると、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。

休憩③（ 余談　宇宙の果て　宇宙の形　宇宙の中心？ ）

私がまだ小学生になる前、世界の果てについて考えたことがなかった頃、（２歳上の）兄だったか、あるいは父だったかに、地球は丸くて、ずっとまっすぐ進むと反対から帰ってくると聞き、衝撃を受けました。地面は平らだと思っていたので、それが丸いっていうこととなかなか結びつきませんでした。しかし、世界地図を見たり地球儀を見たりするうちに、地球の大きさが自分の想像を超えてとても大きいことを知り、一部を見ていると平らなものが、全体では丸いということを受け入れられるようになっていきました。

それからしばらく経って、小学校の４年生か５年生の頃、何かの本で、「宇宙は果てがないけど有限であり、そして宇宙に中心はない」ということが書かれているのを読みました。果てがなくて有限というのは、ちょっと大雑把に言えば、ずっとまっすぐ進むと反対側から元の位置に戻ってくる、ということです。幼い頃に聞いた、地球は丸くてまっすぐ進むと反対から帰ってくる、という話と似ています。この宇宙空間は（時間の１次元を除けば）３次元ですが、「果てがないけど有限」な３次元空間をイメージするのは難しいので、まずイメージしやすい低い次元から考えてみます。１次元の線の世界で有限だけど果て（端）がないのは、線の端と端をつないだ円になります（きれいな円でなくても構いませんが）。正確には円そのものではなく、円周になります。線に沿って「まっすぐ」進むと反対から元の位置に戻ってきます（図 15A）。次に１つ次元を上げて２次元の面の世界で考えてみましょう。面の世界で有限で果てがないものは、例えば球（ボールや地球など）の表面になります。（先程の「円周」は２次元の “球”（円）の表面と考えることもできます。）３次元の球の表面は有限だけど果て（端）はありません（穴の開いたドーナツの表面のような面も有限で端がありません）。ボールや地球の表面には果て（端）がありませんが、面積は有限です。そして球の表面ではどの方にまっすぐ進んでも反対から戻ってきます（図 15B）。球の表面上での「まっすぐ」とは、その球の表面に住んでいる人にとっての「まっすぐ」です。ここではあまり深入りしませんが、球の表面でいうと、例えば北極と南極を最短距離で結んだ線に沿って、すなわち経線に沿って一周回るような経路や、赤道に沿ってまっすぐ進む経路が地球表面上では「まっすぐ」な直線の経路になります。この経路は２次元球面の世界の中で「まっすぐ」です。球の表面の場合、北極から出発すると、どの方向に「まっすぐ」進んでも南極を通って一周回って反対から戻ってきます（図 15B）。このことから類推して想像すると、４次元球の「表面」（「面」と言っても実際は２次元面でなくて３次元空間ですが）が有限だけど果てがないということで、理解したつもりになりました。この宇宙もイメージは球の表面で考えたことと同じで、地球からどの方向にまっすぐ（我々の３次元空間の中でのまっすぐ）進んでも、宇宙を一周回って反対から戻ってきます。我々の世

界から見たら、どう見ても「まっすぐ」な方向です。まっすぐ進んでいるのに反対から帰ってくるのです。４次元球の表面はなかなかイメージは難しいかもしれませんが、３次元球の表面からの類推で少しイメージできると思います。また、宇宙には中心がないということもその本当の意味が分かったのはその頃でした。地球の表面上には中心がなく、どこも同じで特別な点はありません。同様に、４次元球の表面（ この宇宙空間 ）にも中心はありません。

そのことを知ってから程なく宇宙はずっと変わらないものではなく、膨張していることも聞きました。宇宙に始まりがあることもその頃知りました。それも衝撃でした。無限に昔から宇宙があったのだろうか、この後も、無限に未来まで宇宙は続くのだろうか、と思ったことはありましたが、それ以上考えが進むはずもなかった頃、宇宙に始まりがあることを知ったのでした。この宇宙の膨張のため、実際は光でも宇宙を一周まわって反対から帰ってくることはできないようなので、飽くまで宇宙の形についての想像にとどまりますが、宇宙が膨張していることや、「まっすぐ」どこまでも１つの方向に進むとそれが反対と繋がっていることが、とにかく衝撃でした。実際の我々の宇宙の場合、もちろん反対から帰ってくることが実際に確かめられているわけではありませんし、確かめようもありませんが。

ここで、宇宙の形についてちょっと想像で遊んでみましょう。実際は宇宙は時間を除いて３次元空間ですが、想像が難しいのではじめに空間の次元を１つ落として宇宙を２次元として考えてみましょう。先程述べたように、３次元の球の表面は２次元なので想像できると思います。この３次元の球の表面（ ２次元 ）を我々の宇宙と考えてみましょう。はじめに平面内に輪ゴムを２つ並べて、輪ゴムが平面から離れないようにしたままその輪ゴムの外側同士全体をくっつけようとしてもくっつることはできません（ 図 16 ）。これを平面ではなく曲面である３次元球の表面でやってみます。３次元球の表面に、輪ゴムを２つ置きます。北極と南極のように、反対側におきましょう。そして２つの輪ゴムをどんどん大きくしていくと、中間、すなわち赤道に当るところで出会い、２つの輪ゴムの外側同士がぴったりとくっつきます。平面内ではできなかったことが（ 曲面である ）球面上ではできたのです（ 図 17 ）。これを次元を１つ上げてやってみます。今度は輪ゴムではなく、ゴム風船を２つ並べます。３次元空間内で、どうやっても、２つの風船の外側の表面全体同士をぴったりはりあわせることはできません。しかし、１つの風船をここに、もう１つの風船を宇宙の反対側に置いて、両方の風船をどんどん大きくしていきます。２つの風船が宇宙の半分ずつを占めたとき、２つの風船の表面全体同士がぴったりとはりあわされます。不思議ですが。再び３次元球の表面の話に戻ります。３次元球の表面に輪ゴムがあるとします。その輪ゴムの内側と外側があります。わかりやすく区別するために、内側を赤く、外側を青く色付けしておきます。自分が球面上にいて、その輪ゴムの外から見ると、青く見えています。その輪ゴムを球面から離れないようにしたままどんどん大きくしていきます。そして輪ゴムの直径が球の直径の大きさを超えると、今度は小さくなっていき、もとの大きさに戻ります。この時、輪ゴムの内側と外側が入れ代わって、外から見ると赤く見えています。今度はこれを１次元増やした３次元の世界でやってみます。我々の宇宙空間です。ゴム風船があり、内側が赤く塗られて、外側が青く塗られています。今、この風船を外から見ると青く見えています。こ

の風船が広がり、どんどん大きくなって宇宙の「直径」を超えると今度は小さくなっていき、元の大きさに戻ります。その時、内側と外側が入れかわり外から見ると赤く見えています。球面の表と裏（ 外側と内側 ）を入れかえることができたのです。これも想像が難しいですが、４次元の球の表面上ではそのようなことが起こります。

