物理 追試験

問題番号(配点)	設問	解答番号	正解	配点	チェック
第1問(25)	問1	1	⑤	5	
	問2	2	⑧	5	
	問3	3	⑤	5	
	問4	4	⑤	5	
	問5	5	④	5	
第2問(25)	問1	6	⑥	5*1	
		7	②	5*2	
	問2	8	③	5	
	問3	9	②	5	
		10	③	5	

問題番号(配点)	設問	解答番号	正解	配点	チェック
第3問(20)	問1	11	①	5*3	
	問2	12	③	5*4	
	問3	13	④	5	
	問4	14	④	5	
第4問(30)	問1	15	⑥	5	
	問2	16	⑤	5	
	問3	17	②	5	
	問4	18	④	5	
		19	③	5	
	問5	20	⑤	5	

(注)

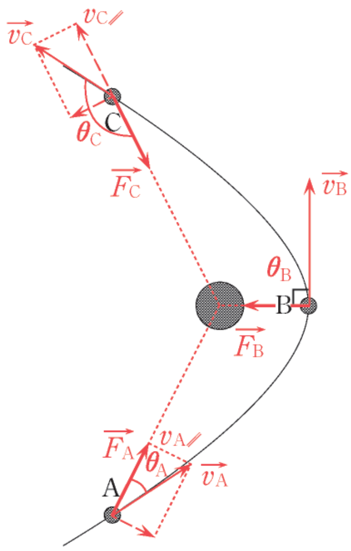
1 ＊1は，③，④，⑤，⑨のいずれかを解答した場合は1点を与える。
2 ＊2は，①，③，⑤，⑧のいずれかを解答した場合は1点を与える。
3 ＊3は，②，③，⑤のいずれかを解答した場合は1点を与える。
4 ＊4は，①，④，⑤のいずれかを解答した場合は1点を与える。

自己採点欄
100点

第1問 標準 《総　合　題》

問1　$\boxed{\quad 1 \quad}$　正解は⑤

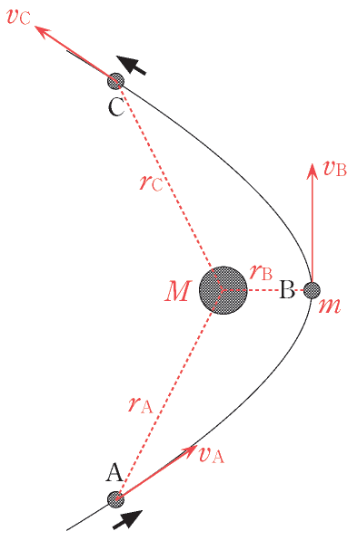
$\boxed{\text{ア}}$　A，B，Cの各点における，彗星が太陽から受ける万有引力を $\overrightarrow{F_A}$，$\overrightarrow{F_B}$，$\overrightarrow{F_C}$，彗星の速度を $\overrightarrow{v_A}$，$\overrightarrow{v_B}$，$\overrightarrow{v_C}$，$\overrightarrow{v_A}$ の $\overrightarrow{F_A}$ 方向の成分を $v_{A/\!/}$，$\overrightarrow{v_C}$ の $\overrightarrow{F_C}$ 方向の成分を $v_{C/\!/}$ とすると，これらは右図のようになる。



点Aでは，$\overrightarrow{F_A}$ の向きと $v_{A/\!/}$ の向きが同じ向きであるから，万有引力が彗星に対してする単位時間あたりの仕事は正である。点Bでは，$\overrightarrow{v_B}$ の $\overrightarrow{F_B}$ 方向の成分は0であるから，単位時間あたりの仕事は0である。点Cでは，$\overrightarrow{F_C}$ の向きと $v_{C/\!/}$ の向きが逆向きであるから，単位時間あたりの仕事は負である。

よって，単位時間あたりの仕事を，左から順に並べると，**正，0，負**となる。

$\boxed{\text{イ}}$　彗星が太陽からの万有引力だけを受けて運動する場合，力学的エネルギー保存則が成立する。彗星，太陽の質量をそれぞれ m，M とする。A，B，Cの各点において，彗星と太陽との間の距離をそれぞれ r_A，r_B，r_C とすると，力学的エネルギー保存則は



$$\frac{1}{2}mv_A{}^2-G\frac{mM}{r_A}=\frac{1}{2}mv_B{}^2-G\frac{mM}{r_B}=\frac{1}{2}mv_C{}^2-G\frac{mM}{r_C}$$

ここで，$r_A=r_C>r_B$ であるから

$$G\frac{mM}{r_A}=G\frac{mM}{r_C}<G\frac{mM}{r_B}$$

$$\therefore\quad \frac{1}{2}mv_A{}^2=\frac{1}{2}mv_C{}^2<\frac{1}{2}mv_B{}^2$$

よって，速さは，$\boldsymbol{v_A=v_C<v_B}$ となる。

したがって，文字列と式の組合せとして最も適当なものは⑤である。

別解　$\boxed{\text{イ}}$　彗星が太陽からの万有引力だけを受けて運動する場合，彗星と太陽とを結ぶ線分（動径）が単位時間に通過する面積（面積速度）は一定である。これを，ケプラーの第2法則（面積速度一定の法則）という。面積速度 A は，彗星と太陽との間の距離が r の位置での彗星の速さを v，動径 $\vec{r}$ の方向と彗星の速度 $\vec{v}$ の方向がなす角を θ とすると

$$A=\frac{1}{2}rv\sin\theta$$

点Bで太陽からの距離が最小であるから，点Bでの速さ v_B が最も速い。軌道上の点Aと点Cは太陽から同じ距離にあるので，点Aでの速さ v_A と点Cでの速さ v_C とは等しい。前図のように，A，B，Cの各点において，動径の方向と彗星の速度の方向がなす角を θ_A，θ_B，θ_C とする。$\theta_B=90^\circ$ であるので，ケプラーの第２法則（面積速度一定の法則）より

$$A=\frac{1}{2}r_A v_A \sin\theta_A=\frac{1}{2}r_C v_C \sin\theta_C=\frac{1}{2}r_B v_B$$

