

## 第4章 エネルギー

前章では力によってどのように運動が引き起こされるのかを見ました。一方、力によって移動させる労力をはかる概念があります。それがエネルギーです。エネルギーは科学の中で最も中心的な概念の一つです。実際様々な種類のエネルギーが登場することになります。たとえば、身近なものではガスコンロなどの燃焼などの化学反応によるエネルギーがあります。また、我々の食料もエネルギー源です。またそれらと同じくらいなじみが深いのが、電気によるエネルギーであり、私たちの生活はこれなしにはもはや成立しません。しかし、そもそもエネルギーとは何かと言うと、非常に難しい概念です。そして、すべてのエネルギーはミクロに見たときには力学的なエネルギーに帰着します。ここではエネルギーとは何かについて学習しましょう。

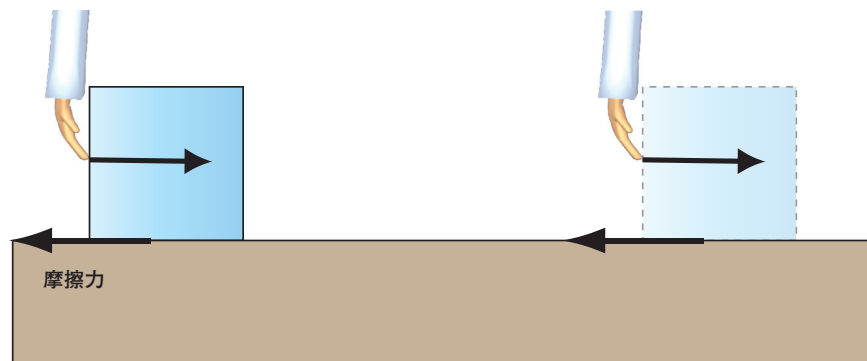


## 力学的な仕事の考え方とは？

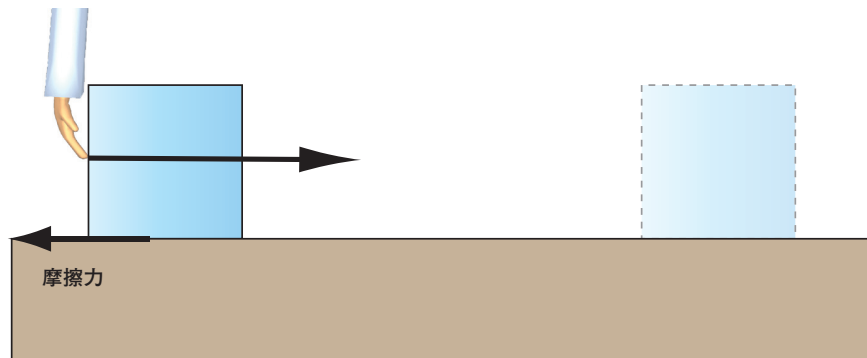
たとえば、パズルを解くのに30分でといてしまっても、1日かかって解いてもといたこと自体は変わりありません。会社で必要な書類を作成するのに1日かかって一週間かかって同じです。もちろん速くできればそれにこしたことはありませんが、同じ仕事をしたわけです。同様のことが物を動かすのにも言えます。物を動かす場合、どのくらいの時間動かしたかでなく、どのくらいの距離を移動させたかというほうが結果自身を反映しています。これが力学的な仕事の基本的な考え方です。

机の上の本を移動させてみます。摩擦力に逆らって移動させるのに力が必要となります。摩擦力に逆らって移動させた場合、割と小さな力でゆっくり移動させることもあるし、瞬間的に大きな力をだし、あとは勝手に止まるまでまつといった移動のさせ方もあります。ともあれどちらも移動させることには変わりはありませんね。まず、力を与え続けて50cmくらいゆっくり移動させてみましょう。こんどは、だいたい2倍の力で半分の25cm分だけ力を加えてあとはすべるのにまかせると、止まるまでの距離はだいたい50cmになります。これは、2倍の力では、余分な力分で本は加速していくが、25cmで力を加えなくなると、その後はその力と同じ大きさの摩擦力で減速して、やはり25cm行って止まるためです。つまり、力と力を加える距離の積は移動の仕方によらず等しいのです。実際、最初止まった状態から最後止まった状態になるなら、途中でどのような力を加えようとも最終的な仕事は等しいことが示すことができます。

またこのことはあまり難しく考えなくてもよいでしょう。つまり、仕事は結果です。結果的に50cm本を動かしたという仕事には変わりはないということです。



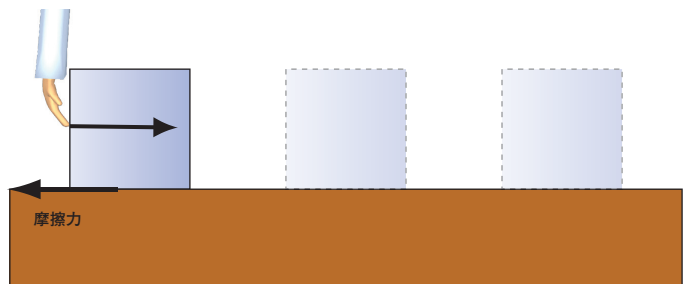
ゆっくり押して50cm移動



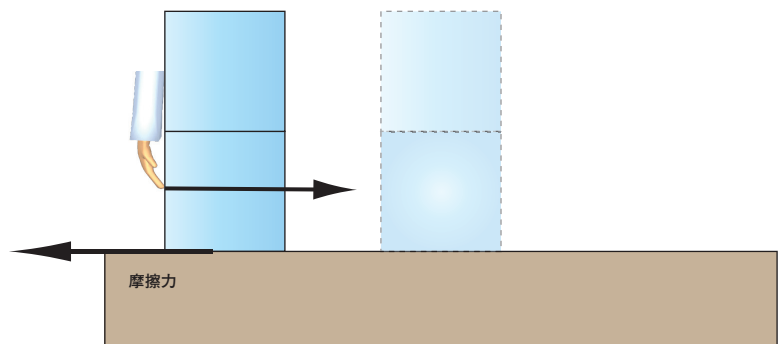
力強く押して、滑らせて50cm移動

## 仕事はどう定義する？

それでは仕事という量をどのように定義したらよいかを考えてみましょう。床の上の重い荷物を横に押して動かして行くとき、2つの荷物を重ねて押して行くとき、押す力は2倍になります。これをある距離だけ距離だけ動かすと、2つのものを動かしたということなので、2倍の仕事とあります。つまり、同じ距離だけ移動させる場合、仕事は与える力に比例します。また、一つの荷物の移動距離を2倍にするというのも、同じ仕事を2回するのと同じなので、2倍の仕事となります。このため、仕事は移動する距離に比例します。



移動距離が2倍なら2倍の仕事



力が2倍なら2倍の仕事

このため、この移動方向の力と距離の積を**仕事**とします。つまり、仕事は

$$\text{仕事} = \text{力} \times \text{移動距離}$$

です。このことはイメージとしてしっかり覚えておきましょう。仕事というのは日常的な仕事を反映したものだと言えますね。

また、この仕事自身にはどのくらいの時間でその仕事をしたかの情報がないことも認識しておきましょう。つまり、仕事とは、あくまで結果のみを表す量で、どのくらいの時間がかかったのかは問わない量なのです。

この仕事という言葉は、英語の Work の当て字であり、あなたのお仕事はなんですか？といった仕事の意味よりも、「ああこれをするのは一仕事だ。」といった使い方とほぼ同様の意味です。