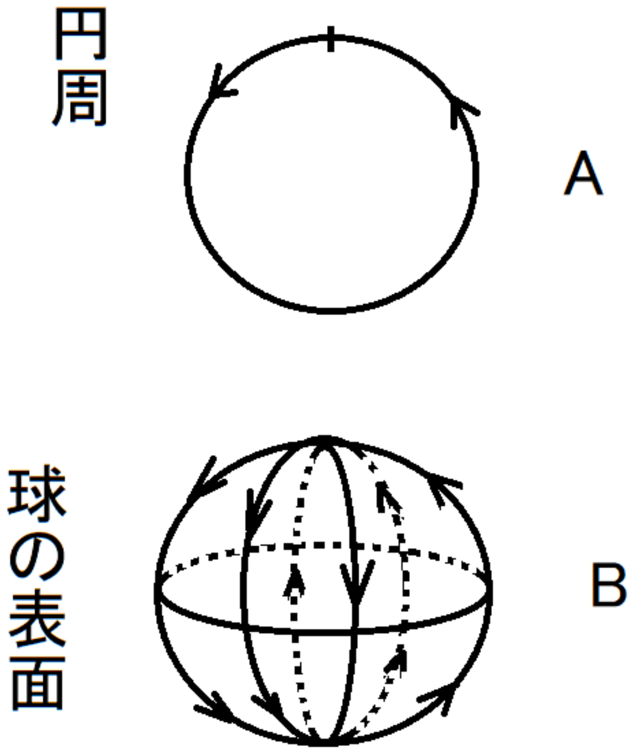


図 15　果てのない１次元２次元

平面上の輪ゴム２個

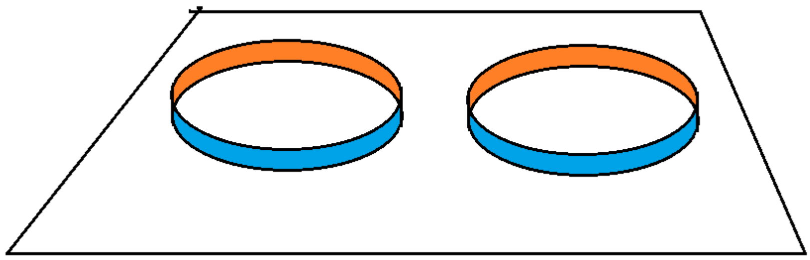


図 16　平面上の輪ゴム

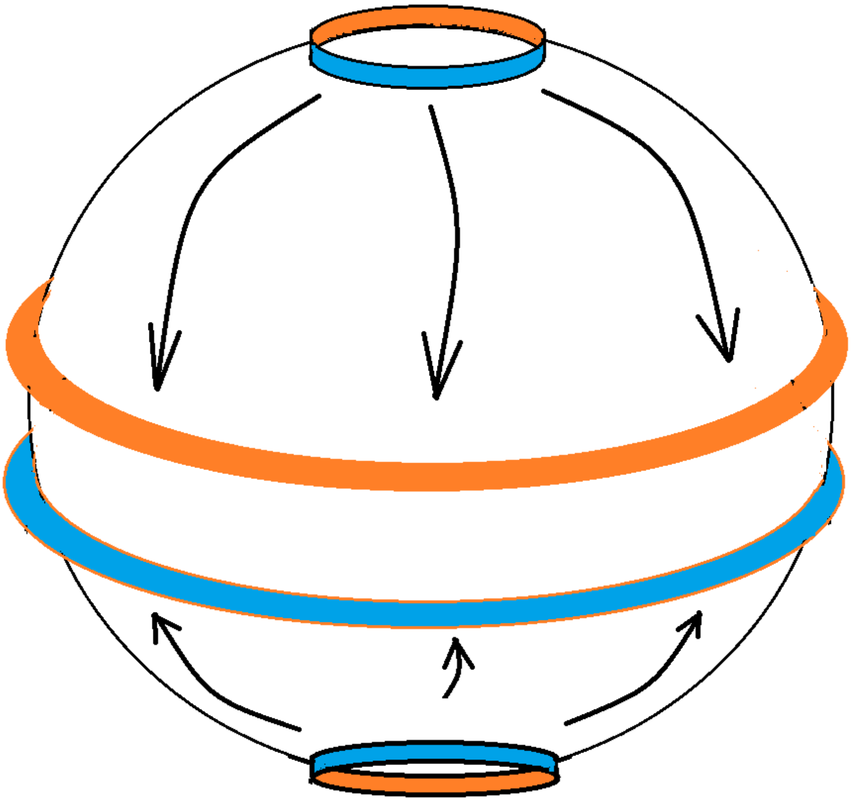


図 17　球面上の輪ゴム

仕事って何？

仕事とは

　物理では、「エネルギー」のところで話したように、「仕事」で「エネルギー」を定義します。改めて確認しておくと、「エネルギー」とは「物体に仕事をする能力」と定義されています。つまり、エネルギーがあれば、物体に対して仕事をすることができるということです。では、「仕事」とは何かというと、「物体に力を加えながら、力の方向に移動させること」です。力の方向というのは、物体に加えた力と同じ向きの場合もあれば、加えた力と逆向きの場合もあります。この２つの向き両方を含めて「方向」と言っています。

正の仕事と負の仕事

力を加えた向きに物体が移動することはイメージできると思いますが、逆向きに移動する場合もあり、これが少しイメージしづらいと思います。物体が受けている力が１つなら、確かにその力の向きに移動します。しかし、他にも力を受けていたら着目している力の向きと違う向きに移動することがあります。逆向きの場合もあります。そして、力の向きと同じ向きに移動したのか、逆向きに移動したのかで、その力がした仕事が正か負かを定めます。同じ向きに移動した場合は正の仕事、逆向きに移動した場合は負の仕事とします。そして、「力」Œ「力の向きに移動した距離」を仕事と定義します。逆向きに移動した場合はこの値にマイナス符号をつけて仕事を表します。【図 18】において、犬が力を加えている向きと移動の向きは同じなので犬がする仕事は正の仕事ですが、子供が引っ張る力と犬の移動の方向が逆向きなので、子供がする仕事は負の仕事になります。単位は［J］で「ジュール」と読みます。１ N の力を加えながらが力の向きに１ m 移動させたときの仕事が１ J です。逆向きに移動した場合は －１ J です。

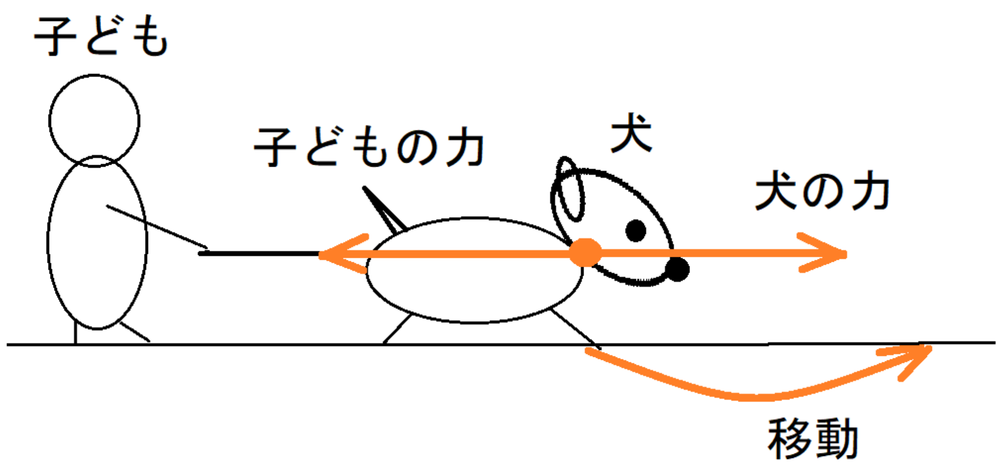


図 18　正の仕事負の仕事

仕事って何？

斜めの場合の仕事

実は、力を受けながら物体が移動するとき、その力の向きと同じ向きでも逆向きでもない場合もあります。例えば、水平な床に置いてある荷物にひもをつけ、引っ張るとき、ひもが必ずしも水平になっているとは限りません。水平に対して斜めにひもを引っ張ることもあるでしょう。そんなとき、「仕事」をどう考えれば良いでしょうか。仕事は飽くまで、「力」と「力の向きに移動した距離」の積が定義なので、斜めにはたらいている力を、「移動の方向」と、「それに垂直な方向」に分解してやります。そして、その「移動の方向の力の分力」と「距離」をかけた量に正・負の符号をつけたものを「仕事」と定義します（ 図 19「斜めの力の仕事」)。ここでも、「力の分力の向き」と「移動の向き」が逆ならマイナスをつけます。

物体がいくつかの力を受けているとき、それぞれ一つずつの力についてその力が物体にした仕事が定まります。それらの力のうちの一つに着目したとき、その力がした仕事が正の仕事になるか負の仕事になるかはその着目している「力の向き」と「移動の向き」の関係で決まっていることを覚えておいてください。同じ向きなら正の仕事、逆向きなら負の仕事です。力が移動の向きに対して斜めの場合も、「移動の方向の分力が同じ向きなら正、逆向きなら負の仕事です。

このように、仕事に正の仕事と負の仕事があることに対応して、エネルギーにも正のエネルギーもあれば負のエネルギーもあります。それはまた後の章で話します。

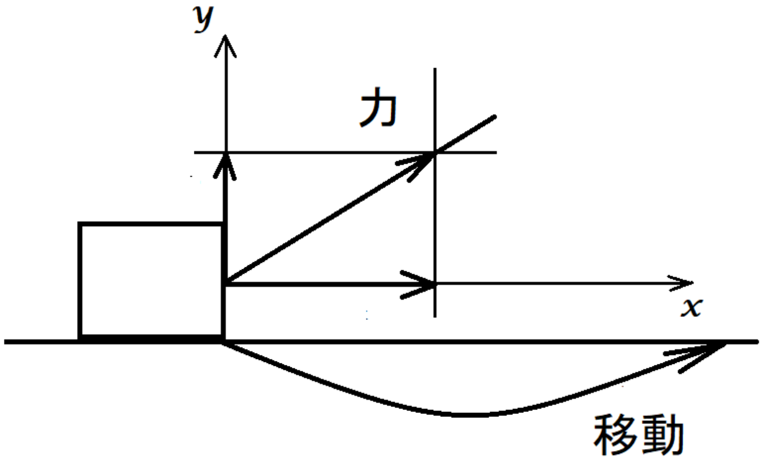


図 19　斜めの力の仕事

变化量、增加量、减少量

变化量、增加量、减少量

物理に限りませんが、扱う様々な量が時間的に変化します。例えば、物理では「位置」や「速度」や「エネルギー」等、様々な変化する量を扱います。その時、意外と混乱するのが何から何を引かなければならないのか、ということです。これを整理しておきます。ここでの話は、後でとても重要になるので、こんな話があったな、と頭の隅に入れておいてください。

まず、「〇〇の変化量」を求めたいとき、「時間的に後の〇〇」から「時間的にはじめの〇〇」を引けば変化量が求まります。「後」から「はじめ」を引くということが重要で、引く順序を間違えてはいけません。増えたか減ったかに関係なく、必ずこの順序で引算をします。結果がプラスであれば増加、マイナスであれば減少、と理解してください。

「増加量」も計算方法は「変化量」と全く同じです。増加量を求めて、プラスであれば増加した、ということですが、マイナスになったら　減少していた、と理解してください。例えば、財布の中に朝、3000 円入っていたとします。お小遣いをもらったり、コンビニで買い物したり、一日終わったところで夜、財布の中を見ると、4000 円でした。この時、財布の中身の増加量の計算は、もちろん、「夜の財布の中の金額－朝の財布の中の金額」で増加量は「1000 円」です。もし、夜、2500 円になってたら、増加量は「マイナス 500 円」です。減った場合は増加量はマイナスで表します。

これらに対して、「減少量」を求めるときは引く順序が逆になります。「〇〇の減少量」を求めたいとき、「時間的にはじめの〇〇」から「時間的に後の〇〇」を引けば減少量が求まります。「はじめ」から「後」を引いて減少量を求めます。先程の例で言うと、減少量は、「朝の財布の中の金額－夜の財布の中の金額」で、夜、2500 円になってたら減少量は 500 円で、もし夜、4000 円になってたら、減少量は、マイナス 1000 円になります。引算の結果がプラスであれば減少した、マイナスであれば増加したと理解してください。引く順序を間違えないように気をつけましょう。

保存力

これから、力学的エネルギー保存の法則を導いていきますが、その前に１つ準備が必要です。力学的エネルギーが保存するのか、あるいは保存しないのかということに保存力と呼ばれる、ある特別な力が関係します。ここではまず保存力の話をします。

