



エネルギーの形態

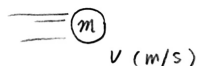
「エネルギー」は、自然現象を理解するうえで最も重要な物理量のひとつです。エネルギーには以下に示すようにいろいろな形態がありますが、孤立した系の中のエネルギーの総和はどんな現象が生じても一定となることが知られています (エネルギー保存の法則)。

物体の衝突や化学反応、太陽光発電、核反応等の様々な過程でエネルギーはその形態を変化させますが、その総和は一定に保たれます。各形態のエネルギーの多くは数式で書き表すことができ、エネルギーの形態の変化を考えることが、様々な現象を理解する基礎となります。エネルギーを表す式を以下に紹介します。

単位は SI 単位系 (国際単位系, http://science.shinshu-u.ac.jp/~tiiyama/?page_id=2178) を使う必要があります。SI 単位系のエネルギー E の単位は J ($= \text{N m} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$)、力 F の単位は N ($= \text{kg m s}^{-2}$) です。

1 運動エネルギー

運動している物体は次の式で表される「運動エネルギー (kinetic energy)」を持っています。「速さ v で動いている窒素分子」も、質量 m を正しく代入してやれば ($m = 4.65 \times 10^{-26} \text{ kg}$) 同じ式で運動エネルギーを算出できます。



$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

m : 物体の質量 (kg)

v : 物体の速さ ($\frac{\text{メートル}}{\text{秒}}$)

2 質点に対する仕事 = 位置エネルギー (ポテンシャルエネルギー)

力の働いている空間 (「場」という) の中では、物体は「その位置にいただけで得られるエネルギー」を持っています。例えば、重力が働いている空間 (重力場) の中で、床に置いた 1 kg の物体を重力に逆らって 1 m 持ち上げるためには、外からエネルギーを加える必要があります。高さ 1 m にある物体は床に置いてある状態よりも「高いエネルギー」を持っている、と言えるでしょう。このような「位置によって決まるエネルギー」のことを、「位置エネルギー (potential energy)」といいます。

位置エネルギーの大きさは (力 \times 距離) で計算できます。先ほどの重力に逆らって 1 m 移動させる例だと、質量 1 kg の物体に働く力は 9.8 N なので、 $(9.8 \text{ N} \times 1 \text{ m}) = 9.8 \text{ J}$ となります。

場所 (x) によって力 F の大きさが変わる場合 ($F(x)$) には、次のように積分をとることでエネルギーを求めることができます。

$$\Delta E = - \int F(x) dx$$

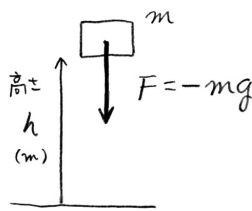
力の向きに「逆らって」移動するとき、物体の位置エネルギーは高くなるので、積分式の前に $-$ がつきます。

位置エネルギーの原因となる「力」には、重力の他に静電気力、バネによる力などがあり、それぞれに対応した位置エネルギーと式があります。2 種の力が同時に働く場合は、位置エネルギーは 2 つの位置エネルギーの和となります。次のページに、主な位置エネルギーと対応した式を挙げます。位置エネルギーは、「基準の位置」の位置エネルギーを 0 として、そこからの差 (ΔE) として取り扱います。

2.1 重力による位置エネルギー (地表近く)

この部屋の中で働いている力、地球からの「重力」について考えましょう。物体に働く重力は、物体の質量に比例します ($F = -mg$)。比例定数を重力加速度 g と呼び、地球表面では $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ となります。重力加速度は星の質量と半径によって決まります。火星表面では 3.7 m/s^2 です。

力 F の符号は「向き」を表しています。高さ h は基準点から上向きの方をプラスに取るので、 mg の前についている $-$ は、力が h と反対の方向、すなわち下向き (地球の中心方向) に働いていることを表しています。前頁の式に従い、 F の式に $-$ をつけて距離 (高さ) h で積分すると、重力による位置エネルギーの式 $\Delta E = mgh$ が求まります。 E に Δ がついているのは、位置エネルギーが「基準の高さ」 (例えば地表面、床の高さなど) からの差であることを表しています。



$$F = -mg$$

$$\Delta E = mgh$$

- m : 物体の質量 (kg)
- g : 重力加速度 (9.8 m/s^2)
- h : 高さ (m)