## 仕事の単位は？

さて、ここで仕事の単位を決める前に力の単位を思い出しておきましょう。力の単位は N (ニュートン) でした。仕事の単位を**ジュール (J)** と言います。1 N の力で 1 m 移動させたときの仕事が 1 J となります。100 g の肉を持つ力がおよそ 1 N でした。この力にさからって上に 1 m だけ移動させてみます。これが 1 J (ジュール) の仕事というわけです。何回も持ち上げて 1 J を体感してみましょう。ただし、スーパーマーケットで 100 g の挽き肉をもって上下に動かしていると、やはり変な人だと理解されてしまうので気をつけましょう。

## 仕事率、パワーは現代社会で重要な概念

同じ仕事をするのにもある人だと1週間かかってしたこと優秀な人だと1時間でできてしまうなんてことも社会ではよくあることですね。人間だけでなく、機械などでも同様です。たとえばエレベーターでも、非常に速いエレベーターとおそいエレベーターがあります。このように社会では、した仕事よりも、どれだけの時間に仕事をどれだけしたかが重要となることがあります。エレベーターで上に運ぶのにスピードが速い方が、単位時間あたりにした仕事は大きくなります。また、掃除機でも単位時間あたりに多く空気を吸い込むものや、車で大きな力で加速していくものは、パワーがあるといいます。このようにある時間内にした仕事を問題にするのが、**仕事率（パワー）**です。物理では、単位時間あたり（1秒間）にした仕事を**仕事率**または**パワー**と言います。つまり、

$$\text{仕事率} = \text{仕事} \div \text{かかった時間}$$

となります。単位はW（ワット）で1Wは、1秒間に1Jの仕事をするに対応します。たとえば、1秒間に100gの挽き肉を1m上に上げるのが1W。0.5秒で1m上げたら2W。また、1秒間に2m上げて2Wです。これもまた、スーパーで挽き肉を上下させて体感してみましょう。きっと周りの人はだれも近づかなくなるので安心して上下させてみましょう。

仕事は力×距離なので、仕事率は

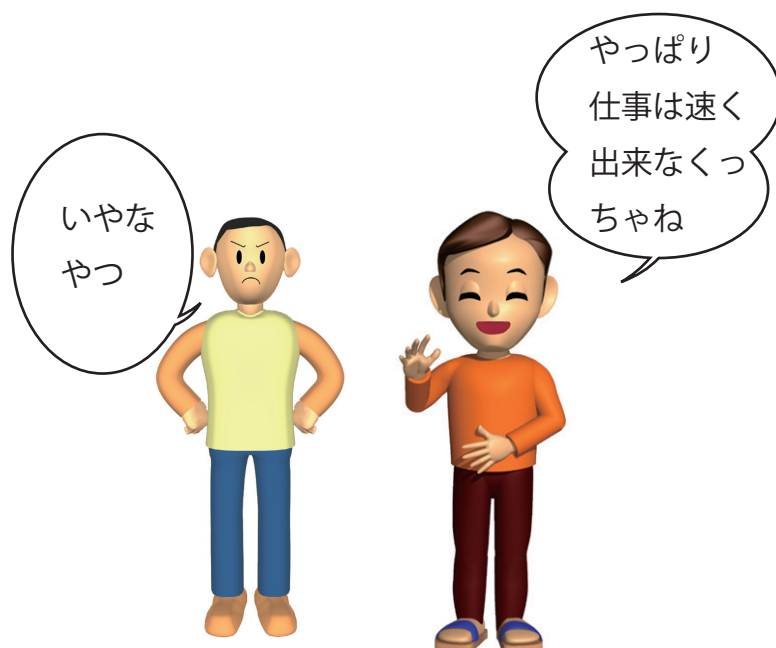
$$\text{仕事率} = \text{力} \times \text{距離} \div \text{時間}$$

です。ここで、距離÷時間はスピードなので仕事率は、

$$\text{仕事率} = \text{力} \times \text{スピード}$$

と書くこともできます。これから、スピードが速い場合や、力が大きい場合はパワーがあるということがよくわかりますね。

今度電気屋さんに行くとき、掃除機のコーナーに立ち寄ってみましょう。掃除機の性能が吸引仕事率という形で示されているのがわかります。この仕事率の値が大きい方が、吸い込むパワーが大きいということになります。



## エネルギーとは？

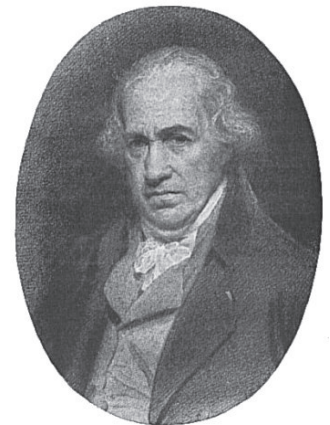
左手で本をすこし高く持ち、そっと落とし、下から右手で受け止めてみましょう。本は速度を増し、右手を下に押しつけるという仕事をします。床の上に落とした場合でも、床を押しという仕事をし、それにより床を振動させたり、空気の振動により音を発生させたりすることになります。つまり、ミクロに見ると、本の衝突で、床の上の分子が押されて振動するわけです。このように、一般に物体になにか仕事をさせるものを**エネルギー**と呼びます。つまり、**エネルギーとは、仕事に変換させられるもののことです**。たとえば、コンロでガスを燃やすのは、ミクロに見ると、周りの分子を押して分子に仕事することになります。また、このミクロな振動は、熱と言い、後で学習します。とにかく、エネルギーは仕事に変えられるので仕事と同じ単位で表します。つまり、エネルギーの単位は、ジュールです。また、単位時間あたりに供給されるエネルギーはパワーであり、単位は仕事率と同じワットです。また、電気製品などではジュールという単位よりもワットの方がなじみ深いものですね。

### ジェームス ワット (1736-1819)

スコットランドの発明家であり、技師。スコットランドの船大工の息子として生まれます。18歳のときにロンドンに出て、それ以来主に蒸気機関の改良に努めました。それまでの蒸気機関では効率はわずか1パーセント程度でした。彼はその蒸気機関の改良に生涯打ち込みます。彼の発明家ですが、あまり商売はうまくありませんでした。そこで、商売たくましいパートナーを得て、巨万の富を築きました。

仕事率、パワーの単位ワットは彼にちなんでつけられたのですが、皮肉なことに彼が常に使っていたのは馬力です。この馬力という単位も彼が作りました。これは、蒸気機関は主に鉱山の発掘主にかってもらっていたので、彼らにその力強さを説得するのは馬にして何頭分かというほうが良かったからです。このためもありますが、馬力は、日本でも最近まで自動車のパワーを表すのに使われていましたし、海外では今でもよく使われている単位です。

生涯情熱的な発明家であり1000個以上に蒸気機関を作成しました。彼はいつも次の改良を思いつくことができたと言います。ワットは産業革命の名士たちに常に尊敬された紳士ででした。83歳で死去。





## ポテンシャルエネルギー（位置エネルギー）とは？

エネルギーというと仕事に変わるものということで漠然としていますね。これはまだ、具体例を説明していないから当然です。そこで、今からエネルギーの具体例をいくつかあげてみましょう。

