

第1問 次の問い(問1~5)に答えよ。(配点 25)

問1 山頂でふたをした空のペットボトルが、ふもとではへこんでいる現象を調べするために、注射器を使って実験を行った。空気は理想気体とし、注射器のピストンはなめらかに動き、注射器は熱を通すものとする。

山頂での大気圧を P_0 、絶対温度を T_0 、ふもとでの大気圧を P_1 、絶対温度を T_1 とする。図1のように、山頂で空気を体積 V だけ注射器に入れて注射器の先にゴム栓をして、これをふもとに持ってくると、体積が $V - \Delta V$ となった。山頂での大気圧 P_0 を表す式として最も適当なものを、後の①~④のうちから一つ選べ。 $P_0 = \boxed{1}$

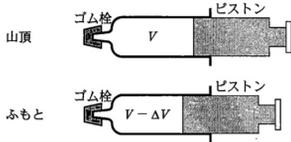


図 1

- ① $\frac{P_1(V - \Delta V)}{V}$ ② $\frac{P_1(V - \Delta V)T_1}{VT_0}$
 ③ $\frac{P_1VT_1}{(V - \Delta V)T_0}$ ④ $\frac{P_1(V - \Delta V)T_0}{VT_1}$
 ⑤ $\frac{P_1VT_0}{(V - \Delta V)T_1}$ ⑥ $\frac{(V - \Delta V)T_0}{P_1VT_1}$

問2 次の文章中の空欄 **ア**・**イ** に入れる式と数値の組合せとして最も適当なものを、後の①~④のうちから一つ選べ。 $\boxed{2}$

地球表面にある質量 m の小物体にはたらく重力の大きさは、重力加速度の大きさを g とするとき、 mg となる。この力は、地球の全質量 M が地球の重心に集まったときの万有引力にほぼ等しい。このことから、小物体と地球の重心の距離を R 、万有引力定数を G とするとき、**ア** という関係式が得られる。 $R = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$ 、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、 $G = 6.7 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ として、地球の質量 M を求めると、約 **イ** kg となる。

	ア	イ
①	$M = \frac{gG}{R^2}$	3×10^{22}
②	$M = \frac{gG}{R^2}$	2×10^{23}
③	$M = \frac{gG}{R^2}$	6×10^{24}
④	$M = \frac{GR^2}{g}$	3×10^{22}
⑤	$M = \frac{GR^2}{g}$	2×10^{23}
⑥	$M = \frac{GR^2}{g}$	6×10^{24}
⑦	$M = \frac{gR^2}{G}$	3×10^{22}
⑧	$M = \frac{gR^2}{G}$	2×10^{23}
⑨	$M = \frac{gR^2}{G}$	6×10^{24}

問1 注射器内の気体の物質量を n とする

理想気体に成り立つ状態方程式より

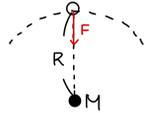
$$\text{山頂: } P_0 V = nRT_0$$

$$\text{ふもと: } P_1 (V - \Delta V) = nRT_1$$

$$\text{からより } P_0 = \frac{V - \Delta V}{V} \cdot \frac{T_0}{T_1} \cdot P_1$$

(答) ④

問2



万有引力の法則より

$$F = \frac{GMm}{R^2}$$

これが mg にほぼ等しいことより

$$\frac{GMm}{R^2} \doteq mg \quad \therefore M \doteq \frac{gR^2}{G}$$

よって

$$M \doteq \frac{9.8 \text{ m/s}^2 \times (6.4 \times 10^6 \text{ m})^2}{6.7 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2}$$

$$= \frac{9.8 \times 6.4^2}{6.7} \times 10^{23} \text{ kg}$$

$$\doteq \underline{\underline{6 \times 10^{24} \text{ kg}}}$$

(答) ⑨

問3 図2のように、正方形の薄い板のふちに、板面を含む平面内で三つの力がはたらいている。板の中心を点Oとする。一つの力は、大きさFで板の頂点Pに作用し、その向きは線分OPに垂直で図の下向きである。残り二つの力は、それぞれ線分OPから反時計回りに 30° と 150° の方向を向いた大きさ $2F$ の力であり、それらの作用線は点Oで交わっている。図中の三つの力の合力を表す図として最も適当なものを、後の①~⑧のうちから一つ選べ。ただし、線分OPの長さをLとする。 3

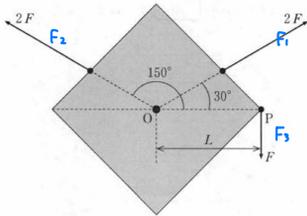


図 2

平行でない2つの力の合力は、作用線の交点に移動してベクトル和をとればよいので、 F_1 と F_2 の合力は以下のように求められる。

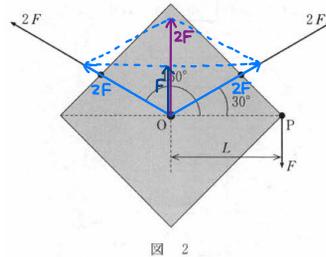
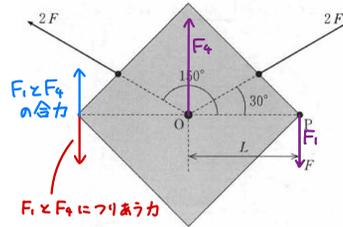


図 2

平行な2つの力の合力は、こちらに釣りあう力と同一作用線上の逆向きで同じ大きさの力として求められる。

- ①
- ②
- ③
- ④
- ⑤
- ⑥
- ⑦
- ⑧



F_1 と F_2 の合力
 F_1 と F_2 に釣りあう力
 ・力の釣りあいより
 向き：下向き
 大きさ： $2F - F = F$
 ・モーメントの釣りあいより
 作用線は点OよりLだけ左

