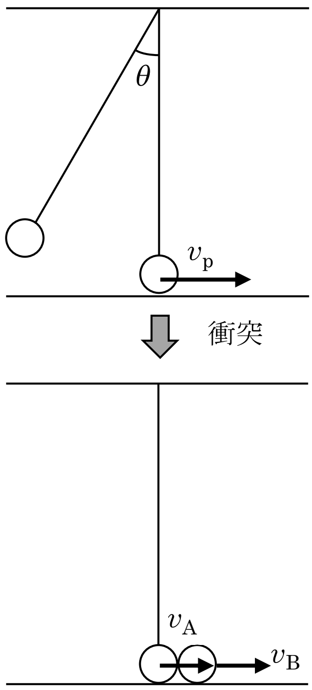
1

Ⅰ



問１　力学的エネルギー保存則より

$$\frac{1}{2}m_A v_p^2 = m_A g\ell(1-\cos\theta)$$

$$v_p = \underline{\sqrt{2g\ell(1-\cos\theta)}}\ \text{[m/s]}$$

問２　小球 A と小球 B の物体系について，
水平方向の運動量保存則より，

$$\underline{m_A v_p = m_A v_A + m_B v_B}$$

問３　反発係数の式より，

$$\underline{e = -\frac{v_A - v_B}{v_p}}$$

問４　問２，問３の結果より，v_A，v_B を求めると

$$\underline{v_A = \frac{m_A - e m_B}{m_A + m_B}v_p\ \text{[m/s]},\qquad v_B = \frac{(e+1)m_A}{m_A + m_B}v_p\ \text{[m/s]}}$$

Ⅱ

問５　運動量保存則より

x 軸方向：$\underline{mv_0 = mv\cos\theta + MV\cos\varphi}$　…①

y 軸方向：$\underline{mv\sin\theta - MV\sin\varphi = 0}$　…②

問６　①，②より V を消去すると

$$\underline{v_0\tan\varphi = v(\sin\theta + \cos\theta\tan\varphi)}$$

問７　小球 C と小球 D の物体系について，運動エネルギー保存則より

$$\underline{\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}MV^2}\quad\cdots③$$

問８　①，②から φ を消去すると

$$(MV)^2 = (mv)^2\sin^2\theta + (mv_0 - mv\cos\theta)^2$$

③を代入して v について整理すると

$$\underline{(M+m)v^2 - (2mv_0\cos\theta)v + (m-M)v_0^2 = 0}\quad\cdots④$$

問９　④の 2 次方程式が実数解をもてばよいので，判別式を D とすると $D \geqq 0$

$$\frac{D}{4} = (mv_0\cos\theta)^2 - (M+m)(m-M)v_0^2$$

$$(mv_0)^2\cos^2\theta - \left(m^2 - M^2\right)v_0^2 \geqq 0$$

したがって $\sin\theta \leqq \dfrac{M}{m}$

$m > M$ より $0 < \dfrac{M}{m} < 1$ であるから

$$\underline{\sin\theta_{MAX} = \frac{M}{m}}$$

二物体の衝突に関する問いで，問７までは基本的な問いや誘導が丁寧な問いであったため確実に得点したい問いであった。問８は，指定された文字から消去しなくてはいけない文字を考えれば，立式しやすかったであろう。

2

問１　点 A に置かれている正電荷が点 B の正電荷から受ける静電気力の大きさは

$$\frac{kq^2}{(2a)^2}=\underline{\frac{kq^2}{4a^2}\ [\mathrm{N}]}$$

問２　点 A，点 B には同符号の電荷が置かれているので，<u>斥力</u>

問３　点 C に単位電荷を置いたときに単位電荷の受ける静電気力の向きは図１より y 軸正方向なので

点 C の x 軸方向の電場の強さは，<u>0 N/C</u>

y 軸方向の電場の強さは，$\dfrac{kq^2}{4a^2}\times\dfrac{\sqrt{3}}{2}\times 2=\underline{\dfrac{\sqrt{3}kq}{4a^2}\ [\mathrm{N/C}]}$