最初の具体例は、本を上に出ることです。本を上に出すには、重力に逆らって仕事をしなければなりません。このときの仕事は、

$$\text{重力} \times \text{高さ}$$

となります。これまた、ゆっくり持ち上げても速くても最終的に静止した状態になれば、する仕事は重力×高さとなることを示すことができます。また、重力＝質量×重力加速度でしたので、

$$\text{仕事} = \text{質量} \times \text{重力加速度} \times \text{高さ}$$

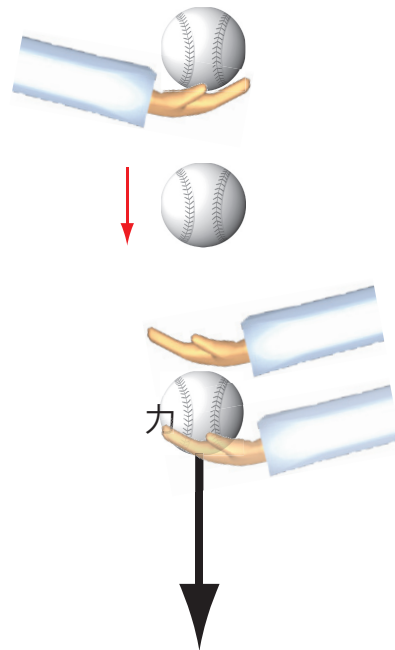
となります。この手がした仕事はどこかに行ってしまったわけではありません。実際。手を離して本を落下させると他にちゃんと仕事をするようになります。たとえ床に落ちてても、床を振動させる仕事をするわけですから。よって、この手のした仕事はある種のエネルギーに変わったわけです。このように高い位置にいるというだけで仕事ができるので、この重力により蓄えられたエネルギーを**重力的位置エネルギー**と言います。あるいは、潜在的に仕事ができるということで**重力的ポテンシャルエネルギー**という言い方もします。外国では位置エネルギーよりもポテンシャルエネルギーの方が標準的です。つまり、

$$\text{重力的ポテンシャルエネルギー} = \text{質量} \times \text{重力加速度} \times \text{高さ}$$

となります。

重力などでは再利用可能なエネルギーとして残りますが、移動させたからといっていつでもそうとは限りません。たとえば、本を机の上で横に移動させるには、摩擦力に逆らって仕事が必要になります。このような仕事は、移動させるときに本と机の表面の分子をぶるぶると振動させるという仕事をしていますので、移動したからといって再利用可能な仕事は残りません。重力などの力に逆らった仕事は再利用可能なポテンシャルエネルギーとなることを認識しておきましょう。

物質を燃やしたりするような化学反応のエネルギーを**化学的エネルギー**と言います。化学反応では、その後燃高い位置から落としたボールは焼などにより仕事に変えられますので、**化学的エネルギー**運動エネルギーとなり、受け止めた手に仕事をする。



## 運動しているものにはエネルギーがある？

それでは、本をまた1 m上に持ち上げて落としてみましょう。床に落下させると落下直前には位置エネルギーはなくなります。そのかわり、本は速度があり、それが床に落下してそれが床の分子を押すという仕事をするようになります。つまり、運動した状態が仕事に変わったわけです。また、机の上の本を横にすべらしてみましょ。すると、運動した状態になりこれはその後、本と机の表面の分子を動かすという仕事をしながら止まっています。この場合も、運動した状態にエネルギーがあり、これが仕事に変わっていったわけです。このように、運動している状態の物質の持つエネルギーを**運動エネルギー**と言います。

机の上を本を滑らせる場合も同様です。最初に滑らせる速度を2倍にすると、止まるまでに2倍の時間がかかりますね。また、止まるまでの平均の時間は2倍です。また、止まるまでの距離は、平均速度×時間です。平均の速度も時間も2倍になりますので、止まるまでの距離は4倍となります。このため、仕事は4倍になり、このことから運動エネルギーは速度の二乗に比例することがわかりますね。このことから、車に乗っていて、2倍のスピードを出した状態でスリップすると、止まるまでに4倍の距離がかかりますので注意してください。運動エネルギーは質量に比例し速さの二乗に比例します。つまり以下ようになります。

**運動エネルギーは、質量に比例し速さの2乗に比例する**

## (選択) 運動エネルギーの正確な式は？

以下難しいので結果だけ知りたい人は読み飛ばしてもかまいません。運動エネルギーの形を見ておきましょう。運動している状態がその後どれだけ仕事ができるかで運動エネルギーの正確な形を計算してみましょう。

机の上を本を滑らせてみます。最初の速度がある状態で最後はある距離だけ移動して静止しますね。この間の仕事は、仕事の定義から

$$\text{仕事} = \text{力} \times \text{距離}$$

ですね。この力により本は減速していきますので、ニュートンの第2法則、力=質量×加速度より、

$$\text{仕事} = \text{質量} \times \text{加速度} \times \text{距離}$$

です。

また、距離は、平均の速さ×時間です。また最後の速さはゼロですので平均の速さは、最初の速さの半分ですね。よって

$$\begin{aligned} \text{仕事} &= \text{質量} \times \text{加速度} \times \text{時間} \times \text{最初の速さ} \div 2 \\ &= \text{質量} \times (\text{加速度} \times \text{時間}) \times \text{最初の速さ} \div 2 \end{aligned}$$

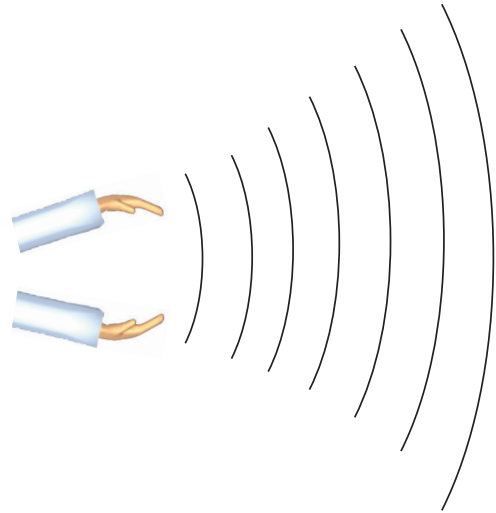
です。最後の速度は、加速度が単位時間あたりの速度の変化であるので、最初の速さ=加速度×時間となります。よって上の式の括弧の中を最後の速さに変えてみますと、最初に持っていた運動エネルギー=その後の仕事は、

$$\text{運動エネルギー} = \text{仕事} = \text{質量} \times (\text{速さの2乗}) \div 2$$

となります。

## 音とは何か？

手をたたくと音がでます。これは、どのようにして起こるのでしょうか？手をたたいたときに手のひらが振動し、その振動により手のひらの近くの空気は同じように振動し、空気の密度を変えます。空気はできるだけ均一になろうとして、密度が濃い場合には、隣を押しだし、薄ければ隣から空気がやってくることで、これが波として伝搬します。この振動が耳に入り、鼓膜を振動させると、これが体内で電気信号に変えられ脳に伝わります。これが音が聞こえるということです。音は鼓膜を振動させるという仕事をしますので音もエネルギーを持ちます。



音を伝えるのは必ずしも空気のような気体だけではありません。プールに潜っていても音が聞こえるのは経験したことがある人が多いでしょう。またよく時代劇などで忍者が地面に耳を当てて音を聞く場面があります。壁に耳を当てて、手で壁をたたいても壁から音が聞こえます。また、糸電話などで遊んだ人も多いでしょうがこれは糸を振動が伝わるためです。音も鼓膜をふるわせる仕事をするのでエネルギーを持つ。また、自分の声はレコーダーなどで聞くと、普段聞いている声と異なって聞こえます。これは、普段聞いている声は、骨を伝搬して伝搬してきた音まで鼓膜で拾っているためなのです。

## 音の強度とは？

一般にエネルギーの強さを強度と言います。そして、空気などの微少な振動のエネルギーを**音の強度**といます。強度はちょうど、光での明るさに対応します。光源から遠ざかるほど暗くなるように、音源から遠ざかるほど、音の強度は減少します。