ここで，軌道の対称性より，$r_A=r_C$，$\theta_A=\pi-\theta_C$ であるから，$v_A=v_C$ となる。
また，彗星が点Aから点Bへ運動するとき，万有引力は正の仕事をするから運動エネルギーは増加し，$v_A<v_B$ である。彗星が点Bから点Cへ運動するとき，万有引力は負の仕事をするから運動エネルギーは減少し，$v_C<v_B$ である。

POINT ○彗星と太陽との間にはたらく万有引力の大きさ F は，彗星の質量を m，太陽の質量を M，彗星と太陽との間の距離を r，万有引力定数を G とすると

$$F=G\frac{mM}{r^2}$$

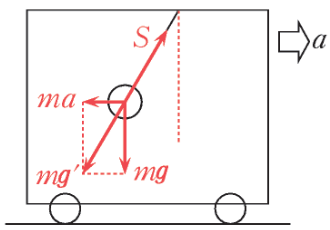
万有引力による位置エネルギー U は，無限遠点を $U=0$ の基準として

$$U=-G\frac{mM}{r}$$

CHECK ○惑星は太陽を１つの焦点とする楕円軌道上を運動する。これを，ケプラーの第１法則という。
○彗星も太陽を焦点の１つとする軌道上を運動するが，(i)楕円軌道を描き，太陽に最接近した後，再び戻ってくる周期彗星と，(ii)放物線軌道または双曲線軌道を描き，一度太陽に最接近した後，二度と戻ってこない非周期彗星とがある。

問２　$\boxed{2}$　正解は⑧

$\boxed{ウ}$　小球の質量を m とする。この自動車が一定の加速度 a で運動しているとき，自動車とともに運動する観測者から見て，小球にはたらく力は，鉛直下向きに大きさ mg の重力，自動車の加速度と反対向きに大きさ ma の慣性力，糸の張力 S である。重力と慣性力の合力をみかけの重力といい，みかけの重力加速度の大きさを g' とすると



$$mg'=\sqrt{(mg)^2+(ma)^2} \qquad \therefore \quad g'=\sqrt{g^2+a^2}>g$$

自動車が静止しているときの，大きさ g の重力加速度のもとでの振り子の周期 T は，$T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ である。これに対して大きさ g' のみかけの重力加速度のもとでの振り子の周期を T' とすると

$$T'=2\pi\sqrt{\frac{L}{g'}}<2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}=T$$

よって，このとき自動車の中で観測される振り子の周期は T より短い。

エ　自動車が等速直線運動をしているとき，加速度は0であるから，小球には慣性力ははたらかないので，大きさ g の重力加速度のもとでの振り子と同じである。よって，このとき自動車の中で観測される振り子の周期は T に等しい。

したがって，語句の組合せとして最も適当なものは⑧である。

問3　3　正解は⑤

オ　気体が吸収する熱量を Q，気体の内部エネルギーの変化を ΔU，気体がする仕事を W とすると，熱力学第1法則より

$$Q = \Delta U + W$$

過程A→Bにおいて，気体が吸収する熱量を Q_{AB} とすると

$$Q_{AB} = 20p_0V_0 + 4p_0V_0 = 24p_0V_0$$

カ　熱機関の1サイクルにおいて，熱効率 e は次式で表される。

$$熱効率\ e = \frac{気体がする仕事\ W_{all}}{気体が吸収する熱量\ Q_{in}}$$

ここで，過程B→Cと過程C→Aにおいて気体は熱を放出するから，1サイクルで気体が吸収する熱量 Q_{in} は

$$Q_{in} = Q_{AB} = 24p_0V_0$$

1サイクルで気体がする仕事 W_{all} は

$$W_{all} = 4p_0V_0 + 0 - 2p_0V_0 = 2p_0V_0$$

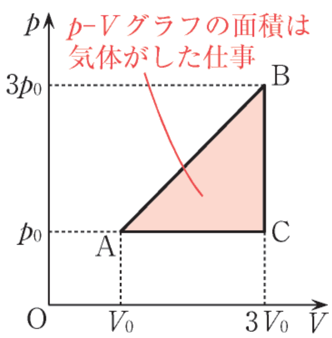
よって

$$e = \frac{W_{all}}{Q_{in}} = \frac{2p_0V_0}{24p_0V_0} = \frac{1}{12}$$

したがって，式と数値の組合せとして最も適当なものは⑤である。

POINT　○熱効率の計算に用いる熱量 Q_{in} は，気体が吸収した熱量だけで放出した熱量は含まないが，仕事 W_{all} は，気体が外部へした仕事と外部からされた仕事の和である。
○気体がした仕事 W_{all} は，右図のように，図2の p-V グラフの三角形の面積で与えられる。

$$W_{all} = \frac{1}{2} \times (3V_0 - V_0) \times (3p_0 - p_0) = 2p_0V_0$$



CHECK　○過程B→Cと過程C→Aにおいて気体が熱を放出することは，熱力学第1法則から確認することができる。各過程における気体が吸収する熱量は次表のようになる。

	気体の内部エネルギーの変化 ΔU	気体がする仕事 W	気体が吸収する熱量 Q
A→B	$20p_0V_0$	$4p_0V_0$	$24p_0V_0$
B→C	$-15p_0V_0$	0	$-15p_0V_0$
C→A	$-5p_0V_0$	$-2p_0V_0$	$-7p_0V_0$

○気体の物質量を n，定積モル比熱を C_{V}，気体定数を R とする。
状態A，状態Bにおける気体の温度を T_{A}，T_{B} とすると，状態方程式より

$$p_0V_0=nRT_{\mathrm{A}} \qquad \therefore \quad T_{\mathrm{A}}=\frac{p_0V_0}{nR}$$

$$3p_0\cdot 3V_0=nRT_{\mathrm{B}} \qquad \therefore \quad T_{\mathrm{B}}=\frac{9p_0V_0}{nR}$$

過程 A→B において，気体の内部エネルギーの変化を ΔU_{AB} とすると

$$\Delta U_{\mathrm{AB}}=nC_{\mathrm{V}}(T_{\mathrm{B}}-T_{\mathrm{A}})=nC_{\mathrm{V}}\left(\frac{9p_0V_0}{nR}-\frac{p_0V_0}{nR}\right)=\frac{C_{\mathrm{V}}}{R}\times 8p_0V_0$$

