

10 物質の性質と熱とエネルギー

この講義も残念ながら、もう、残りの回数の方が少なくなってきました。そこで、これからの数回は、新しい物理学の世界をかいま見ていきたいと思います。新しいといっても、既にある程度完成された分野もありますし、本当にこれから研究しなければならないようなこともあります。そういう意味では、定義がはっきりしないのではありませんが、いずれにしても、高校の時に学習したような物理学とは一味違うと思います。

初回のテーマは熱とエネルギーです。

10.1 上空の空気はなぜ落ちてこないのか

さて、例によって、ABCの話から始めましょう。今回のAについては、こちらから提示します。その前の段階として、みなさんは、ものを温めると膨張すること(多くの場合についてですが)、そして、膨張したために同じ大きさで考えると軽くなることを知っていると思います。例えば、暖かい空気は冷たい空気よりも軽いので、上に行こうとします。冬の時期に暖房をかけると、足元の空気は冷たくて部屋の上の方の空気だけが暖かいことはよく体験します。

そこで、こんな疑問は湧きませんか？

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。これは山の上の方が気温が低いことの原因になります(A: 上空と地上とどちらが気温が高いか。B: 地上の方が気温が高い。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？

- 実際に落ちてきているけど、空気が透明だから見えない
- 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、地上には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を調べなければなりません。ただ、結論だけ言うと、上空の空気を地上に持っ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。

このように、気圧が変化することで温度が変わることは、日常的に感じることもあると思います。例えば、ヘアスプレーなど、ガスが缶に封入されている場合です。中のガスを使うと、ガス缶が冷えるのを見たことはありませんか？これは、気圧が下がると温度が下がる典型的な例です。逆に、圧力を上げると温度が上がる例としては、ポンプで自転車のタイヤに空気を入れる時が挙げられます。

また、飛行機の中の空気についても興味深い話があります。乗客が呼吸をするために、飛行機の中は常に換気しなければなりません。また、飛行機の中の気圧は地上に近い気圧にしています。その結果、外気を飛行機の中に導くと、その空気はとても温度が高くなります。高度にもよりますが、例えば 60 度とかそういった温度になってしまいます。そこで、飛行機の中に取り込んだ空気は、冷却してから機内に入れなければなりません。

10.2 エアコンの仕組み

以前、講義の中でこのような話をした時、学生から質問がありました。このような仕組みを使えば、エアコンを使わずに済み、電力消費を節約できるのではないかと思います。どうでしょうか、という質問です。

非常に鋭い質問です。とてもいい質問なので感心しました。しかし、大変残念ながら、正しくこのような仕組みを用いたのがエアコンなのです。ここで、簡単にエアコンの仕組みを見てみましょう。冷房の場合と暖房の場合がありますが、この図にあるようなクーラーの場合を考えてみま

しょう。

エアコンには必ず室内側と室外側があります。この二つはパイプで接続されています。そのパイプの中には、「冷媒」と呼ばれる気体 (圧縮すると液体になるような気体) が入っています。ここにコンプレッサーと書いてありますが、これは「圧縮機」ということです。ここで冷媒を圧縮します。先ほどの実験でわかったように、気体を圧縮すると温度が高くなり、熱が外部に出ていきます。こうして熱を出すことで冷媒は冷やされたこととなります。外の気温と同じとまではいきませんが、ある程度は冷やされる訳です。室外機を通り抜けた気体は、エアコンのところで膨張します。するとそこでは冷媒の温度が下がります。室外機で熱を捨てた分、冷媒は最初よりももっと低い温度になるはずですが、これがエアコンの冷房の仕組みです。

冷房の説明でわかるように、これを逆に動かすことで暖房が実現できます。

このようにしてエアコンは動作しています。ちなみに、このような働きをする冷媒として、フロンガスは非常に良い性質をもっていました。これはオゾン層破壊の原因物質として、現在は利用が禁止されています。

10.3 温度と熱の正体

さて、こうしてみると、何となくわかっていたつもりのものが、本当にわかっているのか、はっきりしなくなってくると思います。例えば、温度とは何だろうか、熱とは何だろうか、ということです。