人間の認識する明るさは、光の強度にほぼ比例します。一方、音の強度をとらえる人間の耳は、変わった性質を持っています。それは音の強度が2倍になってもそれは音の大きさが2倍になったようには感じないことです。音のエネルギーが10倍になるとおおよそ音の大きさが2倍になったように感じます。そこで、音の大きさを表すには、強度よりもそれを耳に聞こえる音に近いように変換した**デシベル**という単位を使います。これは、電話の発明者、ベルにちなんでつけられた名称です。あなたも健康診断で、聴力検診を受けたことがあるでしょう。そこで、音の強度があまり小さいと耳には聞こえなくなることを体験したでしょうか。耳には聞こえる最小の音の強度があります。その音の強度を0dBとします。10dBとはこの強度の10倍を表わします。ここまでは同じように感じますが、20dBとは10dBの音に対して10倍をあらわし、0dBの音の100倍となります。同様に30dBは0dBの1000倍などとします。通常のおしゃべりだと、その音の強さは40dBから60dBに相当します。車の良く通り道路脇だと、70dB程度で、120dBを超えますと、痛みを感じます。ニュースなどでも騒音問題のときこの単位が出てきます。またこのデシベルという単位は、電気でも信号を増幅したりするときの単位としても使われています。



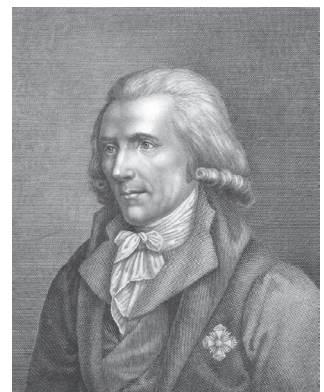
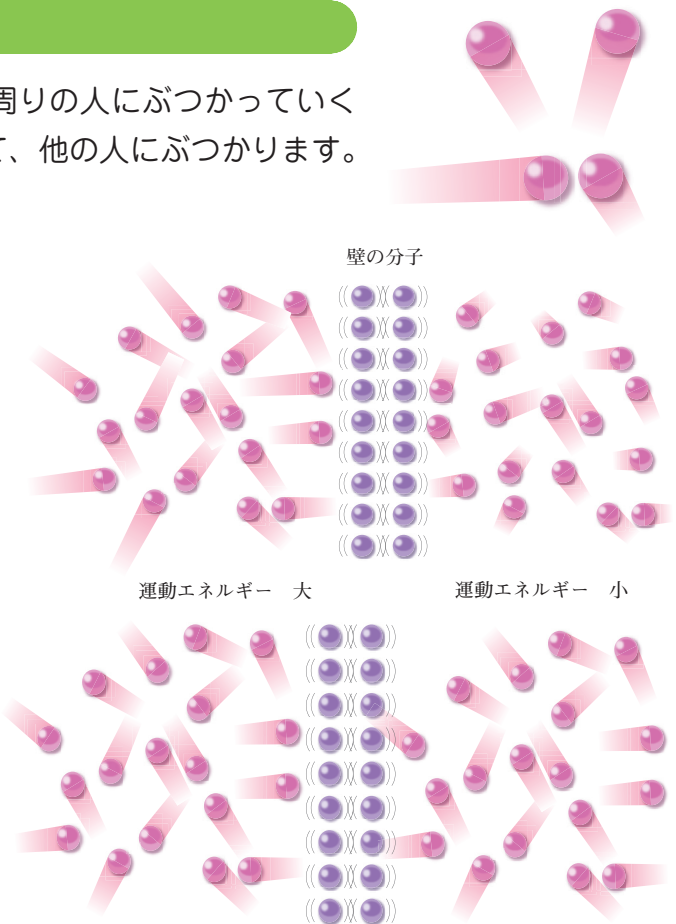
## 熱とは？

混雑している電車の中で、一人の人が周りの人にぶつかっていくと、周りの人も動きだしますね。そして、他の人にぶつかります。このように最初に運動エネルギーの差があっても、衝突していくとお互いの平均運動エネルギーが等しくなるようになっていきます。つまり、非常に暴れている分子に衝突すると、速いスピードで跳ね返りやすくなり、運動エネルギーが増加します。一方、動きの速い分子が速さの遅い分子に衝突すると、その分子を加速させるため、分子のスピードが遅くなることが多くなります。このようにして、熱が伝わっていくわけです。この移動するエネルギーを**熱**と言います。熱とは、移動するエネルギーであって、その物質の持つエネルギーではないことに注意しましょう。それでは物質の持つエネルギーはなんというのでしょうか？その物質のもつエネルギー全体を**内部エネルギー**と言って、移動するエネルギーである熱とは区別します。また、熱が移動できる状態にあるものを**熱的接触状態**と言います。

### ベンジャミン・トンプソン (1753-1814)

アメリカの物理学者で発明家。マサチューセッツ州で生まれます。天性の楽道家であり、19歳の時、14歳年上のチャーミングで富豪の娘と結婚し富を得ます。アメリカの独立戦争のとき、革命派を王党派に引き入れる工作をしていました。革命派に家をおさわれ妻を見捨ててイギリス軍に避難してしまいます。革命派の情報を持っていたためイギリス軍では好意を持って迎えられました。軍として働くと共に、火薬の研究で成果を上げます。イギリスでは科学者として名声を得ましたが、フランスのスパイとみなされその後ドイツに渡るなどして、その後フランスのラボアジエ（化学の創始者の一人）の後家と再婚しすぐ分かれます。その後そこで亡くなりました。絶えずトラブルを興すような人生でした。

トンプソンは発明家としての歳能がとても豊富でした。彼の発明はドリップコーヒーメーカー、セントラルヒーティング、圧力鍋、暖かい下着、クッキングヒーターなど多岐に及びます。トンプソンは、大砲の砲塔をくり抜くときに摩耗したドリルを使うと熱が余分に出るを見つけました。そこでドリルをバケツの中につけて摩擦させるとバケツの水が沸騰した。これにより、仕事と熱の関係があることを指摘したのです。このことが後にエネルギー保存則の確立の先駆けとなりました。



## カロリーと熱の関係は？

熱の正体がエネルギーであることがわかる前には、熱は物質の温度をどれだけ上げるかで測られていました。たとえば、お水をレンジで沸かす。水の量を2倍にすると、沸くまで時間がおおよそ2倍かかりますね。このように水は私たちに最も身近な物質でもあり、料理にも使います。そこで、熱の基準として1gの水の温度を1℃だけ上げるのに必要な熱を**1カロリー**と定義しました。ダイエットに気をつけている人にはおなじみの用語です。また、食品のカロリーとは、体内で脂肪などを分解したときに出る熱の量を数値にしたものです。

1000g=1kgの水の温度を1℃上げるのに必要な熱を1キロカロリーといい、こちらのキロカロリーの方がよく使われています。このカロリーがどれだけのエネルギーに対応するのは、電熱器などで加熱して、加熱時間と温度の上昇を測ることによってわかります。

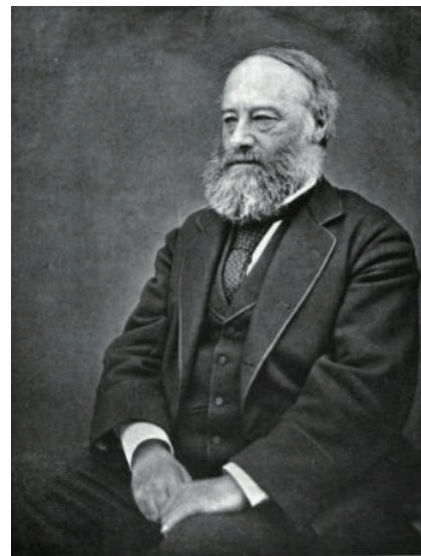
このようにして決定されたのは、

$$1 \text{ カロリー} = 4.2 \text{ ジュール (ジュール)}$$

という関係です。これを**熱の仕事当量**と言います。仕事と等価な量というそのままの意味です。

### ジェームス プレスコット ジュール (1818-1889)

日常生活では運動によるエネルギーは、摩擦力や空気抵抗などで失われてしまいます。熱とエネルギーが同値であることを測定し、エネルギーの保存という考え方を示したのがジュールです。ジュールは酒の醸造元の家で、次男として生まれましたが体が弱く学校に行きませんでした。また生涯学校に勤めることなく、彼の家の資産により支えられて研究をしました。モーターの効率を上げる研究をし、この中でエネルギーの保存という考え方に至ったようです。おもりが下がっていく力で水の中のプロペラを回転させ、水の温度の上昇を測定しました。これより、仕事と熱が一定の割合で変換されることを見いだしました。エネルギー保存則は、ジュールにとっておそらく自然界の神秘を見つけた思いだったことなのでしょう。大学に属していませんでしたので、最初は異端視されていましたが、エネルギー保存の考え方はその後急激に研究者に受け入れられて行きました。