(答) ④

問4 図3に灰色で示す真空中の領域Rを電子が通過している。電子の入射速度は一定である。領域Rに、電子の入射速度の向きに垂直に一樣な電場(電界)をかけ、さらに同じ領域に適当な磁場(磁界)をかけると、電子は速度の向きを変えずに直進して、速さ v_1 で領域Rを出た。電場を維持して磁場を0にしたとき、磁場を維持して電場を0にしたときには、電子は速度の向きを変えて、それぞれ速さ v_2 、 v_3 で領域Rを出るようになった。 v_1 、 v_2 、 v_3 の大小関係を表す式として最も適当なものを、後の①~⑦のうちから一つ選べ。

4

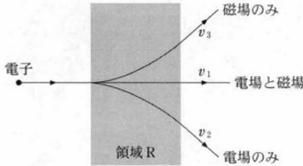


図 3

- ① $v_1 > v_2 = v_3$ ② $v_2 > v_3 = v_1$ ③ $v_3 > v_1 = v_2$
 ④ $v_1 > v_2 > v_3$ ⑤ $v_2 > v_3 > v_1$ ⑥ $v_3 > v_1 > v_2$
 ⑦ $v_1 = v_2 = v_3$

入射速度の大きさを v_0 とおく。

磁場による力(ローレンツ力)

ローレンツ力は常に速度と垂直な向きにはたらくので、電子に対して仕事をしない(ローレンツ力による運動エネルギーの変化、すなわち速さの変化はない)。

よって、 $v_3 = v_0$ 。

電場による力

・電場と磁場の場合(直進する場合)

電場による力は常に速度と垂直な向きにはたらくので、電場による速さの変化もない

よって、 $v_1 = v_0$ 。

・電場のみの場合

下図のように座標軸をとり、加速度のx成分、y成分をそれぞれ a_x 、 a_y とおくと、

x方向の運動方程式： $ma_x = 0$

y方向の運動方程式： $ma_y = eE$

よって、領域Rを出た瞬間の速度のx成分、y成分をそれぞれ v_x 、 v_y とおくと、

$v_x = v_0$ 、 $v_y > 0$

となるので、

$v_2 = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} > v_0$

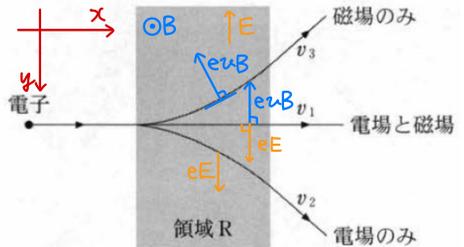


図 3

(答) ②

問 5 次の文章中の空欄 **ウ**・**エ** には、それぞれ直後の { } 内の式のいずれか一つが入る。その組合せとして最も適当なものを、後の①~⑧のうちから一つ選べ。 **5**

電子などの粒子が波動としてふるまうときの波を物質波(ド・ブロイ波)という。電子の質量を m 、プランク定数を h として、速さ v の電子のド・ブロイ波長は **ウ** { (a) $\frac{mv}{h}$ (b) $\frac{h}{mv}$ } である。

図 4 のように速さ v の電子を、原子が規則正しく並んだ結晶面(格子面)からなる結晶に、結晶面となす角 θ で入射する。電子が物質波としての特性をもつために、X 線と同様に、ブラッグの条件を満たす反射方向で、電子線が強め合う。ブラッグの条件を満たす最小の θ の値を θ_0 としたとき、結晶面の間隔 d

は **エ** { (c) $\frac{h}{2mv \sin \theta_0}$ (d) $\frac{mv}{2h \sin \theta_0}$ (e) $\frac{h}{mv \sin \theta_0}$ (f) $\frac{mv \sin \theta_0}{h}$ } となる。

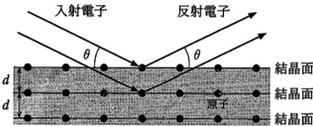


図 4

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
ウ	(a)	(a)	(a)	(a)	(b)	(b)	(b)	(b)
エ	(c)	(d)	(e)	(f)	(c)	(d)	(e)	(f)

光子仮説

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

の妥当性が Compton 散乱により確かめられたことなどを受け、波動は粒子の性質をもつのなら逆に粒子が波動としての性質をもつのではないかと考えた de Broglie は、運動量 p をもつ粒子は

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

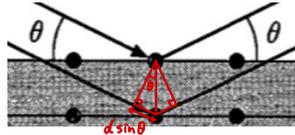
の波長 (de Broglie 波長) をもつ波としての性質をもつ (物質波) と考えた。

とくに、質量 m をもつ粒子の場合、de Broglie 波長は

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

と表せる。

→ ウ: (b)



経路差 $2d \sin \theta$ が波長の整数倍のとき、2つの電子線は同位相となるので

$$2d \sin \theta = n\lambda = n \cdot \frac{h}{mv} \quad (n=1, 2, \dots)$$

$n=1$ のとき θ は最小となるので

$$d = \frac{h}{2mv \sin \theta_0}$$

→ エ: (c)

(答) ⑤

第2問 単振り子の周期を精度よく測定する探究活動に関する次の文章を読み、後の問い(問1~5)に答えよ。(配点 25)