保存力

　名前は難しそうに聞こえるかもしれませんが、名前の由来は、「力学的エネルギーを保存させる力」なので、保存力と呼ばれています。保存力である力には、重力や電気力、磁気力、弾性力（ バネの力など ）、万有引力などがあります。重力は万有引力と同じものと思ってもらってかまいません。中学、高校で学ぶ重力は地球表面付近の万有引力のことを指します（ もう少し細かく言うと、地表付近の万有引力と地球の自転による遠心力の合力です ）。

　物体がある力を受けていて、その物体が出発点から別の点（ 終点 ）へ移動する間に、その力が物体にする仕事が、物体がたどる経路によらずに出発点と終点の位置だけで決まるとき、その力を保存力と言います。逆に言うと、保存力であれば、出発点と終点を決めると、出発点から終点まで物体が保存力を受けながらどんな経路でたどって移動しても、保存力がその物体にする仕事は同じ値になります。ある力がする仕事が経路によらないためには、その力はある条件を満たさなければなりません。これは大学で学ぶ内容なので、詳しくは触れませんが、力がある微分方程式を満たしていれば、その力がする仕事が経路によらないことが示せます。これを示すには大学で学ぶ数学が必要になりますが、この後の話には必要ないので、ここでは深くは触れないでおきましょう。とにかく、上で挙げた重力等の力はこの条件を満たす力なので、保存力であることが分かっています。

位置エネルギー

保存力であれば、その保存力に対応した「位置エネルギー」を定義することができます。それぞれの保存力に対応して、「重力による位置エネルギー」とか、「弾性力による位置エネルギー」とか、「電気力による位置エネルギー」、等と呼ばれる位置エネルギーが定義されます。位置エネルギーというのは、物体が存在する位置において、物体がその位置でもつエネルギーが定まるという、そんなエネルギーです。一般に位置エネルギーの定義は、「ある位置で物体がもつ位置エネルギーは、物体がその位置から基準の位置まで移動する間に保存力がする仕事」です。基準となる位置は、どこに定めても構いませんが、計算するとき少しでも手間が省ける位置を選ぶとよいです。保存力なので、その位置から基準の位置まで移動する間に、保存力がする仕事は経路によらず（ どんな経路で移動しても ）同じ値になります。つまり、基準の位置を終点としたとき、出発点を決めれば、基準の位置まで、どんな経路でたどっても保存力がする仕事は全て同じ値になるので、出発点で、ある定まったエネルギーを持つ、ということです。これが位置エネルギーです。思い出してもらうと、エネルギーとは、「仕事をする能力」なので、出発点において、基準まで移動する間に保存力が位置エネルギーの分だけ物体に対して仕事をする能力を持っている、ということです。ある点から基準まで移動する間に保存力がする仕事が正の仕事ならこの点における位置エネルギーは正であり、もし保存力がする仕事が負ならこの点における位置エネルギーは負ということになります。例えば、重力による位置エネルギーの場合、基準より高い位置に物体があれば、基準の位置まで降りていく間に重力がする仕事は正なので、位置エネルギーは正となりますが、基準より低い位置にあれば、基準の位置まで昇っていく間に重力がする仕事は負なので、位置エネルギーは負となります。

保存力がする仕事

ここで、保存力についてもう少し話を続けます。出発点が決まれば、物体が基準まで移動する間に保存力がする仕事がわかるということと、保存力がする仕事が経路によらないということを利用して、１つ重要なことが言えます。次のことが言える理由を考えてみましょう。

『物体がある点 A から、ある点 B へ移動する間に保存力が物体にする仕事は、「A での位置エネルギー」－「B での位置エネルギー」に等しい。』

どうでしょうか？ ヒントは、保存力がする仕事は経路によらないので、A から基準まで移動する２つの経路で保存力がする仕事を考えてみる、ということです。１つは A から直接基準まで移動する経路、もう１つは A から B を経由して基準まで移動する経路です。どちらの経路で移動しても、保存力がする仕事は等しいはずです。「A → B →基準」の場合、保存力がする仕事を「A → B」と、「B →基準」に分けると、「B →基準」の部分は、「B での位置エネルギー」に他なりません。一方、「A →基準」の場合は「A での位置エネルギー」に他なりません。これを次のように書いてみましょう。

「仕事（ A →基準)」　＝「仕事（ A → B)」＋「仕事（ B →基準)」

なので、

「A での位置エネルギー」＝「仕事（ A → B)」＋「B での位置エネルギー」

となります。というわけで、求めたかった、「A 点から B 点に移動する間に保存力がする仕事」すなわち「仕事（ A → B)」は

「A での位置エネルギー」－「B での位置エネルギー」

となります（ 図 20 ）。今、A から B へ移動するので、「はじめ」が「A 点」、「後」が「B 点」なので、この引算は言い換えると、「A から B へ移動するときの位置エネルギーの減少量」となります。前の章で話しましたが、減少量を計算するときは「はじめの量」－「後の量」で求めるということを思い出してください。

このことが、力学的エネルギー保存の法則を導出するときに重要となります。覚えておいてください。もう一度確認しておきます。

『ある点 A から、ある点 B へ移動する間に保存力がする仕事は、「A での位置エネルギー」－「B での位置エネルギー」に等しい。』

少し言い換えると、

『ある点 A から、ある点 B へ移動する間に保存力がする仕事は、A から B へ移動する際の位置エネルギーの減少量に等しい。』

です。式で表わせば

「仕事（ A → B ）」＝「A での位置エネルギー」－「B での位置エネルギー」

です。

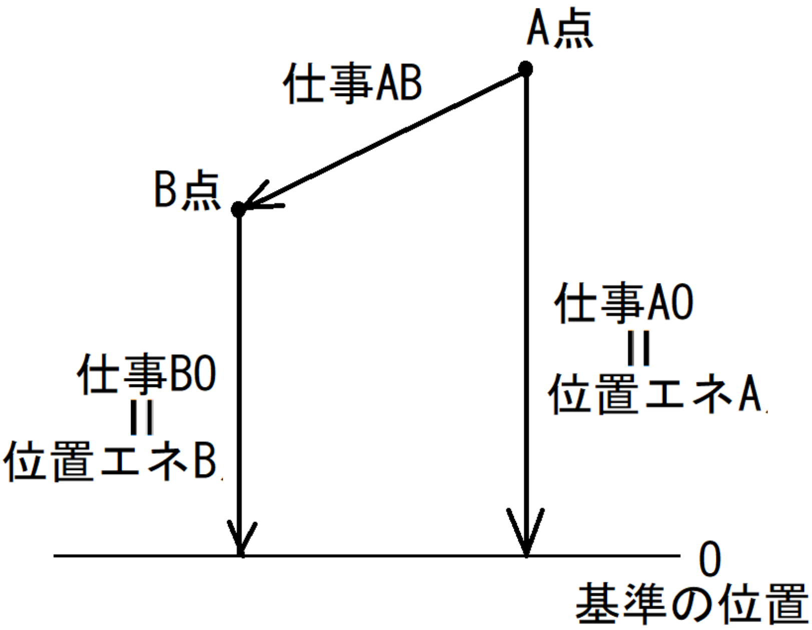


図 20　保存力のする仕事

運動エネルギーと仕事の関係

物体にした仕事と物体の運動エネルギーの変化量

運動エネルギーを持っている物体（A）は、止まるまでの間に他の物体（B）に対して仕事をすることができます。これはエネルギーのところで話したことですが、これと逆に運動エネルギーを持っている物体（A）に仕事をしてやると、物体（A）の運動エネルギーは変化します。同じ意味ですが、少し言い方を変えると、「物体（A）の運動エネルギーの変化量はその物体（A）がされた仕事に等しい」と言うことができます。

これは、作用反作用の法則を考えれば当然であることかわかります。動いている物体（A）が、他の物体（B）に対して仕事をするということは、他の物体（B）に対して力を及ぼしているわけで、その物体（B）から反作用の力を受けます。力の向きは、作用と反作用では逆向きで同じ大きさなので、自分（物体A）が他の物体（B）に対してした仕事と自分（物体A）が物体Bにされた仕事は逆符号の関係になります。まず、運動エネルギーを持っている物体（A）が他の物体（B）に対して仕事をすれば、その仕事の分だけ、物体Aの運動エネルギーは減少します。つまり「（物体Aの）運動エネルギーの減少量は他の物体（B）に対してした仕事に等しい」です。「（物体Aの）運動エネルギーの減少量」＝「他の物体（B）に対してした仕事」が成り立っています。自分（物体A）が他の物体（B）に対してした仕事と逆符号の仕事を自分はされているので、言い方を変えると、

「（物体Aの）運動エネルギーの減少量」＝「他の物体（B）に対してした仕事」＝－「自分（物体A）が物体Bにされた仕事」

なので、

「自分（物体A）がされた仕事」＝－「（物体Aの）運動エネルギーの減少量」＝「物体（A）の運動エネルギーの変化量」

という関係が成り立っていることになります。物体（A）に加えた力の向きに物体（A）が移動すれば物体（A）にした仕事は正の仕事であり、物体（A）はより速く動くことになります。物体（A）に加えた力の向きと逆向きに物体（A）が運動していれば、物体（A）にした仕事は負の仕事となるので、物体（A）の速さはより遅くなります。言い方を変えると、物体（A）に正の仕事をすれば運動エネルギーは増加し、負の仕事をすれば運動エネルギーは減少するということです。

ここで、物体（A）に対してした仕事は、どんな力がした仕事であってもこの関係は成り立ちます。すなわち、保存力であっても、保存力でない力であっても構いません。（保存力でない力としては、例えば摩擦力や手で加えた力等があります。）

運動エネルギーを持っている物体は、止まるまでの間に他の物体に対して仕事をすることができます。これと逆に、運動エネルギーを持っている物体に仕事をしてやると、物体の運動エネルギーは変化します。同じ意味ですが、少し言い方を変えると、「物体の運動エネルギーの変化量は物体にした仕事に等しい」と言うことができます。

