2023 M

理　科

理科は 物 理 化 学 生 物 のうち２科目を選択受験のこと。

物 理 ……１頁　化 学 ……21頁　生 物 ……32頁

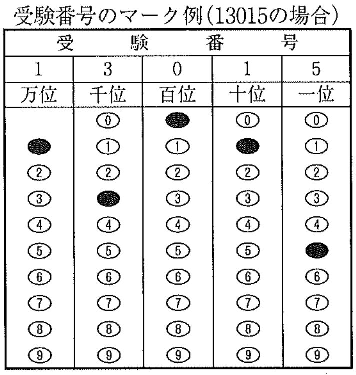
問題 Ⅰ はマークシート方式，Ⅱ は記述式である。

Ⅰ の解答はマークシートに，Ⅱ の解答は解答用紙に記入すること。

〔注 意 事 項〕

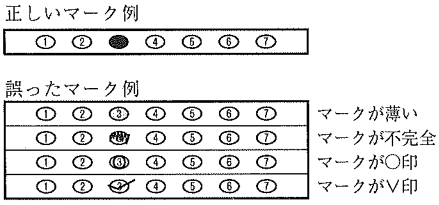
1. 監督者の指示があるまでは，この問題冊子を開かないこと。
2. マークシートは，コンピュータで処理するので，折り曲げたり汚したりしないこと。
3. マークシートに，**氏名・受験番号を記入し，科目選択・受験番号をマークする**。マークがない場合や誤って記入した場合の答案は無効となる。

受験番号のマーク例(13015の場合)



4. マークシートにマークするときは，HB またはＢの黒鉛筆を用いること。**誤ってマークした場合には，消しゴムで丁寧(ていねい)に消し，消しくずを完全に取り除いたうえで，新たにマークし直す**こと。
5. 下記の例に従い，**正しくマーク**すること。

（例えば３と答えたいとき）



6. 各科目とも基本的に正解は一つであるが，科目によっては二つ以上解答を求めている場合があるので設問をよく読み解答すること。
7. 解答は所定の位置に記入すること。

物　理

I　以下の問題(**第１問〜第３問**)の答えをマークシートに記せ。

第１問　次の問い(**問１〜問５**)に答えよ。〔**解答番号** $\boxed{1}$ 〜 $\boxed{7}$ 〕

問１　図１は，前腕を水平な x 軸に対して角度 30° に保って，手のひらに重さ 100 N のボールを持って静止させているときの骨と筋肉のようすである。これを前腕を長さ 30 cm で重さの無い棒とした簡単なモデルでおきかえよう。図２のように，棒に対して直角な方向に筋肉による力 F がはたらいており，ひじの関節を支点として考えると，支点から F の作用点までの距離は 5 cm である。支点で棒にはたらく力を R としよう。この力の水平成分を R_x とすると，R_x はいくらか。正しいものを，下の①〜⑧のうちから一つ選べ。

$R_x = \boxed{1}$ N

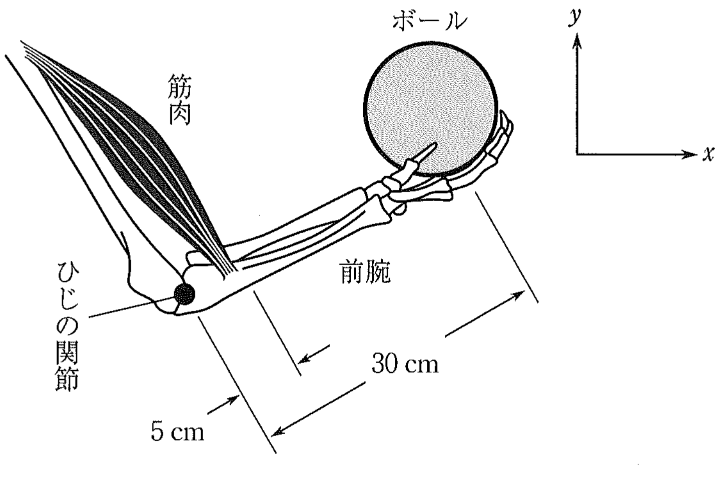


図１

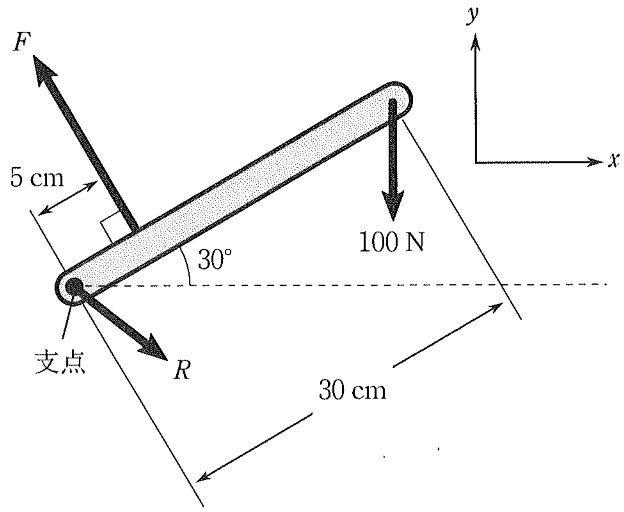


図 2

① 150　② 300　③ 350　④ 450

⑤ $150\sqrt{3}$　⑥ $300\sqrt{3}$　⑦ $350\sqrt{3}$　⑧ $450\sqrt{3}$

問 2　自然長がともに ℓ で，ばね定数がそれぞれ k，$2k$ の軽いばねがある。図3のように，この二つのばねを質量 m の小物体の上下に取り付け，二つのばねが鉛直になるように 2ℓ だけ離れた床と天井に固定した。鉛直上向きに x 軸をとり，二つのばねが自然長のときの小物体の位置を原点Oとする。重力加速度の大きさを g として，下の問い((a)，(b))に答えよ。ただし，小物体の大きさは無視できるものとし，小物体は x 軸方向にのみ運動するものとする。

