① 力学

○原則

1 摩擦力（非保存力）　静止している間の摩擦力が静止摩擦力であり、動き始めの静止摩擦力が最大静止摩擦力（＝μ（静止摩擦係数）×N（垂直抗力））である。滑り出した後は、動摩擦力と言う。

2 力学的エネルギー保存則　物体の速度を変化させる際に必要な仕事を運動エネルギー1/2 mv^2 と言い、物体がある位置 h (m)にいる状態で物体に蓄えられるエネルギーを位置エネルギーmgh またはポテンシャルと言う。m (kg)は物体の質量、v (m/s)は物体の速度、g (m/s²)は重力加速度である。

運動エネルギーと位置エネルギーの和のことを、力学的エネルギー(kg m²/s²)と言う。この力学的エネルギーは、保存力だけを考慮するとき、常に保持される。保存力は、重力や弾性力や静電気力のことを指す。一方で、摩擦力や空気抵抗といった非保存力が関わると、力学的エネルギーが減少し、物体が減速したり停止したりする。

・摩擦が関係ない場合（力学的エネルギー保存則）:
　力学的エネルギー＝運動エネルギー+位置エネルギー＝一定

・摩擦が関与する場合：
　力学的エネルギーの減少量＝摩擦力のした仕事

3 運動方程式（運動の第 2 法則）　物体の速度が光速に比べて十分に小さいとき、力は質量と加速度の積に等しい。

4 速度と加速度の関係　速度 v は、単位時間あたりの変位 x の変化量(m/s)であり、加速度 a は、単位時間当たりの速度の変化量(m/s²)である。初速度 v_0 と時間 t を使って、$x=v_0t+at^2/2$ や $2ax=v^2-v_0^2$ の関係が成り立つ。

5 運動量保存則と反発係数　外力が加わらない時、２物体の運動量（mv [kg m/s]）は衝突前後で変わらない。２物体 A と B が完全弾性衝突する時、運動量と力学的エネルギーが保存され、衝突前の互いに近づく速さ（v_A-v_B）と、衝突後の遠ざかる速さ（V_A-V_B）の比（反発係数）が 1 となる。

6 力のつりあいと遠心力　２つの力が同一直線上にあって、且つ同じ大きさで反対方向を向いているとき、物体は等速度運動する（力がつりあう）。力のつりあいの式を求める場合、力の方向を分解する必要がある。その分解方向は自由である。回転座標系で作用する慣性力の一つが、遠心力である。遠心力は mv^2/r と表される。R (m)は回転座標系の半径である。

7 浮力　流体中にある物体に対して、重力と逆方向に作用する力を浮力と言う。浮力は、流体の密度ρ (kg/m³)と物体の体積 V (m⁻³)を用いて、ρVg (N)と表わされる。

○解答

問１

【方針】

摩擦力が関与するので、原則 1 を用いる。速さが分かっているので、力学的エネルギー保

存則を用いる（原則 2)。

【解説】

AB 間の距離を x とする。小物体には重力mg、垂直抗力$mgcos\,\theta$と動摩擦力$\mu' mgcos\theta$がはたらく。力学的エネルギー保存則より、

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + 0 = 0 + mg(xsin\theta) + \mu' mgcos\theta \times x$$

が成り立つ。$x = \frac{v_0^2}{2g(sin\theta + \mu' cos\theta)}$より、解は a となる。

問 2

【方針】

加速度は運動方程式を用いれば求まる（原則 3)。時間、速度、加速度の関係は、原則 4 の通りである。

【解説】

小物体の加速度を a とする。運動方程式は、$ma = mgsin\theta - \mu' mgcos\theta$となる。滑り落ちるのに要した時間 t は、$\mathrm{x} = \frac{1}{2}at^2$の関係から、$t = \sqrt{\frac{2x}{a}}$が得られる。よって、$t = \frac{v_0}{g\sqrt{sin^2\theta - \mu'^2 cos^2\theta}}$。解は b となる。

問 3

【方針】

前問同様、原則 4 を用いて解く。

【解説】

$0 \leq \mathrm{x} \leq x_1$における加速度を$a_1$、$x_1$に到着するときの時間を$t_1$とする。$t_1 = \frac{v_1}{a}$と$x_1 = \frac{1}{2}a_1{t_1}^2$の関係から、$t_1 = \frac{2x_1}{v_1}$が得られる。解は f である。

問 4

【方針】

力学的エネルギー保存則（原則 2）が成り立つ。

【解説】

自動車の重さを m、加速度をa_2とする。$\frac{1}{2}\mathrm{m}{v_1}^2 + ma_2 \cdot (x_1 - x_2) = \frac{1}{2}m{v_2}^2$が成り立つ。よって$a_2 = \frac{{v_2}^2 - {v_1}^2}{2(x_2 - x_1)}$より、解は d となる。