以前から時々お話していますように、例えば私たちの体は細かくみていくと分子で構成されていることがわかります。私たちの体だけでなく、空気や水も分子で構成されています。こうした分子はとても小さく、例えば空気の場合、分子の占める体積は $1/1000$ 程度です。このように小さい分子が空気を構成していますから、空気は、いわばスカスカです。スカスカなのに大きさを保っていられるのは、実は空気の分子が激しく動き回っているからなのです。空気中の分子は、おおよそ 300m/s (1000km/h) 程度の速さで飛び回っています。この分子の持っている運動のエネルギーが温度に対応しているのです。

ブラウン運動

ジェット機並の速度で分子がぶつかってきたら、空気にさらされている私たちの皮膚は痛みを感じないのでしょうか。分子があまりにも小さくて軽いために、私たちはその痛みを感じません。ただ、一つ一つの分子の衝突についてはそれを感じなくても、その分子が沢山あって、連続的に衝突してくるとすると、それを感じます。それが圧力です。

また、私たちよりもずっと小さな物体では分子の衝突を感じてふらつくことがあります。「車は急に止まれない」の回でお話したように、衝突の際には相手が影響を受けるかどうかは質量の比で決まるからです。相手の質量が小さければ小さいほど、相手に影響を及ぼしやすくなります。そこで、顕微鏡でみるぐらい小さくて軽い粒子の場合には分子が衝突してきたときの影響でわずかにふらつきます。そのふらつきがブラウン運動です。

体積の変化による温度の変化

また、圧力 (あるいは体積) が変化したときの温度の変化についても分子の運動で説明できます。

一般に、圧力を下げるときは、容器の体積を増やします。壁を遠ざけるわけです。その時、分子の運動にはどのような影響があるのでしょうか。例えば野球のボールやサッカーボールを壁に当てることを考えましょう。衝突の瞬間の前後では、ボールの速さはほとんど変化しません。(もちろん、ボールの変形などに伴ってエネルギーが失われてちょっと遅くなりますが。)ところが、その壁が動いていたらどうでしょうか。遠ざかる壁にボールを当てても、跳ね返ってくるボールの速さは遅くなるでしょう。極端な場合として、ボールの速さと壁の速さが同じ程度であったとすると、ボールは壁に当たっても同じ方向に進みつづけることさえあるでしょう。同じことを分子の運動について考えてみると、遠ざかる壁があるような場合には、衝突の際に次々に分子の速度が低下し、運動エネルギーが失われてしまうことがわかんと思えます。これは温度の低下を意味します。

今は壁が遠ざかる場合を考えました。空気を逃して圧力を減らす場合はどうでしょうか。この場合も基本的には同じです。分子の激しい運動のために、空気中の分子は互いに頻りに衝突します。逃れていく空気に衝突する際には、壁に衝突するのと同様のことが起こります。いずれにしても温度が低下するようになるわけです。

熱の移動

温度は分子の運動エネルギーに対応していることがわかりました。ここでは、二つの箱とその間の薄い板を考えましょう。そして、板を挟んで一方には高温の気体、他方には低温の空気が入っているとします。時間が経過すると二つの箱の中の温度は最初の二つの箱の温度の中間程度の温度になることを私たちは知っています。暖かい方は冷めて、冷たい方は温まるわけです。これはどのように説明できるのでしょうか。

これも、分子の衝突で考えてみましょう。暖かい空気は激しく運動していますので、壁に激しく衝突します。その結果、空気分子はエネルギー失って、やや遅くなります。一方、壁を構成する分子は(固体ですから自由には運動できないので、その場で)激しく振動するようになります。今度は低温側の空気分子が壁に衝突することを考えます。激しく振動している壁に、遅い空気分子が衝突すると、

