

## 第5章 万物は回転する

### 今日の道具

- 自転と公転：電灯, コイン (2 枚)
- 大気の渦：GMS 動画, 車輪
- 回転と向心力：スーパーボール, ヒモ
- 角運動量：村主のビデオ, 回転台, ダンベル, 地球コマ, コリオリの力のビデオ
- テイラーの壁：回転台, 水槽, 染料

### 5.1 イントロダクション

まず、タイトルについて、誤解が無いように解説しておきます。ギリシャのヘラクレイトスは、「万物は流転(るてん)する」という言葉を残しました。この表現は、勿論、この世の中のものに永遠のものはないということを表しています。永久機関が人の心をとらえたように、永遠に続くものがあつたとしたらいいなあ、という人間の願望があります。そして、この言葉は、残念ながらそのようなものはないのだということ、言い表しているように思います。ここでは、この表現をもじって、「万物は回転する」というタイトルを付けました。実際、世の中のものには回転するものが多いです。

さて、回転運動について考える前に、私の個人的な趣味についてお話ししたいと思います。私には、回転するものに思い入れがあります。これは、回転運動に限らず、そもそも、小さいものの中に何らかの能力を秘めた物に私は魅力を感じます。例えば電池です。小さ

な物体の中に物を動かしたり光らせたりするような能力を秘めています。回転運動もそうで、限られた空間の中に運動エネルギーを溜め込んでいる状態です。

以上は私の個人的な趣味です。しかし、世の中を見ると、おそらく同様の発想で回転運動に魅せられた人が多かったのではないのでしょうか。例えば、宗教にもたくさんの回転運動が見られます。トルコのセマーと呼ばれる旋舞や、摩尼車(まにしゃ)はその例です。摩尼車は、回転させることでお経を読んだことと見なしましょう、というものです。寺院の柱に固定されていて、そこで信者が車を回すものや、棒に円形の車と、その車に先におもりがついていて、棒を振ることで回すことができるものがあります。摩尼車以外にも回転のイメージがあります。例えば、仏教の輪廻という言葉にも回転のイメージがあります。

また、振り返ってみると、以前学習した永久機関も、回転運動するものが多いです。それは、有限の領域に運動しつづけるものを閉じ込めておくためには、必然的に振動あるいは回転運動が必要だからです。限られた空間の中で永続的に運動を続けることができる回転運動は、永久機関と同様に、人間を虜にする何かがあつたのかもしれない。

### 5.2 回転運動のバランス

#### イントロダクション

さて、それでは早速、回転運動について考えていきましょう。例えば、紐に結びつけられた物体を(ほぼ)一定の速さで円運動を行わせることができます。速さ一定で行う円運動は、「等速円運動」といいます。前回勉強したことを思い出してみましょう。力が何も作用しなければ、物体は等速度で運動するはずですが、等速円運動のような、速さが変化しないような場合は、何も力が作用しないのでしょうか？

#### 速さと速度

実はそうではありません。力が作用しない場合は、「等速直線運動」をするのであって、どこまでもまっすぐに一定の速さで運動します。今回の場合は、直線上の運動ではありません。このような曖昧さを避けるために、物理学では「速さ」と「速度」を区別することが普通です。「速度」は大きさと向きを持っています<sup>1</sup>。どちらの「向き」にどれだけの「速さ」で移動しているか、という2つの要素を併せ持っているものが「速度」です。一方、「速さ」は向きについて考えません。そこで、進む向きが時間的に変化する場合、「速さ」は時間的に変化しないことはありません。しかし、「速度」が一定であることはありません。

等速円運動は、「速さ」は一定ですが、「速度」が一定ではない運動です。運動方程式で考えているのは「速度」ですので、等速円運動を行う物体は力を受けていることで運動を継続しているはずですが。

#### 向心力

それでは、どのような力が作用しているのでしょうか。それは、紐に結びつけた物体を回転させることで実感することができます。紐の端を持って回すとき、手は遠くへ飛んでいきそうな物体を引き留めていることが実感できるでしょう。つまり、紐を(あるいは物体を)中心向きに引きつけることで等速円運動が維持できると考えられます。このように回転運動を維持するために必要な中心向きの力を向心力といいます。

