

この資料を最後まで読み、例題を解いたうえで次回の講義(第3回「エネルギー」)に臨むこと。

2014年度「化学」(担当:野島 高彦)第3回

エネルギー

0 はじめに

化学を理解するためにはエネルギーについて基本的な事柄を理解しておく必要がある。だから今回はエネルギーの基礎を扱う。ここで扱うエネルギーは、運動エネルギー、位置エネルギー、熱エネルギー、電磁エネルギーの4種類である。化学エネルギー、原子力発電に用いられている原子核内の結合エネルギー、状態変化と熱エネルギーとの関係は、別の機会に扱う。電気エネルギーについては扱わない。

1 運動エネルギー

何かの仕事を成し遂げる能力のことを**エネルギー**と呼ぶ。子供の頃に公園で遊んだブランコのことを思い出してみよう。ブランコに乗り、背中を友達に押ししてもらおうと、ブランコは動き始める。このときあなたは**運動エネルギー**を受け取ったことになる。友達に背中を押ししてもらったときに、あなたは運動エネルギーを受け取ることになる。友達の手が背中から離れたとき、あなたが持っている運動エネルギー E は、次のように表される。

$$E = (1/2)mv^2$$

ここで m はあなたの質量、 v はあなたの速度である。

2 位置エネルギー

さて、ブランコは地面からどんどん高くあなたを持ち上げてくれる。高く持ち上げられたあなたは、その高さを利用して何かの仕事を成し遂げることができる。たとえばそこから飛び降りれば、地面に転がっているちょっと固めの空き缶を軽々とつぶすことができるだろう。高い場所にいる、ということはあなたに何らかの仕事をする能力を与えてくれているのである。言い換えると、地面から高い場所にいるあなたは、**位置エネルギー**¹を持っているのである。上空にいるあなたが持っている位置エネルギー E は、次のように表される。

¹ ポテンシャルエネルギーと呼ばれることもある。

$$E = mgh$$

ここで m はあなたの質量， g は重力加速度 9.8 m s^{-2} ， h はブランコが最も低い地点にいるときの高さを 0 としたときの，あなたの高さである。

3 エネルギー保存の法則

これまでに行われてきた，ありとあらゆる科学的実験の結果は，エネルギーは消えることもなければ，現れることもない，ということを示している。これを**エネルギー保存の法則**あるいは**熱力学第一法則**と呼ぶ。止まっているブランコに座った瞬間のあなたは，運動エネルギーを持っていない。しかし友達があなたの背中を押すという仕事によって，あなたは運動エネルギーを受け取ったのである。これと同時に，背中を押してくれた友達は，運動エネルギーを失っている。運動エネルギーは，あなたの友達からあなたに移っただけであって，いきなり現れたわけではない。

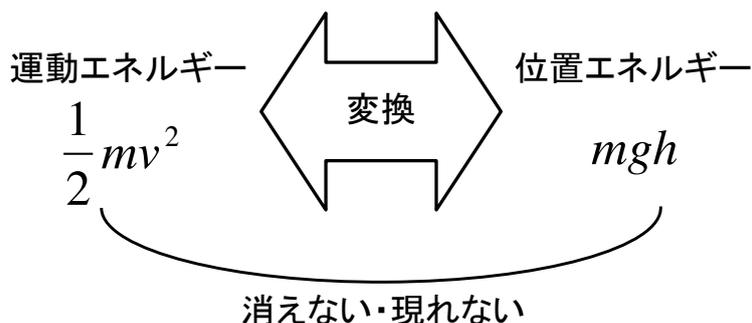
4 エネルギーの種類は変換することができる

ブランコに乗って前へ後ろへと往復するあなたは，地面から最も高い位置に来た瞬間に自分の身体が一瞬，止まることを感じる。この瞬間について考えてみよう。身体が止まったということは，速度がゼロになったということである。したがって，運動エネルギー E を計算すると，次のような結果になる。

$$E = (1/2)mv^2 = (1/2)(m)(0)^2 = 0$$

運動エネルギーはゼロになってしまったことになる。これはエネルギー保存の法則に反していないだろうか？

結論から述べると，速度がゼロになり運動エネルギーがゼロになっても，エネルギー保存の法則は保たれている。なぜならば，運動エネルギーは位置エネルギーに姿を変え，あなたはその位置エネルギーを持っているからだ。