2.2 重力による位置エネルギー (宇宙スケール)

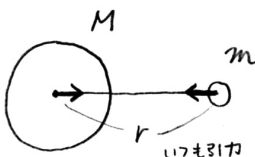
質量を持っている2つの物質の間には重力が働きます (万有引力)。2つの物質の質量をそれぞれ M , m として、両者の中心間距離を r とすると、両者間に働く力は

$$F = -G \frac{Mm}{r^2}$$

となります。 G は重力定数 ($G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$) で、宇宙全体で成り立つ定数です。式中の $-$ は、力が中心間距離 r が小さくなる方向に働く、すなわち「引力」であることを表しています。質量は必ずプラス (正の値) なので、重力はどんな場合でも引力になります。

重力は距離の2乗に反比例して弱くなります。例えば月までの距離は地球の半径のおよそ60倍なので、月と同じ距離に1kgの物質を浮かべたときの地球からの引力は、地球表面での引力の1/3600となります。前項の式 ($F = -mg$) は、 M に地球の質量、 r に地球の半径を代入した近似式です。

上の式に $-$ をつけて距離 r で積分すると、位置エネルギーの式が得られます。 r についていた2乗が消え、 E は r の1乗に反比例します。 r を ∞ とすると、 F , E ともに0となります。無限に離れると引力は働かなくなります。 E は無限に離れたときの位置エネルギーを基準 ($E = 0$) としていると考えるとよいでしょう。



$$E = -G \frac{Mm}{r}$$

F , E ともに $r \rightarrow \infty$ のとき0。
重力はいつでも引力。
($F \leq 0$, $E \leq 0$)

- M : 物体1(地球)の質量 (kg)
- m : 物体2の質量 (kg)
- G : 重力定数
($6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$)
- r : 2つの物体の中心間の距離 (m)

2.3 電荷による位置エネルギー

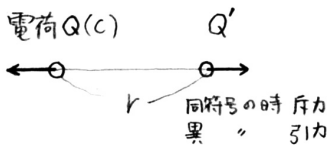
2つの電荷 (Q, Q') の間には静電気が働きます。

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ'}{r^2}$$

電荷の単位は $\overset{\text{クーロン}}{C}$ で、例えば電子は $-1.6 \times 10^{-19} C$ の電荷を持っています。式中の $(1/4\pi\epsilon_0)$ の部分は比例係数だと考えればよいでしょう。 (ϵ_0 は真空の誘電率 ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} C^2 J^{-1} m^{-1}$))

重力と同じく静電気力は距離の2乗に反比例して弱くなります。しかし電荷にはプラスの電荷だけでなくマイナスの電荷もあります。 Q と Q' が異符号 (プラスとマイナス) の場合は両者の間に働くのは引力ですが、同符号 (プラスとプラス、またはマイナスとマイナス) の場合は両者の間には反発力 (斥力) が働きます。

- をつけて積分すると E の式が得られます。 $r \rightarrow \infty$ のとき $E = 0$, 電荷が同符号の時は電荷が近づくにつれ E はプラス (不安定) に、電荷が異符号の時は電荷が近づくにつれ E はマイナス (安定) になります。



F, E ともに $r \rightarrow \infty$ のとき 0.

Q, Q' は同符号のとき斥力 ($F \geq 0, E \geq 0$)、異符号のとき引力 ($F \leq 0, E \leq 0$).

Q : 粒子1の電荷 ($\overset{\text{クーロン}}{C}$)

Q' : 粒子2の電荷 (C)

ϵ_0 : 真空の誘電率 ($8.854 \times 10^{-12} C^2 J^{-1} m^{-1}$)

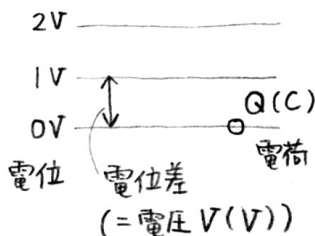
r : 2つの物体の中心間の距離 (m)

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ'}{r}$$

2.4 電位で表される電気的位置エネルギー

静電気力による位置エネルギーを「電位」によって直接表す方法があります。電位の単位は V です。1 V 高い電位に $1 \overset{\text{クーロン}}{C}$ の電荷を移動させるには、 $1 \overset{\text{ジュール}}{J}$ のエネルギーが必要です。