問 5

【方針】

最高点における速度の垂直成分は 0 であり、位置エネルギーが最大となることを利用して、力学的エネルギー保存則から求める。

【解説】

第一回目の最高点における高さを h とする。初速度の垂直成分は$v_0\sin\theta$である。力学的エネルギー保存則から、$\frac{1}{2}\mathrm{m}(v_0 sin\theta)^2+0=0+mgh$が成り立つ。よって、$h=\frac{{v_0}^2}{2g}sin^2\theta$となり、解は a である。

問 6

【方針】

最高点における垂直成分の速度は 0 であり、加速度は重力だけであるので、原則 5 を用いて初速度さえ求めれば、最高点の到達時間が求まる。

【解説】

小球の加速度は g である。衝突直後の速度の垂直成分は$\mathrm{e}v_0 sin\theta$と表わされる。第一回目と第二回目の最高点に到着する時間t_1, t_2は、$\mathrm{e}v_0 sin\theta-\mathrm{g}t_1=0$と$\mathrm{e}v_0 sin\theta-\mathrm{g}t_2=0$から求まる。よって、求める時間は、$t=2t_1+2t_2=\frac{2v_0}{g}(1+\mathrm{e})\mathrm{sin}\theta$より、解は c である。

問 7

【方針】

運動方程式と、おもり 1 にはたらく遠心力（原則 6）から速さを求めればよい。

【解説】

おもり 2 の速さを v とする。おもり 1 にはたらく力は、重力$m_1 g$、垂直抗力$m_1 g$、張力 T、遠心力$m_1\frac{v^2}{R}$である。おもり 2 にはたらく力は、重力$m_2 g$、張力 T である。運動方程式$m_1\frac{v^2}{R}=m_2 g$により、おもり 1 の運動エネルギーは、$\frac{1}{2}m_1 v^2=\frac{1}{2}m_2 gR$となり、解は c である。

問 8

【方針】

缶の沈んでいる分の浮力（原則 7）と缶の重さがつりあう（原則 6)。

【解説】

缶の沈んでいる体積は$\pi R^2 d_1$であるので、力のつりあいは、$\rho\times(\pi R^2 d_1)\times g=Mg$となる。よって、$d_1=\frac{M}{\pi R^2\rho}$より、解は b である。

問 9

【方針】

前問と同様。

【解説】

缶の浮力$\rho\times(\pi R^2(h-d_2))\times g$が重力 Mg とつりあうので、$d_2=h-\frac{M}{\pi R^2\rho}$となる。解は c である。

② 波動

○原則

<u>8 振動数とうなり</u>　振動数が f_1, f_2 の 2 つの波が干渉することで、合成波の振動数が周期的に変わる現象のことを、うなりと言う。うなりの振動数 f は、$f=|f_1-f_2|$ と表わされる。速さ v (m/s)と振動数 f (1/s)、波長 λ (m)の関係は、$v=f\lambda$ である。

○解答

問 10

【方針】

　車 A が動く前後で波長は変わらないことを考慮して、原則 8 を用いる。車 A が観測者方向に動いた時、うねりが聞こえなくなったことから、$f_A < f_B$ と言える。車 A が速さ v の時は、再度うねりが聞こえだしているので、$f_A' > f_B$ である。

【解説】

　静止しているときの車 A、B の振動数を f_A, f_B とする。振動数の関係から、

$$\frac{v}{f_A} = \frac{V-v}{f_A{}'} \quad (10\text{-}1)$$

が成り立つ。車 A が静止している時に観測される、うねりの回数は、

$$f_B - f_A = n_1 \quad (10\text{-}2)$$

車 A が速さ v の時に観測される、うねりの回数は、

$$f_A{}' - f_B = n_2 \quad (10\text{-}3)$$

が成り立つ。式（10-1)、(10-2)、(10-3）より、$f_A = \frac{V-v}{v}(n_1+n_2)$ が得られる。解は e である。

問 11

【方針】

　式（10-1)、(10-2）と同様に、原則 8 を用いる。

【解説】

　うねりが消えた時の速さを v_0 とすると、$f_B - \frac{V}{V-v_0} f_A = 0$ が成り立つ。式（10-2)、(10-3)

を代入して、f_A, f_B を消せば、$v_0 = \frac{n_1 v V}{(n_1+n_2)V - n_2 v}$ が得られる。解は b である。

③ 光学

○原則

<u>9 屈折の法則(スネルの法則)</u>　媒質 A と B における絶対屈折率が、それぞれ n_A、n_B で、媒質 A から媒質 B への入射角と屈折角が、それぞれ θ_A、θ_B のとき、$\frac{n_A}{n_B} = \frac{sin\theta_B}{sin\theta_A}$ の関係が成り立