それではブランコに戻ろう。地面から最も高い高さまで昇ったあなたは、今度は地面に向けて落ち始める。徐々にブランコはスピードを上げ、最も低い地点まで降りて来たときに、スピードは最大になる。今度はこのときの位置エネルギーを考えよう。最も低い地点にいるのだから、高さは $h=0$ となる。したがって、位置エネルギーは次のようになる。

$$E = mgh = (m)(g)(0) = 0$$

今度は位置エネルギーがゼロになってしまった。しかし、これもエネルギー保存則に反してはいない。位置エネルギーは運動エネルギーに姿を変え、あなたはその運動エネルギーを持っているからだ。

以上のことを言い換えると、ブランコが上がったり下がったりするたびに、運動エネルギーが位置エネルギーになり、位置エネルギーが運動エネルギーになり、という変化が繰り返されているのである。そして、運動エネルギーと位置エネルギーを足したエネルギーの大きさは、あなたが地面から何 m の高さにおいても、一定の量に保たれているのである。このことを数式であらわしてみよう。²

$$(1/2)mv^2 + mgh = \text{一定}$$

[例題]

地上 10 m の高さで静止しているボールがもつ位置エネルギーの大きさと同じ大きさの運動エネルギーをもつボールの速度を求めよ。ボールはどちらも同じ規格のものとする。重力加速度は 9.8 m s^{-2} とせよ。

[解答]

$$mgh = (1/2)mv^2$$

$$v^2 = 2gh = (2)(9.8\text{ m s}^{-2})(10\text{ m}) = 196\text{ m}^2\text{ s}^{-2}$$

$$v = \underline{14\text{ m s}^{-1}}$$

5 エネルギーをあらわす SI 単位はジュール (J)

1 kg の物体があつて、ここに 1 m s^{-2} の加速度を与えるときの力の大きさが 1 N である。したがって、 $1\text{ N} = 1\text{ kg m s}^{-2}$ である。 1 N の力で物体を 1 m だけ移動する仕事を成し遂げるエネルギーの大きさを 1 J と定義する。した

² ここでは空気抵抗や金具の摩擦などを無視して考えている。

がって、SI 基本単位を用いてエネルギーを以下のようにあらわすことができる。

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N m} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

6 熱エネルギー

ヤカンに水を入れてコンロに乗せ、コンロに火を付けよう。しばらくするとヤカンのフタがカタカタと動きはじめる。何かがフタを動かすという仕事をしたのである。仕事をしたのはエネルギーである。そのエネルギーは**熱エネルギー**である。

ヤカンのフタが動くしくみを細かくみて行こう。コンロの炎では、都市ガス(あるいはプロパンガス)が空気中の酸素と激しく反応し、光と熱を出している。この熱がヤカンに伝わり、さらにヤカンの中の水に伝わる。熱を受け取った水は、その熱によって温度を上げて行く。そして沸点の 100°C に達すると、蒸発を始める。蒸発によって気体となった水は、体積をふくらませているので、ヤカンの中だけでは収まり切れなくなり、外に出ようとする。このときにフタが押されて動く。

ヤカンのフタを動かす仕事の他に、熱エネルギーはどのような仕事をすることができるのだろうか。再びキッチンに行ってみよう。ナベでお湯を沸かしておき、この上でタマゴの殻を割って中身を落としてみよう。透明だった白味の部分が白くなる。これは、白味に主成分として含まれている蛋白質の分子が熱によって変化したためである³。熱には分子のレベルで変化を引き起こす能力もある。

フライパンで炒め物をしているときに火加減を誤ると、料理を焦がしてしまうことがある。これは熱エネルギーによって食材が化学変化を起こしたためである。熱エネルギーには化学変化を起こす能力もある。実験室で行われる化学反応の多くが、加熱を必要とする。

6.1 熱エネルギーと温度

洗面台の流しから出て来る温水を使っても、ヤカンのフタを動かすことはできないし、タマゴの白味の色を変えることもできない。こうした仕事をするためには、単に熱エネルギーがあればよいというわけではなくて、高い温

³ 精密に折りたたまれた分子の構造が、熱によって破壊される。

度が必要になるのである。そこで、ここでは私たちがこれまで漠然と使ってきた言葉である温度とはそもそも何なのか、について考えてみよう。

日本国内の気温の変化を思い出してみよう。関東地方の場合、夏休み中には日中の最高気温が $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上となる日が続くが、冬休み中には朝の最低気温が $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下となる日が続く。この温度の違いは、何がどのように変わったために生じるものなのだろうか。

私たちは空気の中で暮らしている。空気は窒素分子や酸素分子、その他の気体分子が混ざり合ったものである。目に見ることはできないが、たとえば室温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ のとき、 1 L の空気中には 2.5×10^{22} 個の気体分子が飛び回っている。飛び回っている、ということは、気体分子は運動エネルギーを持っている、ということの意味する。 2.5×10^{22} 個の気体分子それぞれは運動エネルギーを持っているのである。