乾電池は化学反応により、1.5 V の電位を生じています。乾電池のプラス側 (正極) からマイナス側 (負極) に電気抵抗を介して $1 C$ の電荷が移動すれば、 $1.5 J$ の熱が発生することになります。電流の単位 A は、1秒あたりに流れる電荷量を表しています ($A = C/s$)。1.5 V の電位差 (電圧ともいう) で $1 A$ の電流が流れれば、1秒あたり $1.5 J$ の熱が発生します。



$$\Delta E = QV$$

電荷 $1 C$ の $1 V$ の電位の移動で $1 J$ が位置エネルギーに相当。 ($CV = J$)

Q : 粒子の電荷 (C)

V : 電位差 (=電圧) ($\overset{\text{ボルト}}{V}$)

2.5 バネによる位置エネルギー (弾性エネルギー)

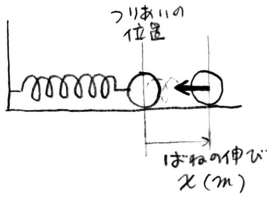
「バネ」はのびに比例した力を生じます (フックの法則)。

$$F = -kx$$

x は「つりあいの位置」からの距離です。バネを伸ばせば ($x > 0$) 縮む方向に、バネを縮めれば ($x < 0$) 伸びる方向に力が働きます。

E (式は下) は「つりあいの位置」が最小値 ($E = 0$) となった2次関数となります。位置エネルギーはどれも「基準の位置」での位置エネルギーとの差 (ΔE) で表されますが、基準の位置が明確なときには Δ を省き、単に E と表記する場合があります。

分子内の原子間の結合は「バネ」のようなものと近似されるので (つりあいの位置があり、その距離を中心に振動運動している)、この形のポテンシャルエネルギーはよく出てきます。調和振動子とも呼ばれます。



$$E = \frac{1}{2}kx^2$$

k : バネ定数 (N/m)

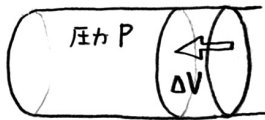
x : バネの伸び (m)

3 物質に対する仕事

「熱 (heat)」と「仕事 (work)」はエネルギーの一種であり、エネルギーの移動を表す用語です。対象とする物質 (「系」と呼ぶ) と周囲の間でエネルギーがやり取りされるとき、温度差に起因するエネルギー移動を「熱」、圧力などの力学的な要因によるエネルギー移動を「仕事」と呼びます。

3.1 圧縮仕事

外から高い圧力をかけて気体を圧縮すると、系にエネルギーを与えることができます。逆に外の圧力を下げて気体を膨張させると、系からエネルギーを奪うことができます。この時のエネルギー移動量は、下記の式で計算可能です。エアコンによる暖房、冷房はこのエネルギー移動を利用しています。



温度一定 (等温過程)、かつ理想気体では

$$\begin{aligned} \Delta E &= - \int_{V_i}^{V_f} P dV = - \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} dV \\ &= -nRT \ln \frac{V_f}{V_i} \end{aligned}$$

圧力一定の時 (等圧過程)、

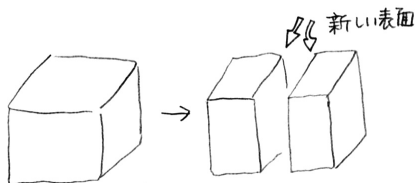
$$\Delta E = -P\Delta V = -P(V_f - V_i)$$

- P : 圧力 (パスカル Pa = N/m²)
- V_i : 初期状態の体積 (m³)
- V_f : 最終状態の体積 (m³)
- n : 物質質量 (mol)
- R : 気体定数 (8.314 J K⁻¹ mol⁻¹)
- T : 温度 (ケルビン K)

3.2 表面張力 (表面自由エネルギー)

固体や液体の「表面」を作り出すにはエネルギーが必要です。表面張力 γ は「表面自由エネルギー」とも呼ばれ、新しい表面を 1 m² 作るのに必要なエネルギーに相当しています。単位は J/m² です。

表面自由エネルギーは物質ごとに決まった値を持ち、また温度で変化します。宇宙空間で液滴が丸くなるのは、高いエネルギーを持ち不安定な「表面」をできるだけ小さくしようという働きによるものです。



$$\Delta E = \gamma \Delta A$$

- γ : 表面張力 (J/m² = N/m)
- A : 表面積 (m²)