「物体の運動エネルギーの変化量」＝「物体にした仕事」

力学的エネルギー保存の法則

次にこの本での目的としていた、力学的エネルギー保存の法則についてお話します。力学的エネルギーが保存することは、ある条件が満たされれば、自動的に導出されます。そのあたりは、うまくつくられてるなあ、と思います。その前に、力学的エネルギーとは何かを説明しなければいけませんね。

力学的エネルギー

　物体が運動しているとき、その物体は、「運動エネルギー」を持っています。そしてまた同時に、その物体が保存力を受けていれば（ 例えば重力や弾性力など ）、「位置エネルギー」も持っています。その位置エネルギーは、物体の位置によって定まっています。位置が変われば、位置エネルギーも変わります。つまり物体は、各瞬間において「位置エネルギー」と「運動エネルギー」の両方を持っています。ただし、どちらかがゼロの場合もありますが。『各瞬間における、位置エネルギーと運動エネルギーを足したもの（ 和)』を力学的エネルギーと呼びます。ここで注意が必要ですが、このときに足す位置エネルギーと運動エネルギーは同じ瞬間のものでなければいけません。別々の瞬間における位置エネルギーと運動エネルギーを足しても、それは力学的エネルギーではありません。それは意味のないものなので、名前すらついていません。「同じ瞬間における位置エネルギーと運動エネルギーの和」のみ、力学的エネルギーと呼びます。ここで示す力学的エネルギー保存の法則は、物体が各瞬間に持っている位置エネルギーと運動エネルギーの和である力学的エネルギーこそが（ ある条件の下で ）保存されるということがポイントです。

出発点

　ここまでで準備してきたことを改めて確認しておきます。

　①物体に仕事をすると、その仕事の分だけ物体の運動エネルギーは変化する（ 物体の運動エネルギーの変化量は、物体にした仕事に等しい ）
　②移動において保存力がする仕事は、位置エネルギーの減少量に等しい

です。この２つがあれば、力学的エネルギーがある条件の下で保存されることが示せます。力学的エネルギーが（ ある条件の下で ）保存することを示す前に、どんな条件が必要か考えてみましょう。どうでしょうか？ どんな条件があれば力学的エネルギーが保存されるのでしょうか？ 少し考えてみてください。

　導きたいことを確認しておきましょう。それは、

「物体が A 点から B 点へ移動するときに、力学的エネルギーが保存される」

ということです。力学的エネルギーが保存される条件を考える手助けとして、１つ確認しておきます。先程、ここまでで準備してきたことを確認しましたが、その１つめの①において、「物体に仕事をすると」と言っていますが、この仕事をする力は、保存力だろうが、保存力でない力だろうが、どんな力の場合であっても、その力がした仕事の分だけ運動エネルギーは変化します。
　導くべきこと、すなわち力学的エネルギーが保存されるということは、（ 物体の運動による ）移動において力学的エネルギーが変わらないということで、「出発点である A 点と終点である B 点での力学的エネルギーが等しい」ということです。これを、「運 A」＋「位 A」＝「運 B」＋「位 B」と表します。ここで「運 A」や「位 A」は、「A 点における運動エネルギー」や「A 点における位置エネルギー」を簡略化して表したものです。B 点も同様です。とりあえず、条件は後で考えるとして、先に進んでみましょう。（ 条件はなんだろうか、という疑問を頭の片隅に置いといて下さい。）

力学的エネルギー保存の法則及び保存の条件

　出発点の１つめ①は、
①「物体の運動エネルギーの変化量は物体にした仕事に等しい」
です。このとき、物体がいくつかの力を受けているとき、これらの力がする仕事を、力ごとに求め、和をとれば、物体が受けている全ての力がした仕事になります。そこで、この仕事の和を、保存力がした仕事と、保存力以外の力がした仕事に分けます。つまり、「全仕事」＝「保存力がした仕事」＋「保存力以外の力がした仕事」と書けます。もう少し簡単に書くために、「保存がした仕事」を「仕保」と表し、そして「保存力以外の力がした仕事」を「仕他」と表しましょう。この簡略化した表し方を用いると、出発点の①は、
「運動エネルギーの変化量」＝「仕保」＋「仕他」
と表せます。「運動エネルギーの変化量」は、「後」－「始め」なので、「A 点」から「B 点」に移動するとき、「運 B」－「運 A」です。一方、「仕保」は、「A 点から B 点へ移動する間に保存力がする仕事」なので、出発点②より位置エネルギーの減少量で表わせ、「位 A」－「位 B」と表わせます。

　整理すると出発点の①は、
「運 B」－「運 A」＝「位 A」－「位 B」＋「仕他」
となります。この式において、左辺や右辺に点 A の量と点 B の量が混在しているので、これをちょっと移項して点 A の量と点 B の量を分けてみると、
「運 B」＋「位 B」＝「運 A」＋「位 A」＋「仕他」
となります。これで、力学的エネルギーが保存するための条件は見えるでしょうか？ 右辺の「仕他」がゼロであれば、「点 A での力学的エネルギーと点 B での力学的エネルギーが等しい」ことを表しているのが分かります。つまり、力学的エネルギーが保存するための条件は、『保存力以外の力がした仕事が 0』ということです。そして『保存力以外の力がした仕事か 0 のとき、力学的エネルギーは保存される』ということになります。これが示したかったことです。

　もう少しこの式を眺めてみましょう。もし、「仕他」が 0 でなければ、
「力エネ B」＝「力エネ A」＋「仕他」
となるので、移項すると
「力エネ B」－「力エネ A」＝「仕他」
となります。ここで「力エネ A」は「A 点での力学的エネルギー」を簡略化して表したものです。B 点も同様です。B 点が後で、A 点が始めなので、左辺は、「力学的エネルギーの変化量」になります。つまり、「保存力以外の力がした仕事の分だけ力学的エネルギーが変化する」ということになります。

　まとめると、

「仕他」＝ 0　のとき力学的エネルギーは保存され、

「仕他」＞ 0　であれば力学的エネルギーは増加し、

「仕他」＜ 0　であれば力学的エネルギーは減少する

ということになります。

休憩④（ 余談　最後の１分まで ）

休憩○（余談　最後の１分まで）

これは、私が高３の時の大学入試に失敗して、高校（ 自分の通っていた高校でなく、同じ市内の兄が通っていた高校 ）に併設されていた補習科という、大学受験に失敗した卒業生を受け入れるところに入って浪人していたときの話です。担任の先生が模試などの前には必ず「最後の一科目まで、最後の１分まで戦え！」と言ってました。もう、この一年の後はない、と思って浪人していたので、その言葉の意味はわかっていました。模試のときには必ず、最後の鐘がなるまで、時間を使って解いたり確認したりしていました。一年後の、今と名前は違いますが（ 当時は共通一次試験 ）センター試験のとき、物理学科志望で、物理が得点源だったにも関わらず、物理で失敗して、それまで取ったことがないほど低い点数でした。かなりのダメージを受けましたが、「最後の一科目まで、最後の１分まで戦え！」という言葉を思い起こし、残りの科目、そして最後の科目の「地理」に取り組みました。地理は、自分の一番苦手科目で、模試でもいつも足を引っ張ってました。それでも全力で取り組みました。結果は、過去最高点で、いつもの物理の点数より、ちょっと低いくらいでした。トータルの点数は、第一志望の大学のボーダーにも届いてませんでしたが、二次試験での逆転が可能だったので、第一志望の大学を受験できました。あの地理のお陰で首の皮一枚繋がりました。

希望の大学に入学して１年か２年経った頃、スラムダンクの連載が始まりました。その中で出てくる、あの安西先生の有名な言葉「あきらめたらそこで試合終了ですよ」があの担任の先生の言葉と重なり、とても共感しました。

受験生の、皆さんには「最後まで諦めない」ことと、「最後まで気を抜かない」ことを心に留めて受験を乗り越えて欲しいと思います。

休憩⑤（ 余談　金魚の子のミステリー ）

これは、物理とは全く関係ない話ですが、ちょっとした不思議なことがあったので、何が起こったのか考えてみて欲しいと思います。10 年くらい前だと思いますが、水槽で金魚を飼っていました。幅 40cm くらいで、高さ 25cm くらいの大きさの水槽だったと思います。時々卵を産んで、子どもが産まれてました。水槽の上には、ガラス板のふたがしてあり、水面とガラス板の間は 3 〜 4 cm くらいでした。エアポンプで泡がブクブク出てました。その泡がはじけて、ガラス板には常に水滴がいくつもついていました。ある日、そのガラス板を上からのぞいていると、ガラス板についてる水滴の中に、産まれたばかりの稚魚が入って水滴の中で動いてました。他の水滴 2 つか 3 つの中にも同じように稚魚が入っていて水滴の中で動いてました（ 図 21 ）。何が起こっているのか分かりませんでした。産まれたばかりの稚魚が水面からジャンプして水滴に入ったとは考えられません。3 〜 4 cm は水面から離れていたので。稚魚は 2〜3mm くらいで、水滴とほぼ同じくらいの大きさです。大人の金魚が尾ビレでバシャッとしたときにたまたま稚魚もいっしょに、とも考えにくいです。今でも、はっきりとは理由が分かりませんが、どのようなことが考えられるでしょうか？

もしかしたら、ということが後日見つかります。ある日、同じように見ていると、稚魚ではなく中に卵がある水滴がありました。しかも複数のそれぞれの水滴に卵が入ってました。もしかしたら、水から離れたガラス板に直接卵を産み付けていたのではないかと思います。その後、そこで生まれたのではないかと。定かではありませんが。