ここで、それぞれの気体分子が持っている運動エネルギーの大きさは、同じではない。速いスピードで飛び回っている分子もあれば、遅いスピードで飛び回っている分子もある。様々なスピードの分子が混ざった状態が、通常私たちが気体として考えているもののしくみである。運動エネルギーは $(1/2)mv^2$ で表されるので、様々なスピードの分子が混ざっているということは、様々な運動エネルギーを持つ気体分子が飛び回っていることでもある。私たちが温度として理解している物理量の正体は、気体分子の持つ運動エネルギーの平均値、である。

このことをもう少し分かりやすく考えよう。気体の温度はテストの平均値と似ている。高校3年生の50人のクラスで化学の定期テストを行ったとする。しっかりと準備してテストに臨んだ者は100点を取るだろうし、遊びほうけていて何もせずに試験日を迎えた者は0点を取ることになるだろう。テストを受けた50人の学生は、最低0点から最高100点までの間の、どこかの点を取るようになる。

さて、この高校では化学を履修するクラスがA組とB組の2クラスだったとしよう。この2クラスの化学の成績を比べるとしたらどのような方法がよいだろうか。最もわかりやすいのは、テストの平均点を比べる方法である。

平均点を比べるとき、私たちはクラスの生徒一人一人の得点は考えないし、最高点や最低点も考えない。80点や90点を取る者はA組にもB組にもいるだろうし、同じように10点や20点を取る者はA組にもB組にもいるだろう。しかし、A組で80点や90点を取った学生が30人以上だったのに対し、B組で

は 30 人以上の生徒が 10 点や 20 点を取ったとなると，A 組の平均点は B 組の平均点よりも高くなる．その結果，B 組よりも A 組の方が出来の良いクラスだ，ということになる．

これと似たことが気体分子の運動エネルギーについても言える．寒い日の空気中にも，暑い日の空気中にも，速いスピードで飛び回っている気体分子もあれば，遅いスピードで飛び回っている気体分子も含まれている．しかし，暑い日の空気中には，速いスピードで飛び回っている気体分子が多いのに対して，寒い日の空気中には遅いスピードで飛び回っている気体分子が多い．すなわち，気体分子の運動エネルギーの平均値は，暑い日には高くなり，寒い日には低くなるのである．これが，気温が高いか低いかをあらわしている．

温度が高い気体は，それだけ運動エネルギーの高い分子を含んでいることになる．そして，それだけ仕事をする能力を多く持つことになる．例えばドライヤーで髪を乾かすときのことを考えてみよう．多くのドライヤーには温風の温度切り替えスイッチが付いている．低温モードで髪を乾かすときと，高温モードで髪を乾かすときとを比べてみると，高温モードのときの方が速く髪を乾かすことができる．すなわち，温度が高いということは，高い熱エネルギーを持っていることを示すのである．

6.2 もう一度エネルギー保存の法則

さて，ブランコに話を戻す．友達に背中を押してもらったのをやめると，ブランコのスピードは落ちて行く．地面からの高さもだんだんと下がって行く．そして，何往復か行ったり来たりを楽しんだ後，ブランコは止まってしまう．このときブランコに乗ったあなたが持つ位置エネルギーはゼロである．また，速度がゼロなので，運動エネルギーもゼロである．このことはエネルギー保存の法則に反していないだろうか？

反してはいないのである．ブランコに乗っていたときのあなたが持っていた位置エネルギーも運動エネルギーも，別のエネルギーに変化して，あなたのまわりから離れて行ったからである．