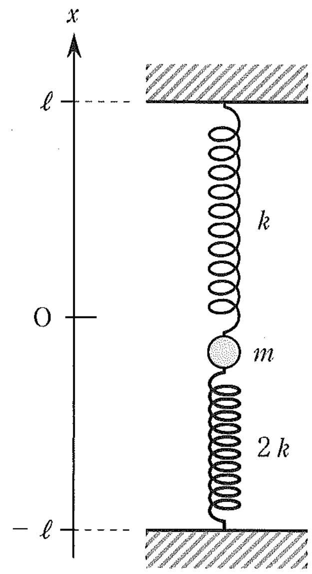


図3

(a)　小物体を鉛直上方に持ち上げ，原点Oより高い位置に静止させてからしずかに手をはなすと，小物体は単振動をした。このときの小物体の位置 x は，時間 t の関数として，

$$x = A\cos\omega t + B \qquad (1)$$

と表すことができる。ここで A，B，ω は定数であり，小物体から手をはなした時刻を $t=0$ とする。この式の ω はいくらか。正しいものを，次の①～⑧のうちから一つ選べ。

$\omega = \boxed{\ 2\ }$

① $\sqrt{\dfrac{k}{3m}}$　② $\sqrt{\dfrac{2k}{3m}}$　③ $\sqrt{\dfrac{3k}{2m}}$　④ $\sqrt{\dfrac{3k}{m}}$

⑤ $\sqrt{\dfrac{m}{3k}}$　⑥ $\sqrt{\dfrac{2m}{3k}}$　⑦ $\sqrt{\dfrac{3m}{2k}}$　⑧ $\sqrt{\dfrac{3m}{k}}$

(b) 単振動する小物体が原点Oを通る瞬間の速さを v としたとき，式(1)の A はどのように表されるか。正しいものを，次の①～⑧のうちから一つ選べ。

$A = \boxed{\quad 3 \quad}$

① $\sqrt{\dfrac{m^2g^2}{k^2}+\dfrac{mv^2}{k}}$　　② $\sqrt{\dfrac{4m^2g^2}{k^2}+\dfrac{2mv^2}{k}}$

③ $\sqrt{\dfrac{m^2g^2}{9k^2}+\dfrac{mv^2}{3k}}$　　④ $\sqrt{\dfrac{4m^2g^2}{9k^2}+\dfrac{2mv^2}{3k}}$

⑤ $\dfrac{mg}{k}+v\sqrt{\dfrac{m}{k}}$　　⑥ $\dfrac{2mg}{k}+v\sqrt{\dfrac{2m}{k}}$

⑦ $\dfrac{mg}{3k}+v\sqrt{\dfrac{m}{3k}}$　　⑧ $\dfrac{2mg}{3k}+v\sqrt{\dfrac{2m}{3k}}$

問 3 図4のように円筒管にピストンを取り付けて閉管とし，この左端の管口の近くに音源をおく。また，管口の位置を原点Oとして右方向に x 軸をとり，x の値でピストンの壁の位置を表す。音源から音量が一定で振動数 f の音波を発しながら，ピストンの壁を管口の位置Oからゆっくりと右に移動させていくと，$x = x_1(>0)$ の位置で最初の共鳴が起こり音が大きくなった。ピストンの壁をさらに右に移動させていくと，図4の $x = L(>x_1)$ の位置で2回目の共鳴が起こり音が大きくなった。音源からの入射波による媒質(空気)の変位を実線で表し，ピストンの壁で反射された反射波による媒質の変位を破線で表すグラフを考えることにする。2回目の共鳴が起きているときの媒質の変位を表すグラフとして正しいものを，下の①～⑥のうちから一つ選べ。ただし，x 軸の正方向を，音源からの入射波および壁からの反射波による媒質の変位の正方向とし，開口端補正は無視できるとする。 $\boxed{\quad 4 \quad}$

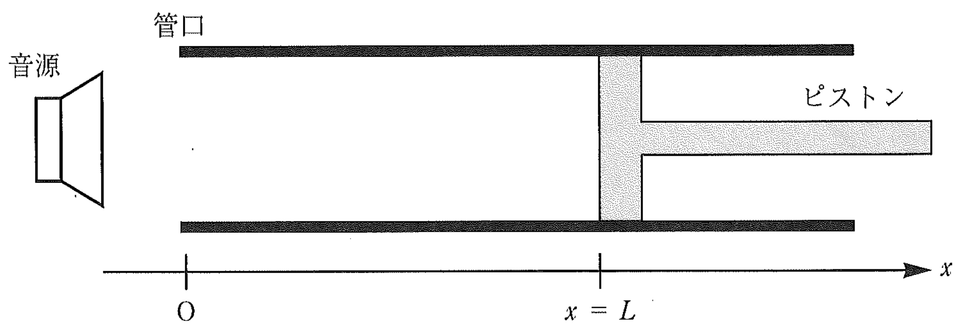
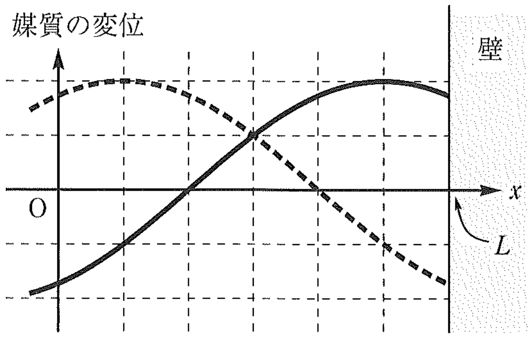