### 5.3 力の種類

このように、回転運動が起こるときには、必ず、何らかの向心力が作用しています。それでは、具体的にどのような力が向心力となるのでしょうか。

ここでは、大きく、接触しているものに作用する力と、接触していないでも作用する力に分けてみましょう。先ほどの、ひもにつけたおもりの例では、ひもの引っ張る力(これを張力といいます)が向心力です。次に、自転車の車輪を例に見てみましょう。これが回転するためには、外側の車輪を内側に引っ張る力が必要です。スポークと呼ばれる細かい線がその役目を果たしています。こうした例が接触している力の例です。

余談になりますが、車輪の回転はいつまでも続く訳ではなく、はやがては止まってしまいます。この回転運動を止めているのは、主として車軸の部分の摩擦です。この部分には、摩擦を極力減らすような部品「ボールベアリング(ベアリング)」が使われています。ベアリングは、2枚の板とその間のボールで構成されています。2枚の板が互いにずれると、その間のボールが転がります。ボールと板の間に摩擦があっても転がることでスムーズにずれることができます。ベアリングに使われるボールが完全な球体に近ければ近い程、よりよいベアリングになります。そして、日本のベアリングは非常に高性能だそうです。

一方、太陽の周りを回る地球の回転運動(公転)や、地球の周りを回る月の回転運動(公転)などは、接触しないで作用する力によって生じる回転運動の例です。これらは、第三種の永久機関として勉強しました。この時に作用する力は「万有引力」と呼ばれる力です。

<sup>1</sup>いわゆるベクトルです

万有引力のように、接触しなくても作用する力は他にあるでしょうか？実は、そもそも、この世の中の力には4つの種類の力しかないことが知られています。

1. 万有引力
2. 電磁気力
3. 強い相互作用
4. 弱い相互作用

これらの力のうち、「強い相互作用」と「弱い相互作用」と呼ばれる力は、非常に狭い範囲でしか作用しないことが知られています<sup>2</sup>。そこで、私たちが日常、感じることはありません。電気と磁気の力は、私たちは実感することができます。下敷で髪の毛を引きつけた経験を持っている人は多いと思います。また、磁石が相互に引き合ったり反発したりするのも経験しているはずです。さらに、電線の周りに磁力が発生することも小学校の時に学習しました。場合によったら、電線の近くで磁石を動かすと発電できることも知っているかもしれません。こうした力は合わせて「電磁気力」といわれています。

このような電磁気力は、接触しないで等速円運動を起こすことに使えそうです。例えば、プラスの電荷を帯びた物体を中心に置き、マイナスの電荷を帯びた物体を回転させると、両者の間の引き合う力が向心力となり、等速円運動を行えるように思われます。しかし、残念ながら、そのような場合には等速円運動を行わせようとしても、等速円運動は続かずに、電磁波（電波）を出しながら次第に半径が小さくなってしまい、やがて2つの物体はくっついてしまうことが知られています。電磁波が発生しエネルギーが失われるから、回転の運動エネルギーが減るのです。

それでは残った万有引力ではどうでしょうか。万有引力は、「全ての物体が互いに引き合っている」という性質を持った力です。例えば、この中のある学生は、他の全ての学生と互いに引き合っています。ただし、その力の大きさはとても小さいので感じることはできません。しかし、例えば、地球くらいの質量を持った物体との間では感じることはできます。私たちが地球に引きつけられ、地上に立っていられるのは、この万有引力が存在することによります。

さて、回転運動について、もう一度考えてみましょう。例えば、地球の自転です。ある瞬間から、急に万有引力が働かなくなったとしたらどうでしょうか。地球は万有引力があることによって、押しつけられて固まっていますので、万有引力が無くなったとしたら、地球は固まる理由を失います。

前回お話ししたことからわかるように、物体に力が作用しなければ、物体は一定の速度でまっすぐ進みます。すると、どんなことが起こるのでしょうか。地球の万有引力が失われて、地球を構成する物体が純粹にまっすぐ進もうとすると、どうなるのでしょうか。それらの物質は地球から遠ざかっていくことがわかります。これを地球の自転とともに回転する人から見たらどうなるのでしょうか。物体は、自分から遠ざかるような力を受けて、離れていくように見えるに違いありません。その力は「遠心力」と呼ばれています。遠心力は、本当は働いていない力です。回転している場合に限り考えることができる見かけの力です。特別な運動である回転運動をする人から見ると、本来速度一定で進んでいるものが、速度一定に見えず、何らかの力が作用したために速度が一定でないというように見えることがあります。遠心力はその例です。そのような力は実際には存在しないので「みかけの力」という表現を使う訳です。