一方，表１より，$\Delta U_{\mathrm{AB}}=20p_0V_0$ であるから

$$\frac{C_{\mathrm{V}}}{R}\times 8p_0V_0=20p_0V_0 \qquad \therefore \quad C_{\mathrm{V}}=\frac{5}{2}R$$

よって，ここで用いられた気体は，二原子分子理想気体であることがわかる。

問４　$\boxed{\ 4\ }$　正解は⑤

$\boxed{キ}$　大きさ p の運動量をもつ粒子の物質波としての波長（ド・ブロイ波長）を λ とすると

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

$\boxed{ク}$　質量 m の粒子を加速したときの速さを v とすると，運動量 p は

$$p=mv$$

運動エネルギーを K とすると

$$K=\frac{1}{2}mv^2=\frac{1}{2m}(mv)^2=\frac{1}{2m}\cdot p^2=\frac{1}{2m}\left(\frac{h}{\lambda}\right)^2$$

質量 m の電子と質量 M の陽子が同じ大きさの運動エネルギーをもつとき，運動エネルギー K は，電子のド・ブロイ波長 $\lambda_{\text{電子}}$ と陽子のド・ブロイ波長 $\lambda_{\text{陽子}}$ を用いて

$$K=\frac{1}{2m}\left(\frac{h}{\lambda_{\text{電子}}}\right)^2,\quad K=\frac{1}{2M}\left(\frac{h}{\lambda_{\text{陽子}}}\right)^2$$

よって

$$\frac{1}{2m}\left(\frac{h}{\lambda_{\text{電子}}}\right)^2=\frac{1}{2M}\left(\frac{h}{\lambda_{\text{陽子}}}\right)^2 \qquad \therefore \quad \frac{\lambda_{\text{電子}}}{\lambda_{\text{陽子}}}=\sqrt{\frac{M}{m}}$$

したがって，式の組合せとして最も適当なものは⑤である。

CHECK　○大きさ e の電気量をもつ静止した粒子を大きさ V の電圧で加速すると，粒子は電場（電界）から大きさ eV の仕事を受け，運動エネルギー K を得る。運動エネルギーの変化と仕事の関係より

$$K-0=eV \qquad \frac{1}{2}mv^2=eV \qquad \therefore \quad v=\sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

よって，粒子のド・ブロイ波長を λ とすると

$$\lambda=\frac{h}{p}=\frac{h}{mv}=\frac{h}{m\sqrt{\dfrac{2eV}{m}}}=\frac{h}{\sqrt{2meV}}$$

これより，電子と陽子を同じ大きさの電圧で加速したとき，電子と陽子がもつ電気量の大きさ e は同じであるから，ド・ブロイ波長 λ は質量の平方根 $\sqrt{m}$ に反比例することがわかり

$$\frac{\lambda_{\text{電子}}}{\lambda_{\text{陽子}}}=\sqrt{\frac{M}{m}}$$

○質量 m の粒子がもつ運動量 p と運動エネルギー K の関係は

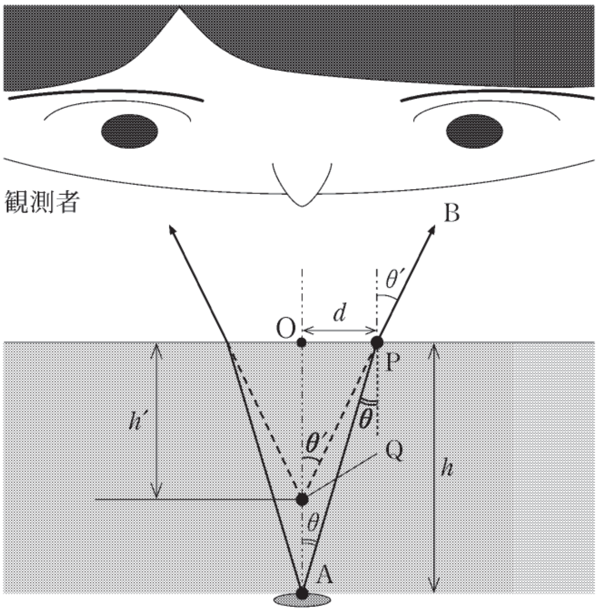
$$K=\frac{p^2}{2m} \quad \text{または} \quad p=\sqrt{2mK}$$

このとき，粒子の物質波としての波長（ド・ブロイ波長）λ は

$$\lambda=\frac{h}{p}=\frac{h}{\sqrt{2mK}}$$

問５　$\boxed{5}$　正解は④

$\boxed{\text{ケ}}$　図３で，点Ａを通る鉛直線と水面が交わる点をＯとすると，右図の△QOP と △AOP より



$$\tan\theta'=\frac{d}{h'},\quad \tan\theta=\frac{d}{h}$$

屈折の法則より，水の空気に対する屈折率 n を θ，θ' を用いて表し，角 θ，θ' がきわめて小さいとした近似式を用いると

$$n=\frac{\sin\theta'}{\sin\theta}\fallingdotseq\frac{\tan\theta'}{\tan\theta}=\frac{\frac{d}{h'}}{\frac{d}{h}}=\frac{h}{h'}$$

$$\therefore \quad h'=\frac{h}{n} \quad \cdots\cdots (\text{あ})$$

$\boxed{\text{コ}}$　(あ)より，h' は，角 θ，θ' がきわめて小さい範囲において，d によらないことがわかる。

$\boxed{\text{サ}}$　目に届く光は，点Ｑから出て点Ｐを直進し点Ｂの方向に進んできたように見える。

したがって，組合せとして最も適当なものは④である。

CHECK　このようにしてコインは実際より浅く見える。これを水中の物体の浮き上がりといい，h' をみかけの深さという。水を入れたコップに割り箸を斜めに入れると，コップの底についた割り箸の先が浮き上がって見えるので，割り箸は水面で折れ曲がっているように見える。これも，物体の浮き上がりが原因である。

