

【解答・採点基準】

(100点満点)

問題番号	設問	解答番号	正解	配点	自己採点	
第1問	問1	1	②	5		
	問2	2	⑤	3		
		3	⑥	3		
	問3	4	④	5		
	問4	5	③	4		
		6	②	3		
問5	7	③	5※1			
第1問 自己採点小計				(28)		
第2問	問1	8	①	3		
		9	②	3		
	問2	10	②	5		
	A 問3	11	⑤	3		
		12	⑤	4※2		
		13	①			
		14	④			
	B 問4	15	④	5		
問5		16	①	5		
第2問 自己採点小計				(28)		
第3問	A 問1	17	⑤	5		
		問2	18	①	5	
		問3	19	⑦	4	
	B 問4	20	①	5		
		問5	21	②	4	
第3問 自己採点小計				(23)		

問題番号	設問	解答番号	正解	配点	自己採点
第4問	問1	22	⑥	6	
	問2	23	⑤	5	
	問3	24	③	5	
	問4	25	⑥	5※3	
第4問 自己採点小計				(21)	
自己採点合計				(100)	

(注)

※1 は、④を解答した場合は3点を与える。

※2 は、全部正解の場合のみ点を与える。

※3 は、⑥を解答した場合は3点を与える。

【解説】

第1問 小問集合

問1 小球Pの質量を m 、初速度を v_0 、重力加速度の大きさを g とする。自由落下する小球Qから小球Pを見ると、重力以外に慣性力もはたらく。



重力と慣性力がつりあうため、加速度は0となる。また、小球Qから小球Pを見ると、その初速度(相対初速度)は v_0 であるため、小球Pは速度 v_0 の等速直線運動をする。

または、小球PとQはともに重力加速度で運動する。したがって、相対加速度は0であり、相対速度は一定となるからと考えてもよい。

1 の答 ②

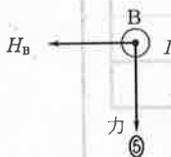
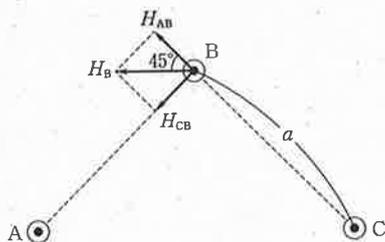
問2 正方形ABCDの1辺の長さを a とする。点A, Cに流れる直線電流がそれぞれ点Bにつくる磁場の強さを H_{AB} , H_{CB} とすると、

$$H_{AB} = \frac{I}{2\pi a} = H_{CB}$$

であり、磁場の向きは右ねじの法則より求まる。これらの合成磁場の強さを H_B とすると、

$$H_B = 2H_{AB} \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2} I}{2\pi a}$$

であり、その向きは左向きとなる。点Bを流れる電流にはたらく力の方向は、フレミングの左手の法則より ⑤ となる。



2 の答 ⑤

また、点Dに電流を流すと、題意より点Bに流れる電流が磁場から受ける力が0となるため、点Bのあらたな合成磁場は0である。点Dに流れる電流の大きさを i 、点Dに流れる電流が点Bにつくる磁場を H_{DB} とする。点Bの合成磁場が0なので、 H_{DB}

【ポイント】

自由落下

初速度0、鉛直下向きに重力加速度の大きさと等加速度直線運動する。

慣性力

$$\vec{F} = -m\vec{a}$$

\vec{F} : 慣性力

m : 質量

\vec{a} : 観測者の加速度

直線電流がつくる磁場

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

H : 磁場の強さ

I : 電流

r : 電流からの距離

フレミングの左手の法則



電流が磁場から受ける力

$$F = IB\ell = \mu IH\ell$$

F : 電流が磁場から受ける力

I : 電流

B : 磁束密度

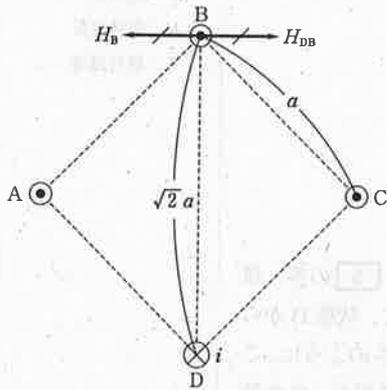
ℓ : 導線の長さ

μ : 透磁率

H : 磁場

は右向きに大きさ I_B となる。 H_{DB} が右向きなので、右ねじの法則より、点 D に流れる電流の向きは紙面に対して垂直に表から裏向きとなる。 H_{DB} の大きさは H_B と等しいので、

$$\frac{i}{2\pi\sqrt{2}a} = \frac{\sqrt{2}I}{2\pi a} \quad \therefore i = 2I$$

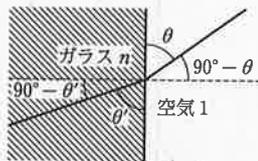


3 の答 ㉔

問3 ガラスから空気に屈折するとき、入射角は $90^\circ - \theta'$ 、屈折角は $90^\circ - \theta$ である。屈折の法則より、