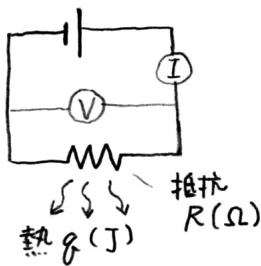
例: 水 72.8 ミリ mN/m, アセトン 23.3 mN/m

4 熱エネルギー

温度差に起因するエネルギー移動を「熱」と呼びます。

4.1 ヒーター (抵抗) に電流を流したときの発熱

ヒーター (電気抵抗) に電圧をかけて電流を流すと、ヒーターが加熱して周囲へと「熱」が放出されます。2.4 でも述べたように、そのときに発生する熱は次の式で計算されます。



$$E = VIt$$

抵抗値と、電圧、電流はオームの法則に従う。

$$V = IR$$

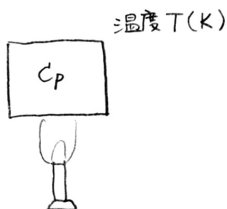
V : 電圧 (V)
 I : 電流 (A = C/s)
 R : 抵抗値 (Ω)
 t : 通電時間 (s)

4.2 物体のたくわえる熱 (内部エネルギー)

物質に仕事や熱の形でエネルギーを与えると、温度が上昇します。温度が上昇した物質に、低い温度の物質を接触させると、「熱」としてエネルギーが高温側から低温側へと流れます。

つまり、温度の高い物質はその内部に「エネルギー」を蓄えていると考えられます。このようなエネルギーを「内部エネルギー (internal energy)」といいます。その正体は、物質を構成している原子や分子の運動エネルギーです。

物質にエネルギーを与えたときにどのくらい温度が上がるかは、物質によって個性があります。物質の温度を 1 K 上げるのに必要なエネルギーを「熱容量」(C_P) といいます。熱容量の大きな物質 (例えば水 $C_P = 4.2 \text{ J K}^{-1} \text{ g}^{-1}$) は、温度を上げ下げするのに大きなエネルギー移動が必要なので「温まりにくく冷めにくい」物質、逆に熱容量の小さな物質 (例えば鉄 $C_P = 0.45 \text{ J K}^{-1} \text{ g}^{-1}$) は、温度を上げ下げするのに小さなエネルギー移動でよいので「温まりやすく冷めやすい」物質といえるでしょう。



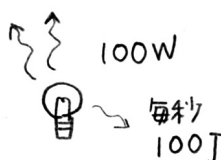
$$\Delta E = C_P \Delta T$$

定圧熱容量 (C_P) は一定の圧力において物体の温度を 1 K 上げるのに必要なエネルギー。

C_P : 定圧熱容量 (J/K)
 ΔT : 温度差 (K)

5 仕事率からの定義

ヒーターや家電製品、また発電機などでは、1秒当たりのエネルギー消費量(発生量)が示されています。これを仕事率 P (単位 $\overset{\text{ワット}}{\text{W}}$) といい、仕事率に時間をかけると消費、あるいは発生(変換)したエネルギー量となります。



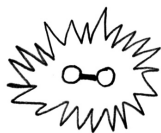
100 W の電球は毎秒 100 J のエネルギーを放出。

$$E = Pt$$

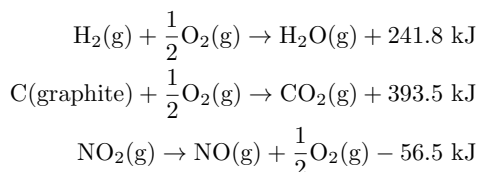
P : 仕事率 ($\overset{\text{ワット}}{\text{W}} = \text{J/s}$)
 t : 時間 (s)

6 化学エネルギー

燃焼反応などによって化学結合が組み替えられ、より強い化学結合が生じると熱が発生します。逆に外から熱を与えることで、新しい化学結合を形成させる場合もあります(吸熱反応)。発生あるいは吸収される熱は化学反応ごとに定まっており、物質ごとのモル生成エンタルピー ($\Delta_f H$) として整理されています。



反応熱(熱化学方程式)の例:



物質	化学式	$\Delta_f H^\circ$ / kJ mol^{-1}
アセチレン(エチン)	$\text{C}_2\text{H}_2(\text{g})$	226.7
一酸化窒素	$\text{NO}(\text{g})$	90.4
エチレン(エテン)	$\text{C}_2\text{H}_4(\text{g})$	52.3
ベンゼン	$\text{C}_6\text{H}_6(\text{l})$	49.0
二酸化窒素	$\text{NO}_2(\text{g})$	33.9
水素	$\text{H}_2(\text{g})$	0
酸素	$\text{O}_2(\text{g})$	0
黒鉛	$\text{C}(\text{s, graphite})$	0
メタン	$\text{CH}_4(\text{g})$	-74.8
一酸化炭素	$\text{CO}(\text{g})$	-110.5
シクロヘキサン	$\text{C}_6\text{H}_{12}(\text{l})$	-156.4
水蒸気	$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	-241.8
水	$\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	-285.8
二酸化硫黄	$\text{SO}_2(\text{g})$	-296.8
二酸化炭素	$\text{CO}_2(\text{g})$	-393.5
三酸化硫黄	$\text{SO}_3(\text{g})$	-395.7

表 298.15 K, 1 bar におけるモル生成エンタルピー

モル生成エンタルピー ($\Delta_f H$) の例:

エンタルピーは熱力学で扱う物理量のひとつで、物理化学 III で習います。

生成物の $\Delta_f H$ の和(それぞれの反応係数をかけたもの)から反応物の $\Delta_f H$ の和を引くことで反応熱を求めることができます。(プラスの場合吸熱、マイナスの場合発熱。)

$\Delta_f H$ がプラスで大きい物質は高い化学エネルギーを持っており、 $\Delta_f H$ が低い物質に変換することで多くの熱を放出します。

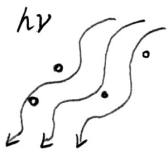
7 放射(放射) エネルギー

エネルギーは電磁波の形でも移動します。化学分野では次の式としてよく登場します。

$$E = h\nu$$

光を含む電磁波は「波」ですが、「粒」としての性質も持っています。電磁波の粒「1個」のエネルギーは、電磁波の振動数 ν に比例しています。比例定数はプランク定数 h ($h = 6.63 \times 10^{-34}$ J s) です。

分子は特定の波長の電磁波(紫外線、可視光、赤外線など)を吸収します。可視光を吸収する物質は、我々の目には「色」がついて見えます。吸収する波長から、分子を特定したり、どのような電子軌道エネルギー、分子振動エネルギーを持っているかを調べることができます。



電磁波の波長 λ , 振動数 ν , 光速 c には以下の関係がある。

$$\lambda\nu = c$$

h : プランク定数

(6.63×10^{-34} J s)

ν : 電磁波の振動数 (Hz = s⁻¹)

λ : 電磁波の波長 (m)

c : 光速度 (3.00×10^8 m/s)

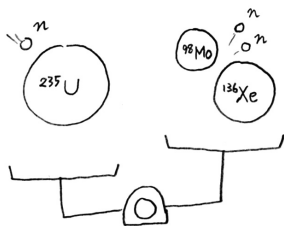
8 質量エネルギー

アインシュタインは相対性理論により、下記の式のように質量 m もエネルギーの一形態であることを示しました。 E は質量エネルギー、 c は光速度です。

$$E = mc^2$$

核分裂反応や核融合反応は桁外れに大きな熱エネルギーを発生します。核分裂前のウラン 235 は中性子がぶつかることで、キセノン 136 とモリブデン 98 に分裂します(他の核種に分裂することもある)。このとき、核反応前と核反応後の質量を比べると、反応後のほうがわずかに軽くなっているのです(減少分は元の質量の 0.8%)。この失われた質量が、上の式に従い熱エネルギーに変換されたと考えることができます。

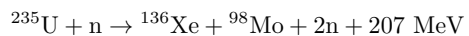
このことから、通常は成り立っているように見える「質量保存則」は成り立っておらず、「エネルギー保存則」が正しい法則であることがわかります。ただし、質量が世界から消え失せてしまうような反応は、核分裂反応や核融合反応に限られると考えて良いでしょう。



m : 物質の質量 (kg)

c : 光速度 (3.00×10^8 m/s)

例: ウランの核分裂 (生成核種は不定)



MeV (メガエレクトロンボルト) はエネルギーの単位で、1 MeV は 96.3 ^{メガ}GJ/mol に相当。