つ。

○解答

問 12

【方針】

屈折率の異なる媒質中では、光の進む速さが異なる。原則 9 を用いて、光路長を求める。

【解説】

絶対屈折率n_1の液体に対するガラスの屈折角をθ_2とすると、$\frac{n_2}{n_1}=\frac{sin\theta}{sin\theta_2}$が成り立つ。ガラス内の光の光路長 l は、$l=\frac{d}{cos\theta_2}=\frac{d}{\sqrt{1-(\frac{n_1}{n_2}sin\theta)^2}}$である。ガラス内の光の速さは$\frac{d}{n_2}$より、ガラス内を進む時間 t は、$\mathrm{t}=\frac{l}{\frac{d}{n_2}}=\frac{{n_2}^2d}{c\sqrt{{n_2}^2-{n_1}^2sin^2\theta}}$　と得られるので、解は f となる。

問 13

【方針】

臨界角が得られる条件を、原則 9 を用いて求めればよい。

【解説】

ガラスから屈折率n_3の液体に光が入るときの角度が臨界角となるので、$\frac{n_3}{n_2}=\frac{sin\theta_2}{sin90°}$である。

よって、$\sin\theta=\frac{n_2}{n_1}sin\theta_2=\frac{n_3}{n_1}$より、解は d となる。

④ 気体

○原則

<u>10　圧力</u>　物体の表面を押す力を圧力といい、単位面積当たりにはたらく力(N/m^2)で表す。
<u>11　理想気体の状態方程式</u>　ボイル・シャルルの法則およびアボガドロの法則から、理想気体は、$PV=nRT$の関係が成り立つ。ここで P [Pa]は気体の圧力、V [m^3]は気体が占める体積、n [mol]は気体の物質量、R [=8.31451 J/K/mol]は気体定数、T [K]は気体の熱力学温度である。標準状態（0 度 1 気圧）で 1mol 中に含まれる分子数 N_A (=6.02×10^{23})をアボガドロ数と言う。
<u>12　熱力学第 1 法則</u>　熱力学におけるエネルギー保存則を熱力学第一法則といい、$\Delta U=\delta Q-\delta W$の関係がある。ここで、$\Delta U$は系の内部エネルギーの変化量、$\delta Q$は系に与えられた熱量、$-\delta W$は系から取り出された仕事である。物体に一定の力 $\boldsymbol{F}$ を距離 $\boldsymbol{s}$ の間加えるとき、$\boldsymbol{F}\times\boldsymbol{s}$ を力が物体にした仕事と言い、$P\Delta V$でも表すことができる。
<u>13　比熱</u>　比熱 c [J/g/K]は、単位質量の物質の熱容量であり、$Q=mc\Delta T$の関係がある。比熱が大きい物質は、温まりにくく、冷めやすい。定積過程におけるモル比熱は $C_v=\frac{5}{2}RT$、定圧過程では $C_p=\frac{3}{2}RT$となる。

○解答

問 14

【方針】

1 個の気体分子が壁に与える力を F、立方体の一片の長さを L とする時、壁 S が N 個の分子から受ける圧力は、原則 10 より、$P = \frac{F\mathrm{N}}{L^2}$と表わされる。力積を用いて Fを求める。壁 S に向かう分子の速度をv_xとすると、一つの分子が壁 S に衝突したときに与える力積の大きさは、衝突前後の運動量の変化に等しく、原則 5 より、$2mv_x$である。分子が単位時間に壁 S に衝突する回数は$\frac{v_x}{2L}$である。

【解説】

単位時間に壁 S が受ける力積は、$F = 2mv_x \times \frac{v_x}{2L}$である。$\overline{v^2} = 3\overline{{v_x}^2}$の関係より、壁が分子から受ける圧力は、$P = \frac{\mathrm{N}}{L^2} \cdot \frac{m\overline{v^2}}{3L} = \frac{\mathrm{N}m\overline{v^2}}{3V}$となる。解は a となる。

問 15

【方針】

気体の状態方程式（原則 11）と問 14 の解を使って解く。

【解説】

気体の温度を T とする。気体の状態方程式から、$PV = \frac{\mathrm{N}}{N_0}RT$が得られる。$T = \frac{N_0 m\overline{v^2}}{3R}$となり、解は h である。

問 16

【方針】

理想気体の温度 1K 上げるのに必要な熱量 Qは、原則 12 より、内部エネルギーの変化に等しいことを用いる。

【解説】

気体分子 1 個の平均運動エネルギーは、問 15 の解を用いて、$\frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3R}{2N_0}T$である。理想気体の持つ内部エネルギー$U$は、$U = \mathrm{N} \times \frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}\frac{\mathrm{N}}{N_0}RT$である。理想気体の温度 1K 上げるのに必要な熱量 Qは、$Q = \frac{3}{2}\frac{\mathrm{N}}{N_0}R(T+1) - \frac{3}{2}\frac{\mathrm{N}}{N_0}RT = \frac{3}{2}\frac{\mathrm{N}R}{N_0}$となり、解は e である。