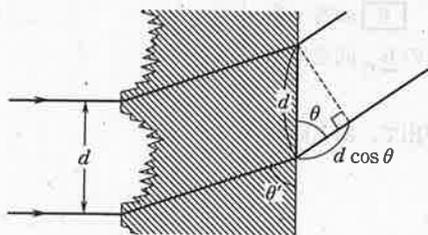
$$n \sin(90^\circ - \theta') = 1 \cdot \sin(90^\circ - \theta)$$

$$\therefore n \cos \theta' = \cos \theta$$



となりあうスリットを通過する二つの回折光は、ガラス中での光路長が等しく、空気中に屈折した後に $d \cos \theta$ の光路差が生じる。光の干渉条件より、光が強めあう条件は、

$$d \cos \theta = m\lambda$$



4 の答 ㉔

問4 状態 A, B, C の絶対温度をそれぞれ T_0, T_B, T_C とする。

ボイル・シャルルの法則より、

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{3p_0 V_0}{T_B} \quad \therefore T_B = 3T_0$$

屈折の法則(光波)

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

θ_1 : 入射角(媒質1側)

θ_2 : 屈折角(媒質2側)

n_1 : 屈折率(媒質1側)

n_2 : 屈折率(媒質2側)

光路長

光路長 = 屈折率 n × 距離

光の干渉条件(固定端反射なし)

強めあう $\dots n\Delta l = m\lambda$

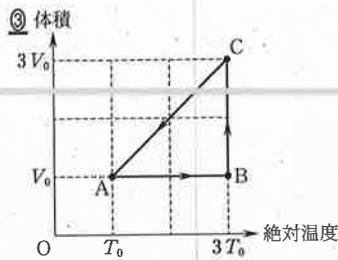
弱めあう $\dots n\Delta l = (m + \frac{1}{2})\lambda$

$n\Delta l$: 光路差

m : 整数

λ : 真空中の波長

過程 B→C は等温変化より、 $T_C = T_B = 3T_0$ となる。過程 C→A の定圧変化では、状態方程式より気体の体積は絶対温度に比例する。したがって、過程 A→B→C→A の体積と絶対温度の関係を表すグラフは、次図のようになる。



状態方程式

$$pV = nRT$$

p : 圧力

V : 体積

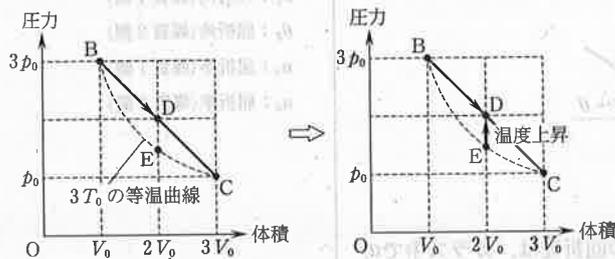
n : 物質質量

R : 気体定数

T : 絶対温度

5 の答 ③

次に、圧力と体積の関係のグラフ(図4)において、状態 B から状態 C まで直線的に変化する過程を考える。次図左のように、この直線上の体積 $2V_0$ の点を状態 D とする。元の過程 B→C の等温変化の曲線(絶対温度 $3T_0$) を破線で表し、この曲線上で体積 $2V_0$ の点を状態 E とする。状態 D は、状態 E と比べて圧力が大きく、体積は等しい。状態方程式より、状態 D の絶対温度 T_D は状態 E の絶対温度 $3T_0$ より大きい。

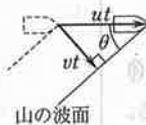


したがって、状態 B から状態 C まで直線的に変化する過程における理想気体の絶対温度は、 $3T_0$ (状態 B) → $3T_0$ より大(状態 D) → $3T_0$ (状態 C) となり、上がった後下がる。

