

2 永遠に動きつづける機械の夢

2.1 エネルギー

皆さんは、エネルギーという言葉をごどのように理解しているでしょうか。例えば、どのような場合にエネルギーという言葉を使いますか？ここで思い浮かべてみてください。

おそらく、次のようなものを思い浮かべるとおもいます。

- アニメなどに出てくる光線の攻撃兵器
 - － アニメ「宇宙戦艦ヤマト」の「波動砲」
 - － 漫画「ドラゴンボール」の「かめはめ波」
- 発電するための (あるいは動力源としての) 燃料
 - － アニメでの台詞「エネルギー充填 100%」「エネルギー残料がゼロ」
 - － 新聞などで報道される「エネルギー問題」
よく私達の社会では、「エネルギー問題」という言葉を使います。「エネルギー問題」という言葉を使う場合には、火力発電所で使われる化石燃料や、原子力発電所で使われるウランの供給が安定しないという問題を意味しています。
- ダイエットなどに関連して、「運動してエネルギーを消費する」といった生物学的表現

このように、エネルギーという言葉を考えて、なんとなくその雰囲気はつかめるものの、そのしっかりとした実体はわかりません。実は、「エネルギー」という言葉は物理学用語です。その物理学の中でも、「エネルギーとは何か」を定義するためには、そのためのいくつかの基礎的な知識を前提にしなければなりません。また、エネルギーの性質については、「なぜそうなのか」がはっきりしないものもあります⁵。このようにエネルギーとはやや難しい考え方です。ただ、難しいと言ってお終いにしては話が進みません。そこで、ここではとりあえず、「ものを温めることができる能力」をエネルギーとします。

それでは、早速、エネルギーにどのようなものがあるかを考えるために、ものを温めることを考えてみましょう。水 2 リットルがここにあったとします。この水を温める、つまり、温度をあげるにはどのようにしたらいいでしょうか。どのような方法が考えられるでしょうか。どのような「もの」にそのような能力があるでしょうか。

1. 運動エネルギー

両手をこすると手はあたたかくなります。同じように、走っている自転車をブレーキで止めるとき、ブレーキパッドはこすれて熱くなります。この熱は水を温めるのに使うことができます。

このように運動していたものを止める際に熱が発生しますので、エネルギーがあると考えられます。このようなエネルギーを運動エネルギーといいます。

⁵少なくとも私には。

2. 位置エネルギー

高いところにあるものを落下させます。すると、落下する際に速さが速くなります。そのまま地面に落下して衝突すると熱が発生します。あるいは、途中の空気が抵抗となってものの動きを止めようとする際にも熱が発生します。流れ星の多くが地上にはたどり着かず途中ですべて燃えつきてしまうのは、空気抵抗による熱が原因です。

このように高いところにあるものは余分にエネルギーがあると考えられます。一般に、場所を決めることでそれに応じたエネルギーがあると考えられる場合、これを位置エネルギーといいます。

3. 電磁エネルギー

最近では、IH クッキングヒーターが普及しています。これは、まず、レンジ台で発生させた電波 (電磁波) でフライパンやヤカンを温め、その熱によって水を温めています。

電子レンジも水を温めることができます。この場合は、電子レンジ内で発生した電磁波がそのまま水を温めます。

このように、電波はエネルギーを持っていると考えることができます。このようなエネルギーは、電磁場のエネルギーとか、電磁エネルギーといいます。

4. 電気によるエネルギー

掃除機で掃除をし終えた後、コンセントから電源ケーブルを抜くと電源ケーブルが暖まっていることを感じるかもしれません。この他の家電製品でも同様です。このように電流を流すことで温度を上げることができます。

最近は見かけことが少なくなりましたが、IH クッキングヒーターとは別に、電線が巻いてあるだけのヒーターもよく使われていました。このようなヒーターは、電流を流すことで温める例の代表です。

このように電気によるエネルギーがあります。特に、電気を流すことで発熱した熱をジュール熱といいます。

5. 化学エネルギー

例えば、これをヤカンに入れ、ガスのコンロで温めることができます。現在では、ガスの多くは「天然ガス」と呼ばれるものを利用しており、「メタン」や「エタン」が主成分です。これを燃やして二酸化炭素と水に変換させます。このように、物質が燃焼などの反応によって変化することを「化学反応」とか「化学変化」と言います。

この例では、ガスの化学反応を用いているので、このようなエネルギーを化学エネルギーといいます。

ここで注意したいことがあります。電気によるエネルギーや電磁エネルギーは、元を正せば、どこかで発電していることが重要です。火力発電は化石燃料を燃やして電気を作るため、電気エネルギーは化学エネルギーから作ることができる訳です。

