

第11章 熱とエネルギー

11.1 永遠に動きつづける機械の夢

福島第一原子力発電所の事故は世界を震撼させました。対応を誤れば、東日本全域で人が住めなくなるかもしれなかった危機です。それほどの危険を犯してまで、私たちは電力を欲しがっています。確かに、私たちの生活は電気に支えられています。もしも家庭に電気が供給されなかったら、大変不便な生活になることでしょう。震災後の計画停電を体験した人は、それがわかると思います。

逆に、もしも限りなく電力を得ることができたとしたら、どれほど安心だろうか。そう思うかもしれませんが、それは、現代だけの話ではなく、昔からそのように考えてきた人々がいました。そして、それを目指して、沢山の試みがなされています。永久機関を作る試みです。永久機関とは、自動的にエネルギーを生み出せるような機械、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のことです。

今回の講義は、永久機関から始めたいと思います。

- 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ようとする力が強いです。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ようとする力は弱いです。

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 の斜面であるとします。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ています。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

てこ (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、てこがつり合っている場合に、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の法則です。具体的には、例えば 2 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。浮力の大きさは、物体の体積と同じ体積で考えたときの周りの液体 (や気体) 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ています。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ると思います。

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。

この他にもいろいろな永久機関が、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？

11.2 夢でしかない永久機関

ところが残念ながら、このような永久機関は、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。急な斜面の方は数が少なく、緩やかな斜面の方は数が多いです。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、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。

これらの他にも考えられた永久機関はあります。しかし、いまだかつて、永久機関ができたことはありません。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ようです。なぜでしょう。ここで、また、ABC の考え方で考えてみましょう。皆さんは、次の A に対して、どのような B, C を考えるのでしょうか？

A なぜ永久機関を作ることができない(むずかしい)のか？

B

C

早速、答えを書くと、これは積極的に検証できない事例です。つまり、「なぜ永久機関ができないか」という問いかけ自身が間違っていると、考えるべきです。「永久機関はできない」ことを事実として認め、そこから議論をスタートするべきではないか、と現代科学は考えています。科学と技術は、ガリレオ・ガリレイによる科学の ABC の考え方を援用することで、飛躍的な進歩を遂げました。それは、ABC の考え方によって多くの問題を解決することができたからです。しかし、時々、それができない場合があります。その時に、実験事実を素直に受け入れ、それを基本に考える、という発想が必要なこともあります。「永久機関ができない」という事実はその例です。

ドイツの物理学者マイヤー (Julius Robert von Mayer, 1814-1878) は、エネルギーが無いところからエネルギーを生み出すことができない、という「エネルギー保存の法則」(エネルギー保存則)を提唱しました。

ここで、「保存」という言葉に注意してください。日常的な保存の意味とは区別して考えて欲しいと思います。時間が経過しても変わらない、という意味が「保存する」の意味です。

11.3 エネルギー

エネルギー保存則は、逆に、エネルギーが無くならないことも意味します。すなわち、エネルギーは相互に変換はするけれども、発生したり消滅したりはしないと考えられています。

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のでしょうか。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と思います。

- 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」や「元気玉」
- 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¹。このようにエネルギーとはやや難しい考え方です。ただ、難しいと言って終わり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

¹少なくとも私には。

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。

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も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に途中で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、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、電磁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と思います。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ので、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、太陽光線は電磁波の 1 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、太陽エネルギーといっていますが、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が。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。これを内部エネルギーといいます。一般的に熱エネルギーと呼ばれているものも、この内部エネルギーのことです。

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。それが電波や光となって地球に届き、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。

11.4 熱

内部エネルギーを私たちは、「熱」として認識していることが多いです。ここでは、あまり正確な表現ではありませんが、「熱」と表現していくことにします。

さて、温度が高い物は「熱」を帯びている、すなわち、大きな内部エネルギーがあると考えられています。この熱を発電につかえないのでしょうか。例えば、部屋の温度は、冷暖房が行われているにせよ、比較的快適な室温でしょう。この部屋の温度を下げ、熱を減らして、その減らした分を発電に使うことができれば、エネルギー保存則に違反することもなく、私たちはエネルギーを手に入れることができます。しかも、気温を下げるのですから、地球温暖化対策にもなります！

そのヒントは大気にあります。

A 上空の空気は冷たいのに、どうして落ちてこないのだろうか。

私達は山に登った時などに、登れば登る程、気温が下がることを体験します。また、山に登らなくても、遠くの山を見ると、上の方だけ雪が積もっていることが多いです。これは山の上の方の気温が低いことの理由になります (A: 上空と地上とどちらの気温が高いか。B: 地上の方の気温が高い。C: 山に積もった雪は上部に多く、下になるほどすくなくなる)。さて、上空の気温が低いとすると、気温が低い空気は重いので、落ちてこないのだろうか、と心配になるかもしれません。

みなさんは、この問題に対してどのような仮説を立てますか？

B 実際に落ちてきているけど、空気が透明だから見えない

B 上空と地上とでは気圧が違うので気圧が影響している

...