日常生活では蛇口の水が落ちるくらいでは水の温度は変わりませんが、滝などでは計ることが出来るくらいに温度が上がるはずです。ジュールは1847年にハネムーンでフランスのアルプスに行き、そこで滝の滝壺の温度が上昇していることを確かめたという伝説があります。温度の上昇を確かめたジュール本人にとっては、とても感激的でロマンティックなことだったのかもしれませんが、奥さんにはどうだったかはわかりませんね。

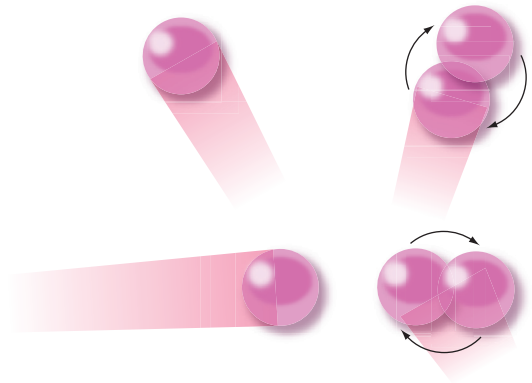
## 熱容量とは？

電子レンジで冷凍食品などを暖めると、ものによってすぐ暖まるものと暖まりにくく時間がかかるものがあることがわかります。主に水分を多く含むものほど暖めにくいものです。また、アルミをひいて魚を焼いても、焼いた直後であってもアルミ фольラなら直後にさわっても平気です。アルミはさめやすいものです。どうしてこのような違いが起こるのでしょうか？もう一度、温度とエネルギーの関係を見てみましょう。

最初に一番わかりやすい気体の場合をみてみます。1つの原子からなる分子と、2原子からなる分子が混同している場合をみてみます。温度が等しいと、平均運動エネルギーはどちらも同じものになります。しかし、2原子分子のほうは、移動する運動に加えて回転しています。このため同じ運動エネルギーでも2原子分子の方が、回転の運動エネルギーを持っている分だけ全体のエネルギーは大きいのです。たとえば、この2原子分子の温度を上げるためには、平均運動エネルギーを上げるだけでなく、回転のエネルギーも与えなければなりません。つまり、2原子分子の温度を同じだけ上げるのに1原子分子よりもよりエネルギーが多くかかることになるのです。

固体の場合も同様です。簡単のため金属などの結晶でみてみよう、それぞれはバネでつながれているので、振動しています。振動しているとき、振動の位置エネルギーと運動エネルギーがあります。平均すると振動の位置エネルギーと運動エネルギーは同じくらいの大きさになります。したがって、温度を1℃上げるためには、運動エネルギーだけでなく、振動の位置エネルギーも大きくする必要があります。温度はお互いの衝突などによって伝搬するので、同じ温度では、お互いの運動エネルギーが同じになることを思い出しましょう。また、分子によって質量が異なるので、同じ質量のものでも物質によって、内部に含まれる分子の数が異なります。このため、物質によって、1℃上げるのに必要な熱が異なるわけです。

1gの物質の温度を1℃だけ上げるのに必要な熱を、その物質の**比熱**と言います。また、ある物体の温度を1度上げるのに必要なエネルギーを**熱容量**と言います。熱容量とは1度の温度に蓄えられたエネルギーと言ってもいいでしょう。ちなみに、水は通常見られるもののうち最も熱容量の大きな物質の一つです。水は、暖めにくくさめにくいのです。水は特殊です。水の分子間の引力は比較的強く100度以下では、運動エネルギーによりお互いの引力が多少勝り、集団で行動しようします。これが、液体の状態です。この液体の状態では、集団運動の変化の自由度が大きく、平均の速さを大きくするためには、多くの水の集団としての変化のエネルギーが必要になります。このために熱容量が大きくなるのです。



2原子分子は単原子分子と異なり回転のエネルギーを持つ。衝突で同じ平均運動エネルギーとなるが持っているエネルギーは2原子分子の方が多い



## 伝導による熱の伝わり

まず次の問題をやってみましょう。部屋の中にある次の物体のうち、温度の一番低いのはどれでしょうか？(A) 本 (B) 鉛筆 (C) 机の鉄の部分 (D) 石 (E) どれも等しい  
答えは、(E) のどれも等しい、です。熱的接触状態にあると、温度は同じになると習ったばかりですね。しかし、実際に触ってみると鉄の部分は非常に冷たく感じます。したがって、鉄の温度が低いと思うのが普通です。こんなことはどうしておこるのでしょうか？

皆さんは料理をしたことがありますか？お玉を熱くなったカレーの鍋の中に入れて、次第にお玉が暖まってきます。特に金属の部分は熱くなりやすいので、取っての部分がプラスチックなどにして熱が伝わりにくくしてあります。このように物体を通して熱が伝わることを**伝導による熱の伝わり**と言います。

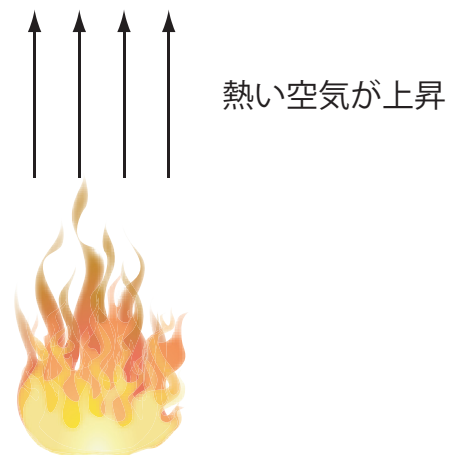
ミクロにみると、一カ所の分子が暴れると、お互いが引き合ったり反発し合ったりする力を通して、その振動が他に伝わっていきます。熱の伝わりが一番大きいのは金属です。よく金属にさわると冷たく感じます。したがって、金属の温度は他より低いと感じてしまうのです。それでは逆に金属をさわる前はどうでしょう。外気は熱を伝えにくいので外気に接触している皮膚の表面は体温に近く、周りの空気は冷たく感じないようになっています。一方、金属にさわると、熱伝導が大きいので皮膚表面の温度は急速に外気の温度と同じになる。このため冷たく感じるわけです。周りにあるプラスチックをさわってもあまり冷たく感じませんね。これは、プラスチックの温度がすぐ皮膚の温度に近づいて皮膚の熱の放出が少ないからです。木や綿などは熱を伝えにくいので、断熱材としても使われます。

このように、熱い、とか冷たいとかいう感覚と温度が高いか低いかは必ずしも一致しないので注意が必要です。

## 対流による熱の伝わり

ガスコンロの火の上の方に手を当てると、熱い風が下から上に上がって行くのがわかります。これは、次のようにして起こります。まず、ガスコンロで暖められた空気や、燃焼によってできた $\text{CO}_2$ などが暖められて膨張し密度が小さくなります。すると、軽くなって上に上昇して行きます。このように、**分子自身の移動によって熱を伝えるのを対流による熱の伝わり**と言います。また、水を張った鍋をコンロで暖めていっても中央付近の水が上に上がっていくのがわかりますね。あがった分だけ温度の比較的低いところで下降していきます。

