令和５年度 次世代の科学技術を担う人材育成事業

福岡県
高校生科学技術コンテスト
ファーストステージ

物理

注意事項

１　試験開始の合図があるまで，この問題冊子の中を見てはいけません。
２　試験中に問題冊子の印刷不鮮明，ページの落丁・乱丁及び解答用紙の汚れなどに気付いた場合は，挙手をして監督者に知らせなさい。ただし，問題内容にかかわる質問は，受け付けません。
３　解答用紙には，解答欄以外に次の記入欄があるので，監督者の指示に従って正しく記入しなさい。
　(1) 受験番号欄…受験票に記入されている受験番号を記入しなさい。
　(2) 氏　　名　　欄…氏名を楷書で記入しなさい。
　(3) 所属校名欄…受験票に記入されている所属校名を記入しなさい。
４　問題冊子の余白等は適宜利用してよいが，どのページも切り離してはいけません。

受験番号	
氏　　名	
所属校名	

福岡県教育委員会

第１問　次の各問いに答えよ。

問１　どんぐりと竹ひごで作られたおもちゃのやじろべえを指に乗せると，図１のように倒れないで直立を保つ。その理由として最も適切なものを下の㋐～㋕の中から一つ選べ。

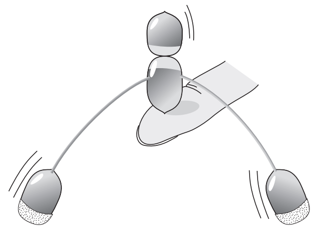


図１

㋐　やじろべえの重心が，指との接点の真上にあるため。
㋑　やじろべえの重心が，指との接点の真下にあるため。
㋒　やじろべえの重心が，指との接点と一致するため。
㋓　下の２つのどんぐり重さの合計が，指に触れるどんぐりの重さより大きいため。
㋔　下の２つのどんぐり重さの合計が，指に触れるどんぐりの重さと等しいため。
㋕　下の２つのどんぐり重さの合計が，指に触れるどんぐりの重さより小さいため。

問２　図２のように，鉄心入りのコイル，スイッチＳ，直流電源からなる回路がある。スイッチの接続端子ａ，ｂは，正極と負極が逆向きの直流電源にそれぞれ接続している。鉄心には糸で吊り下げられた導体リングが通してあり，スイッチＳの切り替えに伴い生じるリングの動きを観測する。スイッチが切れた状態から①スイッチをａに入れる，②スイッチをａから切る，③スイッチをｂに入れる，④スイッチをｂから切る，という操作を順に行ったとき，図２におけるリングの動き出す向きの組合せとして最も適切なものを次の㋐～㋗の中から一つ選べ。

	①	②	③	④
㋐	右	左	左	右
㋑	右	左	右	左
㋒	左	右	右	左
㋓	左	右	左	右
㋔	右	右	左	左
㋕	左	左	右	右
㋖	右	右	右	右
㋗	左	左	左	左

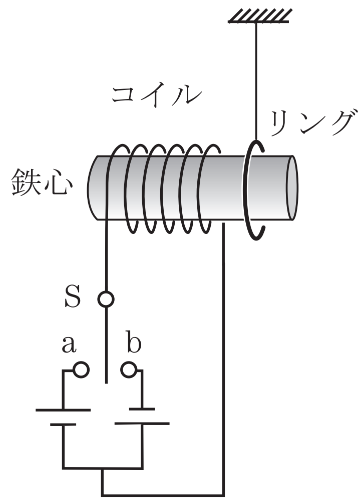


図２

問3　次のまとめを読み，以下の問いに答えよ。

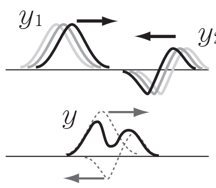
● 波の重ね合わせの原理

２つの波が同時に媒質に届くと，その変位は，個々の波の変位の数学的な和で与えられる。

■波の重ね合わせ

$y = y_1 + y_2$

y：媒質の変位



● 波の強め合い

２つの波が常に同位相で重ね合わせられる場所を波が強め合う場所という。強め合った波が通過する曲線を「腹線」という。

図３のように，２つの波源 S_1，S_2 から，同位相で振幅 A の同心円状の波が出ており，干渉により波が強め合う「腹線」が観測されている。S_1，S_2 の中点を通る腹線を「0 次腹線」と呼び，0 次腹線から左右に順に「１次腹線」,「２次腹線」と呼ぶ。各腹線に沿って，振幅 $2A$ の強め合った波が，２つの波源を通る直線から遠ざかる向きに進んでいく。

波源 S_1，S_2 の中点の位置に新たに波源 S_3 を加え３波源とすると，図４のように波源から十分離れた位置での波の干渉の様子は，２波源のときと比べてどのように変化すると予想できるか。最も適切なものを下の(ア)～(キ)の中から一つ選べ。ただし，波源 S_3 から出る波は，波源 S_1，S_2 と振幅も位相も同じものとし，波の減衰は考えないものとする。

