

はじめに

本書は、

力学・電磁気学・現代物理学の基礎力を養う 94 題
物理チャレンジ独習ガイド

物理オリンピック日本委員会編
杉山忠男著 (丸善出版)

の姉妹編で、第 1 部 熱物理、第 2 部 波動・光学 からなります。執筆方針は上記の書籍と同様であり、「物理チャレンジ」に興味を抱いている中学生、高校生、工業高等専門学校生などが、物理の基礎を身に付けるために活用して頂くことを意図しています。内容は、高校で習う物理を基本としていますが、「物理チャレンジ」(第 1 チャレンジ、第 2 チャレンジ)で扱われる内容の中で、力学・電磁気学・現代物理学を除いた熱物理と波動・光学を扱っています。

高校物理では、従来、微分・積分という数学を使わないことを基本として物理現象を説明していますが、本書では、「物理チャレンジ」の出題方針の下、ある程度の説明をした上で、高校生が学ぶ上で無理のない程度の微分・積分を用いることにしています。

本書を用いて物理の理解を深め、「物理チャレンジ」、さらに「国際物理オリンピック」に参加して、世界の物理を愛好する高校生などとの交流を深め、将来、大学、大学院、研究所などでの研究活動の基礎を十分に身に付けて頂くことを熱望するものです。

なお本書の一部の記述は、本書と同様に物理オリンピック日本委員会で販売している

国際物理オリンピック 研修用テキストⅠ 波動・光学
国際物理オリンピック 研修用テキストⅢ 熱物理

の一部の記述と重複している部分があります。

「国際物理オリンピック 研修用テキスト」は、国際物理オリンピックと同レベルであり、高度な記述が多くなっています。一方、本書は物理チャレンジのレベルであり、平易な記述が主体です。

2022 年 1 月

杉山忠男

目 次

第 1 部 熱物理

第 1 章	熱と温度	4
1.1	温度	4
1.2	熱容量と比熱	5
1.3	融解と蒸発	5
1.4	熱移動のメカニズム	6
第 2 章	気体分子運動	9
2.1	平均運動エネルギー	9
2.2	内部エネルギー	11
2.3	比熱	12
第 3 章	熱力学第 1 法則	14
3.1	熱力学第 1 法則	14
3.2	定積変化と定圧変化	15
3.3	熱機関の効率	17
3.4	断熱変化	19
3.5	カルノー・サイクル	22
第 4 章	熱力学第 2 法則	26
4.1	可逆変化と不可逆変化	26
4.2	熱力学第 2 法則	26

第 2 部 波動・光学

第 1 章	波動	29
1.1	波	29
1.2	横波と縦波	29
1.3	正弦波	30
1.4	波の反射と透過	33
1.5	弦の共振	35
1.6	ホイヘンスの原理と波の回折	36
1.7	波の反射と屈折	38
1.8	3 次元平面波の表現	39
1.9	疎密波としての音波	42
1.10	水面波	43
1.11	音波の定常波と固有振動	45
1.12	ドップラー効果	47
1.13	うなりと分散, 群速度	49
1.14	衝撃波	53
第 2 章	光学	55

2.1	光	55
2.2	光の反射と屈折	55
2.3	光の分散	59
2.4	偏光	62
2.5	球面鏡	63
2.6	レンズの公式	65
2.7	可干渉性	68
2.8	薄膜による干渉	70
2.9	マイケルソン干渉計	73
2.10	光の回折	75
2.11	単スリットと回折格子	80

第 1 部 熱物理

第 1 章 熱と温度

まず、暑さ寒さの指標を与える温度について考えよう。

1.1 温度

(1) 熱平衡と熱力学第 0 法則

2 種類の物体を接触させて十分に時間がたつと、それ以上変化しない状態になる。この状態は熱的につり合った状態であり、**熱平衡状態** (thermal equilibrium state) とよばれる。このとき、「2つの物体の**温度** (temperature) は等しい」という。熱平衡状態で決まった値をもつ物理量を**状態量** (quantity of state) という。温度は状態量であり、後に出てくる圧力や体積も状態量である。