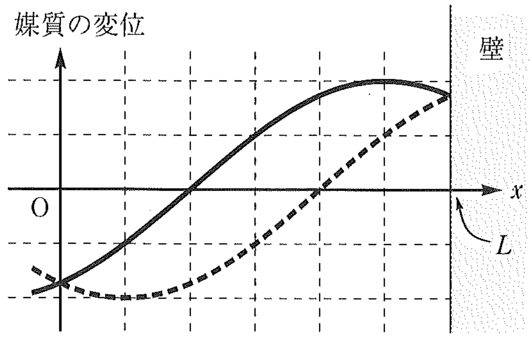
図4

①



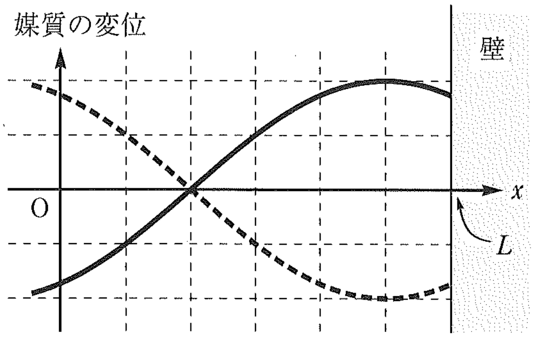
媒質の変位
壁
O
x
L

②



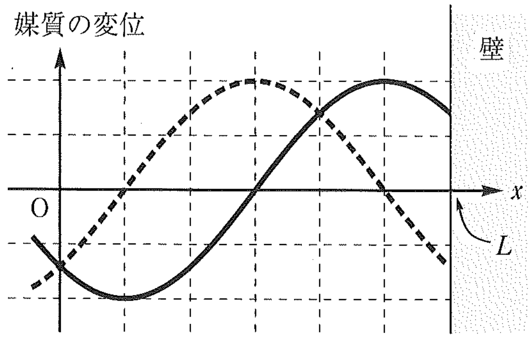
媒質の変位
壁
O
x
L

③



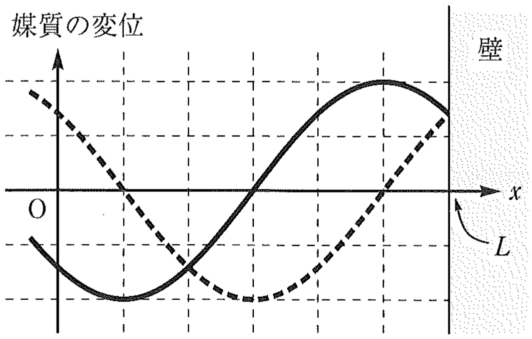
媒質の変位
壁
O
x
L

④



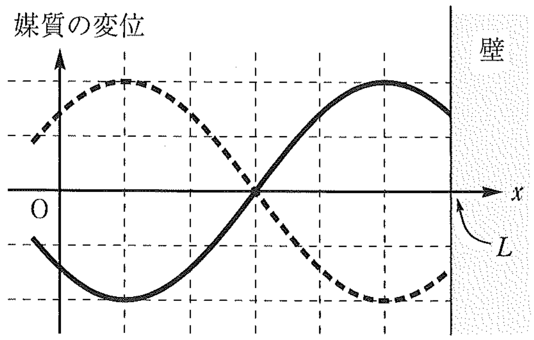
媒質の変位
壁
O
x
L

⑤



媒質の変位
壁
O
x
L

⑥



媒質の変位
壁
O
x
L

問 4 図5のように，鉛直下向き（紙面に垂直に表から裏への向き）の一様な磁束密度 B の磁場がある。この磁場の中に，２本のじゅうぶん長い直線導体のレール pp′ および qq′ を水平面内に間隔 ℓ で平行に固定し，レール上に質量 m の導体棒 A を置く。A は pp′ および qq′ に常に直角をなしたままなめらかに移動できるとする。これをレールの点 p，q で，起電力 E の電池，抵抗値 R の抵抗，およびスイッチにつないで，図5のような回路をつくる。導体棒 A を図5のように静止させておき，スイッチを閉じると回路に電流が流れ，A を流れる電流が磁場から力を受ける。これによって A が動き出すと，回路に誘導起電力も発生するため，やがて A は一定の速さ v で運動するようになった。v はいくらか。正しいものを，下の①～⑧のうちから一つ選べ。ただし，抵抗値 R の抵抗以外の回路の抵抗はすべて無視できるものとし，回路を流れる電流によって図5の磁場は変化しないとする。

v = $\boxed{\quad 5 \quad}$

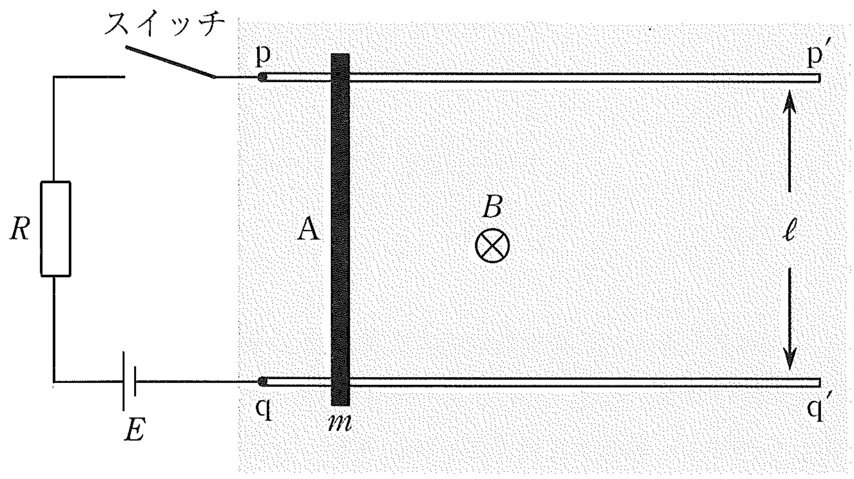


図5

① $\sqrt{BE\ell}$	② $BE\ell\sqrt{\dfrac{2}{m}}$	③ $\sqrt{\dfrac{E}{B\ell}}$	④ $E\sqrt{\dfrac{2}{mR}}$
⑤ $BE\ell$	⑥ $\dfrac{BE\ell}{mR}$	⑦ $\dfrac{E}{B\ell}$	⑧ $\dfrac{2E}{B\ell m}$

問 5　図6のように，光電管に直流電源，電流計，電圧計を接続した装置がある。光電管の内部は真空であり，光電管の電極Qは接地されている。光電管の電極Pの電位をVで表し，直流電源の電圧は可変でVの値を変えることができるものとする。光電管の電極Qに振動数νの光を当て，電極Pの電位Vと回路に流れる電流Iを測定する。下の問い((a)，(b))に答えよ。