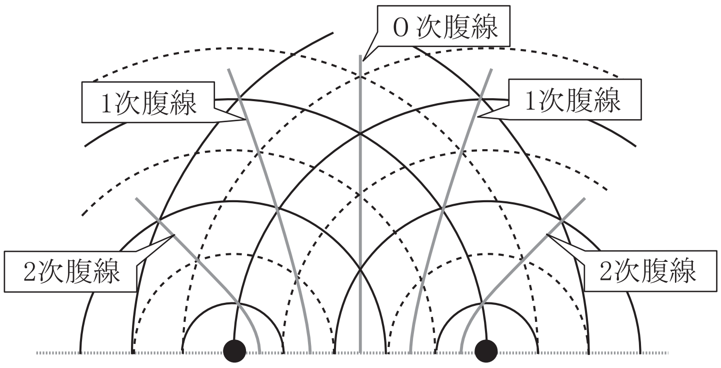


図３

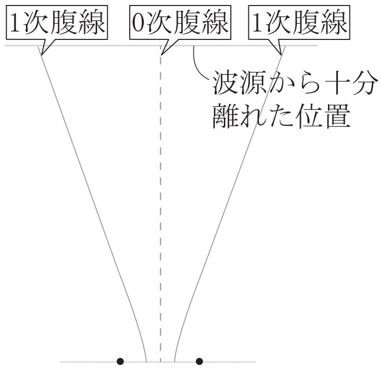


図４

(ア)　0次，1次，2次の腹線を伝わる波の振幅がすべて1.5倍となる。

(イ)　0次，1次，2次の腹線を伝わる波がすべて消失する。

(ウ)　0次腹線を伝わる波の振幅は1.5倍となるが，1次および2次の腹線を伝わる波は消失する。

(エ)　0次および1次の腹線を伝わる波の振幅は1.5倍となるが，2次腹線を伝わる波は消失する。

(オ)　0次および1次の腹線を伝わる波の振幅は1.5倍となるが，2次腹線を伝わる波の振幅は0.5倍となる

(カ)　0次および2次の腹線を伝わる波の振幅は1.5倍となるが，1次腹線を伝わる波は消失する。

(キ)　0次および2次の腹線を伝わる波の振幅は1.5倍となるが，1次腹線を伝わる波の振幅は0.5倍となる。

問4　次のまとめを読み，以下の問いに答えよ。

● 熱力学第一法則

理想気体の内部エネルギー U〔J〕は，気体分子の運動エネルギーの総和であり，内部エネルギーが ΔU〔J〕変化したときに，気体が吸収した熱量を Q〔J〕，気体が外部にした仕事を W〔J〕とすると，

$$\Delta U = Q - W$$

の関係がある。これを熱力学第一法則という。

● 気体のする仕事

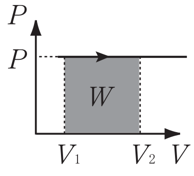
気体の圧力を P，体積を V として，気体の状態変化を体積－圧力図（P － V 図）で表現したとき，気体のする仕事は，変化曲線と V 軸で囲まれた部分の面積で表される。変化が一巡する場合，気体がする仕事は，変化曲線で囲まれる閉領域の面積となる。

■気体のする仕事

$W = P(V_2 - V_1)$

W：気体のする仕事

P：圧力　V_1，V_2：体積



■一巡変化するときの気体のする仕事

|気体のする仕事|=S

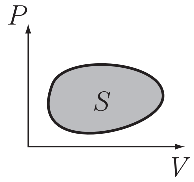


図５の$P-V$図のように，状態aから出発して，等温圧縮変化で状態bに，さらに定圧膨張変化で状態cに，そして最後に断熱膨張変化で状態aにもどる循環過程a－b－cがある。各変化での気体が吸収した熱をQ_{ab}，Q_{bc}，Q_{ca}，内部エネルギーの変化をΔU_{ab}，ΔU_{bc}，ΔU_{ca}，気体がした仕事をW_{ab}，W_{bc}，W_{ca}と表すとき，関係式として誤っているものを下の(ア)～(キ)の中から二つ選べ。

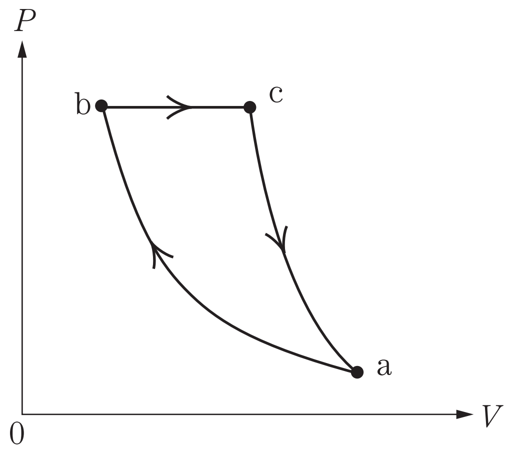


図５

(ア)　$\Delta U_{ab}+\Delta U_{bc}+\Delta U_{ca}=0$

(イ)　$\Delta U_{bc}+\Delta U_{ca}=0$

(ウ)　$Q_{ab}=0$

(エ)　$Q_{bc}>0$

(オ)　$Q_{ca}=0$

(カ)　$W_{ab}+W_{bc}+W_{ca}>0$

(キ)　$Q_{ab}+Q_{bc}+Q_{ca}=0$

問５　次のまとめを読み，以下の問いに答えよ。

● 放射性崩壊の半減期

ある放射性原子核が，α崩壊やβ崩壊などの放射性崩壊によって，初めの個数の半分が別の物質に変化するまでにかかる時間を半減期という。

半減期がT年の放射性原子核Aが$4N$個あり，半減期が$2T$年の放射性原子核BがN個ある。A，Bの原子核が同数になるのは今から何年後か。最も適切なものを次の(ア)～(エ)の中から一つ選べ。