6. 原子力 (あるいは核エネルギー)

この他にも原子力発電によって発電することができます。このようなエネルギーを核エネルギー、あるいは原子力 (エネルギー) といいます。

原子力については後日改めて扱います。

7. 太陽エネルギー

ソーラークッカーは太陽の光を集めてものを温める装置です。太陽の光は、その他に「太陽電池」によって電気のエネルギーに変換することもできます。ところが、太陽光線は電波の一種です。そこで、太陽光線によって地球に届くエネルギーは、太陽エネルギーとっていますが、実際には電磁エネルギーです。

また、太陽が輝くのは太陽内部で発生する核エネルギーによっています。その核エネルギーを太陽エネルギーということもあります。

太陽炉

太陽光線を鏡や凹面鏡で集めて高温にすることができます。それがソーラークッカーです。しかし、より大型のものを作ることができます。それらは「太陽炉」と呼ばれています。単に太陽の光だけでどれだけの温度得られるのか、と思うかもしれません。大型の太陽炉では 3000 以上、条件によっては、40000 の温度を得ることができます。鉄は 1540 程度で融けてしまいますので、それよりもはるかに高い温度です。

8. 内部エネルギー (あるいは熱エネルギー)

そして、熱いものを水に触れさせることで水の温度を上げることができます。熱そのものもエネルギーであると考えられます。これを熱エネルギー (熱力学の用語では内部エネルギー) といいます。

ここで、エネルギーについて注意しておきたいことがあります。発電について述べたことから、エネルギーは相互に変換することがわかります。核エネルギーが太陽を加熱し、熱エネルギーとなります。熱エネルギーは太陽を光らせ、電磁エネルギーとなります。それが地球に届き、光合成によって (燃えない) 二酸化炭素と水を、酸素と炭水化物 (燃えるもの) に化学変化させます。化学エネルギーになった訳です。遠い昔にそのようにしてできた物質が石油や石炭となります。火力発電所ではこれらを燃やして水を温めます。化学エネルギーを内部エネルギーにしていることに対応します。そして、水が激しく沸騰すると、発生した水蒸気を勢いよく吹き出させることでタービンと呼ばれる装置を回転させます。水蒸気の内部エネルギーは運動エネルギーとなって、さらにタービンの回転の運動エネルギーになります。回転の運動エネルギーは、発電機を通して電気のエネルギーとなり、家庭まで配られます。家庭では電気を使って電子レンジを使って電気のエネルギーを電磁エネルギーに変え、電磁エネルギーで水を温めたりします。

また、太陽光線によって地表付近が温められると、地表付近の水蒸気が蒸発します。それは雲を作り、雨となって降り注ぎ、川を作ります。それはダムでせき止められます。低いところにあった水が、太陽エネルギーによって高いところに持ち上げられ、位置エネルギーとなった訳です。ダムでは、水を落とすことでタービンを回して発電します。このように、エネルギーは様々な形をとりますし、また、相互に変換することができます。

2.2 エネルギーと人間

このようにエネルギーにはいろいろなものがあります。そして、人間はこうしたエネルギーを活用してきました。特に電気は重要です。石炭や石油の化学エネルギー、ウランの核エネルギー、水の位置エネルギーなどを活用して電気のエネルギーを得ます。こうして発電したもので、私達は身の回りの電器製品を動かします。

ところが、石油は、人間が使える量が限られていて、50年程度でなくなってしまうと考えられています。ウランも同様で、100年以内になくなってしまうと言われています。石炭の量は比較的多いので数100年は大丈夫なようです。しかし、量に限りがあることは間違いありません。その上、これらを利用すると、様々な廃棄物が発生します。石油や石炭を燃やすと二酸化炭素が発生します。また、硫黄酸化物や窒素酸化物など、公害のもととなるものも発生します。一方、原子力発電では放射性廃棄物が発生します。これらは数万年の時間、生命に危険な放射線を出しつづけます。このように、人類が大量のエネルギーを利用しようとするれば、それに伴って様々な問題が発生します。これを一括して「エネルギー問題」などといいます。

2.3 永久機関

このような認識は古い時代からありました。そこで、なんとか自動的にエネルギーを生み出せるような装置、すなわち、一度動かしたら、他からエネルギーをもらうことなく、永遠に動き続ける機械「永久機関」を作りたいと考えてきました。エネルギーは相互に変換できますから、何らかの永久機関で運動エネルギーを作ることができれば、電気エネルギーや光のエネルギーを作ることができます。特に、回転運動を起こすことができれば、「発電機」を回して発電することができます。発電機は、丁度、モーターの逆の働きをするものだと思っていいと思います。モーターは、電気を使って回転運動を生み出します。逆に、モーターを回すことで電気を生み出すことができます。