6 の答 ②

問5 波は波面に対して垂直方向に進むので、図6の \underline{b} 向きに進む。

波の伝わる速さを v とする。船の先端から波が出て、ある時間 t たつと、波と船は次図のように進む。



上図の関係より、

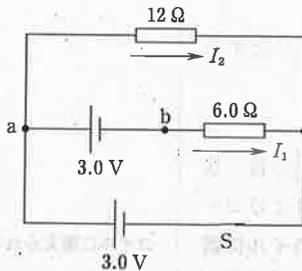
$$\sin \theta = \frac{vt}{ut} = \frac{v}{u} \quad \therefore v = u \sin \theta \quad \text{㉑}$$

7 の答 ㉓

第2問 自己誘導・交流

A

問1 スイッチを閉じた直後において、点 a に対する点 b の電位は -3.0 V であるため、問題中の図1は次図の回路のように考えることができる。



6.0Ω 、 12Ω の抵抗に流れる電流の大きさをそれぞれ I_1 、 I_2 とする。キルヒホッフの第2法則より、

$$\text{下側の閉回路：} 3.0 - 3.0 = 6.0I_1 \quad \therefore I_1 = 0 \text{ [A]}$$

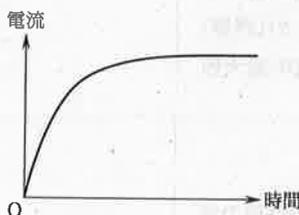
$$\text{外側の閉回路：} 3.0 = 12I_2 \quad \therefore I_2 = 0.25 \text{ [A]}$$

また、スイッチを閉じた直後のコイルの電流は、自己誘導によりスイッチを閉じる直前の電流 0 と等しいので、 $I_1 = 0$ と考えてもよい。

8 の答 ㉑

9 の答 ㉒

問2 問1で考えたように、スイッチを閉じた直後のコイルに流れる電流は 0 である。図2の縦軸は、点 a に対する点 b の電位であるので、コイルの自己誘導起電力を表す。図2のように、時間が経過するとともに自己誘導起電力の大きさは減少し、コイルに流れる電流は増加する。やがてコイルに流れる電流は一定になり、自己誘導起電力の大きさが 0 になる。したがって、スイッチを閉じてからのコイルに流れる電流の大きさの時間変化を表すグラフは、㉒となる。



10 の答 ㉒

キルヒホッフの第2法則

閉回路において…

起電力の和 = 電圧降下の和

自己誘導起電力

$$V = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

V : 自己誘導起電力

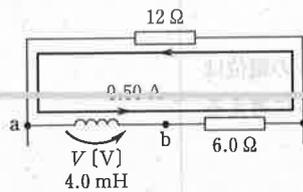
(電流の変化を妨げる向き)

L : 自己インダクタンス

Δt : 時間

ΔI : 電流の変化

問3 スイッチを開く前、コイルにはa→b向きに電流が流れていた。スイッチを開いた直後のコイルの電流は、自己誘導によりスイッチを開く前のコイルの電流と等しいため、回路に流れる電流は次図のようになり、電流の大きさは図3より0.50 Aである。



スイッチを開いた直後の点aに対する点bの電位をVとすると、キルヒホッフの第2法則より、

$$V = (6.0 + 12) \times 0.50 = 9.0 \text{ [V]}$$

11の答 ⑤

スイッチを開いてから十分に時間が経過すると、図3よりコイルに流れる電流は0となる。スイッチを開いた直後のコイルに蓄えられるエネルギーが、エネルギー保存則より、二つの抵抗で発生するジュール熱(W_R とする)に変換されたので、

$$\frac{1}{2} \times 4.0 \times 10^{-3} \times (0.50)^2 = W_R$$

$$\therefore W_R = 5.0 \times 10^{-4} \text{ [J]}$$

12の答 ⑤

13の答 ⑦

14の答 ④

B

問4 交流電源の角周波数を $\omega \left(= \frac{2\pi}{T} \right)$ 、時間を t とする。図5(a)より、点dに対する点cの電位は $V = V_0 \sin \omega t$ である。また、図5(b)より、抵抗を図4中の矢印の向きに流れる電流は $I = \frac{V_0}{R} \sin \omega t$ である。抵抗の消費電力を P とすると、

$$P = IV = \frac{V_0^2}{R} \sin^2 \omega t = \frac{V_0^2}{R} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$$