一般に次のことが成り立つ。

「物体 A と物体 B が熱平衡にあり、物体 B と物体 C が熱平衡にあるとき、
物体 C と物体 A は熱平衡にある。」

これを**熱力学第 0 法則** (zeroth law of thermodynamics) という。

(2) 経験的温度と理想気体

セルシウス温度

日常生活で用いられている℃目盛を次のようには定義する。1 気圧のもとで氷と水が共存する温度を 0℃、水と水蒸気が共存する温度を 100℃とし、その間を 100 等分して 1℃の温度差として℃目盛を決める。こうして決められた温度を**セルシウス温度** (Celsius temperature) という。ただし、100 等分するといっても、物質により熱膨張の仕方が異なるため、標準とする物質を決めなければ温度を決めることはできない。

理想気体

実験によれば、希薄な一定量の気体では、温度が一定のとき、その**圧力** (pressure) (気体が単位体積あたり押す力) p と**体積** V の積は気体の種類によらず一定値になることが知られている。これを**ボイルの法則** (Boyle's law) という。

原子、分子、イオンなどの粒子 6.02×10^{23} 個の集まりを**1 モル** (one mole) という。このときの $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ を**アボガドロ数**という。

1 モルの気体の圧力 p と体積 V の積を、

$$pV = RT \tag{1.1}$$

とおくことにより、**絶対温度** (absolute temperature) (単位は K で表される) T を定義する。ここで、定数 R は**気体定数** (gas constant) とよばれ、実験により次のように定めることができる。

1 モルの気体が 0℃と 100℃のときの pV の値をそれぞれ $(pV)_0$ 、 $(pV)_{100}$ と書き、0℃と 100℃の絶対温度をそれぞれ T_0 、 $T_{100} = T_0 + 100$ とおくと、

$$(pV)_0 = RT_0, \quad (pV)_{100} = RT_{100}$$

となるから、

$$R = \frac{(pV)_{100} - (pV)_0}{100}$$

と書くことができ、それぞれの温度での pV の測定結果を用いて、

$$R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

を得る。さらに、 $(pV)_0 = RT_0$ より、

$$T_0 = 273 \text{ K}$$

と定まる。ここで、温度差 1°C を絶対温度の差 1K に等しくとる。そうすると、 12°C は絶対温度 $T_{12} = 273 + 12 = 285 \text{ K}$ となる。

pV の値は、気体のモル数 n に比例する。そうすると、一般に、気体の圧力 p 、体積 V 、絶対温度 T と n の間に、

$$pV = nRT \quad (1.2)$$

の関係が成り立つ。(1.2)式を**理想気体の状態方程式** (equation of state of ideal gas) といい、この状態方程式を厳密に満たす気体を**理想気体** (ideal gas) という。以後、特に断らない限り、温度は絶対温度を指すものとする。

1.2 熱容量と比熱

静止している物体でも、物体を構成している原子や分子は不規則な運動をしている。この運動を**熱運動** (thermal motion) という。この熱運動のエネルギーが移動すると、物体の温度が変化する。この移動するエネルギーを**熱量** (heat quantity) という。したがって、熱量はエネルギーと同じ単位 [J] で測られる。1cal は、1気圧の下で、水 1g を 1K 上昇させる熱量であり、1cal=4.19J である。

物体の温度を 1K 上昇させる熱量を**熱容量** (heat capacity) といい、物体 1kg を 1K 上昇させる熱量を、その物体の**比熱** (specific heat) という。したがって、質量 m 、比熱 c の物体の温度を ΔT 上昇させる熱量 Q は、

$$Q = mc \cdot \Delta T \quad (1.3)$$

と表される。

1.3 融解と蒸発

1気圧の下で、水 (固体) は 0°C で水 (液体) になり、 100°C で水蒸気 (気体) になる。一般に、固体が解けて液体になる現象を**融解** (fusion)、逆に、液体が固体になる現象を**凝固** (solidification) という。また、液体が気体になる現象を**蒸発** (evaporation)、気体が液体になる現象を**凝結** (condensation) という。一定圧力の下で、固体と液体が共存する温度を**融点** (melting point)、液体と気体が共存する温度を**沸点** (boiling point) という。

物質が固体、液体、気体の間で変化するときに入出力する熱を**潜熱** (latent heat) といい、単位質量の固体が液化するときの潜熱を**融解熱** (heat of fusion)、単位質量の液体