(ア)　T　　(イ)　$2T$　　(ウ)　$3T$　　(エ)　$4T$

第２問　次の文章〔A〕，〔B〕を読み，以下の問いに答えよ。

〔A〕　慣性力についてまとめてみよう。

加速中の電車で乗客が経験することの１つに，「人が握っていないつり革が斜めにぶら下がる」というものがある。電車の乗客から見ると，電車の加速度が一定の場合，つり革は傾いたまま静止しているので，力のつり合いが成立している。つり革を質量 m の小球をとりつけた単振り子に置き換えて考えると，電車の乗客から見たつり合いの式は，重力加速度 $\vec{g}$（大きさ g），ひもの張力 $\vec{S}$，および「未知の力」を用いて，

$$\vec{0} = m\vec{g} + \vec{S} + （未知の力）\cdots ①$$

となる。最後の「未知の力」がなぜ必要かというと，重力と張力の２つの力だけでは合力が 0 にならないことは明白だからである。このように，加速度運動する観測者が，力学現象に関して運動方程式を立式するときは，静止している観測者の場合には考慮しない「みかけの力」を考える必要があり，これを慣性力という。

次のように考えると，この慣性力なるものがどのようなものかがわかる。電車の外部からこの小球を見ると，小球は電車の加速度と同じ加速度で運動しているので，その運動方程式は，

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{S}$$

となる。この式で左辺を移項すると，

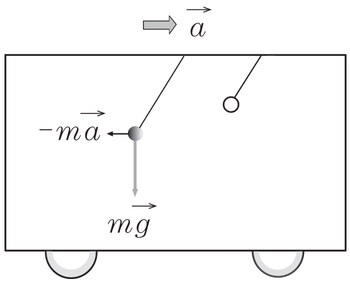
$$\vec{0} = m\vec{g} + \vec{S} + (-m\vec{a}) \cdots ②$$

となり，①式と②式を比較すると，（未知の力）＝ $-m\vec{a}$ となる。

● 慣性力

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

m：物体の質量
$\vec{a}$：電車および観測者の加速度



慣性力は対象物体の運動の様子に依存せず，質量のみに比例するという点で重力と似ている。そこで，これらをまとめて，

$$m\vec{g} + (-m\vec{a}) = m(\vec{g} - \vec{a}) = m\vec{g'}$$

と表し，この $\vec{g'}$ を「みかけの重力加速度」と呼ぶ。$\vec{g'}$ は $\vec{g}$ に比べると，大きさも向きも異なるから注意が必要である。

問1　前述の電車が水平なレール上を運動している場合，慣性力の大きさが重力の大きさの$\dfrac{1}{\sqrt{3}}$倍となるとき，みかけの重力加速度の大きさを，g を用いて表せ。

問2　振り子時計は，振り子の運動を歯車の回転に変換して針を進め，時を刻む時計である。振り子時計を電車の窓側の壁に設置し，駅の時計と電車の振り子時計の時刻を合わせた。駅を出発した電車が次の駅で止まったときに，振り子時計が示す時刻について述べた次の文のうち，最も適切なものを，次の(ア)～(エ)の中から一つ選べ。なお，駅の時計はどの駅も同様に正しい時刻を示している。

また，振り子の周期は，振り幅（振れ角）が十分小さいとき，振り子の長さ l とみかけの重力加速度の大きさ g' を用いて，$2\pi\sqrt{\dfrac{l}{g'}}$ で与えられ，電車の加速時と減速時の加速度の大きさは等しいものとする。

(ア)　電車の加速時にも減速時にも振り子時計の針の進み方は遅くなるので，振り子時計の時刻は，駅の時計よりも遅れている。

(イ)　電車の加速時にも減速時にも振り子時計の針の進み方は速くなるので，振り子時計の時刻は，駅の時計よりも進んでいる。

(ウ)　振り子時計の針の進み方は電車の加速時には遅くなり，減速時には速くなるので，振り子時計の時刻は駅の時計とほぼ等しい。

(エ)　振り子時計の針の進み方は電車の加速時には速くなり，減速時には遅くなるので，振り子時計の時刻は駅の時計とほぼ等しい。

〔B〕 地上での月面疑似体験について考えてみよう。

近々できる大型娯楽施設の広告に，月面体験という文字が踊っている。大型ブースに乗り込み，月面にいる感覚を体験できるイベントのようだ。月面と地上での違いを実感し，より客観的に比較できるというコースメニューが大人気だそうだ。高校の物理部のメンバーであるＡさんとＢさんは，イベントの評判を聞いて，さっそく秋晴れの日曜日に顧問の先生と３人で月面体験に行ってみた。スポーツ万能のＡさんは，今日はヒーローになれると密かに張り切っている。先日の体力測定では垂直跳びで，70 cm というクラスで最高の記録を叩き出していた。

先生が事前に入手した情報によると，この月面体験施設は，固定された滑車を通したロープにより質量 M〔kg〕の巨大なブースを質量 M_0〔kg〕の重りとつなげた構造になっていて，体験者が乗り込んだ後，ブースは建物の床面より高い位置に持ち上げられ，重りをストッパーで止めて固定される。