このように、対流は、分子が移動できる、液体や固体などで起こります。固体などでは、分子が移動できないのでこの対流は起こりません。気体では分子間の間隔が元々大きく、お互いの衝突による熱伝導は大きくありません。そのため、分子自身が移動する対流による熱の伝わりが大きくなります。





## ウエッジウッドが見つけた放射の法則

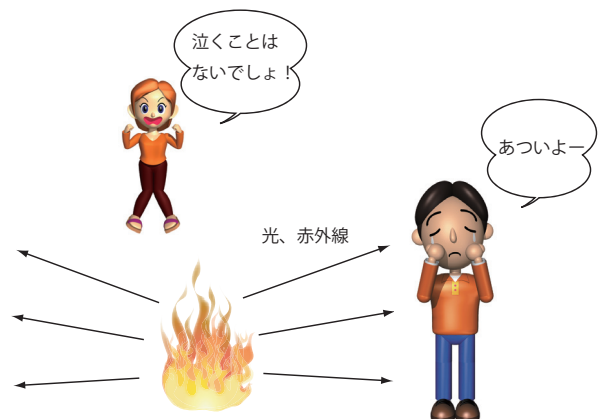
ガスコンロの火に近いところで横から手をかざすと、空気がそんなに熱くなっている感じでないのに、手が熱くなってきます。物質は温度に応じて波長の異なる電磁波を放射します。これを**放射**と言います。この放射は空気が無いところでも伝わるのが特徴です。このため、宇宙空間での熱の伝わりは主に、この放射によるものです。実際に太陽からの放射は地球に届いていますね。このように光による熱の伝わりを、**放射による熱の伝わり**と言います。

この放射には次のような面白い性質があることがわかっています。ところで、コーヒーカップなどで有名なウエッジウッドを知っていますか？このウエッジウッドは次のような発見をしました。土は高熱で焼いて作ります。そして、様々な色の陶器は様々な色の土で作られます。しかし、高温に熱していく場合、温度が3000度くらいで土の色に関わらず赤くなり、より高温にしていくと、黄色、緑から青になっていくのです。しかもこれは土の色によりません。これがウエッジウッドが見つけた放射の法則です。しかし、こんなことはもっと古くから陶芸家たちには知られていたのかもしれませんが。もちろん、物質によって外からの光を反射したりしますので、放射の強さは物質によって異なります。また、光を全く反射しないという理想的な物体を**黒体**と言い、この解析は12章でみるように、量子論の発見の糸口になりました。

太陽は表面温度が約5800ケルビンで燃えており、青白い光です。ただし、地球大気を通過してくると青い成分が大気に吸収されて黄色っぽくなります。一方、白熱電球は2800ケルビンで赤い色です。それではこれより低い温度ではどうなっているのでしょうか？温度が低いと目には見えない赤外線が主に出てきます。たとえば、私たちの体からも、周りのものからも赤外線が放出されています。また外部から赤外線を吸収を



しているために温度が一定に保たれているわけです。このように、絶対温度によって光が変わるのは、放出される光の最も強い光の波長と絶対温度とが関係しているからです。一般に最も強い光の波長と絶対温度とは反比例しています。また、光についての詳細は後の章で説明します。



## 魔法瓶での断熱のしくみ

冷たいものを長く保温しておくためにペットボトルを持っている人は多いでしょう。子供も遠足やお弁当のために持っていることが多いですね。それでは魔法瓶はどのような構造で熱をにがしくしているのでしょうか？

金属は熱伝導が大きいので素早く熱を逃がしてしまいます。そこで、ステンレスなどを2重にする構造の断熱がよく使われています。これは、金属の間に空気の層があり、これにより熱の伝わりを緩和します。ただし、空気は対流や伝導などで熱を伝えますので、保温性能はそれほど高くありません。そこで、この2つの金属の間を真空にしますと、対流や伝導がなくなります。ただし、内部の金属を中で完全に浮かせておくわけにはいかないので外枠との接触部分からは熱が伝わりますが、真空にすると断熱効果は高くなります。それでは、放射はどう防げばよいのでしょうか？放射は真空中でも伝わるので、放射は伝わってしまいますね。これを防ぐために、ステンレスの表面を磨いて鏡のようにします。すると、放射の電磁波の多くは反射し、これにより放射による熱の伝わりもある程度防ぐことができるわけです。このような構造にしたものが魔法瓶です。最近では、コーヒーマーカーなどでも魔法瓶構造のものも良く見かけるでしょう。魔法瓶は良く考えられて作られていますね。



## 蒸発による熱の伝わり

暑い日に道路に水をまくと、涼しくなります。これは道路の温度が下がるからです。これはどのようにして起こるのでしょうか？

この原理は業績の悪化している会社と似ています。業績の悪い会社では、外部の会社と接触のある活発で生きのいい社員が、会社の将来を悲観してやめていきます。すると、業績の良い社員がやめるために、後には外に出られない社員だけが残っていくのです。このため、会社全体での一人あたりの業績はさらに悪化していきます。

水の蒸発も同じ原理です。水分子は引き合っているために、通常外へは出られません。しかし、外からの分子の衝突や水分子同士の衝突などによって、非常に活発に動く水分子も出てきます。すると、他の水の引きつける力を振り切って外部に飛び出すこととなります。残った水のエネルギーは分子一つ一つに換算して低くなりますね。平均運動エネルギーと温度は比例していますので、これは、温度が低くなるわけです。このように、蒸発では平均よりもエネルギーの高い分子が逃げていき、温度が下がっていくのです。

人間の筋肉によって仕事になるのは、ブドウ糖などの分解によって得たエネルギーのおよそ20パーセントです。残りは体温の維持に使われています。しかし、運動をして筋肉をより使うと、外部により多くの熱を放出します。このため、体を冷やす必要があり、これは汗による蒸発によって行われます。このように蒸発は、冷却の過程なのです。

人間の体では通常の状態では、熱の放出のうち約54パーセントから60パーセントの熱は放射によるものです。また、伝導と対流により約25パーセントの熱を体内から逃がします。そして汗による蒸発ではおよそ7パーセントで、息による蒸発により約14パーセントの熱を放出しています。



## 動物での断熱 羽と脂肪

鳥やほ乳類は、一定の体温を保たなければ体内の細胞による化学反応が正常に行われません。そのため、体内に出入りする熱を制御する手段が必要となります。その一つの手段が、毛皮や羽、脂肪などです。ほとんどの生物の体温は気温より高いので、内部の熱をいかにして外に出て行くのを防ぐのかがかぎとなります。

鯨やアザラシなどは脂肪を利用しています。脂肪は熱の伝わりが少なく非常によい断熱材となります。

羽もまたよい断熱材です。実際多くの科学者は、羽毛は恐竜や鳥などで体温を一定に保つために発達したものであり、その後それが空を飛ぶために進化したものと考えています。一般に鳥の体温は平均摂氏41度であり、私たち人間よりも多くの保温が必要となります。羽は空気を近くに閉じこめて対流による熱の伝わりを防ぎます。

毛や毛皮は、表皮と同様に死んだ細胞によって作られています。羽と同様に毛や毛皮が空気を閉じこめ、断熱します。人間は温かい環境で、毛を退化させてきました。



羽毛は空気を閉じこめて断熱性に優れる



## 人体の体温調節

人体は環境の温度変化に対して複雑な体温調節の機構を持っています。体温が上昇すると、皮膚に近い部分の血液中の血小板が膨張して移動しやすくなり、対流によって熱を外に逃がすのを助けます。人間の皮膚の表面からは、伝導、対流、放射によって熱が逃げていきます。また、汗を蒸発させ熱を逃がすのを助けます。