乱雑さの増大

さて、温度が分子の運動エネルギーに対応しているのだとしたら、こんな疑問が湧くかもしれません。気体の入った箱に仕切りを入れて、その仕切りに小さなドアを二つ作ります(次の図参照)。その二つのドアの一方は、右から左へ分子が通るようなドアです。このとき、速く動く分子だけを通すようにします。一方は、逆に左から右へ分子が通るようなドアです。こちらは逆に、ゆっくりと運動する分子だけを通すようにします。このような仕組みをうまく作ることができたら、左側にはゆっくりとした分子だけがあつまり、右側には速く動く分子だけが集まることになります。

そして、実際にそのようなことを考えた人はいました。

なんとなくできそうな気もしますが、これはできないことになっています。これを考えた人はマクスウェルという人です。そこで、その人の名前をとって、このような操作する仮想の生き物を「マクスウェルの悪魔」といいます。

10.4 熱の移動

上空の空気の話からエアコンの仕組みの話をしました。エアコンは、簡単にまとめると、気体の性質を使って、高温のところを更に高温にし、低温のところを更に低温にするような作用を持った装置です。そして、そのためには電気のエネルギーを使わなければなりません。

世の中には別の種類の装置もあります。例えば、ペルチェ素子と呼ばれるものがあります。これは、電気を通すと片側が冷たくなり、片側が暖かくなるようなものです。装置が非常に小さいので、小型の冷蔵庫やパソコン内部の部品を冷却するのに良く使われます。

このペルチェ素子には、おもしろいもう一つの性質があります。それは、ペルチェ素子の片側を暖め、片側を冷やすと電気が生じるというものです。先ほどのペルチェ素子の使い方や、エアコンの働きとは逆ですね。

ここまでの話で気づいたと思いますが、暖かいものから冷たいものへ熱を移す際には、電気を発生させることができますが、逆に、周りよりも冷たいものから熱を奪って、更に冷やすためにはエネルギーが必要になります。

さて、マクスウェルの悪魔が実在したとしましょう。すると、ペルチェ素子とを組み合わせることで、発電ができます。例えば、私たちの身の回りの温度一定の空気を、マクスウェルの悪魔によって高温の空気と低温の空気とに分離してもらいます。そこにペルチェ素子を用いれば、発電ができるわけです。地球温暖化が叫ばれる中、空気の温度を使って発電できるとすれば、それは大変便利なことです。

ところが、このようなこと、つまり、温度一定のものを高温と低温のものに分けて発電することは、できないことが知られています。このような装置は第二種の永久機関として知られています。第二種の永久機関もできないのです。

10.5 エントロピー

「第二種の永久機関ができない」ということは別の表現でいい表されることが多いです。それは、「エントロピー増大の法則」という言い方です。

まず、エントロピーとはなんでしょうか。それは、「乱雑さ」と表現されることが多いです。私自身、毎週のように部屋を片付けます。しかし、日が経つにつれて、部屋はどんどん乱れていきます。イメージとしてはそのように考えてもらえばいいと思います。では、乱雑な状況というのはどのような状況でしょうか。例えば第一引き出しに入っているはずのペンを、部屋のあちこちにある状況です。ファイルボックスに入れておくべき、この講義の資料が、部屋のあちこちにあるような状況です。そこで、乱雑さが増大すると、いろいろなものが均等に近く散らばっている状態になっていることになります。

エントロピー増大の法則は、「エネルギーの出入りの無いような状況下では、乱雑さは増していく」という法則です。この法則は、温度が高いものから低いもの熱が移るということに対応づけることもできます。熱いものと冷たいものがあるときというのは、この図のように速い分子と遅い分子が分かれている状況です。熱が移って温度が均一になると、速い分子と遅い分子が混ざっている状況です。次第にいろいろなものが均一に混ざるといいう状況に対応していることがわかっていきます。

それでは、エントロピー増大の法則が正しいとするとどのようなことが言えるでしょうか。

例えばこれを宇宙に適用してみましょう。宇宙全体は宇宙の外側からのエネルギーの出入りはありません。そこで、宇宙の内部のエントロピーは増していくと考えられます。その結果、現在あるような太陽と地球との間の温度差もなくなり、最終的には宇宙は温度が均一になってしまうと考えられます。これは「宇宙の熱的死」と呼ばれています。宇宙がそのようになってしまったら、太陽は輝かず、地球も温められず、宇宙全体が極めて低い温度になってしまうでしょう。もっとも、このようになるのは、ずっと先の話で、太陽の寿命も尽きたずっと後のことです。私たちが心配することではありません。