その後ストッパーを外すと，ブースがゆっくりと落下を始め，月面体験コースが開始される。

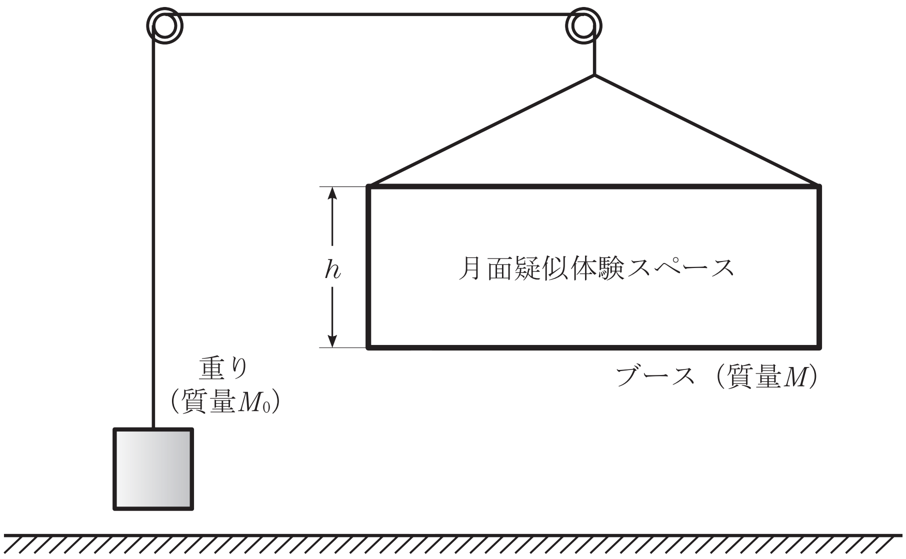


図１

コースメニューには，「体験Ⅰ　ブランコ」，「体験Ⅱ　砲丸投げ」，「体験Ⅲ　垂直飛び」の３つの演目があり，ブースが落下を始める前に１つ目の演目を体験（地上モード）し，次にブースが落下を始めてから床面に達するまでに同じ演目を体験する（月面モード）。１回の体験コースで，ブースの上げ下げが３回繰り返され，３つすべての演目を体験できる。

以下，数値計算で必要な場合は，次の数値を利用せよ。

地上の重力加速度の大きさ $g = 9.8$〔m/s^2〕　月面上の重力加速度の大きさ $\fallingdotseq \dfrac{1}{6}g$

$\sqrt{2} = 1.41$，$\sqrt{3} = 1.73$，$\pi = 3.14$　とする。

先生　「前回の授業でやったアト・ウッドの装置といわれる力学装置を覚えているかい。滑車を通した紐の両端に結ばれた質量の異なる物体を重力のもとで運動させると，2つの物体の質量の比で決まる加速度の等加速度運動が実現できるという装置だったね。月面での重力加速度の大きさは，地上での重力加速度の大きさの $\frac{1}{6}$ だから，ブース内で観測するみかけの重力加速度で再現するには，ロープの質量を無視できるとすれば，ブースの質量と重りの質量の比は，$M : M_0 =$ $\boxed{}$ となっているんだよ。」

問３　空欄 $\boxed{}$ に入る最も適切なものを，次の(ア)～(カ)の中から一つ選べ。

(ア)　4：3　　(イ)　5：2　　(ウ)　7：5
(エ)　9：2　　(オ)　10：3　　(カ)　11：1

Bさん　「なるほど！　でも，人が乗り込むとブース全体の重さが変わるから，そのたびに重りの重さを調整しなくてはならないわけですか。」

先生　「正確にはそうだけど，ブースや重りの重さに比べて人の体重は十分小さいので，それは考えなくてもよいようだ。重りのストッパーが外され，地上モードから月面モードになった瞬間に月面モードランプが点灯し，月面モードでの各演目が開始される。測定結果は自動的に記録され，測定が終了すると，速やかにブース全体にブレーキがかかって減速し，最後は地面にソフトランディングするそうだ。」

先生の説明に安心した2人は早速ブースに乗り込んだ。

【体験Ⅰ】 ブランコ

長さが5mの軽いロープで吊るされたブランコが用意されていて，ブランコの板がお尻のところまで上がる位置まで移動し待機した。スタートの合図とともにブランコに乗ると揺れ始めたが，1往復したタイミングで，月面モードのランプが点灯した。その瞬間，下りエレベーターに乗ったかのような浮遊感に一瞬恐怖を感じたが，そこからのブランコの1往復は，スローモーションの映像を見ているかのような感動的な体験で，2人とも歓声を上げていた。ブランコ体験では月面モードでのブランコの1往復が終了した瞬間に月面モードが終了し，重りが自動的にブースの質量と同じM〔kg〕のものに変更された。さらにブランコが最後に1往復し終えたところで，ブースが減速モードになった。

最初の1往復はおよそ $\boxed{\ 1\ }$ 〔s〕かかっていたが，月面モードでの1往復では $\boxed{\ 2\ }$ 〔s〕となり，最後の1往復の時間は，$\boxed{\ 3\ }$ 。

問4 空欄 $\boxed{\ 1\ }$，$\boxed{\ 2\ }$，$\boxed{\ 3\ }$ に入る最も適切なものを，それぞれの解答群から一つずつ選べ。ただし，このブランコの周期は**問2**で与えたものを用いてよい。

$\boxed{\ 1\ }$，$\boxed{\ 2\ }$ の解答群

(ア) 3.0	(イ) 4.5	(ウ) 6.0
(エ) 7.5	(オ) 9.0	(カ) 11.0

$\boxed{\ 3\ }$ の解答群

(ア) 最初の1往復の時間より短かった
(イ) 最初の1往復の時間と等しかった
(ウ) 最初の1往復の時間より長く，月面モードでの1往復の時間より短かった
(エ) 月面モードでの1往復の時間と等しかった
(オ) 月面モードでの1往復の時間より長かった

問5 ブランコの脇に，先端に球をつけた大きなばね振り子が鉛直にぶら下げてあり，地上モードでその振動がブランコの周期と同期するように調整されていた。月面モードに入る直前は静止していたが，月面モードに入ると同時に振動を開始した。このとき，ばね振り子に比べてブランコの周期は何倍になるか。等しい場合は1倍と答えよ。地上モードでのばね振り子の周期は，球の質量m〔kg〕とばね定数k〔N/m〕を用いて，$2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$〔s〕で与えられる。