第２問 標準 —— 電磁気 《相互誘導，ダイオードの回路》

問１ $\boxed{\ 6\ }$ 正解は⑥ $\boxed{\ 7\ }$ 正解は②

$\boxed{\ 6\ }$ $\boxed{\ ア\ }$ コイル１に交流電流を流すと，コイル１を貫く磁場（磁界）の向きと大きさが時間変化をする。これによりコイル２を貫く磁場も変化するので，コイル２にはその変化を妨げるように誘導起電力が発生する。この誘導起電力の周期は，コイル１の交流電流の周期と同じで，誘導起電力の向きと大きさが時間変化をする。コイル１を流れる交流電流は，時間によって時計回りと反時計回りを繰り返すが，たとえば次図のように，コイル１を流れる反時計回りの電流が増加した場合，コイル２には上側端子が正であるような誘導起電力が生じることがわかる。

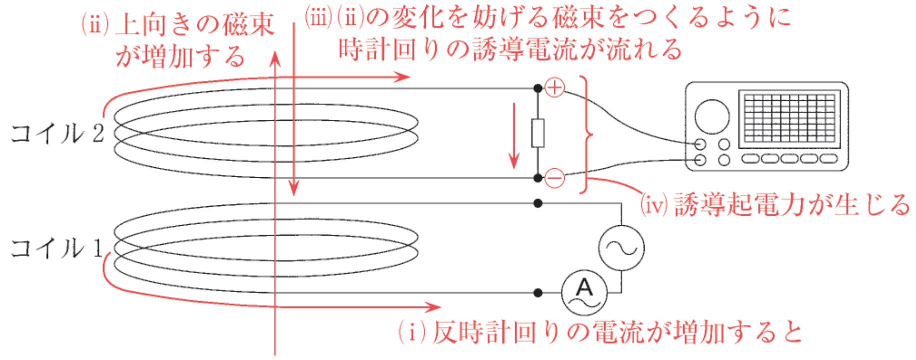
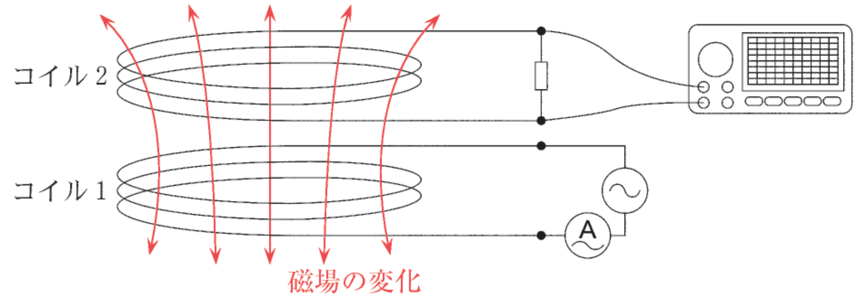
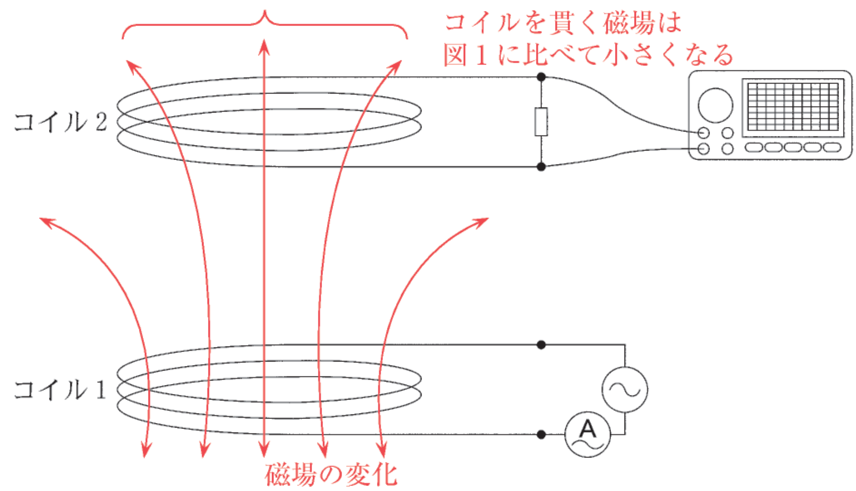


図１の状態に比べて，図２のようにコイル２を上に持ち上げると，コイル２を貫く磁場が小さくなるので，コイル２に生じる誘導起電力の大きさも小さくなる。このときに，オシロスコープに現れた波形の振幅は，誘導起電力の大きさである。

よって，波形の振幅は，「小さくなりました」が適する。





$\boxed{イ}$　コイル１の交流電流の周期は変わっていないので，コイル２に生じる誘導起電力の周期も変わらない。このときに，オシロスコープに現れた波形の山と山の間隔は，誘導起電力の周期である。

よって，間隔は「変わりません」が適する。

したがって，語句の組合せとして最も適当なものは⑥である。

$\boxed{7}$　$\boxed{ウ}$　コイル２の巻き数を N，コイル２の１巻きを貫く時間 Δt あたりの磁束の変化を $\Delta \Phi$ とすると，コイル２に生じる誘導起電力の大きさ V は

$$V = N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

図２の状態に比べて，交流電源の実効値が一定になるようにして周波数を高くすると，磁場の強さは変わらないがその変化の周期が短くなる。コイル２を貫く磁束の変化の時間 Δt が小さくなるので，誘導起電力の大きさ V は大きくなる。

よって，波形の振幅は「大きくなりました」が適する。

$\boxed{エ}$　コイル２を貫く磁束の変化の時間 Δt が小さくなるので，誘導起電力の周期も小さくなる。

よって，間隔は「狭くなりました」が適する。

したがって，語句の組合せとして最も適当なものは②である。

POINT　交流電源の周波数 f と周期 T の間には，$f = \dfrac{1}{T}$ の関係がある。

CHECK　○コイルを流れる電流が変化すると，そのコイル自身にも誘導起電力が生じる。これを自己誘導という。コイルの自己インダクタンスを L，コイルを流れる電流の時間 Δt あたりの変化を ΔI とすると，コイルに生じる誘導起電力 V は

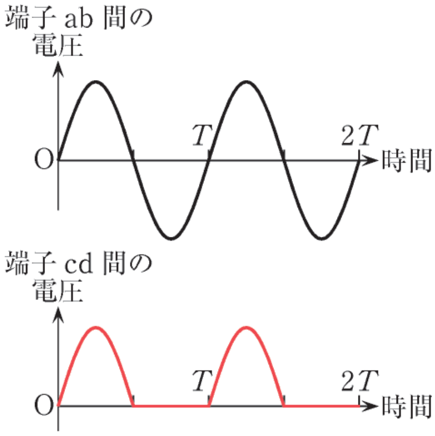
$$V = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

