

## ◆エネルギーの形態◆

「エネルギー」は最も重要な物理量のひとつである。エネルギーにはいろいろな形態があるが(重力エネルギー、運動エネルギー、熱エネルギー、弾性エネルギー、電気エネルギー、化学エネルギー、放射エネルギー、核エネルギー、質量エネルギーなど)、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ても)一定である。[エネルギー保存の法則]

各エネルギー形態を表す式を以下に紹介する。 $F$  は力 (単位:  $\overset{\text{ニュートン}}{\text{N}} = \text{kg m s}^{-2}$ )、 $E$  はエネルギー (単位:  $\overset{\text{ジュール}}{\text{J}} = \text{N m} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ) である。

### 1 運動エネルギー



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

$m$  : 物体の質量 (kg)  
 $v$  : 物体の速さ ( $\overset{\text{メートル}}{\text{m}}/\overset{\text{毎秒}}{\text{s}}$ )

### 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)

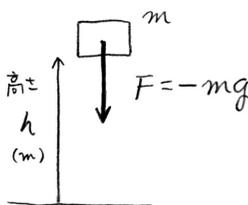
エネルギーは(力 × 距離)の次元を持っている。力が変化する場合も含めて考えるとエネルギー変化  $\Delta E$  は

$$\Delta E = - \int F dx$$

と表される。

エネルギー  $E$  は対象物が得をするとき(エネルギーを得るとき)を正とするので、 $-$ がつく。

#### 2.1 重力による位置エネルギー (地表近く)



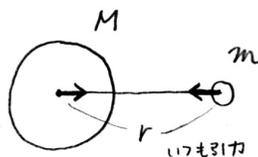
重力による力は質量に比例する。

$$F = -mg$$

$m$  : 物体の質量 (kg)  
 $g$  : 重力加速度 (9.8 m/s<sup>2</sup>)  
 $h$  : 高さ (m)

$$\Delta E = mgh$$

#### 2.2 重力による位置エネルギー (宇宙スケール)



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

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

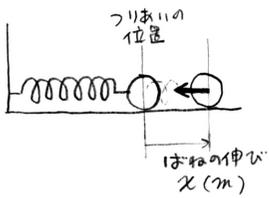
$E$  は  $r \rightarrow \infty$  のとき 0。

$M$  に地球の質量、 $r$  に地球の半径を代入すると  $GM/r^2 = g$  (2.1 に出てきた重力加速度) になる。

重力はどんな場合でも引力 ( $F \leq 0, E \leq 0$ )。

$M$  : 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 バネによる位置エネルギー (弾性エネルギー)



力はバネの伸びに比例する。

$$F = -kx$$

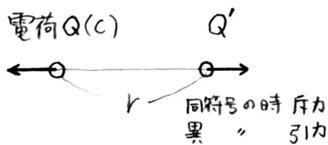
(フックの法則)

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

$k$  : バネ定数 (N/m)

$x$  : バネの伸び (m)

### 2.4 電荷による位置エネルギー



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

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

$E$  は  $r \rightarrow \infty$  のとき 0。  
 $Q, Q'$  は同符号のとき斥力 ( $F \geq 0$ )、異符号の時引力 ( $F \leq 0$ )。

式の形が 2.2 と同じになっていることに注目。

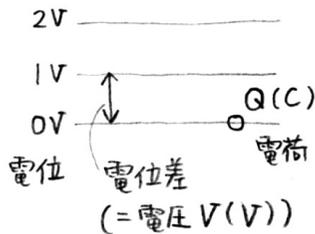
$Q$  : 粒子 1 の電荷 (クーロン)

$Q'$  : 粒子 2 の電荷 (C)

$\epsilon_0$  : 真空の誘電率 ( $8.854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ )

$r$  : 2 つの物体の中心間の距離 (m)

### 2.5 電位による位置エネルギー



$$\Delta E = QV$$

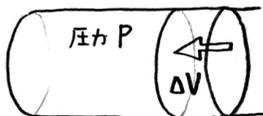
電場中で、電荷 1 C を移動させるのに 1 J 必要であるとき、その電位差は 1 V。

$Q$  : 粒子の電荷 (C)

$V$  : 電位差 (=電圧) (V)