問 17

【方針】

A→B 間は定積変化である。ボイル・シャルルの法則（原則 11）を用いる。

【解説】

状態 B の温度をT_Bとすると、ボイル・シャルルの法則より、$\frac{3p}{T} = \frac{4p}{T_B}$が得られる。よって、

$T_B=\frac{4}{3}T$となり、解は e である。

問 18

【方針】

気体のする仕事は$\Delta W=p\Delta V$で表され、圧力－体積グラフの面積に等しい（原則 12)。B→C 間で気体が膨張しており、外部に仕事をしていることから求めればよい。

【解説】

気体のする仕事は、

$$\Delta W=-\frac{(2p+4p)\times(2V-V)}{2}=-3pV$$

となる。気体の状態方程式より、$3pV=RT$なので、$\Delta W=-RT$と表わされ、解は c となる。

問 19

【方針】

単原子分子の理想気体の定積モル比熱は$\frac{3}{2}R$である（原則 13)。

【解説】

気体が吸収した熱量は、$Q_{AB}=\frac{3}{2}R(T_B-T)=\frac{1}{2}RT$となる。状態 C の温度を$T_c$とすると、ボイル・シャルルの法則より、

$$\frac{3p\times V}{T}=\frac{2p\times 2V}{T_c}$$

が得られる。$T_c=\frac{4}{3}T$となり、T_Bに等しいことがわかる。よって、内部エネルギー変化は、$\Delta U_{BC}=0$である。問 18 から、$Q_{BC}=\Delta U_{BC}-W_{BC}=RT$である。A→B→C 間で気体が吸収した熱量は$\mathrm{Q}=Q_{AB}+Q_{BC}=\frac{3}{2}RT$であり、解は f である。

問 20

【方針】

A→B→C→D→A 間で、気体が外部にした仕事 Wは、圧力－体積のグラフで囲まれた面積に等しい。

【解説】

気体が外部にした仕事 Wは、$W=(4p-3p)\times(2V-V)=pV=\frac{1}{3}RT$となる。よって解は e である。

⑤ 電磁気

〇原則

14　オームの法則　電位は $V=RI$ と表される。$R\,(\Omega)$は抵抗である。

15　電気力線　電気力の様子を表現する仮想的な線を電気力線と言い、強い電気力のある場所では電気力線の密度が高くなる。電気力線の本数は、電荷 Q (C)を中心とした球面から出る本数で定義され、$4\pi kQ$本と表される。

16　電位　1c の電荷の位置エネルギーを電位 V(V)と言い、一様な電場 E(V/m)では、$V=Ed$

で表される。ここで、dは電荷が運ぶ 2 点間（電極間）の距離である。

17　自己誘導起電力　インダクタ（コイル）に交流電流を流すと、電源電圧と逆方向に自己誘導起電力が発生し、電流の急激な変化が和らぐ。自己誘導起電力は、自己インダクタンス L(H)を用いて、$V=\left|-L\frac{\Delta I}{\Delta t}\right|$と表わされる。このとき、コイルに蓄えられるエネルギーは$V=\frac{1}{2}LI^2$となる。

○解答

問 21

【方針】

同じ電流で抵抗Rを増やすことにより、最大電位の測定値が上がることを考慮して解く。

【解説】

電圧計のみの時、内部抵抗 r (=$5\times10^3\Omega$)に流れる電流をI_0とする。オームの法則より、rI_0=100（V)の関係が成立する。抵抗を増やした時、$(\mathrm{r}+R)I_0=400$となる。よって、$R=15\times10^3$となり、解は c である。

問 22

【方針】

電気力線の本数は$4\pi kQ$本（原則 15）である。

【解説】

解は e である。

問 23

【方針】

極板間の電場の強さは、電場に垂直な平面を通る電気力線の密度に等しい（原則 15)。また、電位と電場の関係（原則 16）を用いる。

【解説】

極板間の電場の強さをEとすると、$E=\frac{4\pi kQ}{s}$となる。電位差をVとすると、$V=Ed=4\pi k\frac{d}{s}Q$となり、解は c である。

問 24

【方針】

公式通り、自己誘導起電力を求める（原則 17)。

【解説】

自己誘導起電力は、$500=\left|-L\times\frac{0-2}{0.04}\right|$が成り立ち、$L$=10 が求まる。解は a である。

問 25

【方針】

公式通り、自己インダクタンスのエネルギーを求める（原則 17)。

【解説】

$U=\frac{1}{2}LI^2$=20。よって、解は b である。