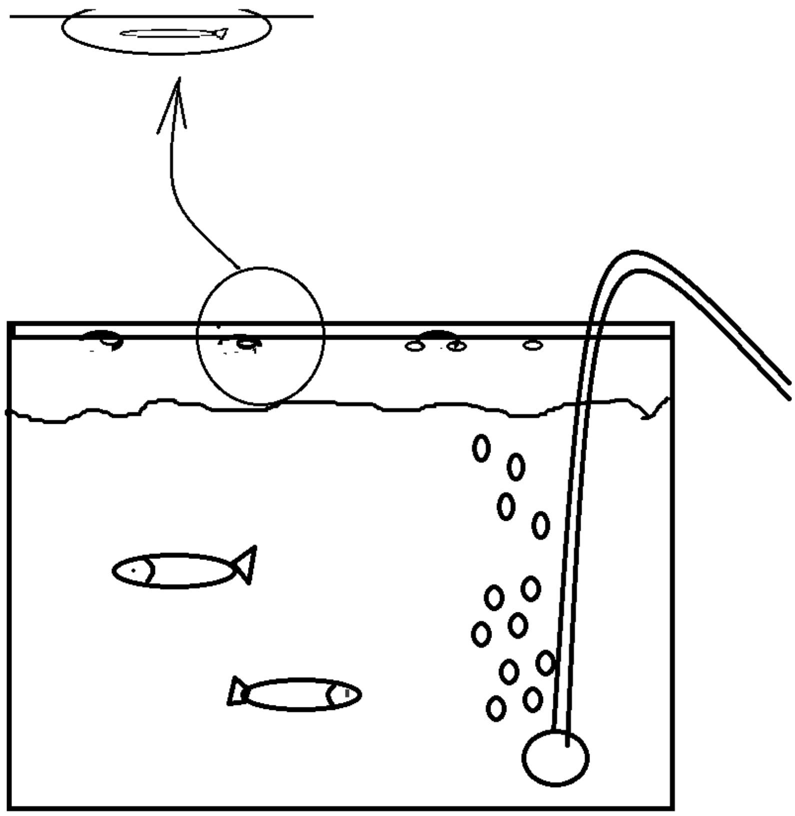


図 21　金魚

熱エネルギー

同じ材質でできた石が２つあります。一方は熱く、他方は冷たいとします。この２つの石の違いは何でしょうか？ 石の中に何かエネルギー的なものが入り込んでいるのでしょうか？ この２つの石の違いは、目に見えない何かが入り込んでいるわけではありません。材質が同じであれば、どちらの石も、同じ原子が集まってできており、それとは別の「もの」が入り込んでいるわけではありません。

石は何種類かの原子で構成されていますが、実はこれらの原子は、じっとしているわけではなく、その場で振動しています。この振動（ 運動 ）を「熱運動」と言います。温度が高い物体ほど、この熱運動は激しいです。石などのように固体であればこの熱運動は「振動」ですが、液体なら原子や分子は不規則に動きまわっているし、気体であれば、原子や分子は（ ほぼ自由に ）飛びまわっています。固体は、隣同士の原子の結びつきが強く動きまわれませんが、だんだん熱運動が激しくなり、隣同士の結びつきが切れると、それぞれの原子は動きまわれるようになります。固体の温度が上がると液体になるのはこのためです。液体も更に温度が上がり、原子や分子の動きが激しくなると、液体から飛び出て、空間内を自由に飛びまわるようになります。これが気体の状態です。

物体を構成している原子や分子に着目した時、原子や分子は動いてるので、運動エネルギーを持っています。この動きが激しければ激しいほど、温度の高い状態です。つまり、温度とはこの原子や分子の熱運動の激しさを表す量です。ただし、全ての原子や分子が同じ激しさで熱運動しているのではなく、速いものもあれば、遅いものもあります。この平均値で温度が定まります。

この温度はどのように測ることができるでしょうか。もし、１個１個の原子や分子の動く速さを測定できて、それぞれの原子や分子がもつ熱運動のエネルギーが分かれば、平均した熱運動のエネルギーが計算できるので、温度がわかりますが、それは現実問題として不可能です。原子や分子はものすごくたくさんあります。目に見えるサイズの物質では、10 の 23 乗個程度もの原子や分子が存在しているので、それら全ての速さを測定するのは無理でしょう。そこでシンプルな方法として温度を計るのに、熱運動が激しくなると体積が増えることを利用する方法が用いられています。熱運動が激しくなると、原子や分子の動く範囲が広がり、近くの原子や分子との間隔が広がります。すると全体の体積が増加します。この時の体積増加は気体が一番顕著です。液体や固体は気体程は体積が増えませんが、それでも熱運動が激しくなるほど体積が増加します。小学校などで赤い液体の入った温度計を使ったことのあるは人は多いのではないでしょうか。あの温度計の赤い液体はアルコールで液体の中でも比較的体積変化が大きなものが使われています。熱運動が激しくなり、体積が増加すると、その増加分を目盛りで読み取り、温度

がわかる仕組みになっています。「熱い」とか「冷たい」というのは飽くまで生物的な感覚で、物理的な感覚ではありません。温度計は単に、熱運動がどれだけ激しいかを体積変化から読み取っているに過ぎません。生物が「熱い」物に触れて「熱い！」と感じるのは、触った物体の熱運動が指の細胞を作る原子や分子に伝わり、指の細胞の原子や分子の熱運動がより激しくなったことを感知しているのです。熱運動があまり激しくなりすぎると、細胞が壊れてしまうので、脳が「離れろ！」と指令を出すことになります。これが「熱い！」という感覚です。「冷たい」物を触った時は逆に、指の細胞の原子や分子の熱運動が冷たい物体の熱運動に伝わり、物体の熱運動が少し激しくなる代わりに、指の細胞の原子や分子の熱運動が弱くなるのを脳が感知しているのです。あまり熱運動が弱くなると凍りついてしまうので、細胞の危険を感じ、やはり「離れろ！」と指令を出すことになります。これが「冷たい！」という感覚です。

熱運動の激しさには限界はありません。エネルギーを与えさえすれば、どれだけでも激しくなれます。しかし、熱運動の「ゆっくりさ」には限界があります。「静止」より遅い熱運動はありません。なので、原子や分子が「静止」している状態が最も温度が低い状態であることになります。これは、物理的に最も低い温度で「絶対零度」とよばれ、およそ「マイナス 273 ℃」です。あらゆる物質はこの温度で熱運動が停止します（ 補足１ ）。「絶対零度」を基準とした温度を「絶対温度」といって温度の単位は「℃」と区別して「K」（ ケルビン ）を使います。0K はマイナス 273 ℃です。普段我々が使っいる「℃」を単位とした温度は「セルシウス温度」という名前がついています。目盛りの幅は、セルシウス温度と絶対温度で共通になっていて、温度幅 1 ℃は 1K に等しいです。なので、絶対零度から 273 ℃温度が上がれば、273K となります。すなわち、0 ℃は 273K です。

（ 補足１ ）

ただし、原子レベルの議論で重要となる量子力学を考慮すると、最低のエネルギー状態でも原子や分子は静止せず、「零点振動」をしています。

休憩⑥（ 余談　連続無限次元空間 ）

宇宙の話の余談で出てきた次元の話を少し拡張してみましょう。数学で「ベクトル」とか、「内積」いう言葉を聞いたことがない人はこの余談は、飛ばしていただいて構いません。聞いたことがなくても半分以上は理解できると思います。ここではイメージだけ伝わればいいかな、と思っているので、興味ある人は更に専門的な教科書等を読んでみてください。これは純粋に数学的な空間、あるいは次元の話であり現実世界の次元の話ではありません。ですが、純粋な数学のように緻密な議論をするわけではなく、ちょっと大雑把な話に留めます。

はじめに、無限の種類を少し区別しておきましょう。1、2、3、. . . と数えられる無限個の整数のような無限を「可算無限」と言います。一方、全ての実数の個数のように数えられない場合の無限を「非可算無限」と言います（ 正しい数学用語ではないかもしれませんが、イメージを伝えるために「非可算無限」をここでは「連続無限」と言っておきます)。例えば可算無限個の数の集まりである（ 全ての ）整数は 1、2、3、. . . と自然数でラベル付けすることができますが、「非可算無限」個の数の集まりには、全ての要素に 1、2、3、. . . と自然数でラベル付けすることはできません。例えば、全ての実数に対して整数でラベル付けすることはできません。例え区間を短く区切ってもその中には非可算無限個の実数があり、自然数でラベル付けすることはできません。

無限の話は一旦置いておいて、次に２次元の xy 平面内の任意の１つの点の座標を（ x, y ）と表します。この後の話の都合上（ 後で文字が足りなくならないように ）、x を x1、y を x2 と書き換えておきます。同様に z は x3、などとします。２次元空間の点なら（ x1, x2 ）、３次元空間の点なら（ x1, x2, x3 ）と表すとしましょう。N 次元空間の点なら（ x1, x2, x3, . . . , xN ）となります。ここで、N 次元空間内の点が１つ決まると、その点の座標として、（ x1, x2, x3, . . . , xN ）が定まり、それぞれの座標軸上の値が定まります。例えば（ 5, 2, 8, . . . , 7 ）等のように決まります。ここで、これを少し見方を変えて、x1, x2, x3, . . . , xN を x 軸上に並べます。とりあえず、x 軸上の 1 のところに x1、2 のところに x2、. . . と並べていきます。縦軸を y、横軸を x として xy 平面内に N 個の点が並び、それらを線で結べば、折れ線グラフが描けます（ 図 22〜24 ）。ただし点と点を結ぶ線は、グラフを見やすくするためにつけた線であり、線自身はグラフには含まれないとします。元の N 次元空間内の１つの点に対して１つの折れ線グラフが定まります。逆に x 軸上の x ＝ x1, x2, x3, . . . , xN の所に値を持つ１つの折れ線グラフを与えると、N 次元空間内の点が１つ定まります。今、x 軸上の 1 から N までの整数の位置にしか点がありません。