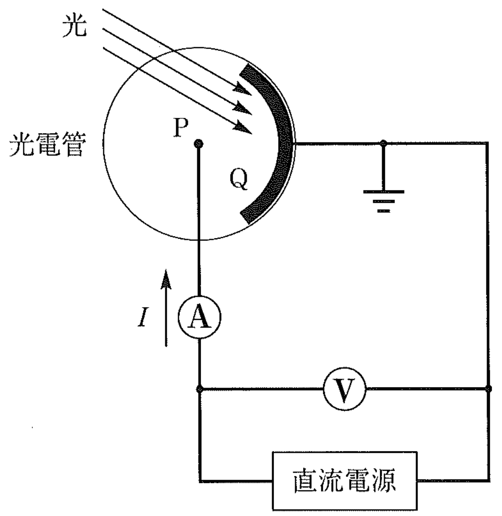


図6

(a)　$V > 0$の場合を考える。振動数νの光を電極Qの金属に当てると，金属表面から電子(光電子)が飛び出してくる。このときの仕事関数をWとしよう。電極Qの金属表面から飛び出した光電子が電極Pに達する直前の運動エネルギーの最大値はどのように表されるか。正しいものを，次の①～⑧のうちから一つ選べ。ただし，電子の電気量を$-e(e > 0)$，プランク定数をhとする。$\boxed{6}$

① $\dfrac{h}{\nu} + eV + W$　　② $\dfrac{h}{\nu} - eV + W$

③ $\dfrac{h}{\nu} + eV - W$　　④ $\dfrac{h}{\nu} - eV - W$

⑤ $h\nu + eV + W$　　⑥ $h\nu - eV + W$

⑦ $h\nu + eV - W$　　⑧ $h\nu - eV - W$

(b) 振動数が$\nu = 7.0 \times 10^{14}$ Hz の光を電極Qに当て，Pの電位Vを大きな正の値から負の値まで変えて回路に流れる電流Iを測定したところ，図7のようにVが-1.0 Vで電流が流れなくなった。同じ実験装置で，光の振動数を$\nu = 1.0 \times 10^{15}$ Hz にして，Vの値を変化させて調べたとき，電流が流れなくなるVはいくらか。Vを数値(有効数字1けた)で求め，最も近い値を，下の①～⑧のうちから一つ選べ。ただし，$h = 6.6 \times 10^{-34}$ J・s，$e = 1.6 \times 10^{-19}$ C とする。 $\boxed{\quad 7 \quad}$ V

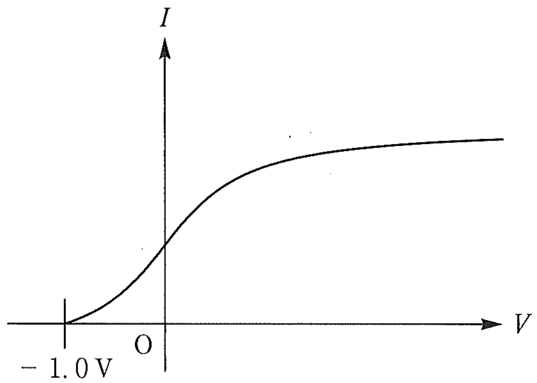


図7

① −6　② −4　③ −2　④ −0.3
⑤ 1　⑥ 3　⑦ 5　⑧ 9

第2問 同一形状の長方形の金属極板2枚を水平にして，極板間の間隔 d で置いた平行板コンデンサーがあり，起電力 V の電池，抵抗値 R の抵抗，およびスイッチをつないで回路をつくった(図1)。平行板コンデンサーの極板間を真空にしておいてスイッチを閉じ，コンデンサーを充電したところ，じゅうぶん時間がたち回路を流れる電流が0になったとき，図1のように，コンデンサーが蓄えた電気量は Q_0 であった。この状態からスイッチを閉じたまま，比誘電率 ε_r ($\varepsilon_r > 1$)の誘電体を，図2のようにコンデンサーの極板の左端から距離 x だけ挿入した。ただし，誘電体は極板間になめらかに挿入することができ，極板の左端の位置を原点Oとする水平な x 軸の方向にのみ移動できるものとし，図2のように誘電体の右端が座標 x のとき，誘電体が位置 x にあると言い表すことにしよう。誘電体は金属極板と同じ長方形，厚さは d の直方体なので，誘電体が位置 $x = L$ のとき，コンデンサーの極板間全体が誘電体で満たされる。抵抗値 R の抵抗以外の回路の抵抗はすべて無視できるものとし，極板や誘電体の端での電場の乱れの影響は無視できるとして，下の問い(**問1～問3**)に答えよ。

〔**解答番号** $\boxed{1}$ ～ $\boxed{7}$ 〕

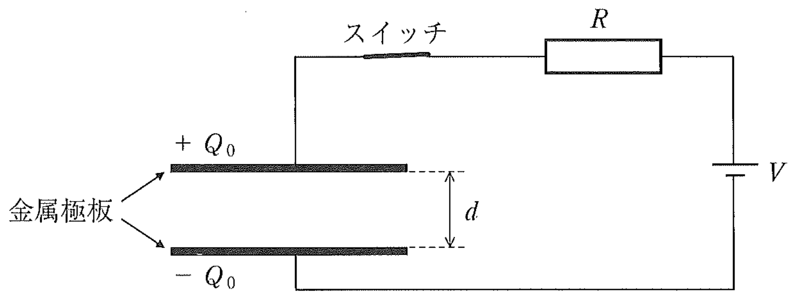


図1

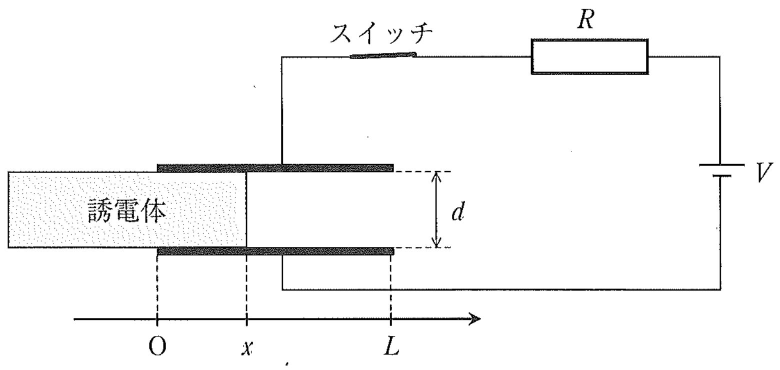


図2

問 1　スイッチを閉じたまま，図 2 のように，誘電体を位置 x で静止させておき，じゅうぶん時間がたつと回路を流れる電流が 0 になった。このときのコンデンサーの上側の極板の，誘電体に接している部分(極板の左端から座標 x で示すところまで)の電気量はいくらか。正しいものを，次の①～⑧のうちから一つ選べ。 $\boxed{\quad 1 \quad}$