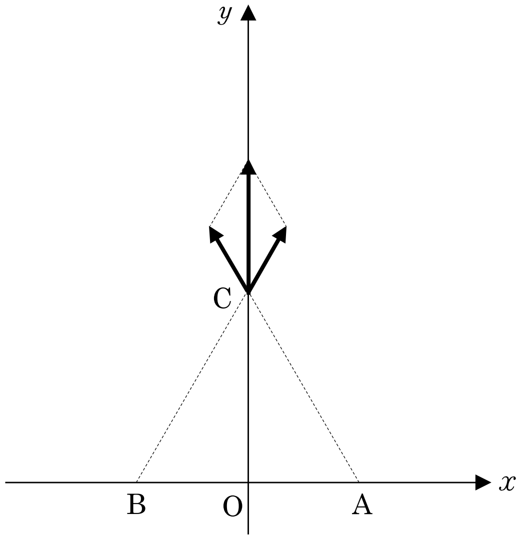


図１

次に，点 D に単位電荷を置いたときに，単位電荷が点 A の電荷から受ける静電気力の大きさを E_1 [N/C]とすると

$E_1=\dfrac{kq}{\left(2\sqrt{3}a\right)^2}=\dfrac{kq}{12a^2}$ [N/C] であり，

x 軸とのなす角は，60° であるから

x 軸方向の電場の強さは，$\dfrac{kq}{24a^2}$ [N/C]

y 軸方向の電場の強さは，$\dfrac{\sqrt{3}kq}{24a^2}$ [N/C]

単位電荷が点 B の電荷から受ける静電気力の大きさを E_2 [N/C]とすると，$E_2=\dfrac{kq}{4a^2}$ [N/C]であるから

x 軸方向の電場の強さは，$\dfrac{\sqrt{3}kq}{8a^2}$ [N/C]

y 軸方向の電場の強さは，$\dfrac{kq}{8a^2}$ [N/C]

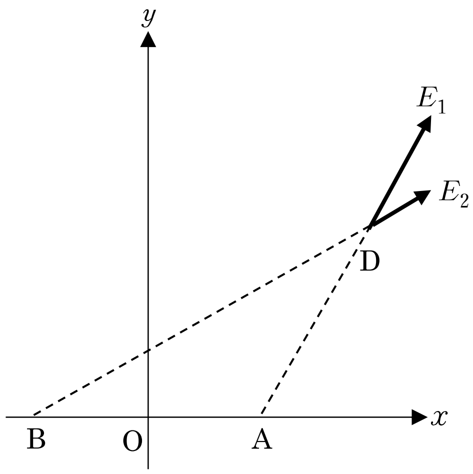


図２

よって，点 D の x 軸方向の電場の強さは，

$$\frac{kq}{24a^2}+\frac{\sqrt{3}kq}{8a^2}=\underline{\frac{\left(1+3\sqrt{3}\right)kq}{24a^2}\ [\mathrm{N/C}]}$$

y 軸方向の電場の強さは，

$$\frac{\sqrt{3}kq}{24a^2}+\frac{kq}{8a^2}=\underline{\frac{\left(3+\sqrt{3}\right)kq}{24a^2}\ [\mathrm{N/C}]}$$

問４　点 C，点 D の電位を V_{C} [V]，V_{D} [V]とすると

$$V_{\mathrm{C}}=\frac{kq}{2a}\times 2=\underline{\frac{kq}{a}\ [\mathrm{V}]}$$

$$V_{\mathrm{D}}=\frac{kq}{2\sqrt{3}a}+\frac{kq}{2a}=\underline{\frac{\left(3+\sqrt{3}\right)kq}{6a}}\ [\mathrm{V}]$$

