熱と気体

1 導入

この講義で最重要なのは、**気体の状態を P, V, T で表し、熱・仕事・内部エネルギーの出入りを区別すること**です。

熱力学でつまずきやすいのは、記号は少ないのに、Q、W、ΔU の向きと意味が頭の中で混ざりやすいことです。この講義では、まず状態を表す量と出入りするエネルギーを分け、そのあとで状態変化ごとに何が残るかを見ます。

2 用語と定義

状態方程式 (Equation of state) は、

$$PV = nRT$$

です。

熱量 (Heat) は温度差によって移動するエネルギーです。

熱力学の第 1 法則 (First law of thermodynamics) は、

$$\Delta U = Q - W$$

です。

3 方針

まず P, V, T のどれが変わり、どれが一定かを見ます。そのあと、仕事 W と内部エネルギー U の関係を第 1 法則で整理します。

→ 講義 熱力学第一法則 lecture physics thermodynamics
https://study.bem130.com/lecture/physics/thermodynamics/熱力学第一法則-講義/

大事なのは、最初から公式を機械的に当てないことです。まず「体積が変わるか」から仕事の有無を見て、「温度が変わるか」から内部エネルギーの変化を見ます。

4 直感的な説明

気体は粒子が激しく動いていて、その勢いが圧力です。体積を広げると気体は外へ仕事をします。熱を加えると、その一部は内部エネルギーを増やし、一部は仕事へ回ります。

力学では 1 個の物体に注目して運動を追いましたが、熱力学では無数の粒子をまとめて見ます。だから、位置や速度ではなく P, V, T のような巨視的な量で状態を押さえます。

5 厳密な説明

5.1 1. 状態方程式

$$PV = nRT$$

は、圧力 P、体積 V、絶対温度 T を結びます。

この式を使う理由は、熱力学では気体 1 個 1 個の位置や速度を追わず、全体を P, V, T という巨視的な量で記述したいからです。つまり $PV = nRT$ は、理想気体を巨視的に扱うための基本モデルです。

この式は、3 つの量が独立ではなく、2 つを決めると残り 1 つが決まることを言っています。したがって問題では、「何が一定か」を先に読み取ることが重要です。

ただし、$PV = nRT$ は「どんな気体にも厳密に成り立つ法則」ではなく、分子間力や分子の大きさを無視できる理想気体の近似です。だからこの講義で状態方程式を使うときは、暗黙に理想気体を前提にしています。

5.2 2. 第 1 法則

$$\Delta U = Q - W$$

で、Q は加えた熱量、W は気体が外部にした仕事です。

これは気体に注目したエネルギー保存です。外部から熱 Q が入ると気体のエネルギーは増えますが、そのうち W だけを外へ仕事として渡したなら、内部に残る増分は

$$\Delta U = Q - W$$

になります。

この符号の意味を固定しておくことが大切です。$W > 0$ は「気体が外へ仕事をした」場合なので、そのぶん内部エネルギーは減る向きに働きます。

5.3 3. 仕事 $W = \int P\,dV$ が出る理由

気体がピストンを押している場面を考えます。ピストンの断面積を S、微小距離だけ動いた量を dx とすると、気体がピストンに及ぼす力は

$$F = PS$$

です。したがって微小仕事は

$$dW = F\,dx = PS\,dx$$

です。ここで $S\,dx = dV$ は体積の増加分だから

$$dW = P\,dV$$

となり、積分して

$$W = \int P\,dV$$

を得ます。

5.4 4. 状態変化をどう見分けるか

体積が変わらなければ $W = 0$ です。温度が一定なら、理想気体では内部エネルギーは温度だけで決まるので $\Delta U = 0$ です。ここを先に押さえると、残りの量が自動的に決まります。

この判定で大事なのは、「何が一定か」と「どの法則を使ってよいか」を混同しないことです。たとえば等温変化で $\Delta U = 0$ と置けるのは、理想気体の内部エネルギーが温度だけで決まる、という事実を使っているからです。したがって実在気体では、そのまま使えない場合があります。

5.5 5. 具体例

等積変化では V 一定なので $W = 0$ です。したがって

$$\Delta U = Q$$

です。つまり与えた熱は全部内部エネルギーへ行きます。

等温変化では T 一定なので、理想気体では $\Delta U = 0$ と見て

$$Q = W$$

です。つまり加えた熱は、そのまま仕事に出ていきます。

断熱変化では $Q = 0$ なので

$$\Delta U = -W$$

です。したがって気体が外へ仕事をすれば、そのぶんだけ内部エネルギーが減り、理想気体では温度も下がります。ここで「熱の出入りがないこと」と「温度が一定であること」は全く別の条件だと区別することが重要です。

さらに等温変化で仕事そのものを出したいなら、$PV = nRT$ から

$$P = \frac{nRT}{V}$$

だから、

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P\,dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V}\,dV$$

です。ここで等温変化では T が一定なので

$$W = nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = nRT \log \frac{V_2}{V_1}$$

を得ます。したがって理想気体の等温変化では

$$Q = W = nRT \log \frac{V_2}{V_1}$$

です。

この 2 つは対照的です。等積変化では仕事がないので熱は全部内部へ入り、等温変化では内部が増えないので熱は全部仕事へ出ます。

6 別の見方

力学では運動エネルギーを見ましたが、熱力学では粒子の無数の運動をまとめて内部エネルギーとして見ます。保存の見方は同じでも、主役が巨視的な状態量へ変わります。

7 見分け方

- P, V, T が出てきたら、まず状態方程式を疑います。
- 熱量、仕事、内部エネルギーの 3 者が出たら、第 1 法則で整理します。
- 等積なら $W = 0$、等温なら理想気体で $\Delta U = 0$、という判定を先に思い出します。
- 符号で混乱したら、「気体が外へ仕事をしたら $W > 0$」に戻って考えます。

8 どこまで成り立つか

$PV = nRT$ は理想気体の近似です。高圧や低温では、実在気体の相互作用を無視できなくなります。また $\Delta U = 0$ を等温変化で使えるのも、理想気体の範囲です。したがって「等温だから必ず $\Delta U = 0$」ではなく、「理想気体の等温変化だから $\Delta U = 0$」と覚える必要があります。

9 最終形

$$\boxed{PV = nRT}$$

$$\boxed{\Delta U = Q - W}$$

10 一言でいうと

- 気体では P, V, T を見て状態を押さえます。
- 熱と仕事の出入りは $\Delta U = Q - W$ で整理します。

11 関連リンク

→ 講義 仕事と力学的エネルギー lecture physics mechanics
https://study.bem130.com/lecture/physics/mechanics/仕事と力学的エネルギー-講義/