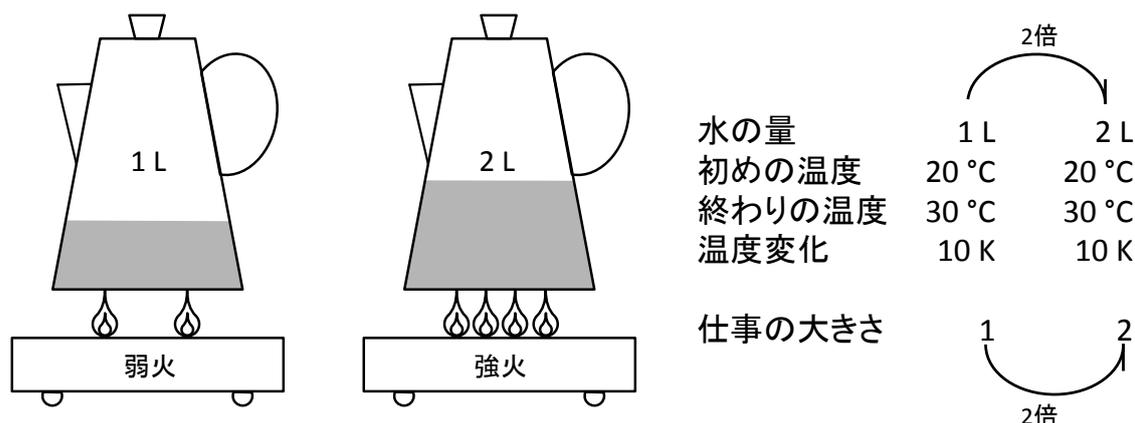
ブランコに乗っていたあなたは，ほほに風を受けて心地よい思いをしていたことだろう．このときあなたは，意識することはなかったかもしれないが，あなたを包む空気の分子をかき混ぜていた．すなわち，空気の分子をかき混ぜるという仕事をしていたのである．あなたの持っていた運動エネルギーと位置エネルギーは，あなたのまわりの空気の分子に運動エネルギーを与えたのである．

運動エネルギーを与えられた空気の分子は、わずかではあるが、運動エネルギーの平均値を上昇させた。すなわち、あなたのまわりでは、ほんのわずかに空気の温度が上がっていたのである。あなたの持っていた運動エネルギーと位置エネルギーは、熱エネルギーに変わったのである⁴。したがって、エネルギー保存の法則は成り立っているのである。エネルギーは形態を変えることができる。そして、最終的には熱エネルギーの形態に変わる。

6.3 熱エネルギーをあらわす方法

6.3.1 異なる火力のコンロで異なる体積の水を温める

熱エネルギーが成し遂げるわかりやすい仕事の例として、水の温度を上昇させることを例にとりあげよう。たとえばここに同じ大きさのヤカンが2個あって、片方には水が1L、もう片方には水が2L入っているとしよう。水の温度はどちらも20°Cだとする。火力の異なる2台のコンロを使って、これら2個のヤカンを同時に温める。

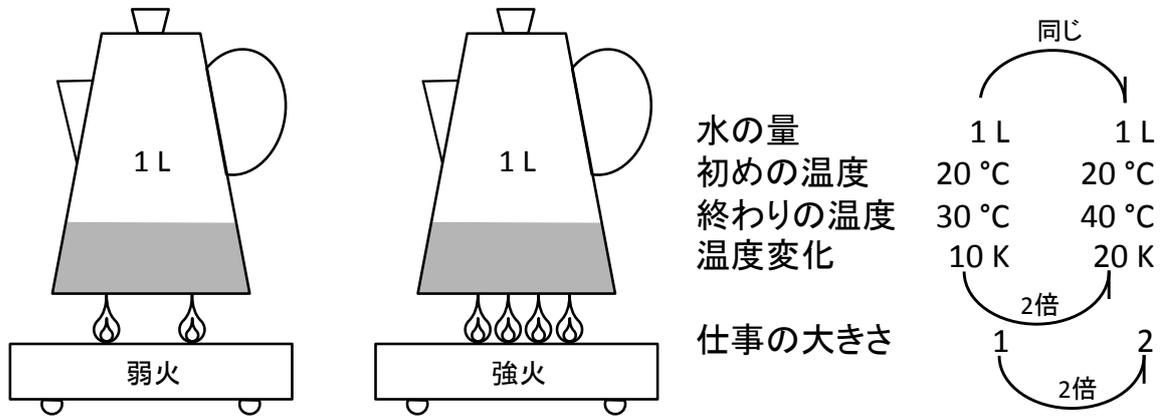


点火してからしばらくして火を止め、温度計で水の温度を計ったところ、どちらのヤカンでも水の温度は30°Cになっていたとする。すなわち、どちらのヤカンも、中の水の温度を10Kだけ高くする仕事を成し遂げたことになる。しかし、弱火のコンロが1Lの水の温度を10K高くしたのに対し、強火のコンロでは2Lの水の温度を10K高くしている。言い換えると、強火のコンロが成し遂げた仕事の量は、弱火のコンロが成し遂げた仕事の量の2倍、ということになる。