図1のように伸び縮みしない軽い糸の一端に質量 m の小球をつけ、糸の他端を点 P に固定した。空気抵抗および点 P での摩擦は無視できるものとする。点 P から小球までの長さ(振り子の長さ)を L とする。最下点にあるときの小球の位置 O を原点とし、鉛直方向に y 軸、水平方向に x 軸をとり、振り子を xy 面内で振動させた。図1のように点 O からの円弧に沿った小球の変位を s 、糸が y 軸となす角を θ 、重力加速度の大きさを g とする。振り子が x 軸の正の向きに振れたときの s を正とする。このとき、 $s = L\theta$ が成り立つ。糸の最大の振れ角 θ_0 が小さく、運動の範囲内では $\sin \theta \approx \theta$ の近似が成り立つ場合を考える。

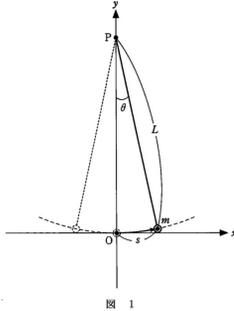


図 1

問 1 小球にはたらく運動方向の力 F はいくらか。最も適当なものを、次の①~⑧のうちから一つ選べ。 $F = \boxed{6}$

- ① $-mg$ ② $-mg\theta$ ③ $-mg\theta^2$
 ④ $-\frac{1}{2}mg\theta^2$ ⑤ $-mg\frac{\theta}{\theta_0}$ ⑥ $-mgL\theta$

問 2 次の文章中の空欄 $\boxed{ア}$ 、 $\boxed{イ}$ に入れる式の組合せとして正しいものを、後の①~⑧のうちから一つ選べ。 $\boxed{7}$

小球の運動は、点 O を中心とする振幅 $L\theta_0$ の単振動とみなすことができる。小球が点 O を x 軸の負から正の向きに最初に通過する瞬間を時刻 $t=0$ としたとき、時刻 t における小球の変位 s は、角振動数を ω として、

$$s = L\theta_0 \times \boxed{ア}$$

と表せる。また、 $\omega = \boxed{イ}$ となる。

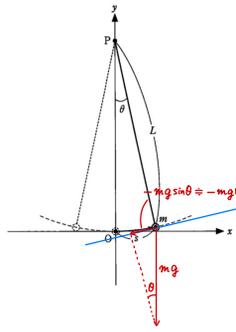
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
ア	$\sin \omega t$	$\sin \omega t$	$\sin \omega t$	$\sin \omega t$	$\cos \omega t$	$\cos \omega t$	$\cos \omega t$	$\cos \omega t$
イ	$\sqrt{\frac{g}{L}}$	$\sqrt{\frac{L}{g}}$	$\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{L}}$	$2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$	$\sqrt{\frac{g}{L}}$	$\sqrt{\frac{L}{g}}$	$\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{L}}$	$2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$

問 3 次の文章中の空欄 $\boxed{ウ}$ ~ $\boxed{オ}$ に入れる式と語の組合せとして最も適当なものを、後の①~⑧のうちから一つ選べ。 $\boxed{8}$

振り子が N 往復する時間 t_N をストップウォッチで測定して、 $T_N = \frac{t_N}{N}$ の値から周期を求めた。観測者がストップウォッチで測定した時間 t_N が、振り子が N 往復する時間の正確な値より、 Δt だけ長かった場合を考える。このとき、 T_N は周期の正しい値よりも、 $\boxed{ウ}$ だけ $\boxed{エ}$ 見積もられる。これは実験誤差の一つである。 N を変えて同じ実験をするとき、誤差 Δt が同じ値であるとするとき、 N が大きいほど、この実験誤差は $\boxed{オ}$ なる。

	ウ	エ	オ
①	Δt	大きく	小さく
②	Δt	大きく	大きく
③	Δt	小さく	小さく
④	Δt	小さく	大きく
⑤	$\frac{\Delta t}{N}$	大きく	小さく
⑥	$\frac{\Delta t}{N}$	大きく	大きく
⑦	$\frac{\Delta t}{N}$	小さく	小さく
⑧	$\frac{\Delta t}{N}$	小さく	大きく

問 1



mg の運動方向成分は

$$s = L\theta > 0 \text{ のとき負}$$

$$s = L\theta < 0 \text{ のとき正}$$

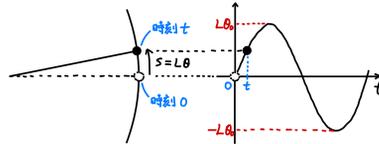
となることも合わせて、

$$-mg \sin \theta \approx -mg\theta$$

である。

(答) ②

問 2



時刻 0 で $s=0$ で、 s はそこから増加していき、

$$s = L\theta_0 \sin \omega t$$

$\theta \approx 0$ のとき、運動方向に関する運動方程式は近似的に

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} \approx -mg\theta$$

と表せる。ここで、 $s = L\theta$ より $\theta = \frac{s}{L}$ 1 から、

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} \approx -\frac{mg}{L} s \quad \text{すなわち} \quad \frac{d^2 s}{dt^2} \approx -\frac{g}{L} s \quad \dots (*)$$

一般に変位が $x - x_c = A \sin \omega(t - t_0)$ と表される

(x は x_c を中心とする角速度 ω の単振動をする) とき、

$$a = \frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega^2 A \sin \omega(t - t_0) = -\omega^2 x$$

という関係が成り立ち、これと(*)を比較して、

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

(答) ①

問 3 振り子が N 往復する正確な時間を t_N^0 とおくと、

周期の正しい値 T_N^0 は、 $T_N^0 = \frac{t_N^0}{N}$ と表される。

ここで、 $t_N = t_N^0 + \Delta t$ のとき

$$T_N = \frac{t_N}{N} = \frac{t_N^0 + \Delta t}{N} = T_N^0 + \frac{\Delta t}{N}$$