ここからは、そんな永久機関の例を挙げます。これらの例には、それぞれ物理学的な背景もあるので、それも同時に説明したいと思います。

● 坂を利用した永久機関

三角形の山形の台の上に、チェーンをつないだおもりを図のように載せます。するとどんなことが起こると考えられるでしょうか。斜面の急な方は、重力の影響を強く受け、斜面に沿って下がるとうする力が強いです。一方、斜面が緩い方は、重力の影響が弱く、斜面に沿って下がるとうする力は弱いです。

このように考えると、この図で左側のおもりの方が強く斜面に沿って引かれるために、左側に落ちていくように思われます。そして、このチェーンは、どんどん加速しながら、永遠に反時計回りに回りそうに思われます。

重力と三角比

これは、皆さんが高校で勉強した三角比で数値的に説明ができます。斜面が水平面に対して角度 θ の斜面であるとし、すると、重力の斜面に沿った方向の大きさは、 $\sin \theta$ に比例します。 $\theta = 90^\circ$ は鉛直になった壁に対応し、重力そのものが作用します。 $\theta = 30^\circ$ では、 $\sin 30^\circ = \frac{1}{2}$ ですから、斜面に沿って重力の半分の大きさの力が作用します。 $\theta = 0^\circ$ は水平面に対応します。重力は斜面に沿った方向には作用せず、大きさはゼロです。

● てこの原理を用いた永久機関

私たちはシーソーや天秤などで、「てこの原理」と呼ばれるものを知っています。天秤が釣り合うためには、支点からの水平距離と重さを掛け合わせたものに注目する必要があります。支点からの水平距離と、そこに作用する力の大きさを掛け合わせたものをトルクといいます。このトルクが、左右で等しくなると初めて釣り合います。逆に、これが等しくなければ釣り合わず、天秤は回転しようとし、このような支点からの距離と力の関係は「てこの原理」として知られています。

そこで、次のような装置を考えてみましょう。この車輪の周りには棒とおもりが付けられています。この棒は、時計周りには途中までしか動かず、途中で止まってしまいます。一方、反時計周りには、車輪に沿うようになるまで動きます。このような車輪で、右側と左側とを比べてみましょう。左側は回転の中心からの距離が短く、右側は長くなっています。そのため、右側の方のおもりによって時計回りに回そうとするトルクが大きくなります。そこで、この車輪は右側に回るように思われます。

てこの原理

梶子(てこ)とは、重いものを動かすための棒をいいます。「てこの原理」とは、てこがバランスしている場合に、支点(てこの固定された点)の周りの力のつり合いについて法則です。具体的には、例えば二つの力の場合、

$$(\text{支点からの距離}) \times (\text{力})$$

が同じになるというものです^a。

^aただし、いくつか注意があります。一つは、例えば、反時計回りに回そうとする力をプラス、時計回りに回そうとする力をマイナス、というように符号を考えると、3つ以上の力について、(支点からの距離) × (力) の合計がゼロになります。また、距離は、支点から力の作用する向きに垂直に測らなければなりません。

● 浮力を使った永久機関

浮力

一般に、液体(や気体)の中にある物体には浮力が作用します。その大きさは、物体の体積と同じ体積で考えたときの周り液体(や気体)にの重さと同じです。向きは重力と逆向きです。例えば、空気中の「空気」には、その分の空気に作用する重力の大きさだけ浮力が作用しますので、丁度、重力とつり合います。空気が落ちないのは、浮力があるからである、ということもできます。

空気中のヘリウムガス(の風船)の場合はどうでしょう。浮力の大きさは体積で決まっていますから、同体積の空気の入った風船と同じだけの浮力が作用します。しかし、ヘリウムガスは軽いので、ヘリウムガスに作用する重力は少ないので、浮力が打ち勝ち、上に上がっていきこうとします。よく、「ヘリウムガスは浮力で上昇する」という表現を用います。しかし、実際には、「浮力は同じだけど、重力が小さいので上昇する」という方がより正確かもしれません。

重力は物を押し下げようとします。私たちを取り巻く空気にも重力は作用しています。ところが空気は地面に落下すること無く、わたしたちの周りに存在しつづけます。軽いガスが入った気球はむしろ上昇していきます。