いろいろな可能性があると思います。では、それに対して、どう実験しますか？あるいは、どのような方法で確かめますか？まず、常に上空の空気が落ちてきているとしましょう。そうすると、地上にばかり空気が溜る訳にもいきませんから、地上から上空へ空気が逃げているはずで、つまり、同時に上昇する流れもあるはずで、あちこちで上昇と下降が入り乱れていることになっているはずで、それを実際に確かめるのは難しいかもしれませんが、普通、空を見ていて、どうもそんなことは起こりようがないように思います。例えば、空の動画集 (<http://robo.mydns.jp/SKY/>) を見てみると、雲によって大気の流れが見えるようになっている (これを「可視化」といいます) ことがわかります。これを見ても、激しく大気が上下運動をしているようには見えません。

では、気圧が影響しているという仮説はどうでしょうか。気圧がどう関係しているか、を、想像するのは難しいことです。しかし、実は、このような話は中学校でも扱ったことになっていますし、また、これについては簡単に確かめることができます。

ここにあるのは真空調理器と呼ばれるものです。主に漬物を作るときに用います。漬物液に野菜を浸して気圧を下げると良く浸かるそうです。まず、この中に気圧計を入れてみましょう。操作をすることによって気圧計の気圧が下がることがわかります。空気を抜くことで気圧が下がっている訳です。

次に、この中に温度計を入れて空気を抜いてみましょう。中の空気が少ないので、固体である温度計の温度を変えるのは大変ですが、それでも温度が変化していること、つまり、温度が下がっている様子が観察できます。

これをしばらく放置すると、段々と周りの空気に温められて気温が上がっていきます。

今度は、この容器中の圧力を上げてみましょう。圧力を上げるためには、周りから空気を入れる必要があります。そのため、表示される気温は、正確にはこの内部の空気の温度だけでは無く、外から入ってきた空気と混ざったものになってしまいます。この点は注意が必要です。では、気圧を上げてみましょう。すると、気温が上昇することが確認されました。このように、気圧によって温度が変化することが確かめられました。上空の冷たい空気を考える場合には、気圧を考える必要があります。

残念ながら、今日のこの段階で確かめられるのはここまでです。どうして上空の冷たい空気が落ちてこないのかを考える場合には、どうしても、具体的にどれくらいの気圧の変化でどれくらいの温度変化が起こるかを確かめなければなりませんし、上空の空気がどれくらいの気圧でどれくらいの気温なのかも調べなければなりません。ただ、結論だけいうと、上空の空気を地上に持つてくるととても暖かくなります。例えば夏に、上空に冷たい空気があるからといって、それを引きずり降ろしてくると、かえって高温になってしまうのです。同じ圧力で比べた時に暖かいので上空の空気は上空に居つづけることができる訳です。

しかし、圧力によって温度が変わる例、あるいは、外部の気体を押しやって温度が下がる例は、私たちの日常生活でもそれを実感できることがあります。例えば、スプレー缶やガスボンベです。残りが少なくなったスプレー缶を使うと、缶が冷たくなります。これは、内部エネルギーを減らして外部にエネルギーを取り出すことができた例です。

しかし、これを行うためには、容器の内部の圧力をあげておく必要がありますし、そうすると、その時に気体の温度は上がってしまいます。温度を下げてエネルギーを取り出すには、エネルギーを加えて温度をあげておかなければなりません。

これらを詳細に考えると、残念ながら、純粋に温度を下げてエネルギーを取り出すことを繰り返し替えて行うことができないことが知られています。これができるとして永久機関を考えることもできます。温度を下げてエネルギーを取り出したら、再び、まわりの温度に馴染むまで待って、再びエネルギーを取り出せばいいからです。こうした永久機関は、これまで述べた永久機関とは性質が異なるので区別し、第 2 種の永久機関と呼ばれています。これに対して、これまで述べた永久機関は第 1 種永久機関と呼ばれています。そして、第 1 種永久機関が実現できないことが、エネルギー保存則に対応したように、第 2 種永久機関ができないことは、熱力学第二法則、あるいは、エントロピー増大の法則と結びついて理解されます。この辺の話は難しいので、皆さんが熱力学を履修したらそこで学んでしょう。