⁴ 空気に運動エネルギーを渡したほかに、ブランコをぶら下げている軸でも摩擦熱を発生させている。この熱も外へ広がっている。

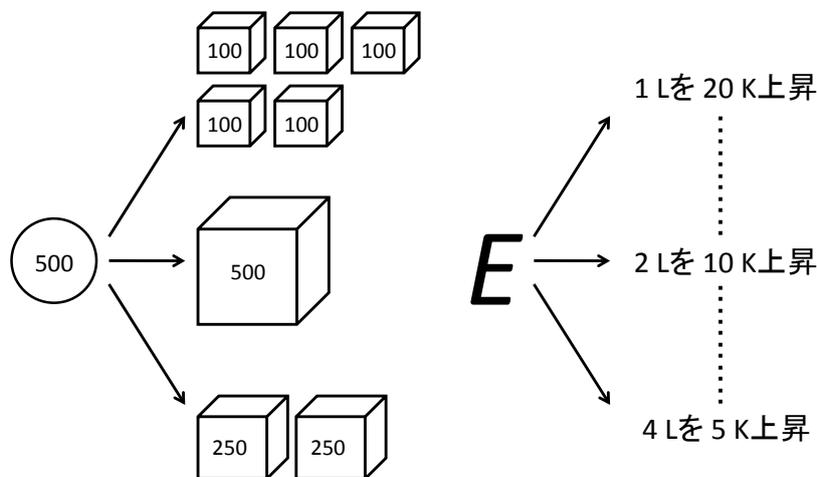
6.3.2 異なる火力のコンロで同じ体積の水を温める

再びヤカン 2 個を持ってきて、先ほどと同じように 20 °C の水を入れて温めることにする。ただし今回は、どちらのヤカンにも水を 1 L 入れることにする。



しばらく温めてから火を止め、水の温度をはかると、弱火のコンロで温めた水の温度は 30 °C になっていた。このとき、強火のコンロで温めた水の温度は 40 °C になっている。1 L の水で温度が 10 K だけ上昇しているのだから、コンロからヤカンに与えられた熱エネルギーは、さきほどの実験と同じである。このことから、1 L の水の温度を 20 K だけ上昇させることのできる熱エネルギーで、2 L の水の温度を 10 K だけ上昇させることができる、ということがわかる。

言い換えると、一定量の熱エネルギーが利用できる時、たくさんの水をちょっとだけ温めることにそのエネルギーを使うこともできるし、少ない量の水の温度を熱くするためにそのエネルギーを使うこともできる。



これは、遠足に持って行くお菓子を買うときの予算の使い方と同じである。500円分のお菓子を買うと決めたとき、100円のお菓子を5個買うこともできるし、500円のお菓子を1個買うこともできる。もちろん、250円のお菓子を2個買うこともできる。熱エネルギーの場合も同じである。

6.4 比熱

大気圧下、20 °C で 1 kg の水の温度を 1 K だけ上昇させるために必要な熱エネルギーの大きさは 4.2 kJ である。一方、同じ条件下で 1 kg のエタノールの温度を 1 K だけ上昇させるために必要な熱エネルギーの大きさは 2.4 kJ である。このように、同一条件下において 1 kg の物質の温度を 1 K 上昇させるために必要な熱エネルギーは、物質によって異なる。この量を**比熱**、あるいは**比熱容量**と呼ぶ。水の比熱容量は 4.2 kJ K⁻¹ kg⁻¹、エタノールの比熱容量は 2.4 kJ K⁻¹ kg⁻¹ となる。

比熱容量がわかれば、ある質量のある物質をある温度だけ上昇させるために必要な熱エネルギーの大きさを求めることができる。たとえば 20 °C において 2.0 kg の水の温度を 30 °C にする場合のことを考えよう。温度変化量は 30 °C - 20 °C = 10 °C = 10 K である。この温度変化のために必要な熱エネルギー E は次のようになる。

$$E = (2.0 \text{ kg})(4.2 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1})(10 \text{ K}) = 84 \text{ kJ}$$

一般に、質量を m 、比熱容量を C 、温度変化量を ΔT とするとき⁵、次式が成り立つ。

$$E = mC\Delta T$$

[例題]

250 g の水の温度を 20 °C から 80 °C まで上昇させるために必要な熱エネルギーを求めよ。水の比熱容量を 4.2 kJ K⁻¹ kg⁻¹ として計算せよ。

[解答]

温度変化の大きさは $\Delta T = 80 \text{ °C} - 20 \text{ °C} = 60 \text{ °C} = 60 \text{ K}$ である。水の質量は 250 g = 0.250 kg である。以上から次のように求める。

⁵ Δ はデルタと読み、変化量であることを示す。これから先、化学に限らず、あちらこちらに登場する記号である。例えば、温度と言ったら T 、温度変化と言ったら ΔT 。

$$E = mC\Delta T = (0.250 \text{ kg})(4.2 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1})(60 \text{ K}) = \underline{63 \text{ kJ}}$$