これは、浮力の作用です。

そこで、図のような装置を考えてみましょう。

右側は水中にあります。そこで、右側には浮力で上にあがろうとする力が作用します。ところが、左側は水の中ではありません。そこで、左側では重力によって下に下がろうとします。その結果、この装置のチェーンは左回りに回りそうです。

● 毛細管現象を使った永久機関

皆さんの中には、「毛細管現象」という現象を知っている人もいます。

図は、そのようなアイデアによって作られた永久機関です。図では太く描かれてはいますが、先端部分は細くなっているため、「毛細管現象」によって水が吸い寄せられ、先端から水を滴

らすことができそうです。こうして、水が高いところから落ちます。水を落とすときに、発電をすることができます。

毛細管現象

水に毛細管 (毛のように細い管, あるいは細いストロー) をさし入れると、ストローの中の水面は少しだけ上昇します。このように、水は狭いところに入り込んでいく性質があります。狭ければ狭い程、上昇していく性質があります。そこで、細かい繊維でできたティッシュペーパーを水に浸すと、この毛細管現象によって、水の中に入れた部分だけでなく、その上の部分にも水がしみ込んでいきます。

この現象は、水の表面張力と関係しています。水面はその端で容器に沿って上に上がります。管の内側が狭いと、表面張力によって水位が上がります。

これまで見てきたような、他のエネルギーを使うことなく、新たにエネルギーを生み出せるような装置を「第一種の永久機関」といいます。この他にもいろいろな第一種の永久機関が、長い歴史の中で試みられてきました。みなさんは、これらの中で、どれがもっとも効率よくエネルギーを生み出すと考えますか？

2.4 夢でしかない永久機関

ところが残念ながら、このような第一種の永久機関は、どれも実現しません。簡単に、どうして実現しないか、検討してみましょう。

● 坂を利用した永久機関

確かに急な斜面の方が強く下に引かれます。しかし、左右のおもりの数を見てください。急な斜面の方が数が少なく、緩やかな斜面の方が数が多いです。このため、数の観点からは急な斜面の方が不利になります。

この両方の効果を考えると、丁度つり合ってしまうと、回転は起こりません。

● てこの原理を用いた永久機関

これも同様です。左右のおもりの数を調べてみましょう。すると、腕をたたんだ方はおもりの数が多くなっていることがわかります。これも同様につり合ってしまうと、回りません。

● 浮力を使った永久機関

浮力の場合を考えるのは少し難しいです。確かに、縦方向に考えると、回転しそうな気がします。しかし、横方向に考えるとどうでしょうか。水のある側は、下にいけばいくほど圧力が高くなります。そのために、下の方では、水の中から物を押し出そうとする強い力が作用します。これらがつり合って回らなくなってしまうのです。

● 毛細管現象を使った永久機関

この例の場合はどうでしょう。実は、水は滴り落ちることができません。管の口のところを出ると、そこには狭いすき間がありません。むしろ、管の中の方が狭いのです。そこで、水は、管の中に戻ろうとし、決して滴り落ちることができない訳です。

これらの他にも第一種の永久機関はあります。しかし、これらの例を見ると、どうやら第一種の永久機関を作ることは難しそうです。

このように、数多くの永久機関の失敗から、どうやらエネルギーを生み出すことはできないとわかりました。エネルギーを得るためには、既にある、他のエネルギーを変換することによってしか得られない、という訳です。宇宙は限られていますから、この世の中に存在するエネルギーは、そもそも限られていた、という訳です。このように、「エネルギーを生み出すことはできない」という性質を「エネルギー保存則」あるいは「エネルギー保存の法則」と呼びます。この着想は、マイヤー (Julius Robert von Mayer, 1814-1878) によって与えられました。

それでは、やはり永久機関は夢でしかないのでしょうか。

2.5 永久機関のような装置-1-

ここに一つの玩具があります。この動きを見てください。これは、非常に長時間、同じような運動を繰り返します。この玩具は、「水飲み鳥」とか「平和鳥」などと呼ばれているものです。数10年前に流行ったので、皆さんの両親の世代の人ならば、知っているかもしれません。

この鳥はどのようにして動いているのでしょうか。ポイントは頭の部分のフェルトです。この部分は水を吸い込み、水を蒸発させています。水が蒸発すると鳥の頭の部分の温度が低下します。これは、蒸発熱 (あるいは一般に気化熱) として説明されています。注射の際に皮膚をアルコール消毒すると、その部分が冷たく感じられます。これはアルコールが蒸発した際に蒸発熱が奪われて温度が低下するのです。この場合も同様に、水が蒸発して蒸発熱を奪い、温度が低下するのです。温度が低下すると、中の気体の体積が小さくなります。すると、鳥の中にある液体が吸い上げられます。ついにバランスをくずすと、鳥の頭は水面に落ちていきます。この時、中の液体は再び体の下の方に流れるようになっていきます。その結果、下の方が重くなり、再び体が起き上がり振動を繰り返します。そして頭が重くなるまでの間、こうして体をゆすっている訳です。