次にこれを生物に適用してみましょう。「外部とのエネルギーの出入りがなしに」という条件付きですから、例えば人間を熱も通さない壁の中に入れておいておくことを考えます。そうすると、人間の体はバラバラになって均一になっていくことが考えられます。これは具体的には死んで体が腐るということに対応します。いわば生命の物理学的な死です。

10.6 散逸構造

そのように考えると、私たちの体が維持されていることは、非常にありがたいことです。目が目であり、鼻が鼻であることは、ありがたいことです。へそさえも存在することがありがたいように感じられます。

どうしてこのような構造を保つことができるのでしょうか。それは、「エネルギーの出入りがなければエントロピーが増大する」というときの前提条件である「エネルギーの出入りが無い」ということがないためです。エネルギーの出入りがある場合には構造を保つことができるのです。

さらに積極的には、エネルギーの出入りがあるような場合には、均一なものから構造ができる場合があります。例えば受精卵です。受精卵として誕生した生命は、ほぼ均一な状態からスタートします。それが細胞分裂を繰り返しながら徐々に構造を作り上げていきます。エネルギーの出入りを伴いながら、組織化されていく構造には名前がついていて、これを散逸構造と呼んでいます。

散逸構造には先ほど書いた生命の例の他に、様々な地上の現象もその例として挙げることができます。均一な大気の状態から台風が形成されることもその例です。平らな平野から山や川ができるのもその例です。

このような散逸構造の考え方は、プリゴジンという人が提唱しました。その一般的な性質は、まだまだこれからの研究課題です。

10.7 フラクタル

これに関連していわれていることがいくつかあります。散逸構造はフラクタル構造を作ることがあると知られています。

それではフラクタルとはどのような構造でしょうか。それを考えるために、フラクタルの典型的な例であるコッホ曲線を考えてみましょう。

最初に一つの線分を考えます。この線分を三等分します。次に、最初の線分の $1/3$ の長さを一辺の長さとするような正三角形を描きます。このとき、正三角形の一辺が、ちょうど三等分された線分の真ん中のところと一致するようにします。そして、一致した部分を削除します。

すると、最初の線分の長さの $1/3$ の長さの線分が 4 本できます。山ができたような感じです。

今度は、この 4 本の線分をそれぞれ三等分し、上で述べたことと同様の操作を繰り返します。するとこのような形になります。より複雑な形になりました。

これを次々と繰り返すとどうなるでしょうか。すると、細かい部分はどんどん複雑になっていくものの、大まかな形は決まってきます。こうしてできた曲線（曲線と言いますが）は、コッホ曲線として知られています。

コッホ曲線にはどのような性質があるでしょうか。まず一つは、長さです。コッホ曲線を作る過程を考えると、1 回操作するごとに長さが $4/3$ 倍になることに気づきます。これを無限回繰り返すとすると、長さは無限になってしまいます。限られた領域の中に無限の長さが織り込まれているような図形になっているわけです。

もう一つの特徴は、自己相似という特徴です。この図形を拡大して観察することを考えましょう。すると、同じような図形が現れます。これを次々と行っても、ずっと同じような図形が繰り返して現れてきます。アニメーションで見ると不思議な感覚を体験できるでしょう。

より簡単な例は、シェルピンスキー・ガスケットと呼ばれる図形です。三角形の内部を三角形にくりぬくと、4 つの新たな三角形が現れます。その三角形に次々同様の操作を行うとフラクタルな図形ができます。

ここで述べたようなフラクタル図形は人工的な図形です。しかし、私たちの身の回りにはフラクタルな構造をもったものが沢山あります。例えば海岸線です。海岸線は縮尺を変えても同じように見えます。