

『熱の科学』実験指導テキストの紹介

『熱の科学』は、平成 19 年から 21 年にかけて、放送大学面接授業（2 日間の集中授業）のために筆者が企画立案したものであり、このテキストはその際に作成したものである。放送大学面接授業は、受講者に高卒者、主婦、大学生、企業をリタイアした方など、物理学の履修度合いに大きなバラつきがあるのが特徴である。よって、数学は初等的なものに留め、実験を中心とした理解しやすい授業を目指した。

物理学は精密科学であるが、精緻を尽くそうとすれば実験装置はブラックボックスになりがちである。教育に必要なことは、実際に何が動いているかを知ることであるから、そのためには、精密さを多少犠牲にしても（定性的な実験であっても）、簡易な、見通しのよい実験のほうが好ましいと思われる。そうした観点で、ここでは次の 4 つの簡易な小実験を企画した。

- A、仕事等量
- B、比熱
- C、空気の状態方程式
- D、サイクル過程

A では、よくあるような電熱線を用いた方法ではなく、ペットボトルにいった 100 cc の水を振るだけのものである。これだけのことで、 $1 \text{ cal} = 4 \text{ J}$ 程度の結果が出る。女性は大さめに、男性は大きめに出る。統計を取ってみると、興味深い。B では、物質の種類によらない普遍的な現象として、固体のモル比熱を選んだ。希薄極限の気体が、物質の種類によらない「理想気体」になることと併せて紹介する。C、D では、2.5 ml のシリンジを用いる。熱源として、スチロールコップに入れた 80°C 程度のお湯を用いるが、冷めないうちに手早く行えば、充分定量に耐える結果が得られる。C では気体定数が (8.31 J/mol K のところを) 6~8 程度の数字が出るし、(V-T グラフでの外挿値としての) 絶対温度も -200°C くらいの数値が得られる。D では、もちろん準静的な操作ではあり得ないが、P-V グラフの上に描く曲線がこのような操作に相当するのであったということが理解しやすい。これらの小実験を種にして、講義を組み立てたのである。

熱の科学

放送大学面接授業
(平成 21 年 11 月 21 日～22 日)

担当 簗口 友紀

無断転載は禁止します

氏名

はじめに

- ・ こだわり：「簡易」実験 （精密さよりも見通しの良さ）

- ・ 熱現象のとらえ方

- ①熱力学・・・中身は問わない

- よくわからない対象を、刺激→反応 *リスト化*
(摂動→応答)

- 物質の種類によらない普遍性。

- 均質な物質では、なんとたった2つの独立変数！！

- (人間の精神状態の変数は？)

- ②統計力学・・・分子から出発

- たくさんの分子集団の統計を調べる。

- 分子の運動に普遍的な規則性（分布）。

- 「均質な物質では、なぜ2つの独立変数？」の答え

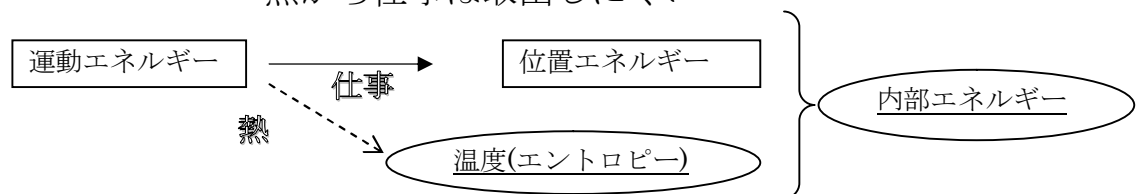
熱力学

・熱力学の骨格

力学・・・力学的エネルギー増分＝もらう仕事



熱力学・・・内部エネルギー増分＝もらう仕事＋もらう熱
熱から仕事は取出しにくい



熱の単位・・・仕事の単位との関係は？

実験 A 熱と仕事の等価性 (ペットボトル)

・熱平衡状態（「放置」の末に現れる巨視的に均一な状態）

熱現象に普遍性が現れる

(例：比熱、気体の体積・・・物の種類によらない)

実験 B 物質の比熱

実験C	空気の状態方程式（シリンジ）
-----	----------------

実験D	熱機関と冷凍機（シリンジ）
-----	---------------

- ・ 状態量（圧力、温度・・・）と非状態量（仕事、熱）
- ・ 熱力学第一法則
- ・ 代表的な熱力学過程、
サイクル過程（熱機関とヒートポンプ）、
熱からどれだけ力学的エネルギーが取り出せるか？