ここで，－符号は，誘導起電力の向きが電流の向きと逆向きであることを表す。自己インダクタンス L は，コイル内部の物質の種類，コイルの断面積と長さ，コイルの巻き数等によって決まる。

○本問のように，コイル１を流れる電流が変化すると，コイル２に誘導起電力が生じる。これを相互誘導という。コイルの相互インダクタンスを M，コイル１を流れる電流の時間 Δt あたりの変化を ΔI_1 とすると，コイル２に生じる誘導起電力 V_2 は

$$V_2 = -M\frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

問 2　$\boxed{8}$　正解は③



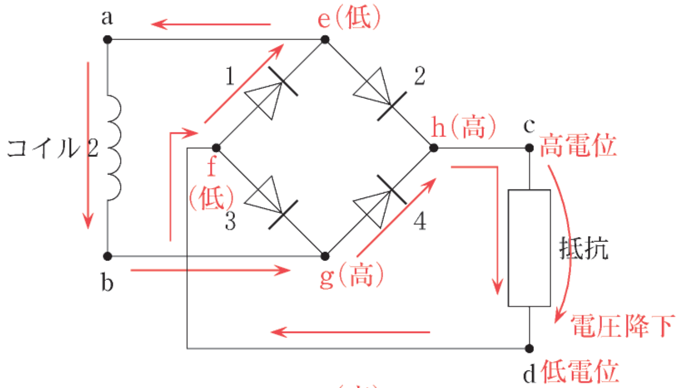
b に対する a の電圧が正 $\left(\text{図 5 の } 0<t<\dfrac{T}{2},\ T<t<\dfrac{3T}{2}\right)$ のとき，ダイオードには電流が流れ，d に対する c の電圧は，b に対する a の電圧に等しい。すなわち，端子 cd 間の電圧波形は，端子 ab 間の電圧波形に等しい。

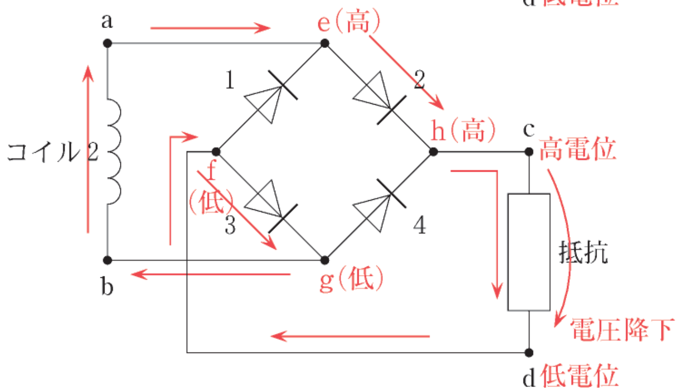
b に対する a の電圧が負 $\left(\text{図 5 の } \dfrac{T}{2}<t<T,\ \dfrac{3T}{2}<t<2T\right)$ のとき，ダイオードには電流が流れないので，d に対する c の電圧は 0 である。すなわち，端子 cd 間の電圧波形は 0 である。

したがって，図として最も適当なものは③である。

問 3　$\boxed{9}$　正解は②　　$\boxed{10}$　正解は③

$\boxed{9}$　次図のように，図 6 の回路の交点を e， f， g， h とする。点 b からダイオードに向かって流れる電流は，点 g→ダイオード 4→点 h→点 c→抵抗→点 d→点 f→ダイオード 1→点 e→点 a→コイル 2 を通って，点 b に戻ってくる。





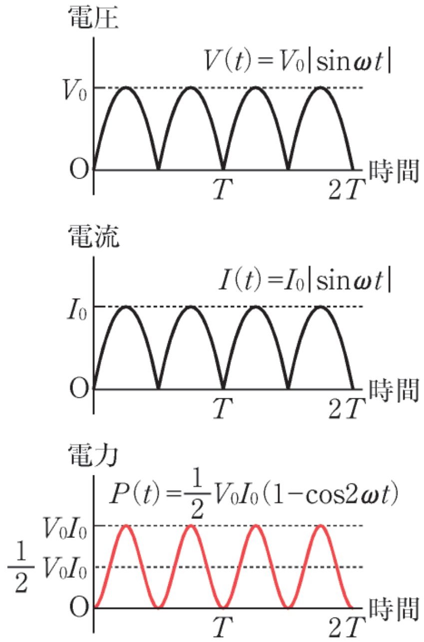
このとき，次の(ⅰ)，(ⅱ)に注意が必要である。

(ⅰ)点 h からダイオード 2 へは逆方向であるから，電流は流れない。

(ⅱ)抵抗を流れる電流によって電圧降下が生じるので，点 c と点 d では，点 c が高電

位である。点 f と点 d は等電位，点 g と点 c は等電位であるから，点 f と点 g では，点 g が高電位である。よって，点 f からダイオード 3 を通って点 g へは電流は流れない。

したがって，語句として最も適当なものは②である。



$\boxed{10}$ 点 ab 間の電圧波形が図 5 となるとき，前図のように，点 b の電位が高い場合も点 a の電位が高い場合も，抵抗にはともに点 c →点 d の向きに電流が流れるから，点 cd 間の電圧波形と，点 cd 間の電流波形は，右図のようになる。

このとき，交流電源の角周波数を ω とし，抵抗にかかる電圧 $V(t)$ は，振幅を V_0 とすると

$$V(t)=V_0|\sin\omega t|$$

抵抗を流れる電流 $I(t)$ は，抵抗にかかる電圧と同位相で，振幅を I_0 とすると

$$I(t)=I_0|\sin\omega t|$$

抵抗で消費される電力 $P(t)$ は

$$\begin{aligned}P(t)&=V(t)\times I(t)\\&=V_0|\sin\omega t|\times I_0|\sin\omega t|=V_0I_0\sin^2\omega t\\&=\frac{1}{2}V_0I_0(1-\cos 2\omega t)\end{aligned}$$