となり、見積った周期 T_N は正しい値 T_N^0 よりも

$\frac{\Delta t}{N}$ だけ大きくなる。

Δt を固定したとき、実験誤差 $\frac{\Delta t}{N}$ は、 N が大きい

ほど小さくなる。

(答) ⑤

周期の測定における誤差を減らすために、レーザーと光センサーを組み合わせた図2のような装置を作った。光センサーの受光部とレーザー光の光軸は、xy面と直交する軸上に固定されている。光センサーにレーザー光が入射すると、オシロスコープにはレーザー光の強度に比例した電圧が観測され、小球が最下点にあるとき糸がレーザー光をさえぎり、電圧が下がる。オシロスコープは十分高い精度で時間を測定できるものとする。

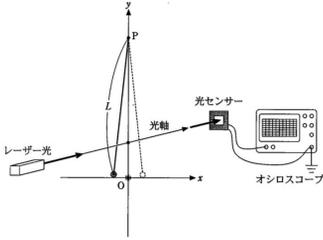


図 2

レーザー光を照射したまま振り子を振動させると、糸は周期的にレーザー光をさえぎり、図3に示す等間隔の針状の波形がオシロスコープで観測された。

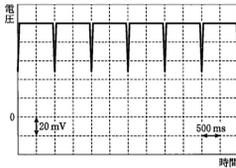


図 3

図4 図3において、振り子の周期と一致する部分を黒矢印(←, →)で示した図として最も適当なものを、次の①-⑧のうちから一つ選べ。

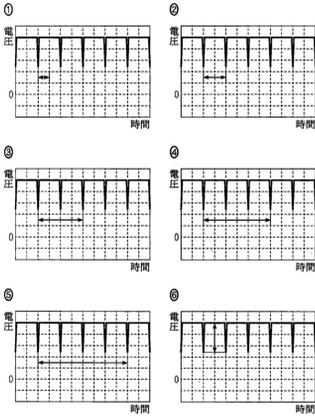


図2の装置を用いると、重力加速度の大きさを高精度で得ることができ、緯度が異なる二つの測定地点において、重力加速度の大きさを測定したところ、測定地点によって小さな差が生じた。この差が生じる原因の一つは、地球の自転による遠心力である。

問5 次の文章中の空欄 、 に入れる式の組合せとして最も適当なものを、後の①-⑧のうちから一つ選べ。

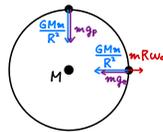
ここでは、地球を半径 R の一様な密度の球体とし、北極と南極を通る地球のまわりを角速度 ω で自転しているものとする。赤道上の地表面にある質量 m の小球にはたらく遠心力の大きさは $f = m \times$ になる。したがって、赤道で測定される重力加速度の大きさを g_0 、極で測定される重力加速度の大きさを g_p とすると、 $g_p =$ と表ける。

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
力	$\omega^2 R$	$\omega^2 R$	$\omega^2 R$	ωR	ωR	ωR	$\frac{\omega^2}{R}$	$\frac{\omega^2}{\sqrt{R}}$	$\frac{\omega^2}{\sqrt{R}}$
キ	$g_0 - \frac{f}{m}$	$g_0 + \frac{f}{m}$	$g_0 - \frac{f}{m}$	$g_0 + \frac{f}{m}$	$\frac{f}{m}$	$g_0 - \frac{f}{m}$	$g_0 + \frac{f}{m}$	$g_0 + \frac{f}{m}$	$\frac{f}{m}$

問4 $s = L\theta_0 \sin \omega t$ として考えると、 $t = 0, \frac{T}{2}, T, \dots$ で $s = 0$ となり、糸がレーザー光をさえぎるので、図3の針状の波形の間隔は $\frac{T}{2}$ に対応する。

(答) ③

問5 半径 R 、角速度 ω の等速円運動をする着目物体(質量 m とする)とともに動く観測者は向心加速度 $R\omega^2$ をもつので、この観測者が見る運動を記述するときは、向心方向と逆向きに、 $mR\omega^2$ の大きさの慣性力を考えることになる。これが遠心力である。



地球を一様な密度の球体とみなすとき、万有引力による力は、第1問問2と同様に、地球の全質量が地球の重心に集まったとして考えることができ、この力の大きさは北極でも赤道面上でも $\frac{GMm}{R^2}$ とみなせる。

北極では遠心力ははたらかない($\because R=0$)ので、

$$mg_p \doteq \frac{GMm}{R^2}$$

赤道上では、問1の過程で mg と表した力は万有引力と遠心力の合力となるので、単振り子の周期を測定することで得られる重力加速度 g_e について

$$mg_e \doteq \frac{GMm}{R^2} - mR\omega^2 \doteq mg_p - f$$

が成り立つ。したがって、

$$g_e \doteq g_p - \frac{f}{m}$$

(答) ①

A 物質質量 m の理想気体の状態をゆっくりに変化させる。気体定数を R とする。

問1 図1のA→B→Cの変化において、A→Bは定積変化、B→Cは定圧変化である。状態Aの温度(絶対温度)を T_A とするとき、気体が外部にした仕事を表す式として正しいものを、後の①~⑥のうちから一つ選べ。 [11]

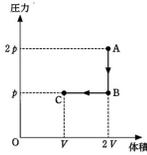
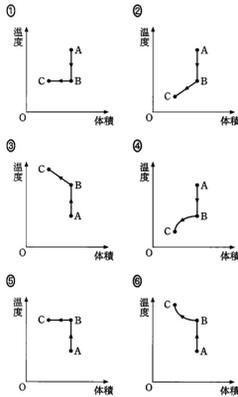


図1

- ① $2nRT_A$ ② nRT_A ③ $\frac{1}{2}nRT_A$ ④ $\frac{1}{4}nRT_A$
 ⑤ $-2nRT_A$ ⑥ $-nRT_A$ ⑦ $-\frac{1}{2}nRT_A$ ⑧ $-\frac{1}{4}nRT_A$