上式より、消費電力の時間変化を表すグラフは④となる。

または、 $P = RI^2 \geq 0$ であり、 $P = 0$ となる時間が $0, \frac{T}{2}, T, \frac{3T}{2}, 2T$ を満たすグラフより、④と考えてもよい。

15の答 ④

問5 コイルの自己インダクタンスを L とすると、コイルの(誘導)リアクタンスは $X = \omega L$ となる。コイルに流れる電流の最大値を I_0 とすると、

$$I_0 = \frac{V_0}{X} = \frac{V_0}{\omega L}$$

上式より、角周波数 ω を増加させると、コイルに流れる電流の最大値は減少する。

コイルに蓄えられるエネルギー

$$U = \frac{1}{2} LI^2$$

U : コイルに蓄えられるエネルギー

L : 自己インダクタンス

I : 電流

また、周期は $T = \frac{2\pi}{\omega}$ より、角周波数 ω を増加させると周期は短くなる。

16の答 ①

第3問 合成波・光電効果

A

問1 問題中の図2より、0.10 s間でうなりが1回生じているので、1 s間当たりのうなりの回数は10回となる。または、うなりの周期が0.10 sであるので、1 s間当たりのうなりの回数は周期の逆数より10回と考えてもよい。

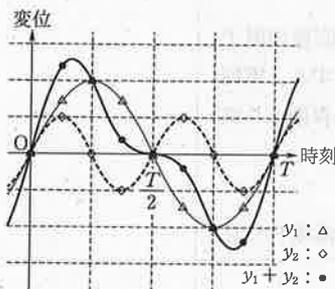
張力を大きくすると、弦を伝わる波の速さが増加する。基本振動する弦の波長は変化しないので、波の速さと振動数の関係より、振動数は大きくなる。

音の高さがずれた「ラ」の鍵盤を押すと同時に440 Hzのおんさを鳴らしたとき、1 s間当たりのうなりの回数が10回であるので、「ラ」の鍵盤を押したとき出た音の振動数は、430 Hz、450 Hzのどちらかになる。また、張力を大きくすると音の振動数が大きくなり、やがてうなりは生じなくなる。このときの鍵盤の音の振動数が440 Hzであるので、調整前の「ラ」の鍵盤の音は430 Hzであることがわかる。

17の答 ⑤

問2 440 Hz（「ラ」の鍵盤）の音の周期を T とする。周期は振動数の逆数であるので、振動数が2倍である880 Hz（1オクターブ高い「ラ」の鍵盤）の音の周期は、 T の $\frac{1}{2}$ 倍（ $\frac{T}{2}$ ）となる。破線の周期が $\frac{T}{2}$ となるのは、①、②である。

①、②は、細実線と破線の振動の様子が同じであり、440 Hzの音を出す「ラ」の鍵盤を押したときに出た音の変位を y_1 、1オクターブ高い「ラ」の鍵盤を押したときに出た音の変位を y_2 とする。いくつかの時刻で合成波の変位 $y_1 + y_2$ の点を図示すると、これらの点を通る合成波の変位は①となる。



18の答 ①

問3 図3の合成波の変位は、長い周期と短い周期の二つの振動が混ざっているように見える。長い周期は $T_1 = 0.0101$ [s]、短い周

1 s間当たりのうなりの回数

振動数の差が小さい二つの音が同時に聞こえるとき、一定周期で音の大きさが繰り返される。これをうなりという。1 s間当たりのうなりの回数は、二つの音の振動数の差の大きさに等しい。

波の速さと振動数の関係

$$v = f\lambda$$

v : 波の伝わる速さ

f : 振動数

λ : 波長

期は $T_2 = \frac{0.0101}{10}$ [s] である。長い周期に対応する振動数を f_1 、短い周期に対応する振動数を f_2 とすると、

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0.0101} \approx 99.0 \text{ [Hz]}$$

$$f_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{10}{0.0101} \approx 990 \text{ [Hz]}$$

誤差があることを考慮すると、98 Hz の音を出す「ソ」の鍵盤を押したときに対応する振動数が $f_1 \approx 99$ [Hz] であり、表 1 にある鍵盤のいずれかを押したときに対応する振動数が $f_2 \approx 990$ [Hz] となる。表 1 の鍵盤の中で、 f_2 の振動数に最も近いのはシの 988 Hz であるため、押した鍵盤として最も適当なものはシとなる。