問５

(1)　外力のする仕事は，点電荷のエネルギー変化と等しい。

原点 O の電位は，$\dfrac{kq}{a}\times 2=\dfrac{2kq}{a}$ であるから求める仕事は

$$\frac{4kq^2}{a}-2qV_{\mathrm{D}}$$
$$=\underline{\frac{\left(9-\sqrt{3}\right)kq^2}{3a}\ [\mathrm{J}]}$$

(2)　静電気力は保存力であるから経路に依らず原点 O まで動かすのに外力がする仕事は等しい。

よって，外力のする仕事の差は <u>0 J</u>

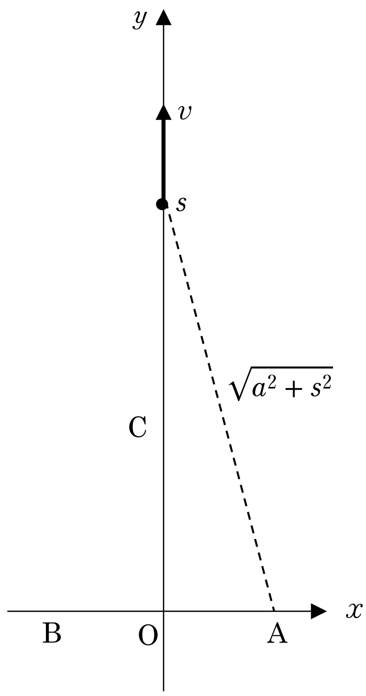
問６　求める速さを v [m/s]とする。

原点から s [m] 離れた位置の電位は，$\dfrac{kq}{\sqrt{a^2+s^2}}\times 2=\dfrac{2kq}{\sqrt{a^2+s^2}}$

エネルギー保存則より

$$\frac{1}{2}mv^2+\frac{2kq^2}{\sqrt{a^2+s^2}}=\frac{kq^2}{a}$$

$$\underline{v=q\sqrt{\frac{2k}{m}\left(\frac{1}{a}-\frac{2}{\sqrt{a^2+s^2}}\right)}\ [\mathrm{m/s}]}$$



静電気力と電場(電界)に関する問題で，電場が単位電荷の受ける静電気力であること，静電気力が保存力であるため，運動エネルギーと位置エネルギーの和が一定であることを理解していれば完答も可能な問いであった。

・物理 VOL.3 $\boxed{59}$ 電場(電界)の強さと外力のする仕事。「高３国立大物理」で１０月に学習した。

・物理 VOL.4 $\boxed{35}$ 電場(電界)の強さと外力のする仕事。「高３赤門会難関大医歯薬物理」(2025 年度名称：「高３赤門会物理」)，高３赤門会医進 SS 物理(2025 年度名称：「高３赤門会 SS 物理」)で１０月に学習した。

$\boxed{3}$

問１

① 全反射

② 臨界角

A　屈折の法則より

$n_1 \sin\theta = n_2 \sin\theta$

B　媒質２に対する媒質１の相対屈折率は，$\dfrac{n_1}{n_2}$ であるから

$\dfrac{n_1}{n_2} = \dfrac{\lambda_2}{\lambda_1}$　よって　$\lambda_2 = \dfrac{n_1}{n_2}\lambda_1$ [m]

C　屈折角が 90° になるとき全反射し始めるので，屈折の法則より

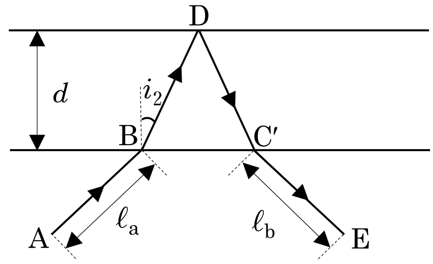
$n_1 \sin i_0 = n_2 \sin 90°$

$\sin i_0 = \dfrac{n_2}{n_1}$

D　屈折の法則より

$\dfrac{v_2}{v_1} = \dfrac{\sin i_2}{\sin i_1}$

$v_2 = \dfrac{\sin i_2}{\sin i_1} v_1$ [m/s]