[例題]

100 kJ の熱エネルギーがあれば、何 kg の水の温度を 25 °C から 70 °C まで上昇させることができるか。水の比熱容量を 4.2 kJ K⁻¹ kg⁻¹ として計算せよ。

[解答]

温度変化の大きさは $\Delta T = 70 \text{ °C} - 25 \text{ °C} = 45 \text{ °C} = 45 \text{ K}$ である。

$$m = E/(C\Delta T) = (100 \text{ kJ})/\{(4.2 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1})(45 \text{ K})\} = 0.529 \text{ kg} = \underline{5.3 \times 10^{-1} \text{ kg}}$$

[例題]

カセット式コンロに取り付けるガスボンベには燃料としてブタンが入っている。ブタン 1 kg を完全燃焼させると、 $4.9 \times 10^7 \text{ J}$ の熱が生じる。250 g のボンベを 1 本使い切って、25 °C の水を 90 °C まで温めるとした場合、何 kg の水を温めることができるか。水の比熱容量を $C = 4.2 \times 10^3 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ として計算せよ。

[解答]

250 g のブタンを完全燃焼して得られる熱エネルギー E_1 を求める。

$$E_1 = (4.9 \times 10^7 \text{ J})(0.250 \text{ kg}/1 \text{ kg}) = 1.225 \times 10^7 \text{ J}$$

水の温度変化 ΔT を求める。

$$\Delta T = 90 \text{ °C} - 25 \text{ °C} = 65 \text{ °C} = 65 \text{ K}$$

1 kg の水の温度を 65 K 上昇させるために必要な熱エネルギー E_2 を求める。

$$E_2 = mC\Delta T = (1 \text{ kg})(4.2 \times 10^3 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1})(65 \text{ K}) = 273 \times 10^3 \text{ J}$$

E_1 と E_2 の比を求める。

$$\begin{aligned} E_1/E_2 &= (1.225 \times 10^7 \text{ J})/(273 \times 10^3 \text{ J}) \\ &= (12\,250 \times 10^3 \text{ J})/(273 \times 10^3 \text{ J}) = 44.87 \doteq 45 \end{aligned}$$

45 kg の水を 25 °C から 90 °C に温度上昇させることができる。

[例題]

ある金属の 100 g に対して温度を 25 °C から 75 °C まで上昇させたとき、熱エネルギーを 2.18 kJ 必要とした。この金属の比熱容量は何 J K kg⁻¹ か。

[解答]

温度変化の大きさを求める。

$$\Delta T = 75\text{ °C} - 25\text{ °C} = 50\text{ °C} = 50\text{ K}$$

$$C = E/m\Delta T = (2.18 \times 10^3\text{ J}) / \{(0.100\text{ kg})(50\text{ K})\} \\ = 436\text{ J K}^{-1}\text{ kg}^{-1} = \underline{4.4 \times 10^2\text{ J K}^{-1}\text{ kg}^{-1}}$$

6.5 カロリー

ダイエットに関心のある人は「カロリー」という言葉に敏感になっているかもしれない。栄養関係の書物には、エネルギー摂取量の目安として成人女子は一日あたり 1 800 キロカロリー(1 800 kcal)、などと書かれている。このカロリー(cal)という単位は、かつて、熱エネルギーを表すために用いられていた単位である⁶。1 cal は、大気圧下で 1 g の水の温度を 1 °C だけ上昇させる熱エネルギーの大きさとして定義された量である⁷。現在、カロリーは以下のようにジュールに換算して用いられている⁸。

$$1\text{ cal} = 4.1840\text{ J}$$

[例題]

135 g 入りのポテトチップを買ってきた。栄養成分表示欄には、100 g あたりのエネルギーが 550 kcal と記されていた。このポテトチップを 1 袋食べると、何 kJ のエネルギーを摂取することになるか。

[解答]

1 cal = 4.1840 J であるから、550 kcal を J で表すと次のようになる。

⁶ カロリーは SI 単位ではない。我が国の計量法は、栄養学や生物学に関する事項の計量以外でのカロリーの使用を禁止している。

⁷ 輸入された食品の栄養成分表示欄に Cal という単位が用いられていることがある。1 Cal = 1 kcal をあらわす。1 Cal と 1 cal とは三桁の違いがある。

⁸ 輸入食品の栄養成分表示欄をみると、カロリーではなくジュールで記載されていることがある。

$$550 \text{ kcal} = (550 \text{ kcal})(4.1840 \text{ kJ kcal}^{-1}) = 2\,301 \text{ kJ}$$