寒くなると、皮膚の近くの血小板は収縮して対流を妨げるようになります。また非常に寒い環境で極度に収縮した血小板は酸素を細胞に渡すことができません。このため、細胞が死滅し凍傷が起こります。また、寒い環境では代謝が活発になりより多くの熱が発せられるようになります。また、体温が下降するとふるえにより、筋肉を振動させ熱を放出させるようにします。風邪による熱が出ているにもかかわらず、寒く感じたりふるえたりするのは体内の温度を感じる機構が温度が高い方に基準がずれてしまうからです。つまり体内の温度センサーが狂ってしまったからなのです。

## 閉じた系と開いた系とは？

科学では、系という言葉をよく使います。たとえば、太陽系は太陽の重力が及ぶ範囲を言いますね。また生物では神経系や生態系などという言葉を使います。系とは今考えている物体や位置、時間などの全体をさします。

物理でも同様です。外からエネルギーや物質の出入りのない環境を**閉じた系**と言います。それに対して、外からエネルギーの出入りがあるのを**開いた系**と言います。堅苦しい言い方ですが、こうして定義しておくとう便利なことが多くあります。

開いた系としては、たとえば私たちの体などがそうですね。外に対して熱を放出していますし、人間外部から食物も摂取しています。また、地球もまた太陽からエネルギーを受け取り、熱を宇宙に放出しています。そのため地球も開いた系です。それに対して閉じた系というのはどのようなもののでしょうか？実際のところエネルギーの出入りのない物質などあり得ないのですが、そうしたエネルギーの出入りを無視できるときに閉じた系という言い方ができます。たとえば、摩擦のない床の上を2つの硬い物体を衝突させるのは力学的に熱などにエネルギーが変換されにくいので閉じた系とも言えます。また、地球も放射による熱の出入りはおよそ打ち消しあうので、地球全体としてはエネルギーの出入りが無いものと思ってよいことにすれば閉じた系とも言えます。



## エネルギー保存の法則とは？

もう一度本を上を放り投げてみましょう。手が本を上を上げます。このとき筋肉がエネルギーを消費して、本に運動エネルギーを与えます。それが一番上までいくと、瞬間静止するので運動エネルギーはゼロとなり、そのかわり位置エネルギーとしてエネルギーがたまりまます。その後落下すると、位置エネルギーが運動エネルギーに代わりながら落下します。手の上に落ちると、手や本の分子を押し、振動させるという仕事をします。これは後で熱エネルギーとして扱います。このように、エネルギーはどのような運動をしても一定です。ただし、ほかのものに力を加えたりした場合には、エネルギーのやり取りがありますが、**関連するすべての物質の持つエネルギーの総量は一定です**。これを**エネルギー保存の法則**と言います。また、手を擦りあわせると熱くなるのは誰もが感じているでしょう。仕事は熱に変わるわけです。このように**力学的なエネルギーだけでは保存していないような現象でも熱エネルギーまで含めると必ずエネルギーは保存するのです**。

## 日常生活とエネルギー

現在、日常生活で最も大きなエネルギー源は石油です。自動車では、ガソリンを燃焼させ、移動するためのエネルギー源としています。また、人間の体も、糖分などをエネルギー源としてゆっくり燃焼させています。このような反応も、分子レベルでみると、分子や電子の配置による位置エネルギーの変化を、分子のエネルギーや、光のエネルギーとして取り出しています。このような化学反応によるエネルギーを、**化学的エネルギー**と言います。

また、音は空気の振動が伝わっていくわけで、それにより私たちの耳の中の鼓膜が振動されて音が聞こえるわけですから、音もエネルギーを持っています。これは**波のエネルギー**の一種です。津波がエネルギーを持っていることは、家を壊すなどの仕事をするのですから、容易に想像することができますね。

太陽の光で熱くなるのは経験していますね。また、石油などは、太陽の光の光合成により成長した植物などが原因となっているわけですから、これらの元には、**光のエネルギー**があります。

また、次の章で出てくるように質量もエネルギーになります。通常これは核反応によって起こる**原子力エネルギー**として活用されています。これらのエネルギーは、形は変わっても全体の量は変化していません。エネルギーの保存則は、非常に重要な概念です。

そしてもっとも身近なエネルギーは**熱エネルギー**です。これについても後の章でもう少し詳しく勉強しましょう。



## 日本のエネルギーバランス

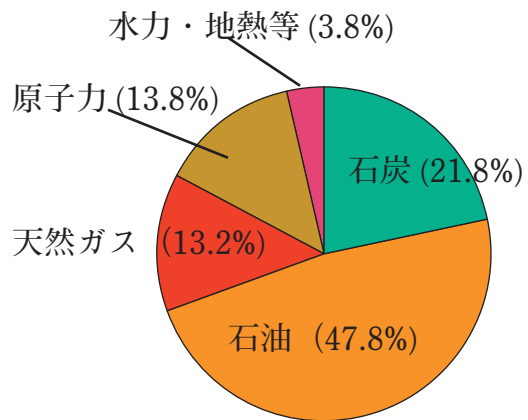
産業革命以降、人類は現代のテクノロジーを進化させてきました。そしてこれは安い安定的なエネルギー供給に支えられてきました。18世紀の終わりに、燃料としてきた木材が品不足となり高騰すると、ジェームズワットなどの産業革命の名士たちは木材に代わり石炭を燃料としてきました。そして20世紀にはいると、石炭に代わり石油を主なエネルギー源としてきました。

石油や石炭、そして天然ガスなどは、化石燃料と呼ばれます。これは、太古の植物がおよそ1000万年かけて地中で化石化してきたものだからです。右図のように我が国のエネルギーのほとんどはこの化石燃料に依存しています。化石燃料の特徴的な性質はそれが復元不可能であるということです。つまり、いったん燃やしたりしてしまうと再び創り出すのは人間の通常的时间感覚では不可能なのです。

次世代の発電としては太陽エネルギーの利用や風力の利用が上げられます。しかし現在のところこれらの代替エネルギー源を主力にすることはできません。それは、電力には通常必要な基礎電力と、時間帯によって多く必要なピーク電力の2つあることが重要です。一方太陽エネルギーや風力は天候に左右されやすく必要なときに大電力を動員するには、巨大な電力の貯蓄施設が必要になってくるでしょう。そしてこれらのコストは非常に高くなってしまいます。

移動にかかるエネルギーとしては、現在ガソリンなどを燃料とする自動車は主流です。この代替として、電気自動車や電機とガソリンのハイブリッドカーなどが市販されてきました。特にハイブリッドカーは燃費が良く、自動車のランニングコストが安くできます。しかし、ハイブリッドカーの導入には数十万円余分にかかるのが通常なので、一般家庭の自動車の使用量ではこの割増分をランニングコストの減少で解消することはできません。

また現在注目されているのが燃料電池による自動車です。燃料電池では水素と酸素を反応させそれを最終的に電気や熱のエネルギーとして取り出すものです。この過程で排出されるものは、二酸化炭素や窒素酸化物ではなく、水ですので大変クリーンなエネルギーです。現状ではコストが高くなりますが、これからの技術開発によりこれらの燃料電池が有望なエネルギーとなっていくでしょう。



日本のエネルギー構成 (2004)

## 生命のエネルギーと食物連鎖

生物か生物でないかにかかわらず、地球上のほとんどの系は太陽の放射のエネルギーを他のエネルギーに変えることによって成り立っています。

地球の大気への放射は、1平方メートルあたり1400ワットのエネルギーが降り注ぎます。地球の半径が約6400kmですのでこれから地球に降り注ぐ太陽のエネルギーは約 $1.8 \times 10^{17}$ ワット、つまり1秒間に $1.8 \times 10^{17}$ ジュールのエネルギーとなります。もっともこのうち約4分の1は宇宙に反射され、また四分の1が大気に吸収されてしまいます。また大気は5パーセントを宇宙に向かって跳ね返します。そのため地表に届く光のエネルギーは約45パーセントとなります。