実験の手引

実験 A	熱と仕事の等価性 (ペットボトル)	一人ひとつ
------	-------------------	-------

- ・ ペットボトル、棒温度計を用意する。
- ・ ペットボトルに水を 100 g 取って、水温を測っておく。
- ・ しっかりふたを閉める。
- ・ 水温を一度上げたい。何回くらい振ったらよいか予想する。適当数振ってみて、頃合を見て水温を測る。
- ・ 水温が一度上昇したら、そこに至るまでに振った回数の合計を記録する。
- ・ 100 g の水の温度を一度上げるには、結局何 J の力学的エネルギーが必要であったか？

実験 B 物質の比熱 一人ひとつ

・断熱コップ、棒温度計、物質 (Cu, Fe, NaCl, Si, Al, Pb)、電熱器、石綿付き金網、ビーカー、割り箸を用意する。

・断熱コップに水を 100 g 取って机に置く。またビーカーには充分の湯を沸騰させておく。両者の温度を測っておき、それぞれ $t_0[^\circ\text{C}]$ 、 $t_2[^\circ\text{C}]$ とする。

・湯が沸騰する間に、用意された物質を観察しよう。ひとつずつ手にとって、一番熱容量の大きなものを予想しよう。

・比熱を測る物質 (元素および化合物) が 2 個ずつ 6 種類あるので、各自好きな物をひとつずつ取る。あらかじめデジタルスケールで重量を測っておく。NaCl は水に溶けてしまうため、プラスチック容器に入れてある。プラスチック容器の重量は 8[g] である。容器自体の熱容量は小さいので、無視して良い。

・物質を湯に入れ、数分煮る。(物質の温度が湯の温度に一致するまで。)

・充分煮えたら、割り箸を使い、やけどしないように物質を断熱コップの水に移す。水温の上昇を温度計にて観察し、上がり切ったところの温度をメモしておく (この時の温度を $t_1[^\circ\text{C}]$ とする)。

・この物質の熱容量 $C[\text{J/K}]$ はいくらか? 【ヒント 水の熱容量を C_0 として、 $C=C_0 (t_1-t_0) / (t_2-t_1)$ と書ける。なぜか?】

・この物質の比熱 $c [\text{J/g K}]$ はいくらか?

・この物質のモル比熱 $\hat{c} [\text{J/mol K}]$ はいくらか? 以下の分子量を参照のこと。

分子量一覧

(分子量とは、その分子 1mol (モル)、すなわちアボガドロ数個 (6.02×10^{23} 個) 集まった時のグラム数である。)

物質名	Cu	Fe	Na	Cl	NaCl	Si	Al	Pb
分子量	64	56	23	35	58	28	27	207

実験C	空気の状態方程式（シリンジ）	一人ひとつ
-----	----------------	-------

C-1

・2.5ml シリンジ（注射器）、ビニールキャップ、棒温度計、気圧計、グラフ用紙、キッチンスケール（共用）、断熱コップ、ものさしを用意する。

・まず部屋の気温（ t_0 [°C]）と大気圧（ P_0 [Pa]）を測り、記録する。

・シリンジの円筒の内径をものさしで測り、円筒の断面積 S を計算して記録する。（ピストンはずさない。そんなに厳密でなく、mm の単位でよい。）

・シリンジに 2.5ml の空気を取り、ビニールキャップをかぶせて密封する。ビニールキャップは、実験中にはずれて飛んで行ってしまうことがあるので、以下の操作は、ビニールキャップをおさえながら注意深く行う。

・ピストンを自由に動かして、空気の弾力をたのしむ。

・円筒およびビニールキャップをおさえながら、ピストンをキッチンスケールに押し付けて、ゆっくりと空気を圧縮する。体積 V が 2.0ml、1.5ml、1.0ml、0.5ml のそれぞれについて、キッチンスケールの目盛りを読み、重量 M を記録する。

V [ml]	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5
M [kg]	0				
P [Pa]					

・ P は V の、どのような関数になっているだろうか。表の数値から推定せよ。

・ PV を縦軸、 V を横軸に取り、グラフに描け。 V と P の関係は、結局どうであるか。

・操作の間、シリンジは熱を十分速く伝え、したがってシリンジ内の空気は外界の温度（ T_0 ）に常に一致するとしてよい。

・終わったら、ビニールキャップをはずして空気を少し抜き、空気の量を半分（ $V=1.25\text{ml}$ ）にして同様の測定を繰り返せ。次の表を埋めて、グラフを完成させ、 $V=2.5\text{ml}$ の場合と比較せよ。