## 5.4 天体の回転運動

世の中の多くの物体は電気を帯びていません。また、電気を帯びた物は、回転運動を続けると、電磁波を発生しながら回転を止める性質があることが知られています。このような理由で、宇宙の

<sup>2</sup>具体的には原子核の中です

天体で回転している物体は、万有引力を向心力として回転しています。

例えば、月は地球の周りを回っています。これは、地球と月の間に作用する万有引力が互いに互いを引きつけていることが大切です。木星にも月があり、木星と木星の月の間の万有引力があることで、木星の月は木星の周りを回転しています。このように、太陽系の惑星の周りには衛星がある場合があって、衛星は惑星の周りを回っています。

惑星も太陽の周りを回っています。これも惑星と太陽の間に作用する万有引力の影響によります。それでは、太陽はどうでしょうか。実は、太陽も太陽が属する銀河系という星の集団の中を回っています。これも万有引力の影響です。

このように宇宙には様々な回転運動があり、そしてそれらは遠隔的に作用する万有引力によって維持されているのです。

ところで、このような天文学的な回転については、いくつかの注意点があるのでそのお話をしておきましょう。

### 落ちることとの関係

以前の講義で物体が落ちることについてお話ししました。落ちることも重力、あるいは万有引力と関係しています。落ちることと天体の回転運動はどのように関係しているのでしょうか。

例えば、高い塔から石を水平に投げたことを考えましょう。すると、運動開始直後、石は地面と水平に進みます。しかし、すぐに重力の影響を受けて落下します。ところが最初に投げる速さを速くするとどうなるのでしょうか。次第に遠くに届くようになります。そして、遠くなると、地球の丸みに関係してきます。地球の丸みがあるために、より遠くまで届くようになります。そして、ついには、地面に落下しなくなります。するとどうでしょうか。石は地球を1周して元の位置に戻ってくることが考えられます。これは人工衛星ですね。人工衛星が実現する速度は計算することができます。そして、その値は、おおよそ  $7.9\text{km/s}$  です。そのような観点からすると、「月はいつも地球に落ちてきている」と言えます。人工衛星や宇宙ステーションもそうです。

ところで、以前、物体の質量に依らず、すべての物体は同じように落下するというお話をしました。空気の抵抗が無ければ、これは、今考えた人工衛星などにも当てはまります。例えば、人工衛星も、スーパーボールも同じように落下します。ちょっと想像してみてください。宇宙ステーションの中にスーパーボールがあったとします。それが、同じ割合で地球に落下するならば、そのスーパーボールは宇宙ステーションの中でフワフワ浮いて見えるに違いありません。これが宇宙ステーションの中の無重力です。

例えば私たちの住む地球は、太陽の周りを回っています。いわば、太陽に落ちています。そこで、太陽からの万有引力を感じることはありません。それは私たちも地球と一緒に太陽に落ちているからです。

### 地球の自転周期

次は、地球の自転周期についてです。地球が自転していることは中学校で学習したことになっています。しかし、その自転周期、つまり、地球が1回転するのにかかる時間はどれくらいでしょうか。うっかり、24時間と答えてしまいそうです。しかし、より正確には23時間56分です。24時間よりも4分間短いです。それはどうしてでしょうか。それは、自転と公転との組み合わせを考えなければなりません。1日の長さが24時間であるというのは、太陽がまた元の方向に戻るために必要な時間を表しています。ところが、実際には地球は自転をしているだけではなく、太陽の周りを公転(星が...)しているために、地球が1回自転しただけでは太陽は元の方向には戻ってきません。さらに、もう少し(4分間)だけ余分に回転する必要があります。

### 尽数関係

月は、いつも（ほぼ）同じ面を地球に向けているという性質があります。これは月が自転をしていないことを意味するのでしょうか？それを調べるために、これを10円玉で実演してみましよう。このように、月も実際には自転していることがわかります。

これは、月がたまたま、非常に偶然にそうなったと考えるべきでしょうか。実際には、天体の中には、このようにいつも同じ面を公転している中心星に対して同じ向きを向けているような例はたくさん観察されます。例えば、火星には2つの衛星（月）があります。これらはどちらも、いつも同じ面を火星に向けています。また、地球の内側を回る金星は、地球に接近する際に、いつも同じ向きを見せます。この他にも、例えば、天王星、海王星、冥王星の公転周期の比は、1:2:3に近いです。このように太陽系内の回転には、綺麗な整数の比があるように見えます。このような関係は総じて、「尽数関係」と呼ばれています。月の公転周期と自転周期の比が1であることも含めて言います。