これは 100 g あたりの量なので、135 g では次のようになる。

$$(2\,301 \text{ kJ})(135 \text{ g})/(100 \text{ g}) = 3107 \text{ kJ} = \underline{3.1 \times 10^3 \text{ kJ}}$$

7 電磁エネルギー

7.1 光はエネルギーである

実験室の試薬棚に褐色のビンが置いてあるのを見たことがあるかもしれない。褐色のビンは、光をさえぎって保管しなければならない試薬に用いられている。光によって分解したり劣化したりする試薬も存在するのだ。つまり、光は化学変化を成し遂げる能力を持つのである。光はエネルギーなのである。

光は**電磁波**の一種である。電磁波は波の大きさ、すなわち**波長**によって何種類かに分類される。波長が数百 km のものから、数 pm のものまであり、それぞれ特性が異なる。電磁波のエネルギーは波長と反比例する。すなわち、以下の関係式が成り立つ。

$$E = hc/\lambda$$

ここで E はエネルギー、 h はプランク定数 ($6.626068 \times 10^{-34} \text{ J s}$)、 c は真空中の光の速度 ($299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$)、 λ は波長である。以下に化学や医療と関係のある電磁波をみて行こう。なお、ここでは波長によって電磁波を分類しているが、電磁波の種類は厳密に波長と対応しているわけではない。

7.2 電波

TV 放送やラジオ放送に使われている電磁波が**電波**である。自動的に時刻合わせをしてくれる電波時計は、国内では福島県と佐賀県から発信される電波により時刻情報を得ている。

7.3 マイクロ波

電波のうち、波長が短いものは**マイクロ波**と呼ばれる。身近にある機器でマイクロ波を利用している代表的なものは電子レンジである⁹。電子レンジの

⁹ 電子レンジという名称から、この調理器具の庫内では電子が飛び交っていると誤解される場合が多いが、食品に照射されているのは電子ではなく電磁波である。

庫内ではマイクロ波が食品に照射される。このエネルギーによって食品中の分子¹⁰が運動エネルギーを与えられ、温度が上がり、化学反応が進む。携帯電話や無線 LAN が使用している電磁波もマイクロ波である。

7.4 赤外線

マイクロ波よりも短い波長の電磁波を**赤外線**と呼ぶ。波長は 700 nm から 1 mm 付近である。英語の *infrared* を略して **IR** と記されることがある。我が国において冬に活躍する電気コタツは、赤外線で身体を温める器具である¹¹。

7.5 可視光線

赤外線よりも波長が短くなると、私たちの目でも感じるようになる。目で見える光は**可視光線**と呼ばれ、約 380 nm から約 750 nm の波長の光である。波長の短いものから長いものへ色を並べると、紫、青、緑、黄色、橙色、赤、となる。

7.6 紫外線

可視光線よりも波長が短い電磁波で、波長は 10 nm から 400 nm 付近のものを**紫外線**と呼ぶ。英語の *ultra violet* を略して **UV** と記されることが多い。紫外線は細胞を構成する生体高分子に損傷を与えるエネルギーをもつ。このことを利用して、医療器具の殺菌処理に紫外線照射が利用されている。

7.7 X線とγ線

紫外線よりも波長が短い電磁波が**X線**および**γ線**である。X線の波長は 1 pm から 10 nm 付近、γ線の波長は 10 pm 以下である。X線とγ線の区別は発生するしくみの違いによるもので、波長の違いではない。しかし X線よりも波長の短いものをγ線と呼ぶこともある。

X線は身体の軟組織を通り抜けるが、骨や歯を通り抜けることができない。このことを利用して医療診断に応用されている。いわゆるレントゲン撮影やエックス線撮影と呼ばれるものがこれである。また、ガン細胞のなかには、X線やγ線に対して敏感なものがあるので、ガン治療に X線やγ線を用いることがある。さらにγ線は医療器具の殺菌処理にも応用されている。

¹⁰ 主に水分子である。

¹¹ コタツには赤いランプが用いられているが、赤い光は赤外線ではない。赤外線という言葉から連想される赤い色をランプに塗っているだけである。

[例題]

以下の電磁波を，エネルギーの高いものから低いものに向けて並び変えよ．

可視光線，マイクロ波， γ 線，赤外線，紫外線

[解答]

(高) γ 線，紫外線，可視光線，赤外線，マイクロ波 (低)

[例題]

赤い光と紫色の光では，どちらが多くエネルギーを持っているか．

[解答]