したがって，図として最も適当なものは③である。

第 3 問 標準 —— 力学 《ものさしの重心，摩擦力》

問 1 $\boxed{11}$ 正解は①

$\boxed{ア}$ ものさしにはたらく鉛直方向の力のつりあいの式より

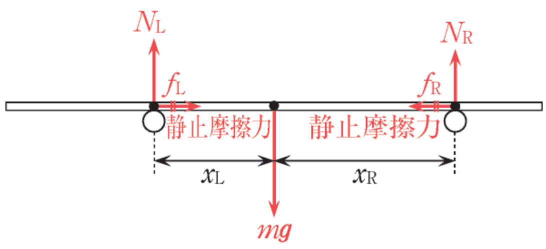
$$N_L+N_R=mg \quad \cdots\cdots(い)$$

$\boxed{イ}$ 重心のまわりの力のモーメントのつりあいの式より

$$N_Lx_L=N_Rx_R \quad \cdots\cdots(う)$$

したがって，式の組合せとして最も適当なものは①である。

問 2 $\boxed{12}$ 正解は③



$\boxed{ウ}$ 段階 1 では，ものさしは水平方向に滑らずに静止している。ものさしにはたらく水平方向の力のつりあいの式より

$$f_L=f_R$$

エ　(う)と同様に，重心のまわりの力のモーメントのつりあいの式より

$$N_{\mathrm{L}}x_{\mathrm{L}}=N_{\mathrm{R}}x_{\mathrm{R}}$$

題意より，指の間隔を縮める前は $x_{\mathrm{L}}<x_{\mathrm{R}}$ であるから

$$N_{\mathrm{L}}>N_{\mathrm{R}}$$

両辺に静止摩擦係数 μ をかけると

$$\mu N_{\mathrm{L}}>\mu N_{\mathrm{R}}$$

したがって，式の組合せとして最も適当なものは③である。

問 3　13　正解は④

オ　(い)，(う)と同様に

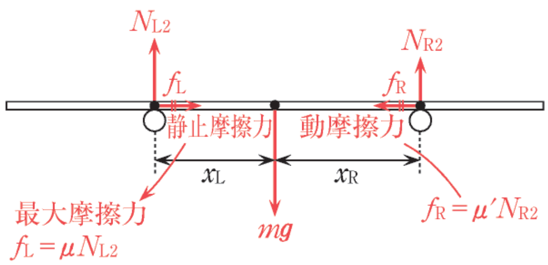
$$N_{\mathrm{L}}+N_{\mathrm{R}}=mg$$
$$N_{\mathrm{L}}x_{\mathrm{L}}=N_{\mathrm{R}}x_{\mathrm{R}}$$

これらから，N_{L} を消去して N_{R} を求めると

$$(mg-N_{\mathrm{R}})\cdot x_{\mathrm{L}}=N_{\mathrm{R}}x_{\mathrm{R}}\qquad\therefore\quad N_{\mathrm{R}}=\frac{x_{\mathrm{L}}}{x_{\mathrm{L}}+x_{\mathrm{R}}}mg$$

ここで，左指は滑らないので x_{L} が一定で，x_{R} が小さくなると，N_{R} は大きくなる。

カ　左指での静止摩擦力が最大となって最大摩擦力であるとき，これが f_{R} と等しい。f_{R} は右指での動摩擦力の大きさで $\mu' N_{\mathrm{R2}}$，左指での最大摩擦力の大きさは μN_{L2} であるから



$$\mu' N_{\mathrm{R2}}=\mu N_{\mathrm{L2}}\qquad\therefore\quad\frac{N_{\mathrm{L2}}}{N_{\mathrm{R2}}}=\frac{\mu'}{\mu}\quad\cdots\cdots(え)$$

したがって，語と式の組合せとして最も適当なものは④である。

CHECK　(え)より，$\mu'<\mu$ であるから　$N_{\mathrm{L2}}<N_{\mathrm{R2}}$

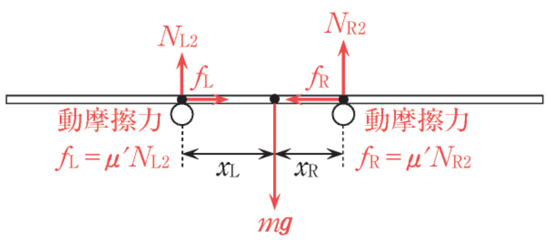
(う)と同様に　$N_{\mathrm{L2}}x_{\mathrm{L}}=N_{\mathrm{R2}}x_{\mathrm{R}}$

よって，$x_{\mathrm{L}}>x_{\mathrm{R}}$ であることがわかる。

さらに右指を滑らせて x_{R} を小さくしようとすると，N_{R} が大きくなり，$\mu' N_{\mathrm{R}}$ が大きくなると，左指での摩擦力が最大摩擦力の大きさより大きくなり静止の限界を超えるので，左指が滑り始める。

問 4　14　正解は④

キ　左指が滑り始めた直後は，ものさしには左指からも右指からも動摩擦力がはたらき，左指での動摩擦力の大きさ f_{L} は $\mu' N_{\mathrm{L2}}$，右指での動摩擦力の大きさ f_{R} は $\mu' N_{\mathrm{R2}}$ である。



