

4 車は急に止まらない

日常生活の中で、私たちは、力が強い人が重い¹²物を動かせることを知っています。では、例えば、交通事故に対しても、力が強い人は有利でしょうか。つまり、皆さんが体をとて鍛えて、とても力が強くなったとします。そうなれば、突っ込んでくる自動車を小指で止めることができるでしょうか。

そんな例は、アニメーションなどでよく見ることができます。例えば、鉄人 28 号¹³というアニメーションでは、小柄で人間大のケリーというロボットが、飛んでいる巨大なロボット「鉄人 28 号」を蹴落とす場面があります。そして、それがケリーの力の強さを表現として使われています。

しかし、何か違和感があるように思います。その違和感は何なのでしょう。それを明らかにしていきましょう。

4.1 力と運動

そのためには、どんなことを考えたらいいでしょうか。ヒントは、力です。力が運動にどのように影響を及ぼすかを知る必要があります。

ところが、私たちは、力と運動について、ある程度の知識があります。例えば、ドアを動かすことを考えます。その際、経験上、次のようなことは知っていると思います。

- ドアにかける力が強いとドアの速度は大きくなる。(速く動く)
- ドアが重いとドアはあまり速くならない。
- ドアに力をかける時間が長い程、ドアの速度は(どんどん)速くなる。

どうでしょうか。皆さんが感じている「自分の実感」と何か違う点がありますか？もしも、無かったら、大変素晴らしいことに、皆さんは「力学」と呼ばれる学問分野の根本的な部分をクリアしたことになります。この「力学」は多くの物理学の基礎となるものです。それこれは、力と運動に関する最も基本的な性質で、「運動方程式」と呼ばれています。「式」と呼ばれているくらいなので、式で書いてみます。すると、このようになります。

$$(\text{速度の変化}) \propto \frac{(\text{力の強さ}) \times (\text{力を及ぼす時間})}{(\text{重さ})}$$

この式が表しているのは、一つには、速度の変化は、力の強さに比例するということです。つまり、力が 2 倍強ければ、速度の変化も 2 倍になります。また、速度の変化は、力を加えた時間にも比例します。長い時間力を加えると、それに応じて速度の変化も大きくなります。一方、重さについてはどうでしょうか。

ここで、「反比例」という言葉を導入しておきましょう。例えば、「A が B に反比例する」とは、「B が 2 倍になったら、A が半分になる」「B が 3 倍になったら、A が 1/3 になる」という関係を示します。この場合、速度の変化は、重さに反比例します。つまり、重さが 2 倍だと、速度の変化は 1/2 に、重さが 3 倍だと、速度の変化は 1/3 になります。これは、別の言い方をすれば、速度

¹² 「重い」とか「重さ」については、4.5 で改めて考えます。ここでは感覚的にとらえておいてください。

¹³ 200x 年放送

の変化は、 $1/\text{重さ}$ に比例する、とも言えます。繰り返し強調しておきたいのは、物理学で学習する法則の多くは、このような「比例」や「反比例」の関係がとても多いです。そこで、この法則は「何と何が比例しているのか」「何と何が反比例しているのか」という視点から法則を考えるような習慣付けを身につけて欲しいと思います。

話をもとに戻しましょう。全体として、速度の変化は $\frac{(\text{力の強さ}) \times (\text{力を及ぼす時間})}{(\text{重さ})}$ に比例する、ということになります。そして、それを表したのが、先ほどの式である訳です。ちょっと説明がぐどかったかもしれませんが、いずれにしても、ドアを動かしたときの3つの性質が重要で、それを式に書き表すこともこともできる、という話です。

前回、空気の抵抗を考えなければ、落下する速度は時間と共にどんどん増えていくという話をしました。これは、重力という下向きの力がかかりつづけるために、下向きの速度がどんどん増すということに対応しています。また、運動方程式によれば「重い」物質ほど動かしにくいのですが、重力は重い物質程、大きな力になります。そこで、ちょうどそれらがキャンセルして、空気の抵抗が無ければどんなに軽いものでも、どんなに重いものでも、同じように落下する訳です。

ここまでのことを考えると、とっても力持ちになれば、小指で自動車を止められそうです。また、ケリーの力が強ければ、鉄人 28 号を振り回すこともできそうです。しかし、まだ、何か違和感があります。

4.2 力の性質

次に、力の性質について考えてみましょう。

ここに、二つの台車があります。先端がバネになっていますから、互いに押しつけると、反発するような力が作用します。互いに押しつけた状態から手を離します。その様子を観察してみましょう。すると、互いに同じような速さで遠ざかっていきます。この時、台車に働く力にはどんな力があるでしょうか。もちろん、重力があります。下向きに引っ張る力です。でも、そちらの方には動かないし、第一に、重力が作用する状態で手を離しても、教卓の上の台車は動かないのですから、台車の運動には関係なさそうです。すると、重要なのは反発力ということになります。実際には摩擦の力もあります。そして、摩擦力は運動を止めるように作用するので、やがて台車は止まってしまいます。しかし、以下では、反発力だけが作用するとして考えます。