が気化するときの潜熱を蒸発熱 (heat of vaporization) という。

いくつかの物質における融点, 融解熱, および, 沸点と蒸発熱を表1に示す。

表 1.1 : いろいろな物質の融点, 融解熱, 沸点, 蒸発熱

物質	融点 (°C)	融解熱 (kJ/kg)	沸点 (°C)	蒸発熱 (kJ/kg)
水 (氷)	0	334	100	2256
窒素	-210	51	-196	199
酸素	-218	28	-183	213
一酸化炭素	-205	30	-191	216
エチルアルコール	-114	107	79	838

例題 1.1 熱量の保存

図 1.1 のように, 氷と水の混じった 100g の氷水が, 100W の電熱器のついた断熱性の容器に入れられている。そこに, 80°Cに熱せられた質量 150g の銅球をすばやく入れて電熱器に 3 分間電流を流したところ, 氷はすべて解けて, 水温は 25°Cに上昇して一定になった。次に, 電熱器に電流を 2 分 30 秒間流したところ, 水温は 55°Cになって一定になった。容器から外部への熱の流失および外部から容器への熱の流入は無視できるとして, はじめに入れられていた氷水の中の氷の質量と容器の熱容量を求めよ。氷の融解熱を 334 J/g, 水の比熱を 4.2 J/g, 銅の比熱を 0.38 J/g とする。

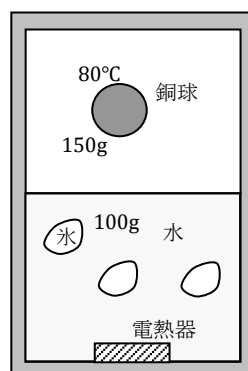


図 1.1

【解答】

電熱器に電流を 2 分 30 秒間流したら, 100g の水と容器が 25°Cから 55°Cに上昇したのであるから, 容器の熱容量を C とすると,

$$100 \times (2 \times 60 + 30) = (100 \times 4.2 + C) \times (55 - 25)$$

$$\therefore C = \underline{80 \text{ J/K}}$$

次に, はじめの氷の質量を m とする。質量 150g の銅球の温度が 80°Cから 25°Cまで低下する間に放出する熱量と, 電熱器から 3 分間に発生する熱量が, 質量 m の氷を解かし, さらに, 100g の水と容器の温度を 0°Cから 25°Cまで上昇させたのであるから,

$$150 \times 0.38 \times (80 - 25) + 100 \times 60 \times 3 = m \times 334 + (100 \times 4.2 + C) \times (25 - 0)$$

$$m \approx \underline{26 \text{ g}}$$

1.4 熱移動のメカニズム

熱の移動の仕方には, 熱伝導 (conduction of heat), 対流 (convection), 熱放射 (thermal radiation) の 3 つがある。熱伝導とは, 物体の内部での分子の熱運動が順次伝わる現象であり, 温度の高い方から低い方に熱が伝わる。対流は, 気体あるいは液体において生ずる現象であり, 温度の高い部分は膨張して密度が小さくなって上昇し, 温度の低い部

分は密度が大きくなって下降して熱が移動する現象である。また、熱放射は、熱が電磁波として移動する現象であり、物体が熱を電磁波として放射すると温度は低下し、逆に、電磁波を吸収すると温度は上昇する。

熱伝導

図 1.2 のように、温度 T_H の十分に大きな高温物体と温度 T_L の十分に大きな低温物体が断面積 S 、長さ L の物体 C でつながれているとき、実験によれば、高温物体から低温物体に単位時間あたりに流れる熱量 H は、両物体間の温度差 $T_H - T_L$ と断面積 S に比例し、長さ L に反比例することが知られている。そこで、比例係数を k とすると H は、

$$H = kS \frac{T_H - T_L}{L} \quad (1.4)$$

と表される。このとき、 k は物質によって異なる定数で、**熱伝導率 (thermal conductivity)** とよばれる。いろいろな物質の 0°C における熱伝導率を表 1.2 に示す。