19 の答 ⑦

B

問 4 光の波長が λ_0 のとき、波の速さと振動数の関係より光の振動数は $\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0}$ となり、光子のエネルギーは $h\nu_0 = h\frac{c}{\lambda_0}$ となる。光の波長が λ_0 のとき、電子はぎりぎり飛び出す(運動エネルギー ≈ 0) ので、エネルギー保存則より、

$$h\frac{c}{\lambda_0} = W \quad \therefore \lambda_0 = \frac{hc}{W}$$

光の波長 λ が λ_0 より大きいとき、

$$\text{光子のエネルギー} = h\frac{c}{\lambda} < h\frac{c}{\lambda_0} = W$$

光子のエネルギーが仕事関数 W より小さくなると、電子は飛び出さなくなる。したがって、光の波長を λ_0 より大きくすると、電子は飛び出さなくなる。

20 の答 ①

問 5 電気素量を e 、電極 P に届いた単位時間当たりの電子(光子)数を N とすると、電流(光電流)は $I = eN$ と表すことができる。図 5 より、電極 Q に対する電極 P の電位が V_A 、 V_B のとき、電流はともに等しく I_0 であるので、

$$I_0 = eN_A, I_0 = eN_B \quad \therefore N_A = N_B$$

光の波長が一定であるため、電極 Q から飛び出た直後の電子の最大の運動エネルギーは一定になり、これを K_0 とする。電極 Q に対する電極 P の電位が V_A のとき、エネルギー保存則より電極 P に届く直前の電子の最大の運動エネルギーは、

$$K_A = K_0 + eV_A$$

同様に、電極 Q に対する電極 P の電位が V_B のとき、電極 P に届く直前の電子の最大の運動エネルギーは、

$$K_B = K_0 + eV_B$$

図 5 より、 $V_A < V_B$ であるので、 $K_A < K_B$ となる。

21 の答 ②

光子のエネルギー

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

E : 光子のエネルギー

h : プランク定数

ν : 光の振動数

c : 真空中の光速

λ : 光の波長

第4問 万有引力

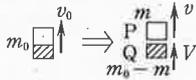
問1 人工衛星は、万有引力 $G\frac{Mm_0}{r^2}$ を向心力として等速円運動するので、運動方程式より、

$$m_0 \frac{v_0^2}{r} = G \frac{Mm_0}{r^2} \quad \therefore v_0 = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

22 の答 ⑥

問2 衛星 Q の質量は、人工衛星の質量 m_0 から衛星 P の質量 m を引いた値 $(m_0 - m)$ となる。分裂直後の衛星 Q の速度を V とすると、運動量保存則より、

$$m_0 v_0 = m v + (m_0 - m) V \quad \therefore V = \frac{m_0 v_0 - m v}{m_0 - m}$$



23 の答 ⑤

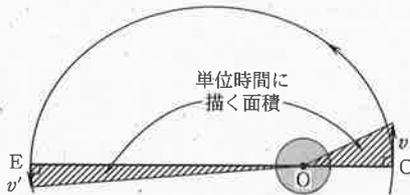
問3 衛星の加速度の向きは、運動方程式より万有引力の向き(衛星 P → 地球の中心 O)と同じなので、図3の③となる。

24 の答 ③

問4 点 C、点 E における衛星 P の速さをそれぞれ v 、 v' とする。ケプラーの第2法則より、P と地球の中心 O を結ぶ線分が単位時間に描く面積は一定であるため、

$$\frac{1}{2} OC \cdot v = \frac{1}{2} OE \cdot v' \quad \therefore v' = \frac{OC}{OE} v < v$$

上式より、だ円軌道上の点 E での速さ v' は、点 C の速さ v より小さいア。



短軸方向の運動において、点 C と点 E は中心に相当する。点 E の速さ v' は点 C の速さ v より小さいため、中心を通過するときの速さが通過する向きによって異なる。単振動の中心において、速さは通過する向きによらず同じで最大となるため、短軸方向の運動は単振動と違うことがわかる。

等速円運動

$$a = r\omega^2 = \frac{v^2}{r}, \quad v = r\omega$$

a : 加速度(向心加速度)

r : 半径

ω : 角速度

v : 速さ

運動方程式

$$m\vec{a} = \vec{F}$$

m : 質量

\vec{a} : 加速度

\vec{F} : 力(合力)

運動量保存則

衝突や分裂のとき、または物体系にはたらく外力が0のとき、物体系の運動量の和は保存される。