問2 この過程における気体の温度を縦軸、体積を横軸としたグラフを作成した。そのグラフとして最も適当なものを、次の①~⑥のうちから一つ選べ。

[12]



問3 次の文章中の空欄 [ア]・[イ] に入れる語句の組合せとして最も適当なものを、後の①~⑥のうちから一つ選べ。 [13]

前問のA→B→Cの変化を逆に変化させたC→B→Aの変化を過程Ⅰとする。また、新たに、図2に示すようなC→Aの過程Ⅱを考える。過程Ⅰと過程Ⅱで気体が外部にした仕事を W_1 、 W_2 、気体の内部エネルギーの変化を ΔU_1 、 ΔU_2 としたとき [ア] であるため、外部から気体に加えられた熱量は、[イ] の方が大きい。

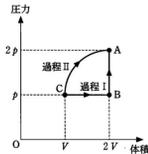


図2

	ア	イ
①	$\Delta U_1 > \Delta U_2$ かつ $W_1 = W_2$	過程Ⅰ
②	$\Delta U_1 > \Delta U_2$ かつ $W_1 = W_2$	過程Ⅱ
③	$\Delta U_1 < \Delta U_2$ かつ $W_1 = W_2$	過程Ⅰ
④	$\Delta U_1 < \Delta U_2$ かつ $W_1 = W_2$	過程Ⅱ
⑤	$\Delta U_1 = \Delta U_2$ かつ $W_1 > W_2$	過程Ⅰ
⑥	$\Delta U_1 = \Delta U_2$ かつ $W_1 > W_2$	過程Ⅱ
⑦	$\Delta U_1 = \Delta U_2$ かつ $W_1 < W_2$	過程Ⅰ
⑧	$\Delta U_1 = \Delta U_2$ かつ $W_1 < W_2$	過程Ⅱ

問1

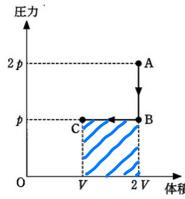
A→B: 定積変化のため気体がした

仕事は 0

B→C: B→Cの向きに注意すると、

左図の斜線部の面積は、気体がされた仕事を表す。

よって気体がした仕事は $-pV$



ここで、状態Aでの状態方程式より

$$2p \cdot 2V = nRT_A$$

であることから、A→B→Cの過程で気体がした仕事は

$$-pV = -\frac{nRT_A}{4}$$

(答) ⑧

問2

A→B: 準静的過程より状態方程式が成り立ち、

$$T = \frac{V}{nR} p$$

ここで、 V 一定より $\frac{V}{nR}$ は定数なので、

この過程では p の減少とともに T も減少する分かる。

B→C: 準静的過程より状態方程式が成り立ち、

$$T = \frac{p}{nR} V$$

ここで、 p 一定より $\frac{p}{nR}$ は定数なので、

この過程では T は V に比例すると分かる。

(答) ②

問3

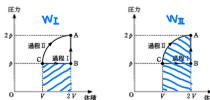
$$\Delta U = U_A - U_C = nC_V(T_A - T_C)$$

よ、 ΔU は始状態と終状態の温度のみで決まるので、

$$\Delta U_I = \Delta U_{II}$$

過程Ⅰ、Ⅱで気体がした仕事はそれぞれ以下の図の斜線部となるため、 $W_I < W_{II}$

よって、 $W_I < W_{II}$



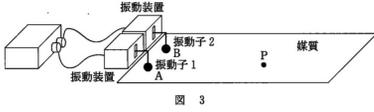
熱力学第1法則より

$$Q_I = \Delta U_I + W_I, \quad Q_{II} = \Delta U_{II} + W_{II}$$

だから、 $Q_I < Q_{II}$

(答) ⑧

B 図3のように、平面に広がった薄い媒質があり、この媒質は平面に垂直な変位を生じる横波を伝えることができる。振動装置に接続された振動子1と2によって、媒質上の点Aおよび点Bを振動数 f で振動させ、点A(波源A)と点B(波源B)から広がる横波を発生させる。ここで、媒質上の点Pの振動を考える。媒質は十分に広く、ふちの影響はないものとする。



まず、振動子1のみを振動させる。このとき、波源Aは、時刻 t における変位が

$$y_A = a_0 \sin(2\pi ft)$$

で表される単振動をする。ここで、 a_0 は振幅である。波源Aから出た波が点Pに到達するまでにかかる時間を t_{PA} とすると、時刻 t での点Pにおける変位 y_{PA} は、振幅を a_{PA} として、

$$y_{PA} = a_{PA} \sin\{2\pi f(t - t_{PA})\}$$

と表される。

図4 図4は、時刻 t の点Pにおける変位 y_{PA} を示したものである。この波の振動数 f と点Pにおける振幅 a_{PA} の値の組合せとして最も適当なものを、後の①~⑨のうちから一つ選べ。 14

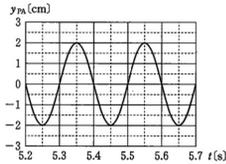


図4

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
振動数	2 Hz	2 Hz	2 Hz	5 Hz	5 Hz	5 Hz	10 Hz	10 Hz	10 Hz
振幅	0.5 cm	2 cm	4 cm	0.5 cm	2 cm	4 cm	0.5 cm	2 cm	4 cm