① $\varepsilon_r Q_0$　② $\dfrac{\varepsilon_r x}{d} Q_0$　③ $\dfrac{\varepsilon_r L}{d} Q_0$　④ $\dfrac{\varepsilon_r x}{L} Q_0$

⑤ $\dfrac{1}{\varepsilon_r} Q_0$　⑥ $\dfrac{x}{\varepsilon_r d} Q_0$　⑦ $\dfrac{L}{\varepsilon_r d} Q_0$　⑧ $\dfrac{x}{\varepsilon_r L} Q_0$

問 2　図 2 のコンデンサーの上側の極板の，誘電体に接していない部分の電気量を**問 1** と同様に求めた結果と， $\boxed{\quad 1 \quad}$ との合計を $Q(x)$ で表そう。$Q(x)$ は，誘電体を図 2 のように位置 x で静止させておいたときに，コンデンサーが蓄える全電気量を与える。この状態から図 2 のスイッチを閉じたまま，誘電体を位置 x から Δx だけゆっくりと動かし，$x + \Delta x$ の位置まで移動させると，電池からコンデンサーに $Q(x + \Delta x) - Q(x)$ の電気量が流入することになる。ここでは，図 2 の状態から，誘電体が一定の速度 u で x 軸の正の向きに移動するように外から力を加える場合を考えることとし，$u(> 0)$ はじゅうぶん小さいとして，次の問い((a)～(d))に答えよ。

(a)　このとき，コンデンサーに蓄えられた静電エネルギーは，単位時間当たりいくら増加するか。単位時間あたりの静電エネルギーの増加として正しいものを，下の解答群①～⑫のうちから一つ選べ。 $\boxed{\quad 2 \quad}$

(b)　このとき，回路に電流が流れて電池は仕事をする。電池の仕事率はいくらか。正しいものを，下の解答群①～⑫のうちから一つ選べ。 $\boxed{\quad 3 \quad}$

$\boxed{\quad 2 \quad}$ ・ $\boxed{\quad 3 \quad}$ の解答群

① $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0 V u}{2L}$　② $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0 V u}{2\varepsilon_r L}$　③ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)^2 Q_0 V u}{2L}$

④ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0 V u}{2d}$　⑤ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0 V u}{2\varepsilon_r d}$　⑥ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)^2 Q_0 V u}{2d}$

⑦ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0 V u}{L}$　⑧ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0 V u}{\varepsilon_r L}$　⑨ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)^2 Q_0 V u}{L}$

⑩ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0 V u}{d}$　⑪ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0 V u}{\varepsilon_r d}$　⑫ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)^2 Q_0 V u}{d}$

(c)　このとき，抵抗値 R の抵抗で単位時間あたりに発生するジュール熱はいくらか。単位時間あたりのジュール熱として正しいものを，次の①～⑧のうちから一つ選べ。

$\boxed{\quad 4 \quad}$

① $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0R^2u^2}{2\varepsilon_r L}$　　② $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0VR^2u^2}{2L}$

③ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)^2Q_0^2Ru^2}{2\varepsilon_r^2L^2}$　　④ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)^2Q_0^2Ru^2}{2L^2}$

⑤ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0R^2u^2}{\varepsilon_r L}$　　⑥ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0R^2u^2}{L}$

⑦ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)^2Q_0^2Ru^2}{\varepsilon_r^2L^2}$　　⑧ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)^2Q_0^2Ru^2}{L^2}$

(d)　u がじゅうぶん小さい場合，前問(c)で求めた単位時間あたりのジュール熱は，小問(a)および(b)の結果に比べて無視できることがわかる。このとき，誘電体を一定の速度 u で移動させるために，外から加える力はいくらか。正しいものを，次の①～⑧のうちから一つ選べ。ただし，図２の x 軸の正の向きを，力の正の向きとする。 $\boxed{\quad 5 \quad}$

① $-\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0V}{2\varepsilon_r d}$　　② $-\dfrac{3(\varepsilon_r - 1)Q_0V}{2\varepsilon_r d}$

③ $-\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0V}{2L}$　　④ $-\dfrac{3(\varepsilon_r - 1)Q_0V}{2L}$

⑤ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0V}{2\varepsilon_r d}$　　⑥ $\dfrac{3(\varepsilon_r - 1)Q_0V}{2\varepsilon_r d}$

⑦ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)Q_0V}{2L}$　　⑧ $\dfrac{3(\varepsilon_r - 1)Q_0V}{2L}$

問３　図２のスイッチを閉じたまま，さらに誘電体をゆっくりと移動させて $x = L$ の位置まで挿入し，コンデンサーの極板間全体を誘電体で満たした。しばらくしてスイッチを開いた後，誘電体をゆっくりと引き抜く。そして，誘電体を極板間から完全に引き抜き終えてから，再びスイッチを閉じるとしよう。このとき，次の問い((a)，(b))に答えよ。

(a)　極板間の誘電体を完全に引き抜き終えて，再びスイッチを閉じた直後に，抵抗値 R の抵抗を流れる電流の大きさはいくらか。正しいものを，次の①～⑧のうちから一つ選べ。

$\boxed{\quad 6 \quad}$

① $\dfrac{V}{2R}$　　② $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)V}{2R}$　　③ $\dfrac{\varepsilon_r V}{2R}$　　④ $\dfrac{(\varepsilon_r + 1)V}{2R}$

⑤ $\dfrac{V}{R}$　　⑥ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)V}{R}$　　⑦ $\dfrac{\varepsilon_r V}{R}$　　⑧ $\dfrac{(\varepsilon_r + 1)V}{R}$

(b) 電流が**問 3**(a)のように流れはじめてから，じゅうぶん時間がたち回路を流れる電流が 0 になるまでに，抵抗値 R の抵抗で発生するジュール熱はいくらか。正しいものを，次の①～⑧のうちから一つ選べ。 $\boxed{\quad 7 \quad}$

① $\dfrac{(\varepsilon_r + 1)^2 Q_0 V}{2}$

② $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)^2 Q_0 V}{2}$

③ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)(\varepsilon_r + 1) Q_0 V}{2}$