ここで少し拡張して、x 軸上に並んだ N 個の点（ x1, x2, x3, . . . , xN ）を、x ＝ 0 から xN までの連続無限個の実数 x に拡張して、N 個の点を持つ折れ線グラフを、実数 x を変数とする関数 f(x) に拡張して考えます。f(x) 自身は連続でなくても構いませんが、イメージしやすいように連続な関数としておきましょう。直線や２次関数、３次関数などをイメージしてもらえればいいです。どんな関数でも構いません。先程述べたように、変数 x は連続な実数（ 0 ≦ x ≦ xN ）です。最初に考えた折れ線グラフの変数 x ＝ x1, x2, x3, . . . , xN は可算な数でしたが、今考えている関数 f(x) の変数 x（ 0 ≦ x ≦ xN ）は非可算無限個（ 連続無限個 ）の数です。変数が取る値の数を可算な数から非可算な数に拡張しました。次に折れ線グラフの場合、x 軸上の点 x ＝ x1, x2, x3, . . . , xN に対応した N 次元空間の N 本の座標軸を考えたのと同様に、x 軸上の全ての実数に対応した連続無限次元空間の連続無限本の座標軸を考えます。もちろんこれらの各座標軸に自然数でラベル付けすることはできません。そもそも、非可算無限（ 連続無限 ）個のものを可算無限の自然数でラベル付けすることはできません。「本」と数えてるから、自然数でラベル付けすることができそうに思うかもしれませんが、そうではありません。そもそも、x 軸上に連続的に無限個並ぶ実数も、１つ１つは点で、「個」と数えられますが、全ての実数に自然数でラベル付けすることはできません。先程述べたように短く区間を区切ってもその区間内の全ての実数に自然数でラベル付けすることはできません。1 個の実数に対して１本の軸が対応します。実数の中の１つの要素を抜き出して「個」とか「本」とか言っているに過ぎません。

関数 f(x) の形が与えられれば、x 軸上の各点における f(x) の値が１つ定まります。つまり、x 軸上の１つ１つの実数に対応した連続無限次元空間内の各座標軸上の値が定まります。そして、これを連続無限次元空間の中の１つの点として表すことができます（ 図 25 ）。連続無限本の座標軸は互いに直交している方向を向いているとします。もちろん連続無限次元空間の中でないと連続無限本の座標軸が互いに直交することはできません。連続無限次元空間を想像することはできませんが。

何故、わざわざこんな面倒なことを考えたかというと、その１つの理由として、例えば２つの関数の積をある区間で積分したものを、「連続無限次元ベクトルの内積」とみなすことができるからです。２次元や３次元、. . . のベクトルの内積は、２つのベクトルの（ x 成分どうしの積 ）＋（ y 成分どうしの積 ）＋（ z 成分どうしの積 ）＋. . .　で表わせます。２つの関数の積をある区間で積分するということは、２次元や３次元のベクトルの内積をとることと同じことを連続無限次元空間の中で行っているというわけです。

私が学生だった頃、頭の中にこのイメージがなくて、「フーリエ変換」等、２つの関数の積を積分している時、「いったい何をやってることになるんだろう？」と悩んだことがありました。その当時はよくわからないけど、漠然と「関数の内積」と思ってました。関数を連続無限次元空間内のベクトルとみなし、2 つの関数の積の積分を無限次元空間内での「関数の内積」とみなす考え方について説明している書物に出会うのにかなり時間がかかり、私自身随分長い間もやもやした状態が続きました。そんな事もあって、これから大学で物理や数学を学ぶ人達がつまづきそうになったときの助けになればと思って

