

2006 年度 経済と環境 「エネルギー問題について」

青木 健一郎
経済学部 日吉物理学教室

2006 年度 春学期

内容

1. エネルギーとエントロピー，熱力学の基本法則
2. エネルギー変換
3. 地球温暖化問題と二酸化炭素 (CO₂)
4. 電気エネルギーへの変換
5. 原子力
6. 太陽エネルギーの利用
7. 他のエネルギー変換方法

目的

- 基本的な概念の理解
- エネルギー関係の基本的な問題の理解
- おおざっぱな数字の概算 (オーダー, 半定量的な理解)
- 「地球温暖化問題」とは?
- 主要なエネルギー変換の方法の理解 . 化石燃料, 原子力, 太陽エネルギー, 等 .

10 のべき乗 — 10^n

- 10^n ($n = 1, 2, 3, \dots$) とは

$$\overbrace{10 \times 10 \times \dots \times 10}^n = 1 \overbrace{00 \dots 0}^n$$

と 10 を n 回かけ合わせたもの . たとえば

$$10^3 = 1 \overbrace{000}^3, \quad 10^{10} = 1 \overbrace{0000000000}^{10}$$

$$10^{50} = 1 \overbrace{00}^{50}$$

- 大きい数や小さい数を扱い際は非常に便利な記述法である。

-

$$10^m \times 10^n = 10^{m+n} \quad (1)$$

例: $10^3 \times 10^2 = 1000 \times 100 = 100000 = 10^5$

-

$$10^{-n} = \frac{1}{10^n}$$

$$10^{-3} = \frac{1}{10^3} = \frac{1}{1000} = 0. \overbrace{001}^3$$

- べき乗のかけ算の公式 (1) は指数(べき) が正でも負でも成り立つ。

$$10^5 \times 10^{-3} = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times \frac{1}{10 \times 10 \times 10} = 10^2 = 10^{5-3}$$

- $10^0 = 1$

$$10^n \times 10^{-n} = 1 = 10^{n+(-n)} = 10^0$$

- 便利な使い方 :



$$\frac{1}{10^{-n}} = \frac{1}{\frac{1}{10^n}} = 10^n$$



$$(10^m)^n = \overbrace{(10^m) \times (10^m) \times \dots \times (10^m)}^n = 10^{mn}$$

- 科学的記法: $x \times 10^n$, ($1 \leq x < 10$, n : 整数)

$$0.0052 = 5.2 \times 10^{-3}, \quad 120000 = 1.2 \times 10^5, \text{ etc.}$$

- 概算の例: 一人あたり常時 1kW 使ったとすると日本での 1 年あたりの総電力消費量は?

$$1 \text{ kW} \times 365 \text{ 日} \times 24 \text{ h} \times 10^8 \text{ 人} \sim 0.9 \times 10^{12} \text{ kWh}$$

実際の発電電力量は 0.94×10^{12} kWh (2003 年) なので概算としては良い。世界全体の発電電力量はその 10 数倍程度である。これもオーダーとしてはもっともであろう。世界全体の一次エネルギー供給量(電力以外も含む)はオーダーとして 10^{14} kWh である。

エネルギー

- 仕事 = エネルギーの変化, 仕事 = 力 × 距離
- 種類: 運動エネルギー, 熱エネルギー, 電気エネルギー, 位置エネルギー (重力, 電気, など), *etc.*

-

$$\text{運動エネルギー} = \frac{1}{2}m\vec{v}^2 \quad (m: \text{質量}, \vec{v}: \text{速度})$$

- ♣ 質量 m に比例するのは直感的に明らか
- ♣ 速度 v に比例はできないのもっとも簡単な式

- エネルギーの単位: J (ジュール) = $kg \cdot m^2/s^2$

例:

- ♣ 1 cal = 4.2 J (1 cal は水 1 g を 1° C 上げるのに必要なエネルギー)
- ♣ 100 W の電球 = 1 秒に 100 J エネルギー消費 . ([W] = [J/s])
- ♣ 1 kWh = 1 kJ/s \times 60 \times 60 s = 3600 kJ
- ♣ 走る人の運動エネルギー $\sim 100 \text{ kg} \times (10 \text{ m/s})^2/2 \sim 5000 \text{ J}$
- ♣ 水 200 g を沸騰させるのに必要なエネルギー

$$\sim 4 \text{ J/g} \cdot \text{K} \times 200 \text{ g} \times 100 \text{ }^\circ\text{K} = 8 \times 10^4 \text{ J}$$