【体験Ⅱ】　砲丸投げ

２回目は砲丸投げであった。通常の砲丸投げと異なり，砲丸を水平方向に投げ出すルールであった。まず地上モードで各自の飛距離を測った。月面モードに入って手渡された砲丸が，地上モードの時と同じものだと聞かされ，その軽さに驚いた二人だったが，月面モードでの測定直後に感想を聞くと，二人とも「投げるときの手応えは［1］，飛距離は［2］だった。」と声を揃えて言った。

問６　空欄［1］，［2］に入る最も適切なものを，それぞれの解答群から一つずつ選べ。

［1］の解答群

㋐　地上モードより小さく　　㋑　地上モードと同程度で

［2］の解答群

㋐　６倍くらい　　㋑　2.4 倍くらい　　㋒　地上モードと同じくらい

【体験 Ⅲ】　垂直飛び

３回目の月面モードの頃には，二人とも月面世界に体も順応し始めていた。

Aさん　「月面では体力測定のときよりも高く飛べそうな予感がする。」

そう言って，月面モードでも地上モードのときと同じ勢いで飛び上がった。

Aさん　「ウワァーーーッ」

想像以上の大ジャンプになり，ブースの床面に降りてくるまでの間，A さんは悲鳴にも似た奇声が止まらず，彼を見上げていた B さんも，目と口をまん丸に開いて言葉を失っていた。A さんは無意識に手足をばたつかせて着陸時にバランスを崩し，お尻をついてしまった。測定結果の掲示板は，［　　］〔m〕を軽く超える記録を表示していた。A さんの様子を見て慎重に飛び上がった B さんだったが，それでも飛び上がった後の奇声は避けられなかった。

全ての演目を無事に終了し，月面体験修了証と記念バッジを手に，スーパーヒーローの気分で会場を後にした。

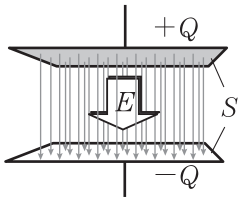
問７　空欄［　　］に入る最も適切なものを，次の㋐～㋓の中から一つ選べ。

㋐　4　　㋑　6　　㋒　8　　㋓　10

第３問　次のまとめを参考にして，以下の問いに答えよ。

● 極板間の電場

真空中で近接する２枚の同形同大の極板にそれぞれ$+Q$，$-Q$の電荷を帯電させた場合，平行板コンデンサーの外部には電場はできず，内部にのみ，正の極板から負の極板に向かう一様な電場ができる。



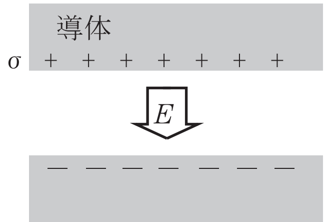
$$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 S}$$

E：極板間の電場〔N/C〕　　Q：極板電荷〔C〕

ε_0：真空中の誘電率〔F/m〕　S：極板の面積〔m^2〕

● 極板表面の電荷が受ける力

導体内部には自由電子があり，電流が流れていない状態では，導体内部は等電位領域になり，内部の電場が0となる。このとき，導体に外部から電荷を与え帯電させると，電荷はすべて表面に分布する。導体の表面の電荷面密度がσ〔C/m^2〕の場所の近くの空間には，面に垂直に電気力線が出入りし，その電気力線密度（すなわち，電場の大きさE〔N/C〕）は，真空中の場合，



$$E = \frac{|\sigma|}{\varepsilon_0}$$

E：極板間の電場〔N/C〕　　σ：電荷面密度〔C/m^2〕

ε_0：真空中の誘電率〔F/m〕

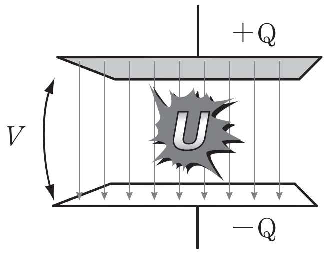
で与えられる。さらにコンデンサーの極板表面は，対向する極板からの電場により対向極板に向かって，単位面積あたりの力（「静電圧力」と呼ぶ）

$$p = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}\text{〔N/m}^2\text{〕}$$

を受ける。したがって，極板面積をS〔m^2〕とすると，極板は$\dfrac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}S$の力で引き合う。

● コンデンサーの静電エネルギー

コンデンサーに蓄えられる静電エネルギーは，蓄えられている電荷と極板間の電圧により決まる。



$$U = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

U：静電エネルギー〔J〕　　Q：極板電荷〔C〕

V：極板間の電圧〔V〕

● コンデンサーの電気容量

平行板コンデンサーの電気容量は，次のように表される。

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

C：電気容量〔F〕　　ε：極板間の誘電率〔F/m〕

S：極板の面積〔m^2〕　　d：極板間隔〔m〕

図１のように，同じ面積 S の３枚の導体平板（以下，単に極板と呼ぶ）α，β，γ を，平行に互いに距離 d だけ離して滑らかで水平な床に垂直に置く。図１は鉛直上方から見た図である。極板 α と γ は固定されているが，質量 m の極板 β は α，γ と平行を保ちながら，極板面に垂直な方向に可動である。極板 α と β は面の中心どうしが，ばね定数 k で自然長が d のばねで結ばれている。極板は十分広く，帯電したときに生じる電場の方向は極板に垂直かつ一様であるとする。スイッチの切り替えで，極板 α は，極板 β あるいは抵抗 R を通して γ のいずれかに接続できる。ただし，回路の導線は極板 β の動きを妨げないものとし，極板と床の間，及びばねの電気的絶縁性は保たれているものとする。また，極板間の誘電率は真空の誘電率 ε_0 としてよい。初期状態ではスイッチは開かれており，どの極板も電荷を持っていない。