## 3 物質に対する仕事

### 3.1 圧縮仕事



圧力一定の時 (等圧過程)、

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

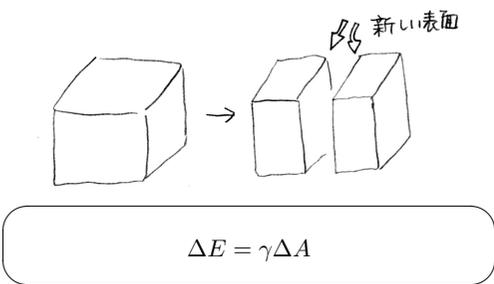
温度一定 (等温過程)、かつ理想気体では

$$\Delta E = - \int_{V_i}^{V_f} P dV = - \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} dV$$

$$= -nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$$

- $P$  : 圧力 (Pa = N/m<sup>2</sup>)
- $V_i$  : 初期状態の体積 (m<sup>3</sup>)
- $V_f$  : 最終状態の体積 (m<sup>3</sup>)
- $n$  : 物質質量 (mol)
- $R$  : 気体定数 (8.314 J K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>)
- $T$  : 温度 (K)

### 3.2 表面張力 (表面自由エネルギー)



表面張力  $\gamma$  は、新しい表面を 1 m<sup>2</sup> 作るのに必要なエネルギーに相当する。

- $\gamma$  : 表面張力 (J/m<sup>2</sup> = N/m)
- $A$  : 表面積 (m<sup>2</sup>)

$\gamma$  の単位として CGS 単位系の <sup>ダイン</sup> dyn/cm もよく使われる。1 dyn/cm は MKS 単位系だと 1 <sup>ミリ</sup> mN/m に相当。

例: 水 72.8 mN/m, アセトン 23.3 mN/m

### 4 仕事率からの定義



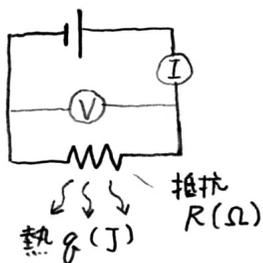
100 W の電球は毎秒 100 J のエネルギーを放出。放出されるエネルギー ( $E$ ) は

$$E = Pt$$

- $P$  : 仕事率 (<sup>ワット</sup> W = J/s)
- $t$  : 時間 (s)

### 5 熱エネルギー

#### 5.1 ヒーター (抵抗) に電流を流したときの発熱



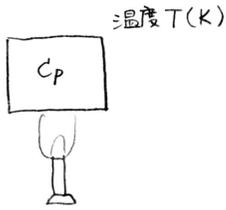
$$E = VIt$$

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 (<sup>アンペア</sup> A = C/s)
- $R$  : 抵抗値 (<sup>オーム</sup> Ω)
- $t$  : 通電時間 (s)

## 5.2 物体のたくわえる熱



$$\Delta E = C_v \Delta T$$

$$\Delta E = C_p \Delta T$$

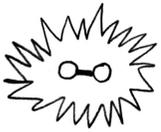
熱容量 ( $C_v$ ,  $C_p$ ) は物体の温度を 1 K <sup>ケルビン</sup> 上げるのに必要なエネルギー。

$C_v$  : 定積熱容量 (J/K)

$C_p$  : 定圧熱容量 (J/K)

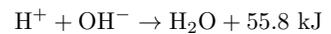
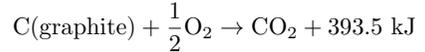
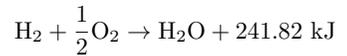
$\Delta T$  : 温度差 (K)

## 6 化学エネルギー

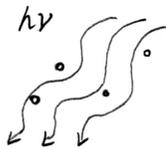


化学結合に伴うエネルギー。  
より強い結合が作られると、より多くの熱が放出される。

例:



## 7 放射(放射) エネルギー



$$E = h\nu$$

電磁波を粒子と見たときの、一粒あたりのエネルギー。

$\lambda$ ,  $\nu$ ,  $c$  には以下の関係がある。

$$\lambda\nu = c$$

$h$  : プランク定数

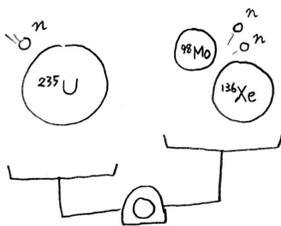
( $6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$ )

$\nu$  : 電磁波の振動数 ( $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ )

$\lambda$  : 電磁波の波長 (m)

$c$  : 光速 ( $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

## 8 質量エネルギー



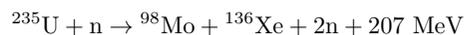
$$E = mc^2$$

相対性理論により「質量」もエネルギーの一形態であることが示された。ただし、質量が失われるのは核分裂反応や核融合反応時に限られると考えて良い。

$m$  : 物質の質量 (kg)

$c$  : 光速 ( $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

例: ウランの核分裂 (生成核種は不定)



1 MeV は 96.3 <sup>ギガ</sup> GJ/mol に相当。