さて、この反発力の性質を考えてみます。今、台車は両方、同じような速さで遠ざかりました。同じような状況で考えてみて、例えば、片方だけ動かして、片方だけ止めておくことができるでしょうか。手で抑えればもちろん可能です。でも、今は、力の純粋な性質を考えるために、他の力を加えず、二つの台車の間に作用する力だけを考えます。すると、どのようにしても、二つの台車は互いに反対方向に同じように進んでしまいます。二つの台車は同じ重さですから、同じように動くということは、互いに同じ大きさの力が働いていることになります。

実は、どんな場合でも、物体 A が物体 B に力を及ぼすとき、逆に物体 B は物体 A に逆向きに同じ大きさの力を及ぼしています。力がこのような性質を持つことは、「作用反作用の法則」という名前で知られています。力の一方を「作用」としたとき、もう一つの反対向きの力を「反作用」といいます。

例えば、バットでボールを打つことを考えます。ボールはバットから力を受けます。その結果、ボールは速度を短時間のうちに変化させて飛んでいきます。この時に、実は、ボールはバットに力

を及ぼしています。このことは、打ったときの「手応え」として、感じられるはずです。この両者、つまり、「バットがボールに及ぼす力」と「ボールがバットに及ぼす力」は大きさが同じで向きが逆です。

余談になりますが、実は、先ほどの「運動方程式」とこの「作用反作用の法則」が、「力学」の基本的な部分のほぼ全てです。「力学」の残りの部分は、これらの応用であると言っても過言ではありません¹⁴。今回の講義の前半で、力学のほぼ全てを学習したとも言えます¹⁵。

4.3 車は小指で止められるか？

さて、今度は重さが違う場合を考えてみます。早速、台車を使って同様の実験をしてみましょう。

今度は、重い方はゆっくり動き、軽い方は速く動いていることがわかります。この現象は、次のように解釈できます。まず、作用反作用の法則によって、重い台車と軽い台車は、それぞれ同じ力で互いに反発するような力を受けます。ところが、運動方程式によって、重いものの速度の変化は小さく、軽いものの速度の変化は大きくなります。その結果、このように早さに違いが出たと考えられます。

これを、人間と自動車に当てはめてみましょう。自動車が突っ込んできたとき、人間と衝突したとしましょう。作用反作用の法則により、自動車と人間には同じ大きさで向きが逆の力が作用します。ところが、普通、人間よりも自動車の方がはるかに重いので、自動車の速度の変化は、小さく、一方、人間は跳ね飛ばされてしまう訳です。

ケリーと鉄人 28 号の場合も同様です。どんなにケリーが力持ちでも、ケリーと鉄人の間に同じ力が作用する以上、重い方は速度が変化しにくく、一方、軽い方は速度が変化しやすいはずです。そこで、互いに回転する場合には、重い方が中心に近く、軽い方がグルグル回るはずです。月が地球の周りを回るのも、地球が月よりも重いからです。太陽の周りを地球が回るのも、太陽の方が地球よりもはるかに重いからです。ケリーが空中で自分の体をぴったり固定することができれば、あるいは、鉄人を回すこともできるかもしれません。しかし、それは現実的ではありません¹⁶。回転運動については、また、別の機会に触れることとします。

ウルトラセブンの場合に見られた特撮技術は、我々が日常の経験で体得した感覚を利用することによって、大きさを表現していました。しかし、今回のアニメーションでは、違和感のあるような映像を用いています。その違和感は、ロボットの力強さを表現するのに一定の効果はあるかと思います。しかし、このような非物理学的な表現は、やがては「何でもあり」の状況を作りだすことになるでしょう。そして、長い目で見ると、人の心に響く表現が貧弱になってしまうように思います。

¹⁴ やっぱり、言い過ぎかもしれません。

¹⁵ やっぱり、これも言い過ぎです。

¹⁶ このアニメ自身に、他にも無理な設定はいろいろあるので、それを言うてはおしまいです。

芸術と物理法則

夏目漱石の「夢十夜」という作品に次のような表現があります。彫刻についての表現です。

するとさっきの若い男が、「なに、あれは眉や鼻を鑿で作るんじゃない。あの通りの眉や鼻が木の中に埋うまっているのを、鑿のみと槌つちの力で掘り出すまでだ。まるで土の中から石を掘り出すようなものだからけって間違うはずはない」と云った。自分はこの時始めて彫刻とはそんなものかと思ひ出した。（「夢十夜」）