書きました。

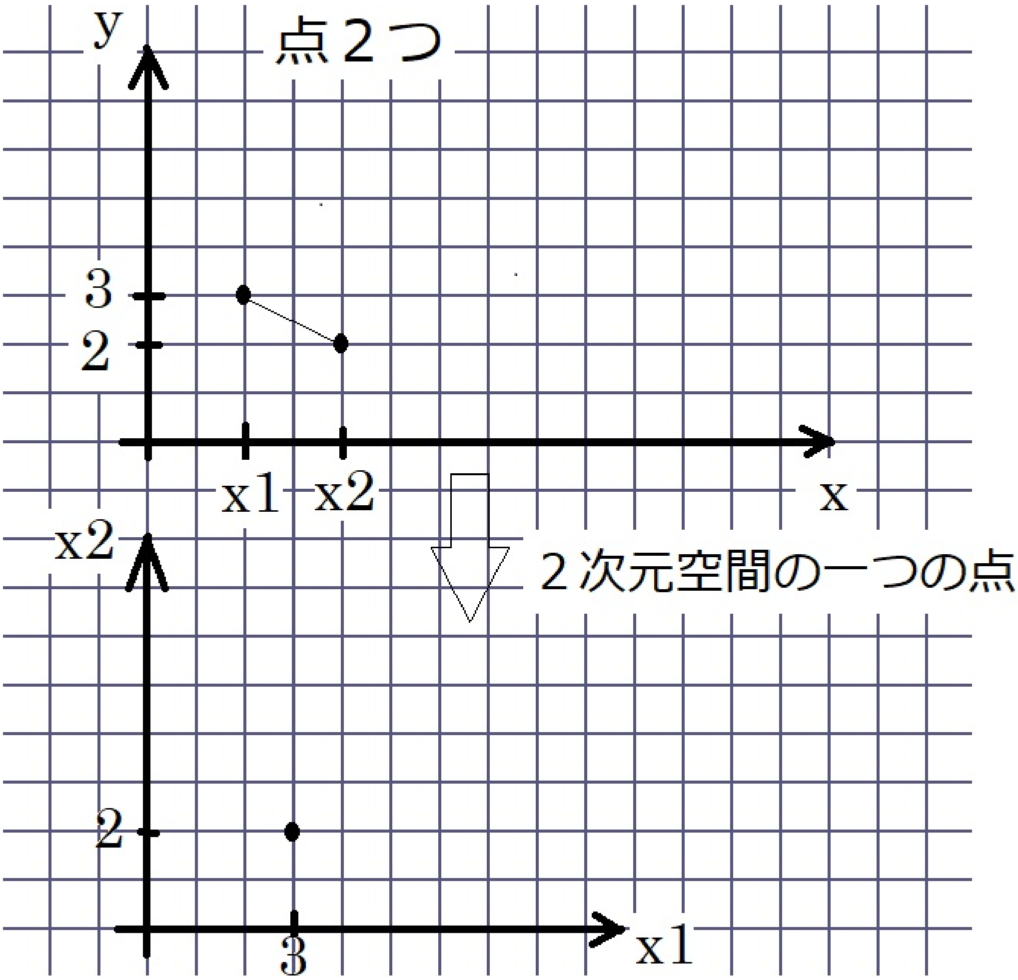


図 22　２次元（点２つ）

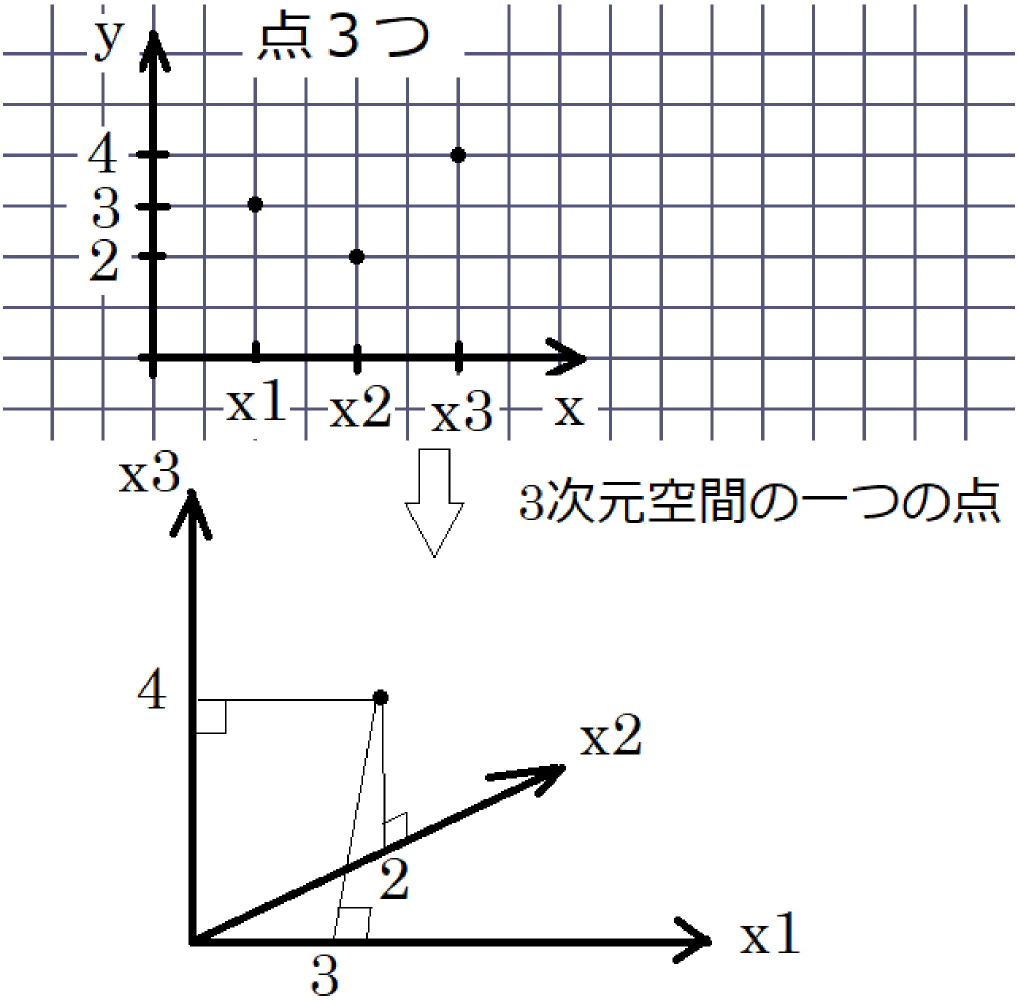


図 23　３次元（点３つ）

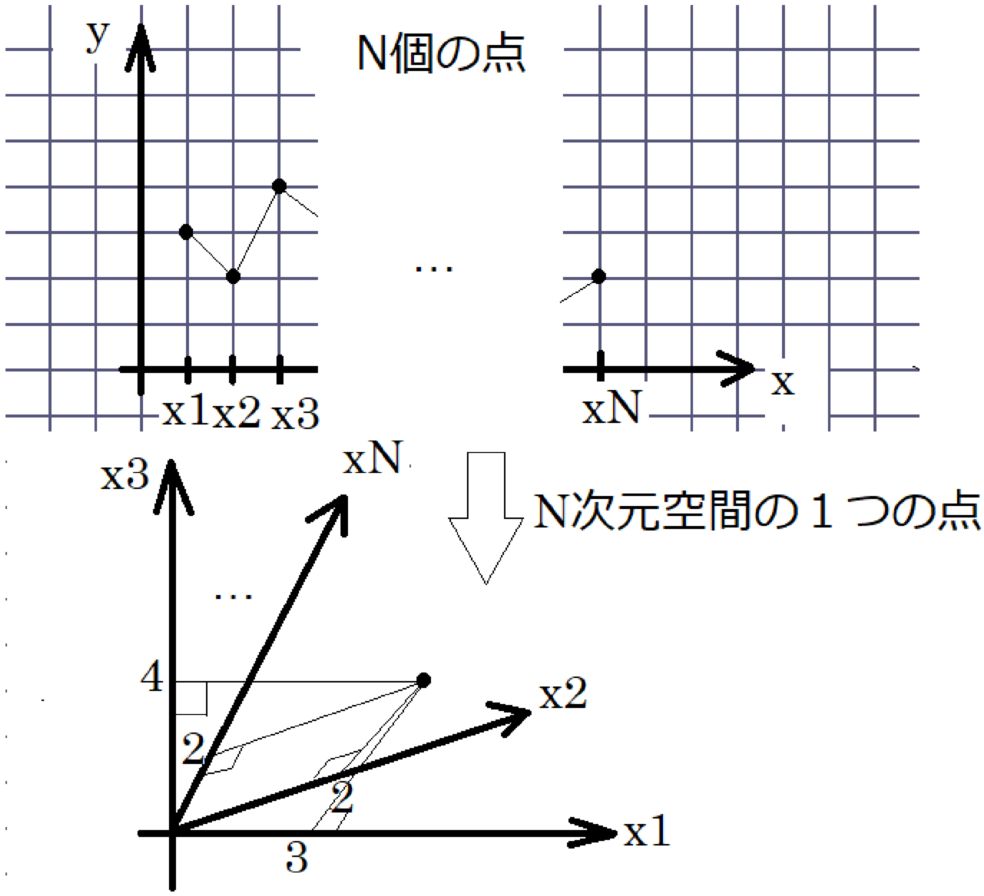


図 24　 N 次元空間（ N 個の点 ）

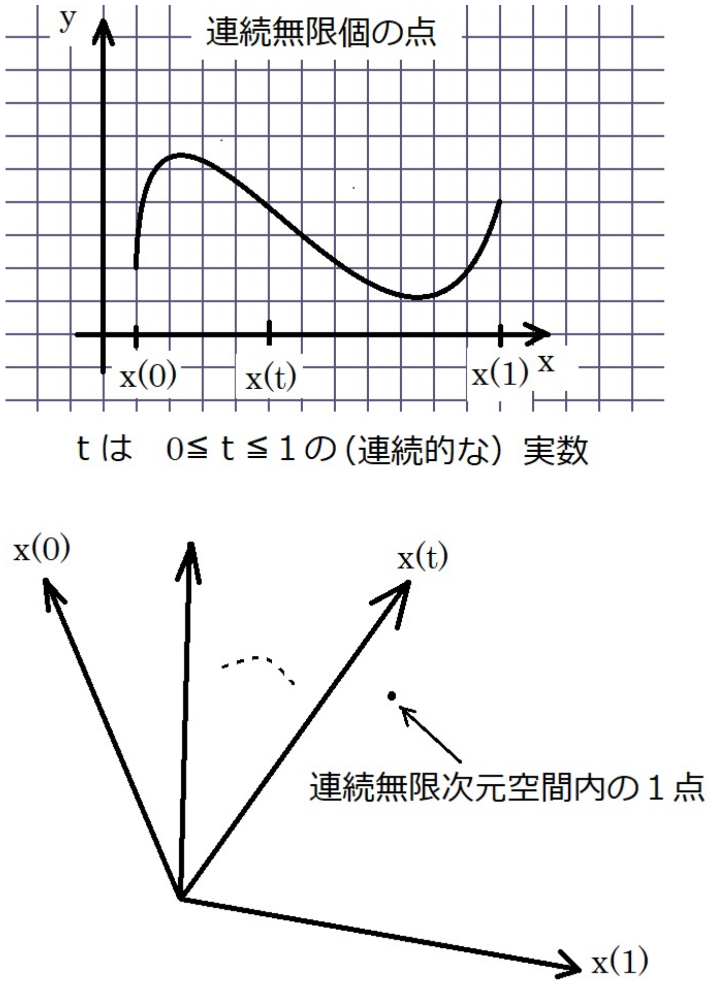


図 25　連続無限次元空間

慣性力

この本の最後に、よく耳にするけど、割りと誤解がある「慣性力」についてお話しします。また、「遠心力」もよく耳にすると思いますが、これも「慣性力」の一種なので、この後お話しします。

力のところで説明したニュートンの運動の３法則は、実は（ そのままでは ）慣性系においてのみ成り立つ法則です。静止している系か、等速直線運動している系においてのみ成り立つということです。慣性系でない、非慣性系においてニュートンの運動の３法則を使うときには、法則を少し修正する必要があります。ここではこのことについて説明します。

「慣性系」のところで話したように、慣性系（ 速度が変化しない座標系 ）どうしは全く同等です。その系の中で起こる現象は全く同じ物理法則（ ニュートンの運動の３法則 ）に従います。しかし、非慣性系（ 速度が変化する座標系 ）の中では、物体はニュートンの運動の３法則にそのままでは従いません。そのため、周りが見えない部屋の中にいたとしても、その部屋が非慣性系であれば、実験によりその部屋は速度を変える運動をしていると判断することができます。

はじめに、一定の速度で走る電車（ 慣性系 ）の天井から糸でおもりがぶら下がっている場合を考えてみましょう。このおもりが受けている力は、鉛直下向きの重力と、鉛直上向きの糸の張力の２つで、これらの力は同じ大きさで逆向きで、合成すると合力は 0 になります。つまり、おもりが受けている力はつり合っています。この時、慣性の法則に従って、最初におもりが静止していれば、そのまま静止を続けることになります。そして電車が速度を変えずに運動していたら、このおもりはまっすぐ鉛直下向きにぶら下がったまま静止しています（ 図 26「慣性系」）。これは電車が静止していても、等速直線運動していても同じです。

しかし、電車が一定の加速度で加速しながら動いていたら、おもりはどうなるでしょうか？ 経験からわかると思いますが、電車の進行方向に対して後ろ向きに傾き、傾いたまま静止しています（ 図 27「慣性力」）。このことから電車が慣性系ではないと電車の中の人は判断することができます。それでは、電車の中の人にとって、このおもりの傾きをどう説明することができるでしょうか？ おもりが受けている力は、糸の張力と重力の２つです。この２つの力の合力は 0 にはなりません（ つり合っていません ）。なぜなら、糸の張力を鉛直方向と進行方向に分解したとき、鉛直方向の分力はおもりが受けている重力とつり合っており、これらの鉛直方向の力を合成すると 0 になります。このためおもりは鉛直方向には運動せずに静止しています。そして糸の張力の進行方向の分力だけが残ります。つまり、進行方向の力は合力が 0 になっていないのでつり合っていません。

それなのに電車の中の人から見るとおもりは静止しています。慣性系の場合は、物体が静止しているときには、物体が受けている力がつり合っています。非慣性系の場合、力がつり合っていないのに静止していることをどう説明すればよいのでしょうか？「非慣性系では合力が 0 でなくても静止する」と言ってもいいですが、できるだけニュートンの運動の法則に対する修正を小さくしたほうが、全体として法則がシンプルなのでありがたいです。結論から言うと、「合力が 0 でないのに静止する」ではなく、「新しい力を１つくわえておもりが受けている力がつり合っていると考える」のです。この時加える力が「慣性力」です。「慣性力」は非慣性系の慣性系に対する加速度と、その非慣性系にいる観測者が見ている物体の質量によって決まります。つまり、『非慣性系の中にある観測者が見るとき、質量を持つ物体は「慣性力」という力を受ける』というように、運動の法則に注釈（ 修正 ）を加えるのです。今の例でいうと、おもりが受けている力の合力は糸の張力の進行方向の分力で、これとつり合う逆向きの力である「慣性力」を加えれば、おもりが受けている力の合力が 0 になり、おもりが静止していることを慣性の法則により説明できることになります。この「慣性力」は非慣性系の人にとってのみ存在しているように見える、見かけの力です。

今度は、この非慣性系の電車の中で傾いてぶら下がっている同じおもりを、電車の外で静止している「慣性系の人」が見たらどのように見えるか、そしてそれをどのように説明するのか考えてみましょう。この人には慣性力など存在しません。おもりが受けている力はやはり糸の張力とおもりが受けている重力のみで、これらの力の合力は糸の張力の進行方向の分力（ 水平方向 ）になり、この力によりおもりは電車と一緒に加速度運動しています。慣性系の人にとっては、「おもりが受けている合力によって加速度運動をする」というように、そのままで運動の法則が成り立っています。