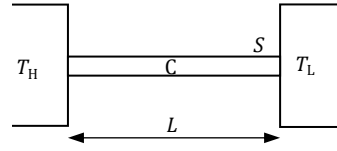


図 1.2

表 1.2 : いろいろな物質の熱伝導率

物質	k [W/(m · K)]	物質	k [W/(m · K)]
アルミニウム	236	水	0.561
銅	403	空気	2.41×10^{-2}
氷	2.2		

一般に、高温物体と低温物体をつないでいる物体 C の温度勾配が場所によって異なり、その値が位置 x に依って定まるとき、単位時間あたり x 軸の正の向きに移動する熱量 H は、

$$H = -kS \frac{dT}{dx} \quad (1.5)$$

と表される。

例題 1.2 2 種類の物質でつながれた物体を伝わる熱量

図 1.3 のように、断面がともに一辺 10cm の正方形で、長さがそれぞれ 10cm、20cm のアルミニウムと銅の棒を接続し、 80°C と 0°C の物体間をつないだ。2 本の棒の接続点の温度と棒を伝わって単位時間あたりに移動する熱量 H を求めよ。ただし、アルミニウムと銅の熱伝導率は、それらの温度によらず 0°C の値に等しいとし、2 つの物体とアルミニウムと銅の棒は真空中に置かれ、それらと真空の間の熱の移動は無視する。

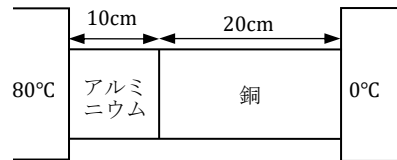


図 1.3

【解答】

アルミニウムと銅の棒の接続点の温度を T [$^\circ\text{C}$] とし、単位時間あたりにアルミニウムの棒を伝わる熱量と銅の棒を伝わる熱量を等しいとおく。 $S = (0.10)^2 \text{ m}^2$ 、 $L_1 = 0.10 \text{ m}$ 、 $L_2 = 0.20 \text{ m}$ 、 $T_H = 80^\circ\text{C}$ 、 $T_L = 0^\circ\text{C}$ とおき、アルミニウムと銅のそれぞれの

熱伝導率を $k_1 = 236 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $k_2 = 403 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ として,

$$H = k_1 S \frac{T_H - T}{L_1} = k_2 S \frac{T - T_L}{L_2}$$

これより,

$$T = \frac{k_1 L_2 T_H + k_2 L_1 T_L}{k_1 L_2 + k_2 L_1} = \underline{43.2 \text{ }^\circ\text{C}}, \quad H = \underline{8.7 \times 10^2 \text{ W}} \quad \blacksquare$$

熱放射

太陽などの恒星は電磁波の放射により、周囲に熱を放射し、放射された電磁波を地球などの惑星が吸収し、惑星は温暖な気候を保っている。一般に、どんな物体も電磁波を放射している。常温の物体は、可視光より波長の長い赤外線を多く放射するが、表面温度が約 $3,000 \text{ K}$ の白熱電球になると、可視光を多く放射するようになり（ただし、可視光のエネルギーの割合は放射エネルギーの 10% 程度）、表面温度が約 $6,000 \text{ K}$ の太陽光では、可視光の強度が最も強くなる。

温度 T の黒体 (black body) (すべての振動数の電磁波を放射・吸収する物体) が、表面の単位面積、単位時間当たり放射するエネルギー H は、

$$H = \sigma T^4 \quad (1.6)$$

と表される。ここで、 σ はシュテファン-ボルツマン定数 (Stefan-Boltzmann coefficient) とよばれ、

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

で与えられる。

例題 1.3 地球への照射エネルギー

太陽光に垂直な地球表面で、 1 m^2 あたり 1 s 秒間に照射される太陽光のエネルギーを求めよ。ただし、地球と太陽は黒体とし、太陽は完全な球形で地球は太陽のまわりを完全な円を描いて運動しているとする。太陽の表面温度を $T_S = 5770 \text{ K}$ 、太陽半径を $R_S = 6.96 \times 10^5 \text{ km}$ 、太陽と地球の距離を $a = 1.50 \times 10^8 \text{ km}$ とする。

【解答】

地球表面の単位面積あたり、単位時間に照射される太陽光のエネルギー H_A は、

$$H_A = \sigma T_S^4 \times \frac{4\pi R_S^2}{4\pi a^2} = \underline{1.35 \times 10^3 \text{ J}} \quad \blacksquare$$