- ♣ 100 回腕立て伏せをしたときの仕事 .

$$\sim 100 \text{ kg} \times 0.5 \text{ m} \times 10 \text{ m/s}^2 \times 100 \text{ 回} = 5 \times 10^4 \text{ J}$$

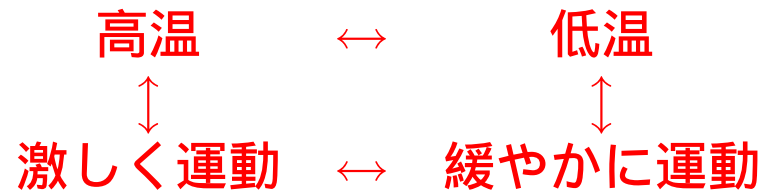
- **エネルギーの保存 (熱力学の第一法則)**
 - ♣ エネルギーはいろいろな形態を取るが、**保存**されている。いつも全体で同じ量しか存在しない。
 - ♣ 19 世紀より知られており、非常に高い精度で検証されている。
- **エネルギー変換** — エネルギーは作り出すものではなく、変換するものである。
 - ♣ 水力発電: 重力エネルギー (の一部) を電気エネルギーに変換
 - ♣ 火力発電: 反応前後の物質の持つエネルギーの差 (の一部) を電気エネルギーに変換

温度

温度 (絶対温度) = 1 自由度あたりの平均の運動エネルギー

- 原子, 分子は常に運動している.

-



- 絶対温度 $273^{\circ}\text{K} = 0^{\circ}\text{C}$, $0^{\circ}\text{K} = -273^{\circ}\text{C}$ (負の絶対温度は存在しない)

- 温度はエネルギーの単位を持っていないので単位を換算する必要がある。(温度をエネルギーの単位で測る必要がある。運動エネルギー = $kT/2$, $k = 1.4 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1} = R/N_{\text{Avogadro}}$)
- 例：空気 = 空気分子 (主に窒素 N_2 , 酸素 O_2 が自由に飛び回っている状態)。室温での平均の速度は $\sim 500 \text{ m/s}$. (cf. 音速 $\sim 350 \text{ m/s}$. 圧力に依存しない.)
- 平均のエネルギーでありエネルギーの高い粒子も低い粒子もいる。(cf. 統計的分布)
- 自由度の数, 1 原子分子の場合 3, 2 原子分子の場合 5, etc. 1 粒子あたり 1 のオーダーである。

非可逆性の簡単な例

- 拡散現象 気体が 2 倍の体積の箱に広がる .
- 個々の粒子は元の箱に戻る確率は $\frac{1}{2}$.
- 粒子の数を N とするとある時点で全ての粒子が元の箱に戻っている確率は