これは永久機関でしょうか。まず、コップの中の水が無くなったらどうなるでしょう。これは動かなくなってしまいます。また、たとえば、この水飲み鳥とコップ全体を、一つの閉じた容器に入れてしまいます。すると、容器の中は水蒸気が充満して蒸発が止まってしまいます。蒸発が止まると、頭も冷えませんから、上で話したようなことも起こりません。つまり、空気中で蒸発が起こること、すなわち、大気中の湿度が100%でないことが重要なのです。運動によって回りやコップの中の水の状態が変化してしまいます。永久機関であるためには、「周りに変化を及ぼさずに」繰り返し運動することが必要です。

実は、これと関連した現象が自然の中にもあります。「水の大循環」と呼ばれているものです。海や陸地から、水が蒸発します。それが運ばれた先で雲になり、雨を降らせます。この時、「水飲み鳥」と同様に、空気中の湿度が100%でないことが大切です。そうでなければ水が蒸発しないからです。

このような問題については、また、後日扱うこととなります。そして、その時に「第二種の永久機関」という言葉が登場しますので覚えておいてください。

2.6 永久機関のような装置-2-

「永遠に動きつづける」という観点からは、例えば、地球の自転 (地球自身が地軸の周りを回る運動) や地球の公転 (太陽の周りを回る運動) はどうでしょうか。あるいは、月の自転や公転はどうでしょう。もちろん、太陽には寿命があり、永遠に輝きつづけるわけではありません。そこで、や

がて、太陽系は終わりを迎え、その時に地球も太陽と運命を共にするでしょう。しかし、そうした点を考えなければ、地球を含む惑星の自転や公転は永遠に続くように思われます。

ただし、これはエネルギーを取り出すことを前提としない永久機関であるといえます。もしも、このような運動からエネルギーを取り出すと、運動の状態が変わってしまいます。例として、月の公転 (地球の周りを回る運動) を挙げましたが、実は、この運動はエネルギーを失いつつあり、運動は変化しています。

皆さんは「潮汐」あるいは、「潮の満ち干」を知っているでしょうか。簡単に説明すると、月が地球表面の海水を引っ張る現象です。月の公転 (地球の周りを回る運動) の周期 (元に戻るまでの時間) は、30 日程度です。それに対して、地球の自転の周期は 24 時間程度です。地球の自転に比べて月の運動はゆっくりなので、月を止めて考えましょう。すると、地球と一緒に回ろうとうする海水は、月に引きずられて運動することがわかります。もっとも、海全体が動く訳ではありません。少しずつ、海水の一部がずれていくことで海面の凸凹ができます。

海水が月によって運動すると、この時、海で摩擦を生じて、熱が発生します。「エネルギー保存の法則」を考えると、熱が発生しているからには、何か別のエネルギーが失われているはずですが、それは何でしょうか。実は、地球や月の運動エネルギー (と位置のエネルギーの合計) が失われているのです。このように熱が発生することの代償として、月は速度が低下し、毎年、おおよそ 1cm ずつ地球から遠ざかっています。また、地球の自転は徐々に遅くなっているのです。

地球と月の運動は、このように、実際には全く同じように動きつづけている訳ではないことがわかりました。しかし、エネルギーを失わなかったら、つまり、地球に海洋がなかったら、このようなことは (ほとんど) 起こらなかったでしょう。永久に動きつづけることはできるけれども、それからエネルギーを取り出すことができないような運動を「第三種の永久機関」と呼びます。第三種の永久機関は存在することができます。しかし、エネルギーを取り出すことができないので、「永久機関」としては意味のない永久機関であると言えます。

ここまでいくつかの物理法則と関連付けながら永久機関について考えてきました。エネルギーを取り出せるような (第一種の) 永久機関は存在しませんでした。そもそも、第一種の永久機関の場合、動きつづけるどころか、多くの場合、動こうとさえしません。しかし、その代わりとして人間はエネルギーが保存するという自然法則を見出すことができました。

第二種の永久機関や第三種の永久機関のように動きつづけるものはあります。しかし、第二種の場合のように、エネルギーの出入りがあったり、第三種の場合のように、エネルギーを取り出すと止まってしまったりするので、結局、無限のエネルギーを生み出す永久機関は存在しないということになります。