E　媒質２の屈折率は n_2 であるから

$$L_1' = \ell_\mathrm{a} + \frac{2d}{\cos i_2} n_2 + \ell_\mathrm{b}$$

$$= \ell_\mathrm{a} + \ell_\mathrm{b} + \frac{2n_2 d}{\cos i_2} \ \text{[m]}$$

F　経路 1，経路２の光は同位相であり，

経路差は，$2d\cos i_2$ なので

$$d\cos i_2 = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_2$$

$\lambda_2 = \dfrac{n_1}{n_2}\lambda_1$ であるから　$2d\cos i_2 = \left(m + \dfrac{1}{2}\right)\dfrac{n_1}{n_2}\lambda_1$

ア　経路１の光が B から C に進む間に経路２の光はB′からC′まで進むので位相差は 0

問２　屈折の法則より

$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$　…①

$n_2 \sin i_2 = n_3 \sin i_3$　…②

$n_3 \sin i_3 = n_4 \sin i_4$　…③

$i_2 < i_3 < i_4 < i_1$ より $\sin i_2 < \sin i_3 < \sin i_4 < \sin i_1$ …④

①，②，③，④より

$n_1 < n_4 < n_3 < n_2$

光の屈折と薄膜干渉に関する問いで，問１の穴埋めについては基本事項をおさえていれば問題なく解答できたであろう。問２の屈折率の大小関係は，屈折の法則を利用することで大小関係がわかる問いであった。

・物理 VOL.3 $\boxed{56}$ 薄膜に斜めに入射する光の干渉。「高３国立大物理」で１０月に学習した。

・物理 VOL.3 $\boxed{57}$ 屈折の法則と全反射し始める条件。「高３国立大物理」で１０月に学習した。

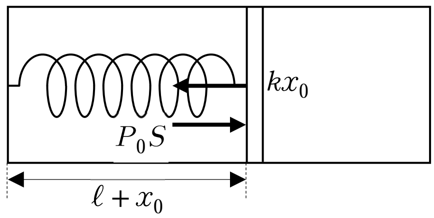
$\boxed{4}$

問１　状態方程式は，　$\underline{P_0 S(\ell + x_0) = nRT_0}$　…①

問２　ピストンにかかる力のつりあいより

$$kx_0 = P_0 S \quad \cdots②$$

$$\underline{x_0 = \frac{P_0 S}{k}\ [\mathrm{m}]}$$



問３　①，②より

$$kx_0(\ell + x_0) = nRT_0$$

これを x_0 について整理して

$$\underline{kx_0^2 + k\ell x_0 - nRT_0 = 0}$$

解の公式を使って解くと

$$\underline{x_0 = \frac{-k\ell + \sqrt{(k\ell)^2 + 4knRT_0}}{2k}\ [\mathrm{m}]}$$

問４　断熱変化であるから

$$P_0\{S(\ell + x_0)\}^{\frac{5}{3}} = P_1(S\ell)^{\frac{5}{3}}$$

$$\underline{P_1 = \left(1 + \frac{x_0}{\ell}\right)^{\frac{5}{3}} P_0\ [\mathrm{Pa}]} \quad \cdots③$$

状態方程式より

$$P_1 S\ell = nRT_1$$

③を代入して

$$\underline{T_1 = \left(1 + \frac{x_0}{\ell}\right)^{\frac{5}{3}} T_0\ [\mathrm{K}]}$$