また、ミケランジェロも彫刻について、同様に、「石の中に内在している形を掘り出してあげるのである」といった表現を残しています。

そうして掘り出されたものは、私たちの心の中に蓄積された美しさと呼応して、見ているものの感動を生みます。

私には物理学にもいろいろな意味での似た側面があるように思います。私たちの心の中で形成された物理法則を発見して彫り出すことで、物理法則がはっきりと示されます。また、その法則を応用することで特撮の効果が現れます。

4.4 止まっている物を動かす

このように考えると、そもそも、止まっているものを動かすには、他の物を後ろに押さなければダメだということに気づきます。

例えばヘリコプターが飛ぶときには、空気を下に押しやります。ロケットが飛ぶときも噴出するガスを下に押し出します。ジェット機だって、ジェットエンジンの前から吸い込んだ空気と燃料を燃やしたガスを後ろに押し出しています。船や水泳では、後ろに水を押し出すことで自分自身を前に進めています。

では、歩くときはどうでしょうか。実は、人間が歩くときは、地球を後ろに押し出して前に進みます。地球と人間との間に作用する力は摩擦力です。地球（地面）が人間に及ぼす摩擦力が人間を前に進ませます。一方、人間が地面に与える摩擦力が地球を後方に動かします。ところが、地球は人間よりもはるかに重いです。1 億倍の 1 億倍の 1 億倍の 1/10 程度です。そこで、人間が前に進んでも、地球が進む距離は、人間が進んだ距離の 1 億分の 1 の 1 億分の 1 の 1 億分の 1 の 10 倍程度です。顕微鏡でも見えません。

もう一つの話は「宇宙遊泳」です。宇宙で泳げるでしょうか。真空中の中では、後ろに押し出す物がありません。そこで、宇宙遊泳では前に進めないでしょう。宇宙船を蹴って飛び出すことや、命綱を引っ張ることで宇宙船に戻ることはできます。また、ロケットと同様にガスを噴出すれば進むこともできるでしょう。宇宙船の中ではどうでしょうか。宇宙船の中には空気があります。そこで、空気中を水泳のように泳ぐことができます。しかし、その進み具合はほんのちょっとです。空気は、同じ体積の水の 1/1000 程度の質量しかありません。そこで、軽いものを同じ速度で押し出しても、自分が進む速度を少ししか稼ぐことができないのです。

4.5 「重さ」について

今回の講義では、「重さ」が何回も現れてきました。しかし、実は、今回使ったような「重さ」という言葉はあまり適当ではありません。例えば、宇宙に行けば、このチョークも重さがゼロに

なってしまいます。宇宙までいなくても、実は、沖縄と北海道では、同じ体重計を使うと沖縄の方が体重が軽く (ただし、50kg の体重の人で 100g 程度ですが。) 表示されます。これは、地域によって重力の大きさが違うからです。しかし、重さが軽くなったから、あるいは、宇宙で重さがゼロになったから、物を動かすのが簡単かということそうではありません。

これは、国際宇宙ステーションの中で宇宙飛行士が水の入った袋を押しているところです。これは、机の上で台車が互いに押し合って離れていく様子とよく似ています。つまり、軽い水の袋の方が速く動くようになっています。「重さ」が無いのにです。また、この様子は、宇宙で体重を計っているところです。体をバネに固定して、体を動かします。「体重が軽い」と速く振動します。一方、「体重が重い」とゆっくり動きます。

こうなると、「重さ」と言っていたものは、より正確には「動きにくさ」と言った方がいいように思います。運動方程式は、

$$(\text{速度の変化}) \propto \frac{(\text{力の強さ}) \times (\text{力を及ぼす時間})}{(\text{動きにくさ})}$$

とした方がいいように思います。この動きにくさには名前がついていて、「質量」と呼ばれています。もっとも、「重量」と「質量」は、比例することがわかっていますので、事実上問題はありません。

体重について、実は、先ほどのような理由で、沖縄と北海道では違う体重計を販売しています。体重が重力加速度とは関係無く、その人に特有の量であるという観点から、同じ人が沖縄と北海道それぞれで測定しても、同じ体重になるように調整しているのです。そのような意味で、体重は「重さ」ではなく、「質量」であるといえます。

昔は、パソコンなどの商品の説明では、「重量」と書いてあった部分は、最近では、「質量」と書かれることが多くなりました。もしかしたら、宇宙で使うことを考えて、そのように表示しているのかもしれませんが。これから、宇宙旅行が普通になると、肉やお菓子なども宇宙に持っていくようになるかもしれません。そして、買い物をするときも、「重量」ではなく、「質量」を計るようになるかもしれません。