V [ml]	1.25	1.0	0.75	0.50	0.25
M [kg]	0				
P [Pa]					

C - 2

・空気を密閉して温度を下げると、空気は縮む。室温 ($t_0[^\circ\text{C}]$) の時 $V=1.5\text{ml}$ の空気は、ポットの湯で温めると、何 ml になるか？ 断熱コップに湯を入れ、棒温度計で湯の温度 $t_1[^\circ\text{C}]$ を測ってからシリンジを浸して何 ml になるか観測せよ。また $V=2.0\text{ml}$ では？ 縦軸を $V[\text{ml}]$, 横軸を $t[^\circ\text{C}]$ としてグラフを描き、どこまで縮むのか想像せよ。

	$t_0[^\circ\text{C}]$	$t_1[^\circ\text{C}]$
V [ml]	1.5	
V [ml]	2.0	

低温の極限では、しまいに $V = 0$ となる温度 ($t_z = -300^\circ\text{C}$ 程度) があることがわかっただろうか。その温度をゼロ (絶対ゼロ度) として

$$T [\text{K}] = t[^\circ\text{C}] - t_z$$

を絶対温度と呼ぶ。

実験D 熱機関とヒートポンプ（シリンジ） 二人で一組

・2.5ml シリンジ、ビニールキャップ、棒温度計、気圧計、グラフ用紙、キッチンスケール、断熱コップ、熱湯を用意する。

・まず部屋の気温 (T_0) と大気圧 (P_0) を測り、記録する。

・シリンジに $V_0=1.5\text{ml}$ の空気を取り、ビニールキャップをかぶせて密封する。ビニールキャップは、実験中にはずれて飛んで行ってしまうことがあるので、以下の操作は、ビニールキャップをおさえながら注意深く行う。

・断熱コップに熱湯を注ぎ、棒温度計で温度 (T_1) を測っておく。

・シリンジ内の空気を、コップに入れて暖めて T_1 にする。それと同時に圧縮して体積を V_1 にする。結果現れる圧力を P_1 とした時、 P_1 の値は、暖め方縮め方によって変わるだろうか？ 以下の二通りのしかたで暖め／縮める。結果を予想する。

①まずピストンを押した後、体積が変わらないようにして暖める。

②体積が変わらないように暖めて後、ピストンを押して縮める。

① まずピストンを押して、 $V_1=1.0\text{ml}$ にする。ピストンを押しながら (V_1 を変えないようにして) シリンジを熱湯に浸し、充分暖める (数分待つ)。

シリンジを暖めたら、コップから取り出してキッチンスケールに押し付け、体積 V_1 の時の荷重 M_1 を測る。実験Bの要領で、 M_1 を P_1 に変換する。暖かい空気は数十秒で冷めてしまうので、二人で協力して手早く行うこと。

② まずピストンを押しながら (V_0 を変えないようにして) シリンジを熱湯に浸し、充分暖める (数分待つ)。

シリンジを暖めたら、熱湯に浸したままピストンを更に押し、体積を $V_1=1.0\text{ml}$ にする。コップから取り出してキッチンスケールに押し付け、体積 V_1 の時の荷重 M_1' を測る。実験Bの要領で、 M_1' を圧力 P_1' に変換する。暖かい空気は数十秒で冷めてしまうので、二人で協力して手早く行うこと。

・ P_1 と P_1' は等しかったか？ ①、②の P 、 V の移り変わりを、グラフ (縦軸を P 、横軸を V) にあらわせ。

演習

・力学の単位系を復習

問1. ①. 100g の物体が重力によって受ける力は何[N]か。重力加速度は $10[\text{m/s}^2]$ としてよい。

②. 重力に逆らって、その物体を 20[m]持ち上げた。物体が獲得する位置エネルギーは何[J] か。

問2. 問1の物体を自由落下させた。

①. 初速度をゼロとすると、落下 1[s]後、2[s]後、3[s]後の速度は何[m/s]か。

②. 20[m]落下させた時の速度は何[m/s]か。

③. 20[m]自由落下させた時、物体が獲得する運動エネルギーは何[J]か。

・圧力

問3. 27[g]の丸エンピツを平面で支える。

①. 平面にかかる力は何[N]か。

②. 尖った先端で支える場合と、お尻の部分で支える場合で、支える面にかかる圧力はそれぞれ何[Pa]か。ただしエンピツの直径を 6[mm]、先端の直径を 0.2[mm]とする。

・熱量と仕事

問4. お風呂の湯を 1 度上げるのに必要な電気エネルギーで、体重 100kg の人をどのくらい持ち上げられるか。