問５　内部エネルギー変化は，絶対温度の変化と比例するので

$$\Delta U = \underline{\frac{3}{2} nR(T_1 - T_0)\ [\mathrm{J}]}$$

※ $\Delta U = \frac{3}{2}(P_1 S\ell - nRT_0)$ [J] も可

問６　ピストンに与えた仕事は，左側の気体とばねがされ仕事に等しい。

断熱過程なので，熱力学第一法則より，気体がされた仕事は内部エネルギーの変化量に等しい。また，ばねがされた仕事は弾性力による位置エネルギーの変化量に等しい。

したがって，

$$W = \Delta U - \frac{1}{2} kx_0^2$$

$$= \underline{\frac{3}{2} nR(T_1 - T_0) - \frac{1}{2} kx_0^2\ [\mathrm{J}]}$$

※ $W = \frac{3}{2}(P_1 S\ell - nRT_0) - \frac{1}{2} kx_0^2$ [J] も可

問７　シリンダーが断熱材でできており，気体がする仕事が 0 なので熱力学第一法則より

内部エネルギーが一定である。

よって，$T_2 = \underline{T_1\ [\mathrm{K}]}$

n [mol] の気体の状態方程式より

$$P_2 S(2\ell) = nRT_2$$

$$\underline{P_2 = \frac{nRT_1}{2S\ell}\ [\mathrm{Pa}]}$$

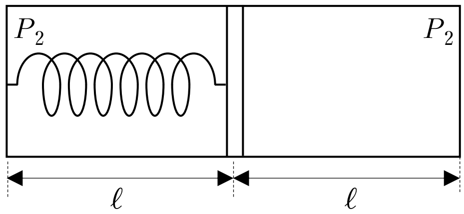
［別解１］

※平衡状態では，ピストンの左側には $\dfrac{n}{2}$ [mol]の気体が存在していて，体積，絶対温度が一定である。

したがって，圧力と物質量が比例するので，$\underline{P_2=\dfrac{1}{2}P_1\ \text{[Pa]}}$

問８　運動方程式は

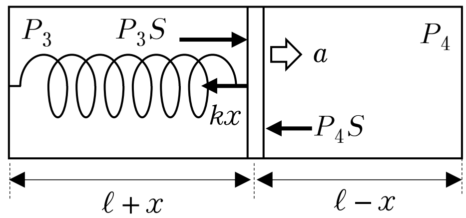
$\underline{Ma=P_3S-P_4S-kx}$　…④



問９　ピストンの左側の気体について，断熱変化であるから

$$P_2(S\ell)^{\frac{5}{3}}=P_3\{S(\ell+x)\}^{\frac{5}{3}}$$

$$\underline{P_3=\left(\frac{\ell}{\ell+x}\right)^{\frac{5}{3}}P_2\ \text{[Pa]}}\quad\cdots⑤$$



問１０　ピストンの右側の気体について，断熱変化であるから

$$P_2(S\ell)^{\frac{5}{3}}=P_4\{S(\ell-x)\}^{\frac{5}{3}}$$

$$\underline{P_4=\left(\frac{\ell}{\ell-x}\right)^{\frac{5}{3}}P_2\ \text{[Pa]}}\quad\cdots⑥$$

④，⑤，⑥より

$$Ma=\left(\frac{\ell}{\ell+x}\right)^{\frac{5}{3}}P_2S-\left(\frac{\ell}{\ell-x}\right)^{\frac{5}{3}}P_2S-kx$$

$$=\left(\frac{1}{1+\frac{x}{\ell}}\right)^{\frac{5}{3}}P_2S-\left(\frac{1}{1-\frac{x}{\ell}}\right)^{\frac{5}{3}}P_2S-kx$$

$$≒\left(1-\frac{5x}{3\ell}\right)P_2S-\left(1+\frac{5x}{3\ell}\right)P_2S-kx$$

$$=-\frac{10P_2S+k\ell}{3\ell}x$$

この単振動の角振動数は $\sqrt{\dfrac{10P_2S+k\ell}{3\ell}}$ であるから

$$\underline{f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{10P_2S+k\ell}{3\ell}}\ \text{[Hz]}}$$

ばねつきピストンに関する問題で，大問４つの中で最も難しかったであろう。気体に関するエネルギー保存を考える際に，ばねの弾性力による位置エネルギーも考慮する必要があった。

・物理 VOL.1 **問題２８－３**　気体がばねつきピストンにした仕事。「高３赤門会難関大医歯薬物理」（2025 年度名称：「高３赤門会物理」）で５月に学習した。