④ $\dfrac{(\varepsilon_r - 1)(\varepsilon_r + 3) Q_0 V}{2}$

⑤ $(\varepsilon_r + 1)^2 Q_0 V$

⑥ $(\varepsilon_r - 1)^2 Q_0 V$

⑦ $(\varepsilon_r - 1)(\varepsilon_r + 1) Q_0 V$

⑧ $(\varepsilon_r - 1)(\varepsilon_r + 3) Q_0 V$

第3問 図1のように，断面積 S で質量が m，M の二つのピストンがついたシリンダーが真空中に置かれている。シリンダーと二つのピストンは熱を通さず，二つのピストンはシリンダー内をなめらかに動くことができる。ピストンで仕切られたシリンダーの上側と下側のそれぞれに，絶対温度が等しく T である理想気体Aと理想気体Bを1 molずつ封じ込める。このときの理想気体Aの圧力と体積を p_{A}，V_{A} と表し，理想気体Bの圧力と体積を p_{B}，V_{B} と表すことにする。シリンダーの底には小さなヒーターがついていて，理想気体Bに熱を加えることができる。ヒーターの体積は無視できるものとする。二つの理想気体の定積モル比熱は等しく C_V であり，気体定数を R，重力加速度の大きさを g として，下の問い（**問1**～**問3**）に答えよ。

〔**解答番号** $\boxed{1}$ ～ $\boxed{7}$ 〕

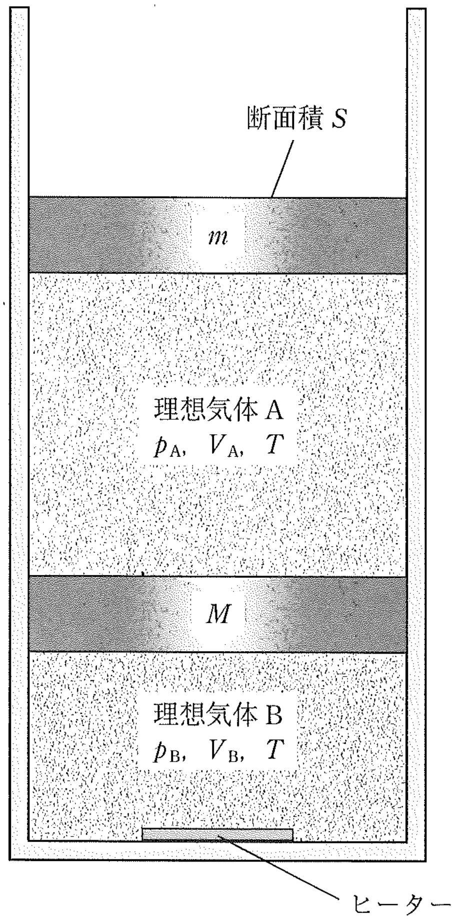


図1

問 1　図1において，二つのピストンにはたらく力はそれぞれつり合って，ピストンは静止していることから p_A と p_B が決まる。このとき，二つの理想気体の体積 V_A と V_B はそれぞれいくらか。正しいものを，次の①～⑨のうちから一つずつ選べ。

$V_A = \boxed{\quad 1 \quad}$

$V_B = \boxed{\quad 2 \quad}$

① $\dfrac{RST}{mg}$　　② $\dfrac{RST}{Mg}$　　③ $\dfrac{RST}{(m+M)g}$

④ $\dfrac{MRST}{m^2g}$　　⑤ $\dfrac{mRST}{M^2g}$　　⑥ $\dfrac{(m+M)RST}{m^2g}$

⑦ $\dfrac{(m+M)RST}{M^2g}$　　⑧ $\dfrac{mRST}{M(m+M)g}$　　⑨ $\dfrac{MRST}{m(m+M)g}$

問 2　図1の状態からヒーターで熱を加えて理想気体Bを膨張させて，前問の理想気体Aの体積 V_A に等しくなるまでゆっくりと変化させ，二つのピストンを静止させた。この状態変化について，次の問い((a)，(b))に答えよ。

(a)　理想気体Bが，体積 V_B から V_A まで膨張する間に，理想気体Bが外部にする仕事はいくらか。正しいものを，下の解答群①～⑨のうちから一つ選べ。 $\boxed{\quad 3 \quad}$

(b)　理想気体Bが，体積 V_B から V_A まで膨張する間に，ヒーターが理想気体Bに与える熱量はいくらか。正しいものを，下の解答群①～⑨のうちから一つ選べ。 $\boxed{\quad 4 \quad}$

$\boxed{\quad 3 \quad}$ ・ $\boxed{\quad 4 \quad}$ の解答群

① $\dfrac{mRT}{M}$　　② $\dfrac{MRT}{m}$　　③ $\dfrac{MRT}{m+M}$

④ $\dfrac{mC_VT}{M}$　　⑤ $\dfrac{MC_VT}{m}$　　⑥ $\dfrac{MC_VT}{m+M}$

⑦ $\dfrac{m(C_V+R)T}{M}$　　⑧ $\dfrac{M(C_V+R)T}{m}$　　⑨ $\dfrac{M(C_V+R)T}{m+M}$

問 3　図1の状態の，理想気体Aの圧力，体積，温度を$(p_{\mathrm{A}},\ V_{\mathrm{A}},\ T)$と表し，理想気体Bについても同様に$(p_{\mathrm{B}},\ V_{\mathrm{B}},\ T)$と表すことにする。この状態から，質量$m$のピストンの上に質量$\Delta m$のおもりをしずかにのせると，理想気体Aの状態は$(p_{\mathrm{A}},\ V_{\mathrm{A}},\ T) \to (p'_{\mathrm{A}},\ V'_{\mathrm{A}},\ T'_{\mathrm{A}})$と変化し，理想気体Bの状態は$(p_{\mathrm{B}},\ V_{\mathrm{B}},\ T) \to (p'_{\mathrm{B}},\ V'_{\mathrm{B}},\ T'_{\mathrm{B}})$と変化して，ピストンが静止して図2の状態となった。この変化は理想気体Aと理想気体Bのそれぞれに対して断熱変化である。ピストンにのせる質量Δmはじゅうぶん小さいとして，下の問い((a)〜(c))に答えよ。