生物のシステムはこのエネルギーに依存しています。まず、この45パーセントのうちわずか4パーセントが光合成に使われて食物連鎖の基礎となります。ほとんどのエネルギーは地面や空気を暖めたり、水を海から蒸発させ雨を降らせるのに使われます。

生物のエネルギーの移り変わりをみるのに、食物連鎖や栄養段階といった考え方が便利です。すべての生物は光合成を行う植物を基礎にしています。そして、この植物を、牛や馬などの草食動物が食べます。そしてこの草食動物を肉食動物が食べることとなります。また幾つかの生物は肉食でもあり草食でもある雑食です。たとえば、類人猿や人間などがこれにあたります。

植物に降り注ぐ太陽のエネルギーのうち、光合成に使われるのはわずかに10パーセントで、これは化学的エネルギーとして植物の体内に蓄えられます。それ以外は跳ね返されたり熱するのに使われたりします。草食動物がこの植物を食べるとき、植物に蓄えられた化学的エネルギーのうち、わずか10パーセント程度しか栄養として吸収できません。つまり、太陽のエネルギーのうち草食動物が利用できるのは元のエネルギーのわずか1パーセント程度です。

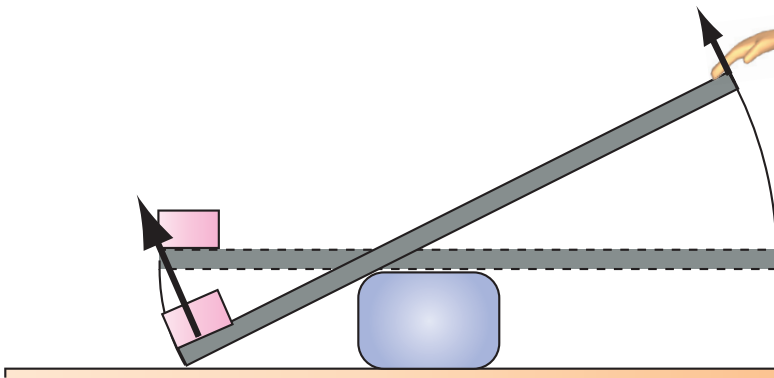
## ダイエットとカロリー

エネルギーの保存則は人間の体にも当てはめられます。つまり、体内では内部エネルギーのほとんどは脂肪として蓄えられます。健康な人においては、排泄物として排泄される栄養は非常に少ないものとなります。このため、熱力学の第一法則は、次のようになります。体内での脂肪の増加は、摂取した食物のカロリーから外に対しての運動の差である。健康な人では一日に必要なエネルギーは約1800カロリーです。そして、脂肪1グラムを作るのには3500カロリー必要となります。逆に脂肪1グラム減少させるのには相当な運動が必要となります。

ダイエットのときに気をつけなければならないのが体内の基礎代謝です。基礎代謝とは運動をしていない状態でも体内の活動を維持していくのに必要なエネルギーのことです。中でも筋肉はエネルギーの消費量が大きな組織です。運動をしなくて食事を制限した場合、体はその抵抗手段として、体内の脂肪を燃焼させると同時にエネルギー消費の激しい使っていない筋肉を減少させます。この結果、体は基礎代謝が減少し、少量のエネルギー摂取でも生存可能な効率の良い体に作り替えて行きます。そのため、少しの栄養の摂取で太りやすい体になってしまうわけです。これがリバウンドと言う現象です。このように一般にダイエットには運動が欠かせないものとなります。

## 機械とは？

機械というと、応用上主に電気のモーターなどで力を加えるものが主です。ただし、機械自身がエネルギーを作り出しているものではありません。機械では、他の形のエネルギーを仕事に変えたり、また力の大きさを変換して伝えたりしています。通常は電気のエネルギーをモーターなどで仕事に換えます。電気については後で考えることにして、ここでは最も簡単なてこの例を考えてみましょう。実はこのてこがなかなか馬鹿にできません。子供の頃シーソーにのっていると、軽い子が相手のときは前の方に出て行くと釣り合ったことを経験したことがあるでしょう。これは鉛筆と定規で体感できます。定規の中心に鉛筆をおいて、上から両手の指で押してみます。中心から同じ距離だと同じ力で釣り合います。図のように一方の指を端にのせると、中間地点より、約半分の力が体感できます。



てこ 弱い力で大きな力とすることができるが、その分移動する距離は長くなる

このような関係は次のようにしてエネルギー保存の法則から求めることができます。まず片方が半分の位置でこし押し込んでみてその後止めます。すると、指が移動する距離は消しゴムの2倍です。仕事は、力と移動距離の積でしたので、同じ仕事となるためには、消しゴムの重力の半分ですむというわけです。

硬くしまったねじをドライバーで回すのに、ドライバーの持つところが太いもののほうが回しやすいのも同じ原理です。このように回転させるためには、力の強さだけでなく回転の中心からの距離も関係しますね。そこで、**回転中心からの距離と、回転する方向の力の積をトルク（力のモーメント）**と言います。



## 効率のいい仕事とわるい仕事

いつも理想と現実とは異なるものです。自転車もそうですが一般に機械によって力は楽になりますが、逆にそれにより摩擦などでエネルギーが失われることがあります。一番極端な例が、机の上の物を動かすことです。位置を動かすのにした仕事はすべて摩擦でミクロな振動として失われてしまいます。つまり、与えたエネルギーのうち、再利用可能なエネルギーは残されませんね。

今度は、机の上に本で坂をつくって、消しゴムを上を押していってみましょう。消しゴムと本の間には摩擦があるので、摩擦力に打ち勝ちながら押さなければなりません。仕事としては、重力と摩擦力に打ち勝つ力で仕事をするわけです。坂を登り切ったとき、重力に逆らってした位置エネルギーは、本の端から落ちて消しゴムの運動エネルギーとなり再利用可能ですが、摩擦の分は再利用できません。一般の機械には摩擦がつきものです。そのため、再利用可能なエネルギーは実際にした仕事よりも小さくなります。似たようなこととして、営業マンがさまざまな営業活動をしたのに、売り上げにつながらないなんてことがあります。こういうとき、営業活動の効率が悪いと言いますね。機械でも同様に、**効率**が定義できます。つまり、**与えたエネルギーに対して、実際にした仕事の割合を効率と言います。**

**効率 = 最終的な再利用可能なエネルギー ÷ 機械に実際にした仕事や入力したエネルギー**

と定義します。この効率は通常パーセントで表します。たとえば、入力したエネルギーの半分が利用できる場合、効率が50パーセントというわけです。

人間の筋肉などにも効率があります。糖分の分解などで得たエネルギーのうちおよそ20パーセントが、筋肉の収縮などに利用される仕事となります。残りは熱となるのですがこれは体温の維持に使われますのであながち無駄というわけではありません。つまり余った熱は、体内の化学反応の速度を正常にするために使われるというわけです。また、体を激しく動かして運動すると、仕事も増えますが、仕事に変換されない熱も増えるので体温が上昇します。運動すると熱くなるのはこのためですね。

## キーワード

仕事、ジュール、仕事率、ワット、エネルギー、重力的位置エネルギー、化学的エネルギー、運動エネルギー、音の強度、熱、内部エネルギー、カロリー、エネルギー保存の法則、波のエネルギー、光のエネルギー、トルク、効率、閉じた系、開いた系、熱の伝わり、伝導、放射、蒸発、対流