次に、振動子2のみを振動させる。このとき、波源Bは、時刻 t における変位が

$$y_B = a_0 \sin(2\pi ft)$$

で表される単振動をする。点Pにおける変位 y_{PB} は、波源Bから出た波が点Pに到達するまでにかかる時間を t_{PB} 、振幅を a_{PB} として、

$$y_{PB} = a_{PB} \sin\{2\pi f(t - t_{PB})\}$$

と表される。

問4 図4より

$$\text{周期 } T = 0.2 \text{ s}$$

と分かるので、

$$\text{振動数 } f = \frac{1}{T} = 5 \text{ Hz}$$

である。また、

$$\text{振幅 } a_{PA} = 2 \text{ cm}$$

である。

(答) ⑤

振動子1と振動子2を同位相で振動させた場合の点Pにおける振舞の振位を y_P とすると、 y_P は振動A、Bから出た波の振位 y_{PA} 、 y_{PB} の和になる。

問5 振動子1のみを振動させた場合の振源Aから出た波の点Pにおける振位 y_{PA} は図4のとおりであった。また、振動子1と振動子2を同位相で振動させた場合の点Pにおける振位 y_P は、図5のとおりであった。このとき、振動子2のみを振動させた場合の点Pにおける振位 y_{PB} を示すグラフとして最も適当なものを、後の①~④のうちから一つ選べ。 [15]

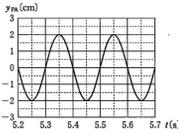


図4 (再掲)

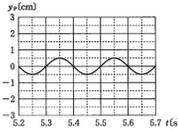
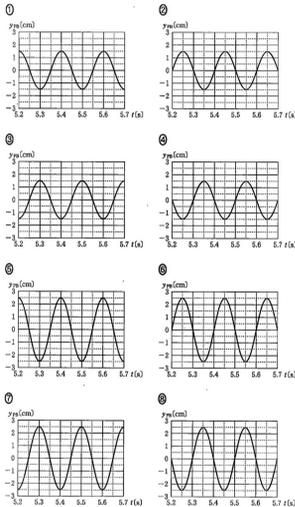


図5



点Pにおいて振源Aから出た波と振源Bから出た波が最も強め合うためには、 y_{PA} と y_{PB} が同位相で振動しなければならぬ。振動子1と振動子2を同位相で振動させた場合、 y_P を、

$$y_P = a \sin [2\pi f(t - t_A)] + 2\pi f(t_B - t_A)]$$

と書けば、振源Aから出た波と振源Bから出た波が点Pで最も強め合うためには、 $f(t_B - t_A)$ が整数でなければならないことがわかる。このことから、点Pとそれぞれの振源からの距離AP、BPの差の絶対値 $|AP - BP|$ の条件が求められる。

問6 振動装置を調整して、振動子1と振動子2を振動数8.0 Hz、同位相で振動させた。波の伝わる速さを4.0 m/s とするとき、振源Aから出た波と振源Bから出た波が点Pで最も強め合う場合の、 $|t_{PA} - t_{PB}|$ と $|AP - BP|$ の値の組合せとして最も適当なものを、次の①~④のうちから一つ選べ。

[16]

	$ t_A - t_B $	$ AP - BP $
①	0.20 s	0.6 m
②	0.20 s	0.8 m
③	0.20 s	1.0 m
④	0.50 s	1.5 m
⑤	0.50 s	2.0 m
⑥	0.50 s	2.5 m
⑦	0.80 s	2.4 m
⑧	0.80 s	3.2 m
⑨	0.80 s	4.0 m

問5 重ね合わせの法則より $y_P = y_{PA} + y_{PB}$

(振動子1, 2 による点Pでの振動 y_{PA} , y_{PB} を重ね合わせるにものか y_P となる。

よって、振幅が1.5 cm で逆位相の波形を選ぶはよい。

(答) ②

<※1> 波の式で表現してみる

$$y = a \sin 2\pi f(t - t_0)$$

図4より $a = 2$, $f = 5$, $t_0 = 5.3$ とし

$$y_{PA} = 2 \sin 10\pi(t - 5.3)$$

図5より $a = 0.5$, $f = 5$, $t_0 = 5.3$ とし

$$y_P = 0.5 \sin 10\pi(t - 5.3)$$

よって

$$y_{PB} = y_P - y_{PA}$$

$$= -1.5 \sin 10\pi(t - 5.3)$$

問6 n を整数として、 $f(t_{PA} - t_{PB}) = n$

$$f = 8.0 \text{ Hz より } t_{PA} - t_{PB} = 0.125n \text{ s}$$

よって $|t_{PA} - t_{PB}|$ の値として適するものは 0.20 s, 0.50 s,

0.80 s のうち 0.50 s のみ

$$t_{PA} = \frac{AP}{v} = \frac{AP}{4.0}, \quad t_{PB} = \frac{BP}{v} = \frac{BP}{4.0}$$

より、 $|t_{PA} - t_{PB}| = 0.50 \text{ s}$ のとき、

$$0.50 \text{ s} = |t_{PA} - t_{PB}| = \frac{1}{4.0 \text{ m/s}} |AP - BP|$$

$$\therefore |AP - BP| = 2.0 \text{ m}$$

(答) ⑤

<※2> 時間的周期と距離的周期

$$T = \frac{1}{f} = 0.125 \text{ s より } |t_{PA} - t_{PB}| = 0.125n \text{ のとき}$$

$y_{PA} \times y_{PB}$ は同位相で、このとき、

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{4.0}{8.0} = 0.5 \text{ m より } |PA - PB| = 0.5n \text{ とする。}$$

これを翻訳すると、到達時間の差 $|t_{PA} - t_{PB}|$ の間に周期 T の波が n 個生じていて、到達距離の差 $|PA - PB|$ の中に波長 λ の波が n 個入っているということである。

第4問 次の文章を読み、後の問い(問1~7)に答えよ。(配点 25)