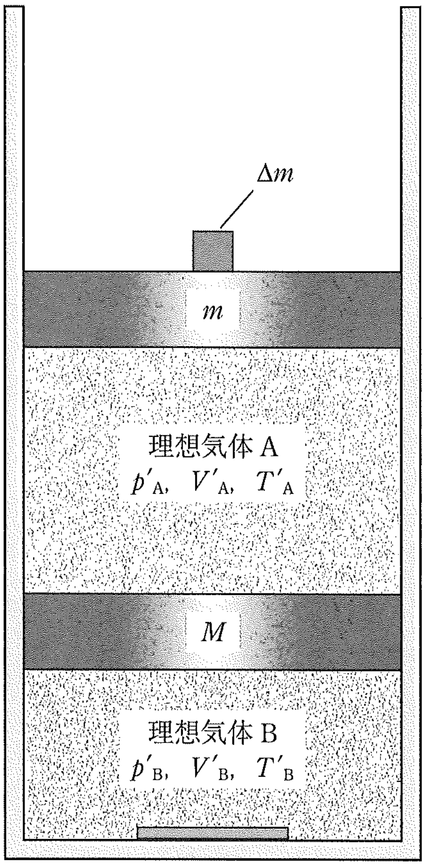


図2

(a) 一般に，定積モル比熱が C_V の理想気体の断熱変化$(p,\ V,\ T) \to (p',\ V',\ T')$において $p' = p + \Delta p$，$V' = V + \Delta V$，$T' = T + \Delta T$ と表し，Δp，ΔV，ΔT はじゅうぶん小さい場合を考えよう。このとき，理想気体の状態方程式と断熱変化に対する熱力学第 1 法則を用いると，圧力変化 Δp と体積変化 ΔV の間に

$$\frac{\Delta V}{V} = -\left(\boxed{\ 5\ } \times \frac{\Delta p}{p}\right) \qquad (1)$$

が成り立つ。ただし，$\Delta p \times \Delta V$ は無視できるとする。$\boxed{\ 5\ }$ を埋めるのに正しいものを，次の①～⑨のうちから一つ選べ。

① $\dfrac{C_V}{R}$　② $1 + \dfrac{C_V}{R}$　③ $1 - \dfrac{C_V}{R}$

④ $\dfrac{R}{C_V}$　⑤ $1 + \dfrac{R}{C_V}$　⑥ $1 - \dfrac{R}{C_V}$

⑦ $\dfrac{C_V}{C_V + R}$　⑧ $\dfrac{R}{C_V + R}$　⑨ $\dfrac{C_V - R}{C_V + R}$

(b) 理想気体 B の断熱変化$(p_B,\ V_B,\ T) \to (p'_B,\ V'_B,\ T'_B)$に対して，前問の式(1)が適用できる。また，圧力変化 $\Delta p_B = p'_B - p_B$ は Δm を用いて表すことができる。このとき，理想気体 B の体積変化 $\Delta V_B = V'_B - V_B$ はいくらか。正しいものを，次の①～⑧のうちから一つ選べ。

$\Delta V_B = \boxed{\ 6\ }$

① $-\dfrac{R^2 ST\Delta m}{C_V(m + M)Mg}$　② $-\dfrac{R^2 ST\Delta m}{C_V(m + M)^2 g}$

③ $-\dfrac{(C_V + R)RST\Delta m}{C_V(m + M)Mg}$　④ $-\dfrac{(C_V + R)RST\Delta m}{C_V(m + M)^2 g}$

⑤ $-\dfrac{C_V RST\Delta m}{(C_V + R)(m + M)Mg}$　⑥ $-\dfrac{C_V RST\Delta m}{(C_V + R)(m + M)^2 g}$

⑦ $-\dfrac{R^2 ST\Delta m}{(C_V + R)(m + M)Mg}$　⑧ $-\dfrac{R^2 ST\Delta m}{(C_V + R)(m + M)^2 g}$

(c) 図1の理想気体A, Bの内部エネルギーをそれぞれ U_A, U_B とし，図2の理想気体A, Bの内部エネルギーをそれぞれ U'_A, U'_B とする。$\Delta U_A = U'_A - U_A$, $\Delta U_B = U'_B - U_B$ としたとき，二つの理想気体の内部エネルギー変化の和 $\Delta U_A + \Delta U_B$ はいくらか。正しいものを，次の①～⑧のうちから一つ選べ。

$\Delta U_A + \Delta U_B = \boxed{\ 7\ }$

① $\dfrac{(C_V + R)C_V TM\Delta m}{R(m + M)m}$　　② $\dfrac{R^2 TM\Delta m}{(C_V + R)(m + M)m}$

③ $\dfrac{(C_V + R)RTM\Delta m}{C_V(m + M)m}$　　④ $\dfrac{C_V RTM\Delta m}{(C_V + R)(m + M)m}$

⑤ $\dfrac{(C_V + R)C_V T(2m + M)\Delta m}{R(m + M)m}$　　⑥ $\dfrac{R^2 T(2m + M)\Delta m}{(C_V + R)(m + M)m}$

⑦ $\dfrac{(C_V + R)RT(2m + M)\Delta m}{C_V(m + M)m}$　　⑧ $\dfrac{C_V RT(2m + M)\Delta m}{(C_V + R)(m + M)m}$

II 次の問いに答えよ。解答用紙の所定の欄には，結果だけでなく考え方と途中の式も記せ。

図1のように，水平な床面が半径 r の円筒の半分と点Aでなめらかにつながっている。図1は鉛直面での断面図で，円筒の中心軸は点Oを通り紙面に垂直である。点Aから円筒の内面に沿って点Bまでの部分は半円であり，BはAの真上にある。水平な床面上を点Aに向かって質量 M の人が質量 m のスケートボードに乗って速さ v_0 で進んでいる。重力加速度の大きさを g とし，下の問い(**問1**～**問3**)に答えよ。ただし，スケートボードと人はすべて図1の鉛直面内で運動するものとし，床面と円筒面はなめらかで摩擦を考えなくてよいとする。また，空気抵抗および人とスケートボードの大きさは無視する。