㈹より，$\mu'<\mu$ であるから

$$N_{L2}<N_{R2} \qquad \mu' N_{L2}<\mu' N_{R2}$$

すなわち

$$f_L<f_R$$

よって，f_R は f_L より大きい。

別解　左指が滑り始める直前は，左指での最大摩擦力の大きさと右指での動摩擦力の大きさが等しく

$$\mu N_{L2}=\mu' N_{R2}$$

左指が滑り始めた直後は，左指での動摩擦力の大きさは $\mu' N_{L2}$，右指での動摩擦力の大きさは $\mu' N_{R2}$ であるから

$$\mu' N_{L2}<\mu N_{L2}$$

よって

$$\mu' N_{L2}<\mu' N_{R2} \qquad \therefore \quad f_L<f_R$$

ク　$f_L<f_R$ より，ものさしにはたらく水平方向の合力の大きさは f_R-f_L で左向きである。よって，ものさしは左向きに加速される。

したがって，語句の組合せとして最も適当なものは④である。

CHECK　ものさしの質量を m，加速度を a とすると，運動方程式より

$$ma=f_R-f_L \qquad \therefore \quad a=\frac{f_R-f_L}{m}$$

第4問 標準 ── 波 《三角波の合成，平面波の干渉と定常波》

問1　15　正解は⑥

ア　波は，媒質の各点に２つの波の振動状態が同時に伝わるだけであって，互いに他の波の進行を妨げたり，他の波に影響を与えたりはしない。これを，波の独立性という。

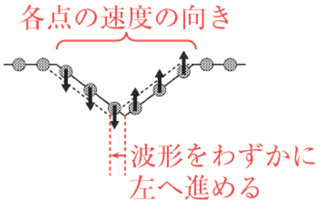
よって，適当な語句は(c)である。

CHECK　○屈折の法則…ある媒質中を進む波が他の媒質に進むときに，その境界面で進行方向を変える際に成り立つ法則のことをいう。
○反射の法則…ある媒質中を進む波が他の媒質に進むときに，その境界面で向きを変え，もとの媒質に戻って進む際に成り立つ法則のことをいう。
○熱力学第２法則…熱は高温部から低温部へ移動する。逆に，周囲に何の変化も残さずに熱を低温部から高温部へ移動させることはできないことをいう。与えられた熱をすべて仕事に変えることはできないということもできる。

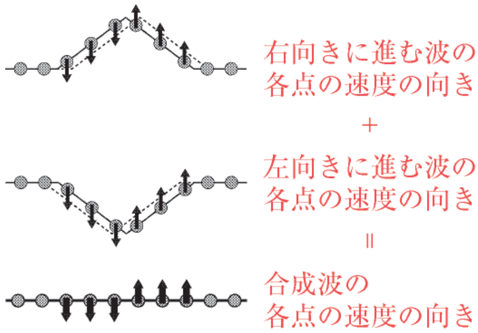
イ　２つの波が重なり通り過ぎた後は，それぞれの波は重なる前のそのままの波面の形を維持して進み続ける。図１の右向きに進む山の波は，重なった後も右向きに山のまま進み続け，左向きに進む谷の波は，重なった後も左向きに谷のまま進

み続ける。
よって，適当な図は(f)である。
したがって，記号の組合せとして最も適当なものは6である。

問 2　16　正解は5



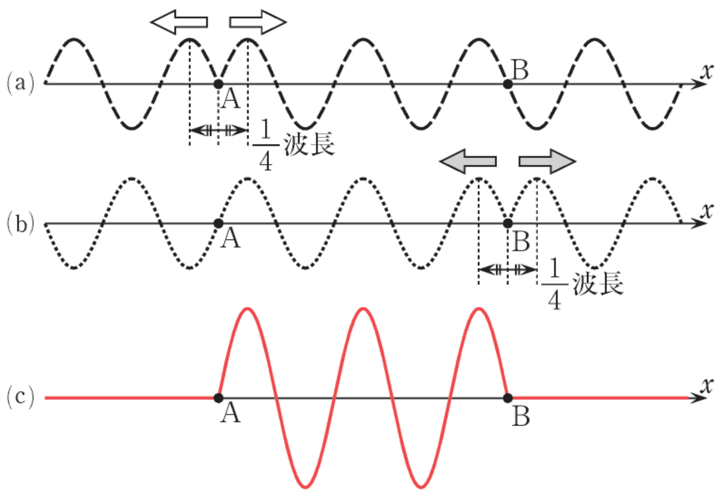
ウ　右図のように，波が左へ進んでいる部分で，わずかに時間を進めた波形を破線で表すと，各点の速度の向きは矢印で表される。
よって，適当な図は(h)である。



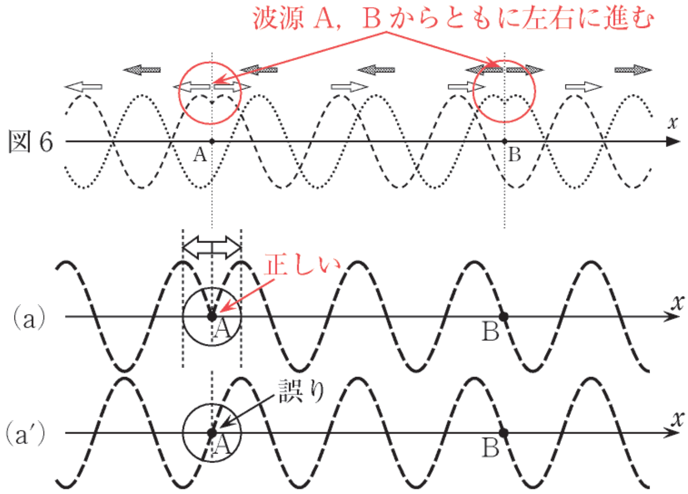
エ　各点の速度の向きは，右図のように，図 3 の右向きに進む波の各点の速度の向きと，ウで得られた左向きに進む波の各点の速度の向きを合成したものである。
よって，適当な図は(j)である。
したがって，記号の組合せとして最も適当なものは5である。

問 3　17　正解は2

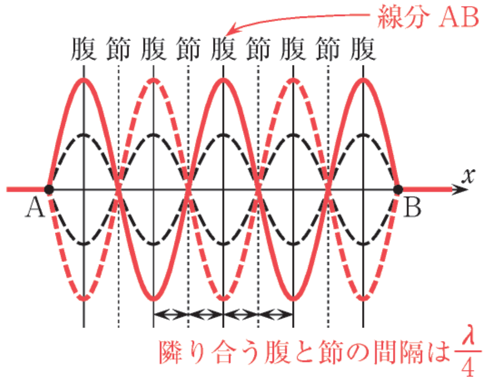
それぞれの波は，$\frac{1}{4}$周期で$\frac{1}{4}$波長進む。波源 A，B から出た波を，図 5 の状態からそれぞれ$\frac{1}{4}$波長進ませると，波形は次図(a)，(b)のようになり，これらの合成波の波形は(c)のようになる。
したがって，図として最も適当なものは2である。



POINT ○波源 A，B のどちらの場合でも，波は波源より左側では左向きに進行し，波源より右側では右向きに進行するので，少し時間がたった後のグラフは図 6 のようになる。よって，波源 A から出た波が，図 5 の状態から $\frac{1}{4}$ 波長進んだときの波形は，次図の(a)であって(a′)ではないことに注意が必要である。