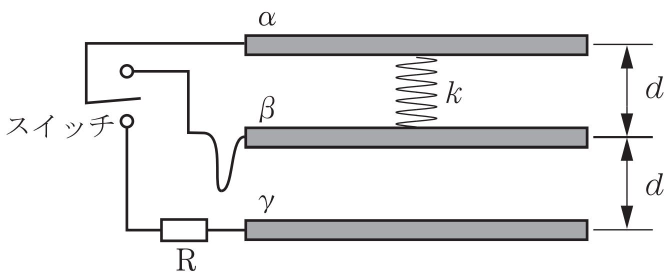


図１

〔A〕 極板 β を固定し，スイッチを開いたまま極板 α と γ にそれぞれ Q，$-Q$ の電荷を帯電させた後，極板 β の固定を解除した。

問１　極板 β の固定を解除する直前，β の α 側の面の電荷が電場から受ける力の向きとして最も適切なものを次の㋐，㋑の中から一つ選べ。また，その力の大きさを求めよ。

㋐　β から α へ向かう向き　　㋑　α から β へ向かう向き

問２　極板 β の固定を解除した後，ばねの長さはどう変化するか。最も適切なものを次の㋐～㋒の中から一つ選べ。

㋐　伸び始める　　㋑　縮み始める　　㋒　変化しない

〔B〕 再び初期の状態に戻し，極板 β を固定し，極板 α と γ にそれぞれ Q，$-Q$ の電荷を帯電させた後，スイッチを β 側につなぎ，しばらくしてスイッチを開き，β の固定を解除すると振動を開始した。

問３　図２のように，極板 β の最初の位置をＯとする x 軸をとり，ばねの伸びる向きの変位を x，加速度を a として，極板 β の運動方程式を立てよ。ただし，極板 β にはたらく床からの動摩擦力や空気抵抗の影響，電磁波の発生などによるエネルギーの減少などはないものとする。

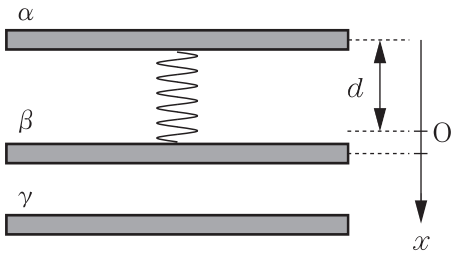


図２

問４　**問３**の振動の周期を求めよ。

問５　実際には床との摩擦や空気抵抗などの影響で，十分時間が経つと，極板 β がつり合いの位置で静止した。このときのばねの伸びが $\dfrac{d}{2}$ であった。極板 β が静止するまでに，この装置から失われたエネルギーをばね定数 k を用いずに求めよ。ただし，極板からの電荷の放電は考えない。

〔C〕 ここで図３のように，外力を加えて極板 β を固定し，スイッチを γ 側につなぎ，十分時間が経過した。

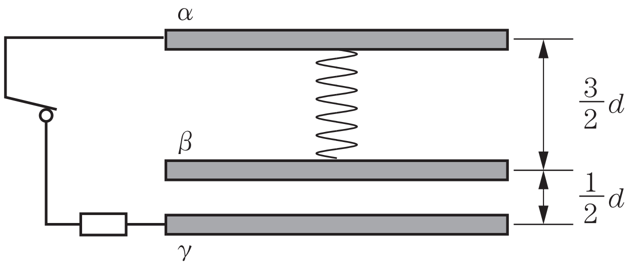


図３

問６　スイッチを γ 側につないだ後，極板 γ につながる抵抗で失われたジュール熱を求めよ。

問７　極板 β を固定するために加えている外力を求めよ。ただし，ばねを伸ばす向きを正とする。

第４問　次の文章〔A〕,〔B〕を読み，以下の問いに答えよ。

〔A〕　同一直線上を運動する２物体について，その様子を視覚的に表す方法を考えよう。

図１のように，同一直線上をそれぞれ一定の速度で移動する二人の人がいる。彼らが出会う時刻とその速度の関係をまとめてみる。横軸に位置，縦軸下向きに時刻をとって運動をグラフにしたものを「ダイヤグラム」といい，列車の運行表に利用されている。

例えば，距離 L だけ離れた位置から，自転車に乗った人と，徒歩の人がそれぞれ速さ v，u で移動を開始した場合，その移動の向きによって両者が出会うまでの時間が異なる。基本的に２つのタイプがあり，図１の左は「追いつきタイプ」で，出発から時間 T_1 後に追いつくことを示している。図１の右は「出会いタイプ」で，出発から時間 T_2 後に出会うことを示している。それぞれで成立する，最初の距離 L と出会う時間の関係を表現した式（以後，「L 公式」と略称する）が記してある。