紫色の光．

★おまけ：身近な電波の波長を計算してみよう

<東京 FM>

東京 FM の周波数は 80.0 MHz である．M はメガと読み， 10^6 を意味する．これは 1 秒間に 80.0×10^6 回振動することを意味する．すなわち $80.0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ が振動数となる．振動数 ν と波長 λ の間には $\lambda = c/\nu$ の関係があるので，この放送局の使用している電波の波長は次のようになる．

$$(299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}) / (80.0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}) = \underline{3.75 \text{ m}}$$

<NTT DoCoMo の FOMA>

FOMA の周波数は 2.0 GHz である．G はギガと読み， 10^9 を意味する．したがって波長は次のようになる．

$$(299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}) / (2.0 \times 10^9 \text{ s}^{-1}) = 0.145 \text{ m} = \underline{15 \text{ cm}}$$

8 熱力学第二法則

前節までで見てきたように，この世界には様々なエネルギーがあり，エネルギーは形態を変えることができる．この性質を私たちは利用している．例えば自動車が動くしくみを考えてみよう．ガソリンと空気を混ぜて点火すると，ガソリンが燃焼して気体になり，この気体は燃焼熱で勢いよくふくらむ．ふくらんだ気体がエンジンのピストンを押し上げ，運動エネルギーとして車輪を回すことに使われる．

ここで、エネルギーの形態が変わるときに、欲しい形態のエネルギーに100%を変換できるわけではない。例えば自動車の場合、エンジンの中で発生した熱の全てがピストンを動かすために使われるわけではない。ピストンを動かすために使われるエネルギーは全体の一部に過ぎず、ほとんどの熱は何かの有効利用されることなく、大気中に逃げて行ってしまふ。

これは海外旅行をするとき空港でする両替と似ている。5万円をドルに替え、ドルをユーロに替え、ユーロを円に替え、という操作をやっても、5万円はあなたの元に戻って来ない。途中で手数料を引かれるからである。手数料も合わせて考えれば5万円分のお金は这个世界から消えていないが、あなたが買い物に使うことのできるお金は両替を繰り返して行くたびに減って行く。エネルギーの場合には、この手数料が、有効利用されることなく広がって行く熱エネルギーに相当する。

エネルギー保存の法則は、エネルギーが这个世界から消え去ることが無いことを示している。しかし、そのエネルギーが私たちにとって扱いやすい形態のものなのか、それとも利用価値の低いものなのか、は別問題である。エンジンから大気中に逃げて行ってしまった熱を集めて自動車を動かすとか、ブランコを持ち上げるといった仕事をさせることはできない。すべてのエネルギーは最終的には熱エネルギーに変わる。その熱エネルギーは何かの仕事を成し遂げるには不十分な形態のものになっている。

こうした現実を考えると、这个世界においてエネルギーの変換には向きがあるということに気づく¹²。すなわち、何らかの仕事が行われると、その仕事に関連した物事は秩序を失い、乱雑な状態に向かうのである。ある系の乱雑さを表す指標は**エントロピー**と呼ばれる。そして何らかの仕事が行われると、この宇宙のエントロピーは増大に向かう。すなわち、この宇宙においてエントロピーは増大する一方なのである。このことを**熱力学第二法則**と呼ぶ¹³。

たとえば冷水と熱湯があったとしよう。そして両者を混ぜてぬるま湯にしたとしよう。いったんぬるま湯にしてしまうと、もう冷水と熱湯に分けることはできない。この場合、冷水と熱湯に分かれていたときのエントロピーよりも、ぬるま湯になったときのエントロピーの方が大きい。

¹² 覆水盆に返らず、とは良く言ったものである。

¹³ 熱力学には第三法則までがある。第三法則は「0 Kにおいてすべての物質の運動エネルギーはゼロである」である。

もちろんぬるま湯を半分に分けて、冷蔵庫と電子レンジに入れば元どおりの冷水と熱湯にすることはできる。この操作は一見、エントロピーを減少させたように思われる。しかし、ぬるま湯から冷水と熱湯をつくる過程では、電力が消費されている。その電力は石油や石炭を燃焼させるなり、ダムから水を落とすなり、ウランが核分裂するなりして生み出されたエネルギーである。そのエネルギーを得る過程で、やはり熱が生じており、その熱は発電に用いられず世界へ広がって行き、それに伴って全宇宙のエントロピーは増大している。何かの仕事をすれば、必ず全宇宙のエントロピーは増大するしくみになっているのである¹⁴。

以上

¹⁴ 永久に運動し続ける「永久機関」をつくることが不可能な理由である。