図1のように、同一水平面(紙面)に間隔 l で平行に置かれた十分に長い2本の導体レールと、抵抗値 R の抵抗、電気容量 C のコンデンサー、スイッチ S を導線をつなぎ、導体レールの上に導体レールに垂直に軽い導体棒を置いた。導体棒とレールの接点を a 、 b とする。その後、鉛直上向き(紙面の裏から表の向き)に磁束密度の大きさが B の一様な磁場(磁界)をかけた。

はじめにコンデンサーには電荷が蓄えられておらず、スイッチ S は開いている。次に、導体棒を右向きに一定の速さ v ($v > 0$)で動かしながら S を閉じる。 S を閉じた後も、導体棒が右向きに速さ v で動き続けるように、導体棒に大きさ F の外力を加える。ただし、導体棒はレールと垂直を保ちながらなめらかに運動するものとする。また、導線、導体レール、導体棒の電気抵抗、空気抵抗、回路の自己インダクタンスは無視できるものとする。

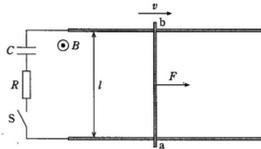
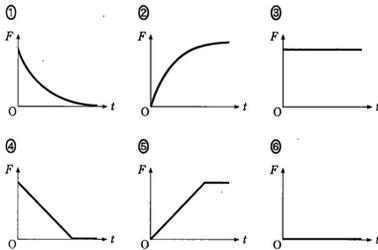


図 1

問1 導体棒が右向きに速さ v で動くときに導体棒の ab 間に生じる誘導起電力 V_1 の大きさと、 S を閉じた直後に導体棒に流れる電流の向きを最も適当なものを、次の①~⑥のうちから一つ選べ。 [17]

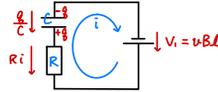
	誘導起電力 V_1 の大きさ	導体棒に流れる電流の向き
①	0	$a \rightarrow b$
②	vB	$a \rightarrow b$
③	vBl	$a \rightarrow b$
④	0	$b \rightarrow a$
⑤	vB	$b \rightarrow a$
⑥	vBl	$b \rightarrow a$

問2 S を閉じてから時間が t だけ経ったときの、 F を表すグラフとして最も適当なものを、次の①~⑥のうちから一つ選べ。 [18]

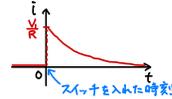


問1 (答) ③

問2 ひ一定より以下のような直流回路とみなせる。



この電流 i の時間変化は以下のとおり。



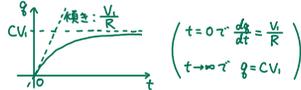
導体棒は等速直線運動をしているので l が a より大きい

$F = lBl$ だから、 F のグラフは ①

<※1> 電流 i のグラフを導出する

回路方程式: $V_1 = Ri + \frac{q}{C}$
 $i = \frac{dq}{dt}$ だから、 $\frac{dq}{dt} = \frac{CV_1 - q}{RC}$

よって q の時間変化は以下のとおり



i の時間変化は、このグラフの接線の傾きの時間変化である。

<※2> q 、 i を時刻 t の関数として求める

$\frac{dq}{dt} = \frac{CV_1 - q}{RC}$

変数分離して積分して

$$\int \frac{dq}{CV_1 - q} = \frac{1}{RC} \int dt$$

$$-\log(CV_1 - q) = \frac{1}{RC}t + A'$$

$$CV_1 - q = e^{-(\frac{1}{RC}t + A')}$$

$$q = CV_1 - Ae^{-\frac{t}{RC}}$$

$$t=0 \text{ で } q=0 \text{ かつ } A = CV_1$$

$$\therefore q = CV_1(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{V_1}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

問3 次の文章中の空欄 19・20 に入れる式として最も適当なものを、それぞれの選択肢のうちから一つずつ選べ。

S を閉じてから十分な時間が経つまでに、外力がした仕事の大きさを W 、抵抗で発生したジュール熱の大きさを J とし、十分な時間が経ったときにコンデンサーに蓄えられているエネルギーを U とする。このとき、 W 、 J 、 U の間には 19 の関係が成り立つ。また、外力がした仕事の大きさ W は、十分な時間が経ったときにコンデンサーに蓄えられている電荷を、導体棒の両端に生じる電位差 V_1 に逆らって運ぶ仕事の大きさに等しくなる。したがって抵抗で発生したジュール熱の大きさ J は 20 となる。

19 の選択肢

- ① $W + J + U = 0$ ② $W - J + U = 0$
 ③ $W + J - U = 0$ ④ $W - J - U = 0$
 ⑤ $W + J = 0$ ⑥ $W - J = 0$
 ⑦ $W + U = 0$ ⑧ $W - U = 0$

20 の選択肢

- ① $\frac{1}{4} CV_1^2$ ② $\frac{1}{2} CV_1^2$ ③ $\frac{3}{4} CV_1^2$ ④ CV_1^2
 ⑤ $\frac{5}{4} CV_1^2$ ⑥ $\frac{3}{2} CV_1^2$ ⑦ $2 CV_1^2$ ⑧ 0

問4 S を閉じてから十分な時間が経った後に、S を開き、導体棒を静止させた。続いて、S を閉じたとき、閉じた直後に導体棒に流れる電流の向きと導体棒の運動の組合せとして最も適当なものを、次の①~⑧のうちから一つ選べ。

21

	導体棒に流れる電流の向き	導体棒の運動
①	電流は流れない	動かない
②	電流は流れない	左向きに動き始める
③	電流は流れない	右向きに動き始める
④	a → b	動かない
⑤	a → b	左向きに動き始める
⑥	a → b	右向きに動き始める
⑦	b → a	動かない
⑧	b → a	左向きに動き始める
⑨	b → a	右向きに動き始める