惑星	周期 (年)	比率 (天王星基準)	比率 (海王星基準)
天王星	84.25301	1.00	0.510
海王星	165.2269	1.96	1.00
冥王星	247.74	2.94	1.50

では、天体の運動に回転運動が多く見られ、また、尽数関係があるのはどうしてでしょうか。まだ理由がよくわからないこともありすし、いろいろな説明があるかと思います。ここでは、逆説的に、そうした運動だけが残った、と表現してみたいと思います。回転運動しない物体は、中心の星に落下することになります。また、尽数関係ではない回転運動は、何らかの障害があって、その要素が失われてしまうと考えられるわけです。

## 5.5 地球上の回転運動

さて、より身近な回転運動に話を移していきたいと思います。それは地球大気のリターン運動です。大気中には「渦」という形で回転運動があります。そのような回転運動はどのようにできるのでしょうか。

ちょっと考えてみましょう。風呂桶に水を張り、その水に渦を作ることができるでしょうか。大気の中に渦を作るということは、そういうことをしている訳です。

そのような方法はいくつかあります。

### 温度差をつけること

方法の1つは温度差をつけることです。温度差をつけると水は渦を巻きます。その様子は、以前は風呂で観察することができました。最近の風呂は、自動的に風呂の水をかき回すので観察するのが難しくなりました。しかし、以前は、風呂の水を通った電灯の光が水の流れを表して、渦ができる様子を観察することができました。

高気圧や低気圧ができる時、温度差があることが重要なポイントとなります。

### 栓を抜く

栓を抜くと水が回転しながら出て行くことを体験します。これは、フィギュアスケートの選手が腕を縮めると速く回転するのと同じような現象です。

大気中では、台風がこれに似ています。ゆっくり回っていた空気が中心に吹き込むと強い回転を発生させます。

南北方向に動かす

風呂桶の下にレールをつけて北極点から赤道まで動かしてみます。すると、風呂桶の中の水は、地球の自転とは反対回りに、24時間で1周する速さで回るようになります。

## 5.6 回転運動の性質

このように様々な回転運動について見てきました。最後に、回転運動の様々な性質についてお話ししたいと思います。

### 1. 角運動量の保存則

腕の長さを変えることで回転の速さが変わります。これについては先ほど学習しました。

### 2. 同じ方向を維持する性質

外部から力を加えない限り、回転運動はその状態を保とうとします。そのため、コマを回すと、その方向は維持されます。これは古くから知られた性質で、飛行機の運行にも使われていました。

ジャイロ効果とも呼ばれています。アメリカンフットボールで(おそらくバスケットボールでも)ボールを回転させることは、ボールの軌道を安定させる効果があります。

それでは、その回転を無理に変えてしまおうとしたらどのようなになるでしょうか。回転軸に力を加えると、回転軸は力の加わった方向と垂直な方向に動く性質があります。実際に体験するとわかるのですが、すごく不思議な感じがします。

### 3. コリオリの力

このビデオを見てみましょう。これは、回転台の上でボールを動かしたときの様子を撮影したのです。回転していない人から見ると、普通にボールは直進するように見えます。ところが、回転しながら見ると、ボールの進み方は曲がって見えます。

これは遠心力と同様に、回転しながら見ると現れる見掛け上の力であり、実際には作用していません。物体は速度を保って前進しようとしているだけです。

### 4. テイラーのインクの壁

このコリオリの力は、特に気象学や海洋学の分野で重要な役割を果たします。その例を示すために、回転している水の中にインクを垂らしてみましょう。

回転していなければボワッと広がるはずのインクが、回転していることによってカーテンのように広がります。

このような現象はテイラーのインクの壁として知られています。

回転している物体は、私たちの身のまわりに沢山あります。しかし、私たち自身が回って観察することはそれほど多くないために、残念ながら私たちの頭の中には、回転についての物理法則は乏しいようです。そのような場合には、一つには、これまでの理論を応用して考えることが必要です。実際、運動方程式や作用反作用の法則を応用して回転している場合の運動を説明できます。そして、もう一つは、沢山経験を積むことです。つまり、実験的な体験を増やして頭の中の物理法則を肥やしてやる必要があります。