4.6 制動距離

皆さんの中で、自動車の運転免許を持っている人はどれくらいいるでしょうか。また、自動車の運転免許を持ちたいと思っている人はどれくらいいるでしょうか。

自動車の運転免許を取得する際には、「制動距離」というものを勉強しなければなりません。制動距離は、「あっ」と思って、ブレーキを踏んでから自動車が止まるまでの距離を表しています。図は、制動距離が、最初のスピードとどのように関係しているかを示したものです。これを見ると、当り前のことではありますが、最初のスピードが速ければ速い程、制動距離が長くなるのがわかります。ところが、よく見ると話はそう簡単ではなく、最初の速度が速ければ速い程、制動距離がどんどん長くなるのがわかります。自動車を高速で運転すると制御しにくくなる理由の一つです。このため、特に高速道路では車と車の間隔 (車間距離) を長めに保っておく必要があります。

さて、ここでの関心は、どうして、制動距離は最初の速さに比例しないで、最初に速い程、一層制動距離が長くなるか、です。

自動車のブレーキをかけて止めようとするとき、ブレーキの作用には限界があるので、一定の力

で止めようとしていると考えてよさそうです。車を一定の力で止めることを考えましょう。これを考えるために、運動方程式を使ってみます。運動方程式とは、次のようなものでした。

$$(\text{速度の変化}) \propto \frac{(\text{力の強さ}) \times (\text{力を及ぼす時間})}{(\text{質量})}$$

ある一つの車を考えると、質量は一定です。また、問題設定から、力も一定です。すると、速度の変化は、力を及ぼしている時間に比例することがわかります。初期に持っていた速さは、時間と共に一定の割合で減り、やがてゼロになると考えられます。つまり、停止するまでの時間は、最初の速さに比例して長くなる訳です。初期の速さが大きい場合、速いので移動距離が長くなる効果と、動いている時間が長いために移動時間が長くなる効果と、この二つがあるために、比例よりも一層移動距離が長くなる訳です。

4.7 ラプラスの悪魔

先ほどお話したように、今日お話したことが力学と呼ばれる分野の基本です。そこで、様々な物体の運動は、今日お話した内容を基に、力とか、速度とかという言葉を使って説明できるはずですが、

その一つの例が、ラプラスの悪魔 (ラプラスの魔) です。力学が教えることは、「力がわかれば、速度の変化がわかる」というものでした。最初の速度がわかっているれば、速度の変化から、新たに、ちょっとだけ未来の速度がわかります。現在や未来の速度がわかれば、そして、現在の位置がわかれば、ちょっと未来の物体の位置もわかるということになります。ところが、ここで、もう一つ重要な点があります。物体に作用する力は、物体の位置や速度がわかれば決まってしまう。そこで、未来の位置や速度がわかれば、未来に作用するであろう力もわかってしまいます。すると、どうでしょう。現在の物質の位置と速度が分かってしまうと、同じことを繰り返すことによって、未来永劫、宇宙の物質の動きは全部決まってしまう、ということになってしまいます。

ここで、皆さんは、「私の意志は私にも分からないので、私の将来が決まっている訳はない」と思うかもしれませんが、しかし、私達の体は、非常に多くの数の細胞で形作られています。細胞はさまざまな物質の分子 (やイオン) の集合体であり、分子は原子が結合したものです。原子は原子核と電子によって形作られています。私たちが何かを感じたり、思ったりする作用は、基本的には神経の中を通る電子の働きや、脳細胞のシナプスを介して物質や電子のやりとりが行われることで生じます。このような原子や電子を粒子として考えると、それらは基本的には力学に従って運動すると考えられます。すると、結局、結論は同じです。皆さんの頭の中でどのように電子が動いているかも、力学法則によって決まってしまう、ということになります。つまり、この講義でラプラスの悪魔の話聞いて、皆さんが驚くかどうか事前に決まっていますし、どのように思うかも決まっています。

それどころか、もっと驚くことに、私がこの講義でラプラスの悪魔の話をどのように話すか、つまりこの世に起こる全てのことは、宇宙ができた瞬間から決まっていた、ということになります。これが、ラプラスという人の考えた力学の結論です。

ラプラスの悪魔については、まだ話の続きがあります。その話は、また、別の機会にお話したいと思います。

4.8 まとめ

今日の話をもとめてみましょう。力と運動の性質のいくつかを学びました。そして、それらはとても基本的なことであり、ある程度直感的でもありました。

- 速度の変化
力と継続時間に比例、質量に反比例
- 作用と反作用
A が B に力を及ぼすときは、逆に、B は A に同じだけの逆向きの力を及ぼしている。
- 物体と物体の間に作用する力
基本的には、物体の位置と速度が決まれば作用する力も決まる。

最後に、今日の講義に関連したクイズを出します。

1 番から 24 番までの番号がついた駐車場があります。ところがなぜか、9 番のところだけは使われていません。どうしてでしょうか。