問3 外から加えられた仕事 W が静電エネルギー U

とジュール熱 J に変換されたと考えられるので

$$W = J + U \quad (\text{答}) \textcircled{4}$$

十分時間が経過したときコンデンサーに蓄えられた電荷は CV_1 である。

外力がした仕事の大きさは、これを電位差 V_1 に逆らって運ぶ仕事の大きさに等しい (→*3)

ので、 CV_1^2 である。

$$\text{これから、} U = \frac{1}{2} CV_1^2 \text{ であることより } J = \frac{1}{2} CV_1^2$$

(答) $\textcircled{2}$

<*3> 問題文の誘導の内容を導く

$$\text{運動方程式: } 0 = F - iBl$$

両辺に v をかけて整理して

$$F \cdot v = i \cdot vBl \\ = V_1 \cdot i$$

これを積分して

$$\int F v dt = V_1 \int i dt \\ = dx \\ \therefore W = V_1 Q$$

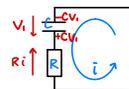
<*3> エネルギー収支を時間微分する

$$\text{回路の式: } V_1 = Ri + \frac{Q}{C} \text{ と } Fu = V_1 i \text{ より}$$

$$Fu = Ri^2 + \frac{Q}{C} i$$

$$\int Fu dt = \int Ri^2 dt + \int \frac{Q}{C} i dt \\ \underbrace{\int Ri^2 dt}_{\text{仕事}} \quad \underbrace{\int \frac{Q}{C} i dt}_{\text{ジュール熱}} \quad \underbrace{\int \frac{Q}{C} i dt}_{\text{静電エネルギー}}$$

問4 スイッチ S を再び閉じた直後は以下のような回路とみなせる



よってこの向きに電流が流れるので $\textcircled{6}$

次に図2のように、図1のコンデンサーを自己インダクタンスがLのコイルに換えて同様な実験を行った。はじめにスイッチSは開いており、導体棒を右向きに一定の速さvで動かしながらSを閉じる。Sを閉じた後も、導体棒が右向きに速さvで動き続けるように、導体棒に大きさFの外力を加える。このとき、導体棒のab間に生じる誘導起電力をV₂とする。

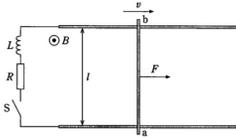


図 2

Sを閉じてから時間がtだけ経ったときの、回路に流れる電流の大きさIを調べたところ、図3のようになった。ただし、破線は時刻t=0におけるグラフの接線を表している。

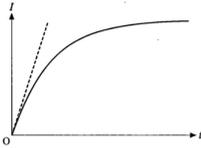


図 3

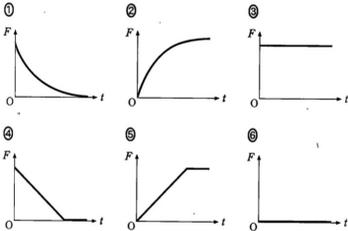
問 5 Sを閉じてから十分に時間が経ったときに、コイルに発生する誘導起電力の大きさを表す式として最も適当なものを、次の①~④のうちから一つ選べ。

22

- ① $\frac{Lv}{l}$ ② $\frac{Lv}{2l}$ ③ vBl ④ $\frac{vBl}{2}$
 ⑤ \sqrt{RFv} ⑥ $\frac{\sqrt{RFv}}{2}$ ⑦ 0

問 6 Sを閉じてから時間がtだけ経ったときの、Fを表すグラフとして最も適当なものを、次の①~⑥のうちから一つ選べ。

23



問 7 図3の破線の傾きをaとする。このとき、コイルの自己インダクタンスLを表す式として最も適当なものを、次の①~⑤のうちから一つ選べ。ただし、時刻t=0の近くにおける電流Iの時間変化の様子は、図3の破線で近似できることを使ってよい。L =

24

- ① a ② $\frac{1}{a}$ ③ aV_2 ④ $\frac{V_2}{a}$ ⑤ $\frac{a}{V_2}$
 ⑥ $\frac{V_2}{aR}$ ⑦ $\frac{aR}{V_2}$ ⑧ $\frac{aV_2}{R}$ ⑨ $\frac{R}{aV_2}$

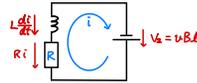
問 5 十分時間が経つと電流は一定になるので

$$L \frac{di}{dt} = 0 \quad (\text{答}) \quad \textcircled{7}$$

問 6 問2と同様に $F = IBl$ だから、Fのグラフの概形は

図3のようになる。 (答) ②

問 7



$$\text{回路の式: } V_2 = L \frac{di}{dt} + Ri$$

$$t=0 \text{ のとき } i=0 \text{ だから } \frac{di}{dt} = \frac{V_2}{L}$$

$$a = \frac{di}{dt} \text{ だから, } L = \frac{V_2}{a} \quad (\text{答}) \quad \textcircled{4}$$

<*5> 電流iの時間変化を調べる

$$\text{回路の式: } V_2 = L \frac{di}{dt} + Ri \text{ より}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_2 - Ri}{L}$$

変数分離して積分して

$$\int \frac{di}{V_2 - Ri} = \int \frac{1}{L} dt$$

$$-\frac{\log(V_2 - Ri)}{R} = \frac{1}{L}t + B'$$

$$V_2 - Ri = e^{-(\frac{R}{L}t + RB')}$$

$$i = \frac{V_2}{R} - Be^{-\frac{R}{L}t}$$

$$t=0 \text{ で } i=0 \text{ より } B = \frac{V_2}{R}$$

$$\therefore i = \frac{V_2}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$