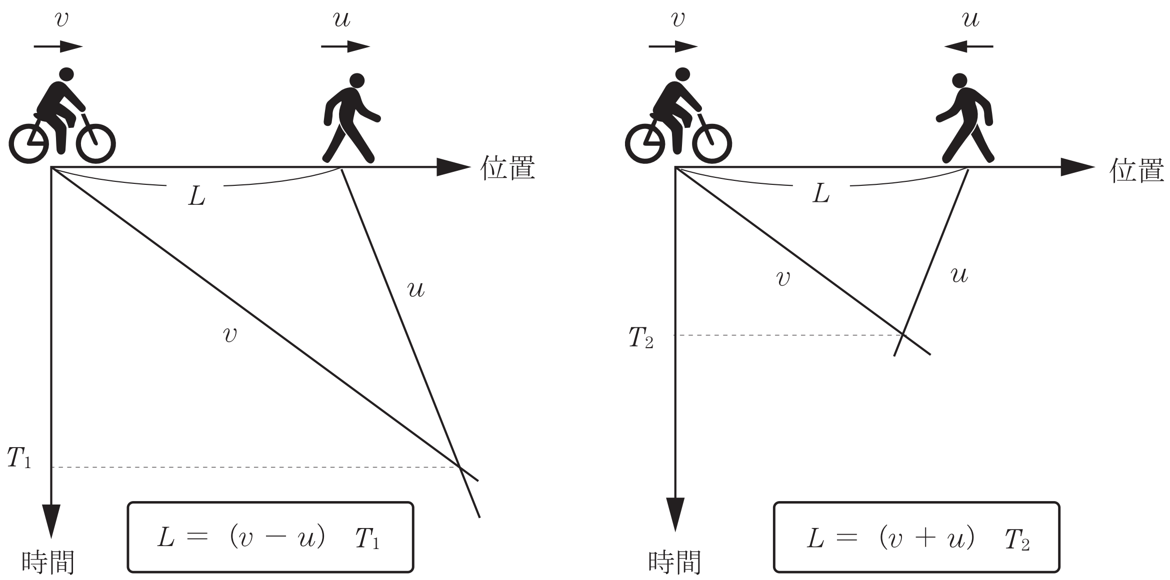


図１

問１　この表現法を用いて，ドップラー効果の振動数に関する公式を導いてみよう。次の文章中の $\boxed{1}$，$\boxed{2}$，$\boxed{4}$ に最も適切な式を記入せよ。また，$\boxed{3}$，$\boxed{5}$ に入れるものとして最も適切なものを，それぞれの解答群から一つずつ選べ。

音源Sが右向きに速さ v〔m/s〕で移動しながら，周期 T〔s〕の音を出している。音は縦波であるため，媒質の疎密が伝わる。図2のように，時刻 $t = 0$〔s〕で1つ目の「密部」が送り出され（a点），時刻 $t = T_0$〔s〕に次の「密部」が送り出され（b点）ている。この2つの「密部」は，観測者Oにそれぞれc点，d点で届き，2つの「密部」が到達する時間差は T_1〔s〕である。

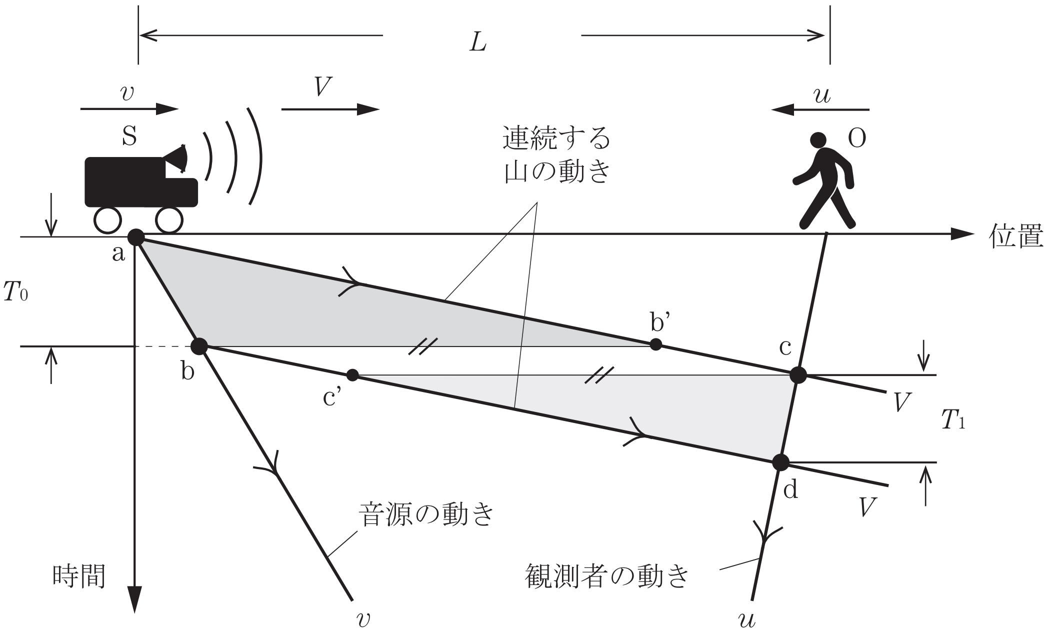


図2

図2中の線分bb'や線分cc'は位置の座標軸に平行に引いた補助線である。△abb'および△cdc'に，「L公式」を適用すると，

$$bb' = (\boxed{1}) \times T_0,\quad cc' = (\boxed{2}) \times T_1$$

と書ける。bb'やcc'は波の $\boxed{3}$ に相当し，時間が経過しても変化しないのでbb'＝cc'が成立する。あるいは，四角形bb'cc'は平行四辺形だから，bb'＝cc'が成り立つと考えてもよい。このことにより，

$$\frac{1}{T_1} = (\boxed{4}) \times \frac{1}{T_0}$$

が導かれ，観測者Oに届く音の振動数が得られた。

さらには，一般的に発音体に対する観測者の相対速度が正の（相対的に遠ざかる）場合，観測される音波の周期は，送り出されたときの周期と比較して，$\boxed{5}$ こともわかる。