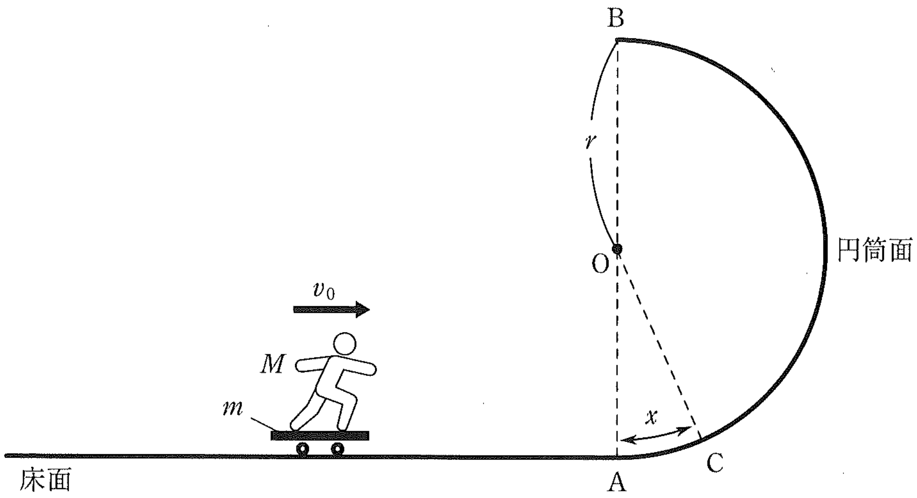


図1

問1 一体となった人とスケートボードは点Aを通過した後，円周に沿って運動し最高点Cに達し，その後は円周に沿って下って再び点Aを通過した。図1のように，円周に沿って測ったAからCまでの長さを x とし，x が半径 r に比べてじゅうぶん小さいとして，次の問い((a)，(b))に答えよ。

(a) 一体となった人とスケートボードが点Cでもつ加速度の，円周に沿った成分の大きさを g，x，r を用いて表せ。ただし，ϕ が小さい場合に成り立つ近似式 $\sin\phi \fallingdotseq \phi$ を用いて答えよ。

(b) 一体となった人とスケートボードが最初に点Aを通過してから，再び点Aを通過するまでの時間を r，g を用いて表せ。

問 2　図1のように速さ v_0 のスケートボードに乗って進んでいる人が，点Aをそのまま通過するのではなく，進行方向と逆向きに点Aでスケートボードから飛び降りた。人が飛び降りた後，スケートボードは円周に沿って運動を続け，図2のように点Oよりも高い円周上の点Dを通過した。$\angle BOD = \theta$ として，下の問い((a)〜(d))に答えよ。

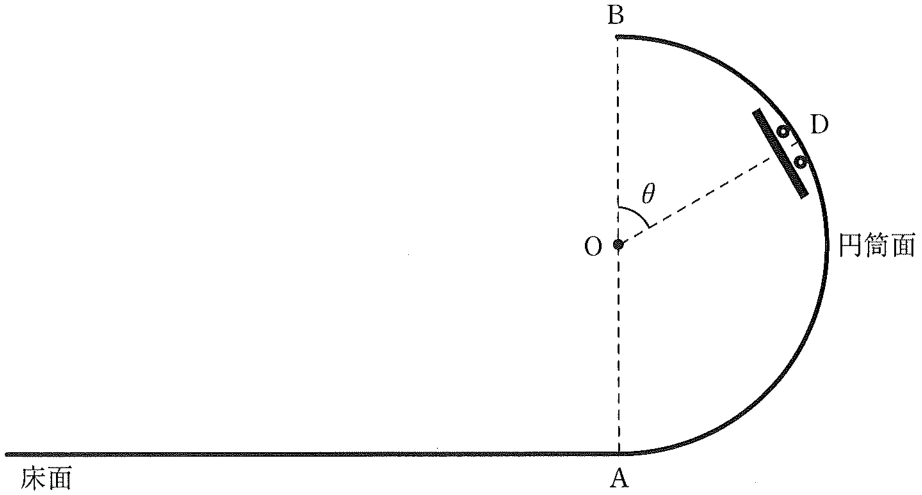


図2

(a)　点Aで人が飛び降りた直後の，床に対するスケートボードの速さを v としたとき，飛び降りた直後の人から見たスケートボードの速さ u はどのように表されるか。M，m，v，v_0 を用いて表せ。ただし，人がスケートボードから飛び降りた直後に，人は水平方向の速度をもつとする。

(b)　点Dにおけるスケートボードの運動エネルギーを，m，g，r，θ，および人が飛び降りた直後のスケートボードの速さ v を用いて表せ。

(c)　点Dにおいてスケートボードが円筒面からうける垂直抗力の大きさを N とする。N を m，r，g，θ，および人が飛び降りた直後のスケートボードの速さ v を用いて表せ。

(d)　点Dを通過したスケートボードが円周に沿って運動を続け，円筒面から離れずに点Bを通過するためには**問 2**(a)の u がある値以上でなければならない。このための u の最小値を M，m，r，g，v_0 を用いて表せ。

問 3　u が**問 2**(d)で求めた最小値に等しい場合に，図 3 のようにスケートボードは点 B から水平に飛び出し，床面上の点 E に落下した。スケートボードが点 B から飛び出してから，点 E に落下するまでの時間を g，r を用いて表せ。また，AE の距離は r の何倍になるか。

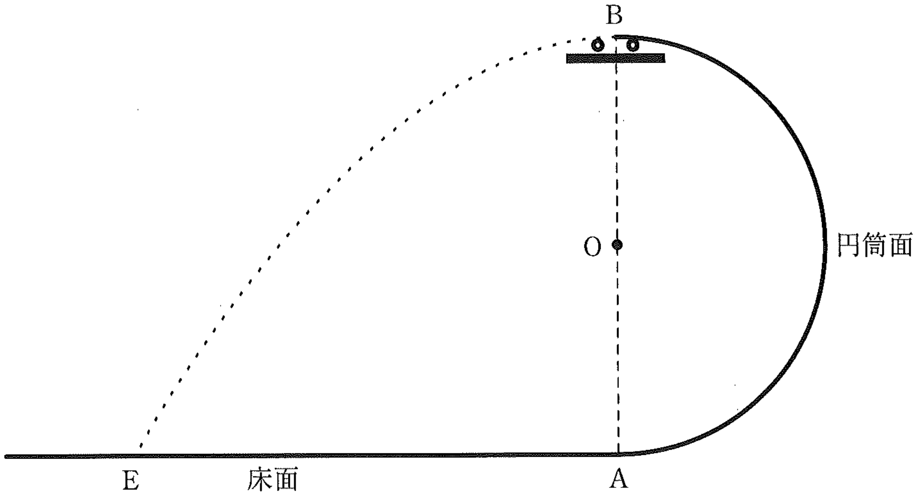


図 3