次に遠心力について説明しますが、その前に円運動について説明する必要があります。話を簡単にするため、一定の速さで運動する等速円運動に話を限ります。等速円運動は、名前の通り、同じ速さで円周上を回る運動です。例えば、円形のレールの上を電車がぐるぐる回っていてもいいし、水の入ったバケツを水平面内でぐるぐる回してもいいです。また、おもりに糸を付けてぐるぐる回してもいいです。電車に乗っている人の立場が想像しやすいと思うので、等速円運動している電車に自分が乗っているところを想像して下さい。レールは傾いておらず、そして電車の床も水平であるとしましょう。等速円運動は、等速と言っても、常に運動の向きが変化しているので、速度が変化する運動であり、加速度運動になります。速さは変わらず、運動の向きだけが常に変化する加速度運動です（ つまり非慣性系です ）。等速円運動するためには、常に物体の運動の向きを変化させるための力として、円の中心向きの力が物体にはたらいていなければなりません。この力は、糸の張力だったり、バケツを持つ腕の力だったり、円形のレールから車輪が受ける円の中心向きの力だったりします。この等速円運動している電車の中にあなたはいます。また、先程と同様に天井から糸でおもりがぶら下がっているとします。おもりはどうなっているでしょうか？ おもりの糸が鉛直方向に対して傾いたまま静止します（ 図 28「円形のレールを回る運動」）。それも、円の外側に傾いています。電車の中の人にとって、これは言うまでもなくみなさんが想像する「遠心力」であり、「おもりは外側に傾いたまま静止している」、と電車の中のあなたはおもりを観測するでしょう。しか

し、この時おもりが実際に受けている力は、糸の張力とおもりが受けている重力の２つだけです。この２つの力の合力は円の中心を向いています（ 図 28「円形のレールを回る運動」）。そして合力が 0 でないのでおもりが受けている力はつり合っていません。ここでも先程と同様に（ 電車の中のあなたにとって ）おもりが静止していることと、慣性の法則の辻褄が合うように本当は存在していない力を導入します。この力がいわゆる「遠心力」です。この力は、円運動するために必要な円の中心を向いている力とつりあうように導入した力なので、「円の中心と反対向きの力」で「遠心力」といいます。この遠心力を加えることにより、おもりが受けている力の合力が 0 となり、おもりが静止していることを説明出来ることになります。遠心力も、電車の外で静止している人にとっては存在していない飽くまで見かけの力です。

このおもりの糸の傾きを、電車の外で静止している人（ 慣性系の人 ）は、どのように説明するでしょうか？ 糸の張力と重力の合力が円の中心を向いており、この力によって円運動をすることができるのだ、と説明することになります。慣性系の人にとっては、遠心力を導入することなくおもりの運動を説明することができます。

まとめると、非慣性系においては、『非慣性系の中の観測者が見ている質量を持つ物体に加速度の向きと逆向きに「慣性力」という力を加えて考えれば、慣性系における「慣性の法則」と「運動の法則」がそのまま非慣性系においても成り立つ』ということです。ただし、慣性力は本当は存在していない力なので、慣性力の反作用は存在せず、作用反作用の法則は成り立ちません。

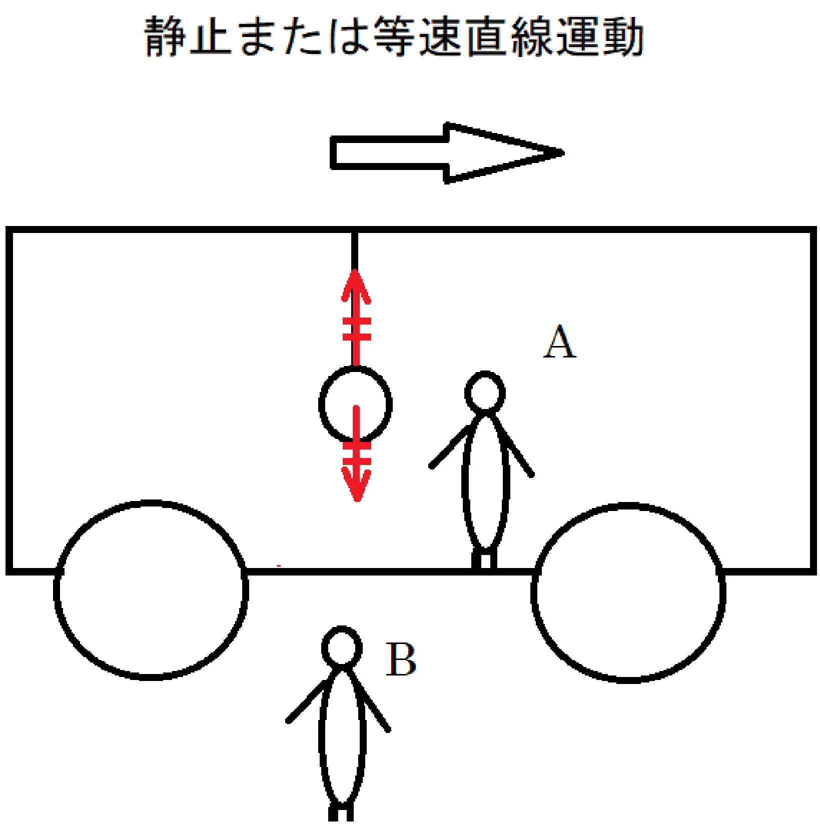


図 26　慣性系

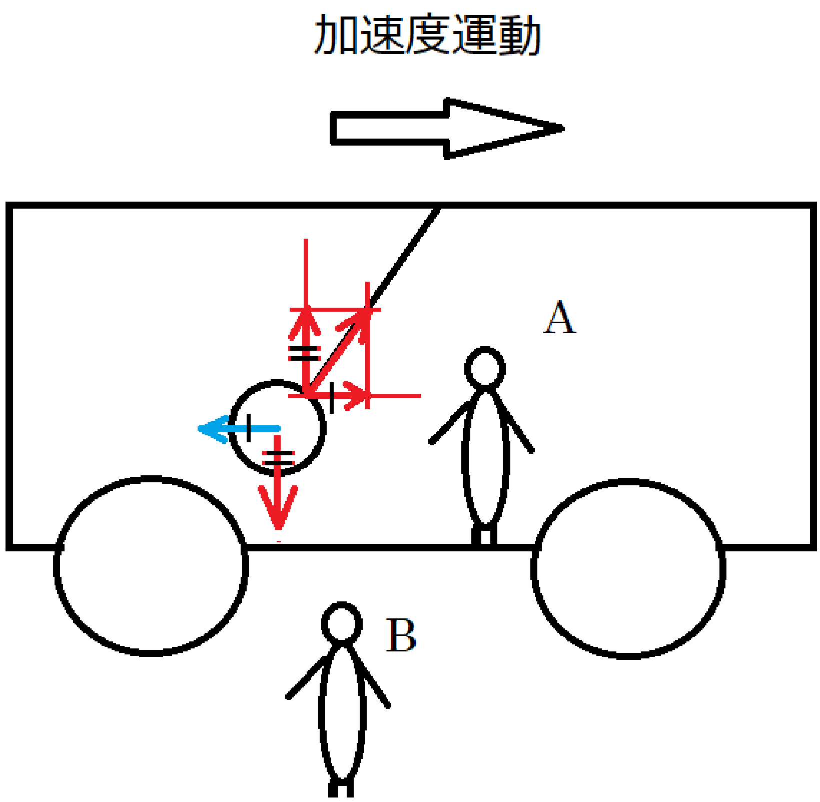


図 27　慣性力

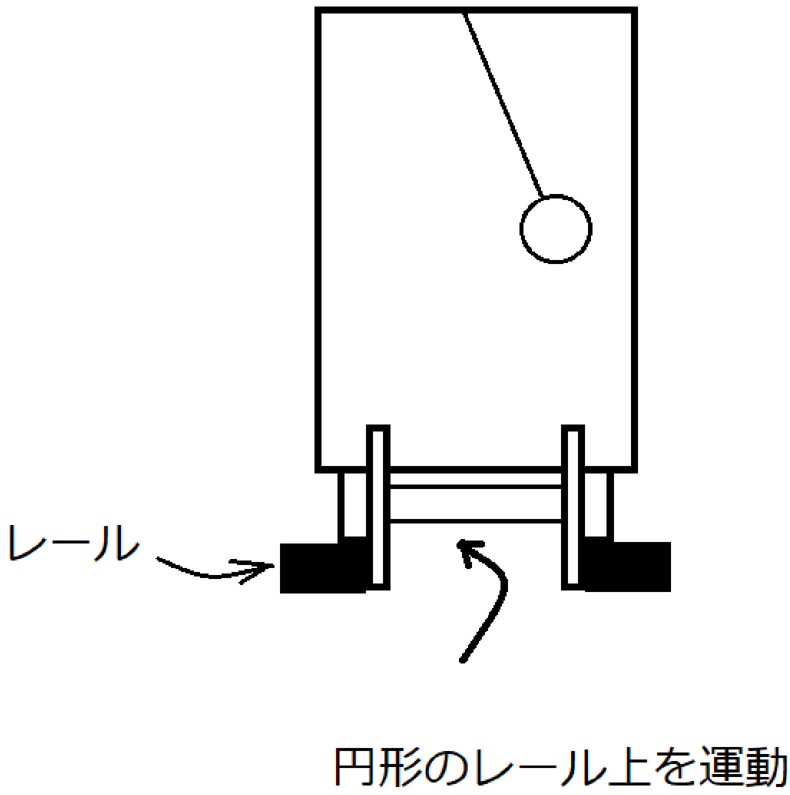


図 28　遠心力

中学生・高校生のための　数式を使わない物理の本

著　　　藤山　篤司

制　作　Puboo
発行所　デザインエッグ株式会社