$$\frac{1}{2^N}$$

- 現実的な数字を入れると $N \sim 10^{24}$

$$\text{全て元の箱に戻っている確率} = \frac{1}{2^N} \sim \frac{1}{10^{10^{23}}}$$

これはとてつもなく低い確率．絶対起きないと言ってよい．

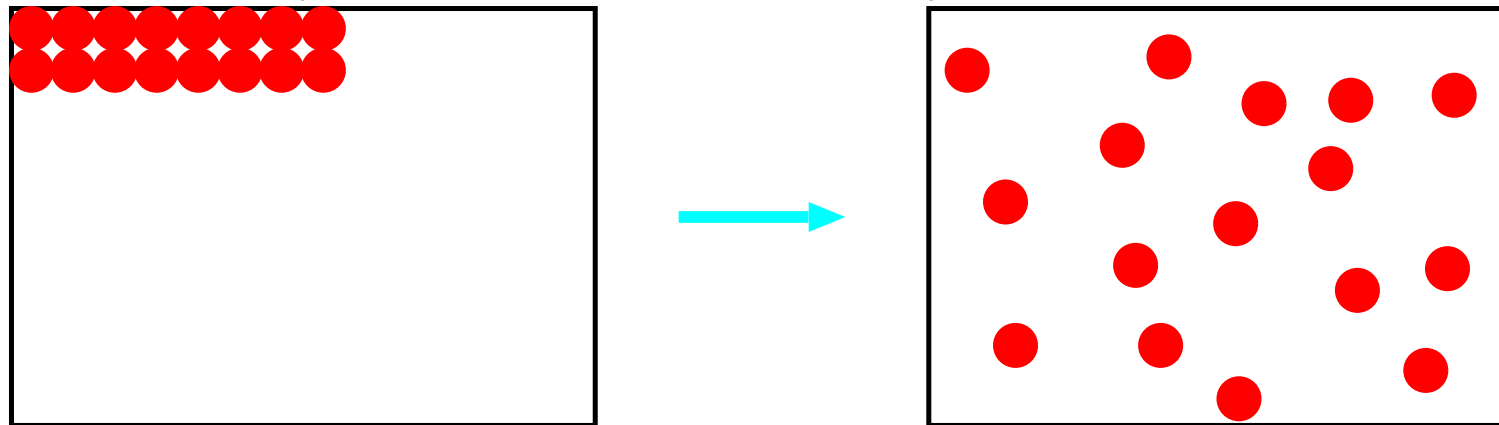
- 時間の方向性はどのように特徴づけられるのだろうか？

時間の矢と熱力学の第二法則

時間とともに全体の乱雑さ (entropy) は増大する。(熱力学の第二法則)

- 乱雑さ (entropy) とは? 例:

- ♣ 子供とおもちゃ (散らかす = 乱雑さが増す)



遊ぶ前に整理されていたおもちゃはあとは散らかっている。

♣ 高温物質から低温物質への熱の移動



高温と低温の物体を接触させると皆同じ温度になる。

● 一般の entropy の定義 (Boltzmann)

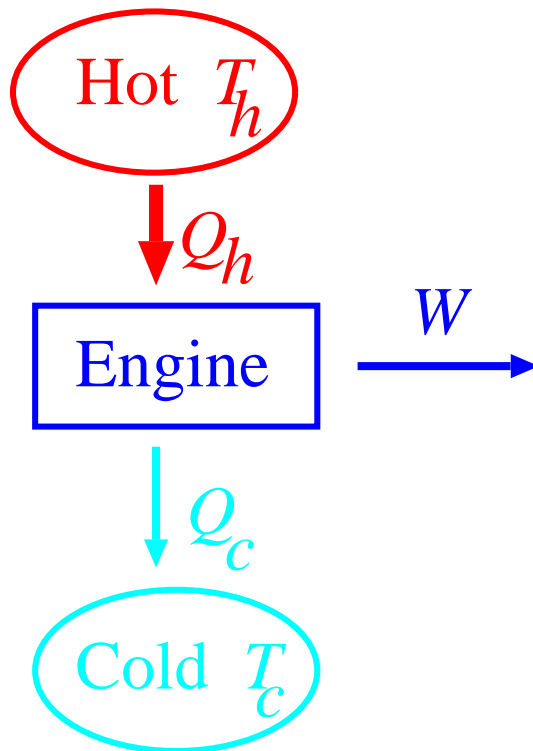
$$S = \log W \quad (W = \text{状態の数})$$

- 熱力学の基本的な法則からはどのようなものも逃れられない (物質, 宇宙, 生物, *etc.*)
- 熱力学の第一法則 (エネルギーの保存) には時間の非可逆性は一切無い。時間の方向性を決めるのは熱力学の第二法則 (entropy 増大) である。

- 情報理論における「Shannon の情報量」はエントロピー (のようなもの) を情報にあてはめたものである。(情報エントロピー, Claude Shannon, 1948)
- 熱力学の第二法則の様々な表現のしかた
 - ♣ 一定温度でエネルギーを取り出し, それ以外を元の状態に戻すことはできない.
 - ♣ エネルギーは自然に低温から高温の物質に移ることはない.
- もっとも効率の良い熱機関 = 可逆的熱機関
- 熱力学の第二法則による熱機関の最高の効率

$$\text{効率} = \frac{W}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} \leq 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

どんな熱機関 (*eg.* エンジン, 火力発電, *etc.*) もこの効率は越えられない .



熱機関一般の概念図 . $Q_c = 0$ は不可能 .

$$\text{効率} = \frac{W}{Q_h} \leq 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

♣ 例: 室温 300 K, 室温より 100 度高いエンジン . → 非効率 !

$$\text{最高効率} = 1 - \frac{300}{400} = 1 - \frac{3}{4} = \frac{1}{4} \quad !!!$$

- ♣ 高温のエンジンの方が有利 . しかしあまり高温だと
- * 熱のロスが大きい .
 - * エンジンの耐久性 .
 - * 安全性の問題 .