$\boxed{3}$ の解答群

(ア) 波長　　(イ) 波数　　(ウ) 速さ

$\boxed{5}$ の解答群

(ア) 必ず大きくなる　　(イ) 必ず小さくなる

(ウ) 大きくなる場合も小さくなる場合もある

〔B〕 ダイヤグラムを使って，イルカが獲物の動きを捉える原理を考えよう。

イルカがエサを求めて前方を泳ぐ魚群に追いつこうとしている。イルカが魚群に向けて時刻 $t = 0$〔s〕から $t = \varDelta t$〔s〕の短い時間で振動数 f_0〔Hz〕のパルス音を発すると，時刻 $t = T$〔s〕から $t = T + \varDelta t'$〔s〕で振動数 γf_0〔Hz〕の反射音が戻ってきた。イルカはこれらの情報から，魚群の動きや距離などを瞬時に判断していると考えられる。イルカと魚群の動きは，両者を含む同一直線上で起こり，静止も含め，等速直線運動をするものとする。魚群の広がりや，運動による音の乱れは考えないものとする。

問２　$\gamma < 1$ の場合，パルス音の発信時間 $\varDelta t$〔s〕と，反射して戻ってきたパルス音の受信時間 $\varDelta t'$〔s〕の大小関係として最も適切なものを次の(ア)〜(ウ)の中から一つ選べ。ただし，パルスの長さは，イルカと魚群の距離より十分短いとする。

(ア)　$\varDelta t' < \varDelta t$　　(イ)　$\varDelta t < \varDelta t'$　　(ウ)　$\varDelta t' = \varDelta t$

問３　$\gamma < 1$ の場合，イルカと魚群の運動について述べた文として最も適切なものを次の(ア)〜(オ)の中から一つ選べ。

(ア)　魚群はイルカから逃げているが，その速さはイルカより遅い。
(イ)　魚群はイルカから逃げているが，その速さはイルカより速い。
(ウ)　魚群はイルカに近づく向きに移動しているが，その速さはイルカより遅い。
(エ)　魚群はイルカに近づく向きに移動しているが，その速さはイルカより速い。
(オ)　この情報だけでは，魚群の移動の向きは，不明である。

〔A〕で導入した「ダイヤグラム」手法を用いて，観測された反射音の γ（>1）値や，その到着時刻 $t = T$〔s〕から，魚群の速度 u〔m/s〕や位置などの情報がどのように取り出せるかを考えてみよう。海水中での超音波の速さを V〔m/s〕とする。

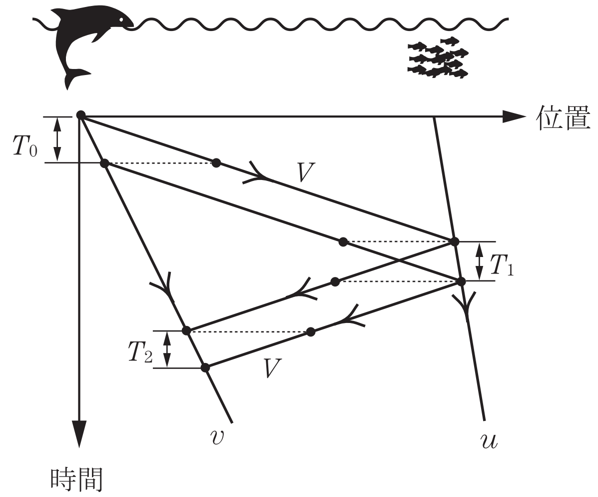


図３

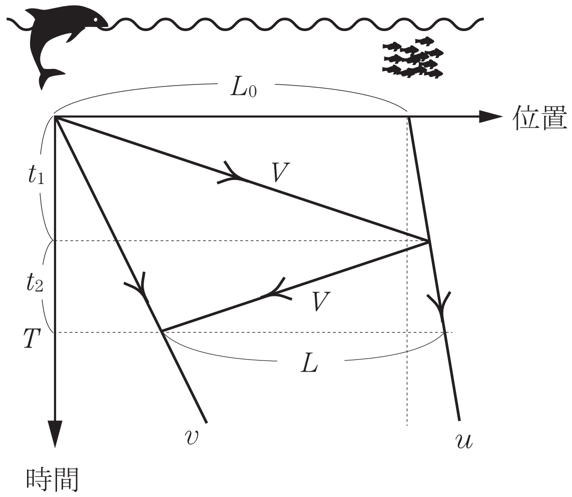


図４

問４　図３は送り出される隣り合う「密部」の動きを表すダイヤグラムである。周期が T_0〔s〕の波として送り出された「密部」が，やがて周期が T_2〔s〕の波の「密部」としてイルカに戻ってくることを表している。図中の破線の補助線を利用し，**問１**の手法を繰り返すことで，$\dfrac{1}{T_2}$を$\dfrac{1}{T_0}$で表し，γ を V，v，u で表せ。この関係式から u を決定することができる。

問５　パルス音が発せられたときのイルカと魚群の距離を L_0〔m〕とする。図４を参考にして，パルスの先端が魚群に届く時刻 t_1〔s〕を，L_0，V，u を用いて求めよ。

問６　時刻 $t = T$〔s〕でのイルカと魚群の距離を L〔m〕とする。図４を参考にして，パルス音が魚群で反射されてからイルカに届くまでの時間 t_2〔s〕を，L，V，u を用いて求めよ。

問７　L を V，v，u，T を用いて表せ。