○波源 A，B から互いに逆向きに進む速さ，波長，振幅が等しい波が重なるとき，線分 AB 間には定常波（定在波）ができる。波源 A，B が同位相で振動するとき，線分 AB の中点は腹で，隣り合う腹と節の間隔は $\frac{\lambda}{4}$ である。このとき，AB 間で節の点は，$x=\frac{\lambda}{2}$，λ，$\frac{3\lambda}{2}$，2λ であることがわかる。



問 4 $\boxed{18}$ 正解は④ $\boxed{19}$ 正解は③

$\boxed{18}$ 点 B の右側で座標 x $\left(\frac{5\lambda}{2}\leqq x\right)$ の点を P とすると，点 P に到達する波源 A からの波と波源 B からの波の道のりの差は

$$\overline{\mathrm{PA}}-\overline{\mathrm{PB}}=x-\left(x-\frac{5\lambda}{2}\right)=\frac{5\lambda}{2}$$

波源が 1 回振動する時間が周期 T であり，この時間に振動の位相は 2π 進む。この 1 周期 T の間に波は 1 波長 λ だけ進むので，1 波長 λ だけ離れた 2 点間の振動の位相差は 2π であり，波源に近い方が位相が進んでいる。

よって，求める位相差を ϕ とすると

$$\lambda : 2\pi = \frac{5\lambda}{2} : \phi \qquad \therefore \quad \phi = 5\pi$$

$\boxed{19}$ 波源Bから出た波の点Bでの時刻 t における変位 y_{B0} は

$$y_{B0} = A_0 \cos\frac{2\pi t}{T}$$

$x = \frac{5\lambda}{2}$ の波源Bから出て，x 軸の負の向きに速さ v で進む波が，座標 x $\left(0 < x < \frac{5\lambda}{2}\right)$ の点に到達するまでの距離は $\frac{5\lambda}{2} - x$ であるから，この波が座標 x の点に到達するのに $\dfrac{\frac{5\lambda}{2} - x}{v}$ だけ時間がかかる。よって，座標 x の点での振動は波源Bより時間 $\dfrac{\frac{5\lambda}{2} - x}{v}$ だけ遅れる，すなわち，座標 x の点での振動状態は波源Bでの時間 $\dfrac{\frac{5\lambda}{2} - x}{v}$ だけ前の振動状態と同じなので，この波の時刻 t，座標 x における変位 y_B は

$$y_B = A_0 \cos\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{\frac{5\lambda}{2} - x}{v}\right)$$

$$= A_0 \cos\frac{2\pi}{T}\left\{t + \frac{1}{v}\left(x - \frac{5\lambda}{2}\right)\right\}$$

CHECK ○波源 A から出た波の $x=0$ の点 A での時刻 t における変位 y_{A0} は

$$y_{A0} = A_0 \cos\frac{2\pi t}{T}$$

波源 A から出て x 軸の正の向きに進む波の時刻 t，座標 x（>0）における変位 y_A は，速さ v で進む波が座標 x の点に到達するのに $\frac{x}{v}$ だけ時間がかかるので，座標 x の点での振動状態は波源 A での時間 $\frac{x}{v}$ だけ前の振動状態と同じなので

$$y_A = A_0 \cos\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x}{v}\right)$$

○合成波の変位 y は，三角関数の公式 $\cos A + \cos B = 2\cos\frac{A+B}{2}\cos\frac{A-B}{2}$，$\cos(-\theta) = \cos\theta$ を用いると

$$\begin{aligned} y &= y_A + y_B \\ &= A_0 \cos\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x}{v}\right) + A_0 \cos\frac{2\pi}{T}\left\{t + \frac{1}{v}\left(x - \frac{5\lambda}{2}\right)\right\} \\ &= 2A_0 \cos\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{5\lambda}{4v}\right)\cos\frac{2\pi}{T}\left(\frac{x}{v} - \frac{5\lambda}{4v}\right) \end{aligned}$$

これが，AB 間にできる定常波の式であり，時刻 t と位置 x が分離された形である。
定常波の節は時刻 t によらず $y=0$ であるから

$$\cos\frac{2\pi}{T}\left(\frac{x}{v}-\frac{5\lambda}{4v}\right)=0 \qquad \frac{2\pi}{T}\left(\frac{x}{v}-\frac{5\lambda}{4v}\right)=\left(n+\frac{1}{2}\right)\pi \quad (n=0,\ \pm1,\ \pm2,\ \cdots)$$

波の式 $v=\dfrac{\lambda}{T}$ より，$vT=\lambda$ を用いると

$$x=(n+3)\frac{\lambda}{2}$$

よって，$0<x<\dfrac{5\lambda}{2}$ で節の座標 x は，$n=-2,\ -1,\ 0,\ 1$ を代入すると

$$x=\frac{\lambda}{2},\ \lambda,\ \frac{3\lambda}{2},\ 2\lambda$$

となることが確認できる。

問 5 $\boxed{20}$ 正解は⑤

２つの波源から点 P_1～P_3 までの道のりの差が波長 λ の整数倍のとき，２つの波は同位相で重なり波は強めあう。逆に，２つの波源から点 P_1～P_3 までの道のりの差が波長 λ の半整数倍のとき，２つの波は逆位相で重なり波は弱めあう。

P_1 については

$$|P_1A-P_1B|=\left|\frac{3\lambda}{2}-2\lambda\right|=\frac{\lambda}{2} \quad \text{……弱めあう}$$

P_2 については

$$|P_2A-P_2B|=\left|\frac{7\lambda}{2}-\frac{3\lambda}{2}\right|=2\lambda \quad \text{……強めあう}$$

P_3 については，$P_3A=l$ とすると

$$|P_3A-P_3B|=\left|l-\left(l-\frac{5\lambda}{2}\right)\right|=\frac{5\lambda}{2} \quad \text{……弱めあう}$$

したがって，語句として最も適当なものは⑤である。

CHECK アクティブ・ノイズ・キャンセリングは，外部のノイズをマイクで拾い，そのノイズと逆位相の音を発生させて，これらの音を相殺させることでノイズを打ち消す技術である。特にエンジン音や騒音などの低周波数のノイズに効果的で，建設現場では，建設機械の騒音をマイクで拾い，これと逆位相の音をヘッドフォンやイヤフォンで発生させて音を弱めている。