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6**)に答えよ。〔**解答番号** $\boxed{1}$ 〜 $\boxed{9}$ 〕

問1 図1のように，重さ W の均一な細い棒の下端が，水平と30°の角をなす斜面に接触しており，斜面はなめらかで棒との間に摩擦力ははたらかないとする。棒が斜面となす角は30°であり，棒の上端は天井につないだ糸で斜め上方からつるされて，棒は静止している。このとき，棒の上端にはたらいている糸の張力を鉛直成分と水平成分に分解すると，糸の張力の鉛直成分の大きさは棒の重さ W の何倍か。正しいものを，下の①〜⑧のうちから一つ選べ。ただし，必要なら三角関数の公式

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin\alpha\cos\beta + \cos\alpha\sin\beta$$

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos\alpha\cos\beta - \sin\alpha\sin\beta$$

を用いてよい。 $\boxed{1}$ 倍

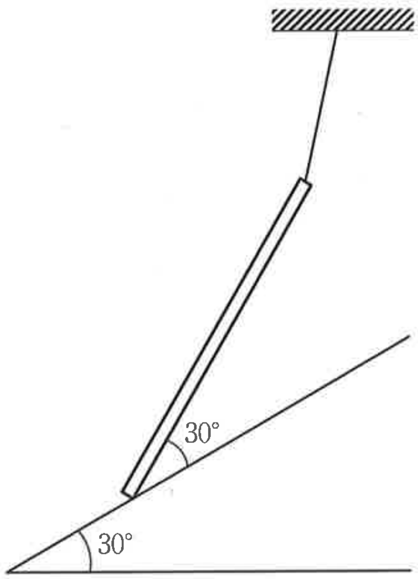

図1

① $\dfrac{\sqrt{3}}{12}$　② $\dfrac{\sqrt{3}}{6}$　③ $\dfrac{\sqrt{21}}{12}$　④ $\dfrac{\sqrt{21}}{6}$

⑤ $\dfrac{1}{4}$　⑥ $\dfrac{3}{8}$　⑦ $\dfrac{1}{2}$　⑧ $\dfrac{3}{4}$

問 2　図2のように，点Oを中心とした半径 r の球が台に固定されている。球の表面の頂上の点Pで，小球に水平方向に大きさ v_0 の初速度を与えたところ，小球はPから球の表面をすべりはじめて，OPから測った角度が θ の点で球の表面から離れた。重力加速度の大きさを g とし，

$$\cos\theta = \boxed{\quad 2 \quad} + \boxed{\quad 3 \quad} \times \frac{{v_0}^2}{gr}$$

と表したとき，$\boxed{\quad 2 \quad}$・$\boxed{\quad 3 \quad}$ を埋めるのに正しいものを，下の解答群①～⑨のうちから一つずつ選べ。ただし，空気の抵抗および小球と球の表面の間の摩擦力は無視できるものとする。

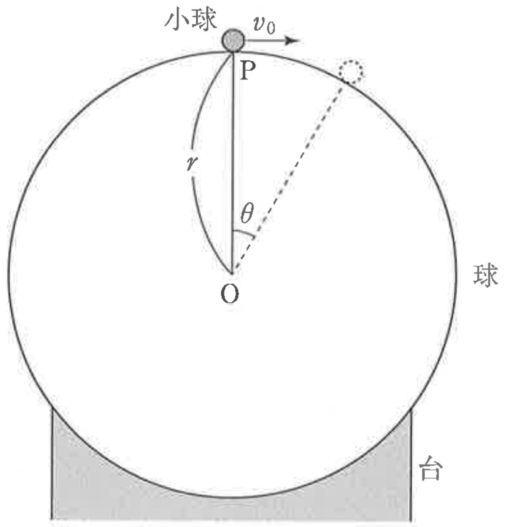

図2

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

① $\frac{1}{4}$　② $\frac{1}{3}$　③ $\frac{1}{2}$　④ $\frac{2}{3}$　⑤ $\frac{3}{4}$

⑥ 1　⑦ $\frac{5}{4}$　⑧ $\frac{4}{3}$　⑨ $\frac{3}{2}$

問 3 x 軸上を正の向きに速さ 2.5 m/s で進む正弦波があり，原点($x = 0$)の媒質の変位と時刻 t〔s〕との関係は図 3 のグラフで表される。このときの媒質の変位 y〔m〕は，時刻 t〔s〕，位置 x〔m〕の関数としてどのように表されるか。正しいものを，下の①～⑧のうちから一つ選べ。

$y = \boxed{\ 4\ }$〔m〕

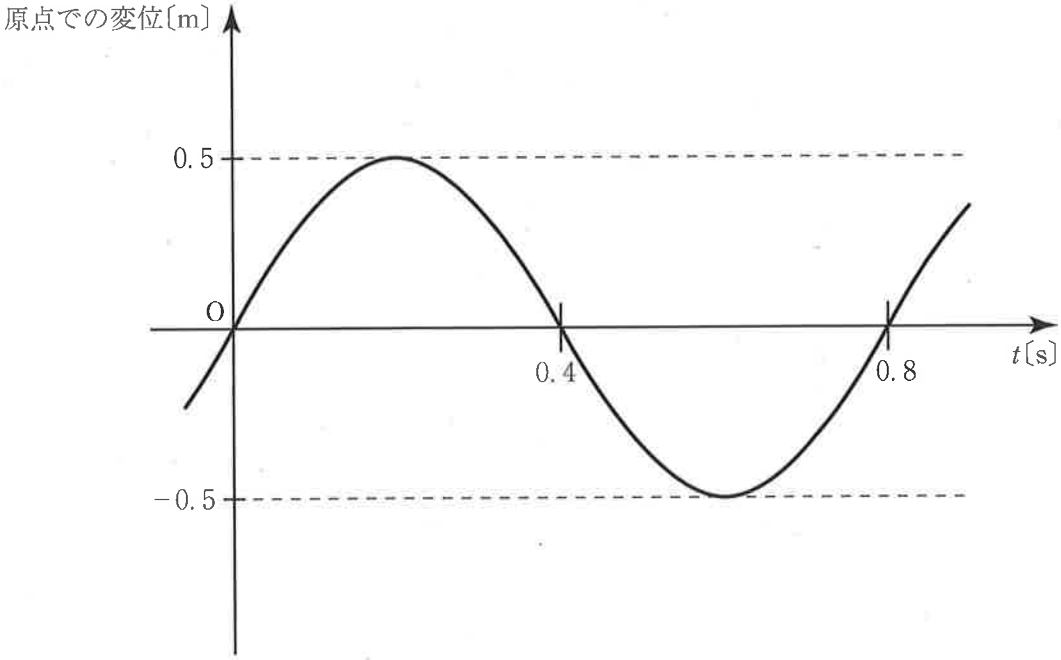

図 3

① $0.5\sin(2.5\pi t + \pi x)$　　② $0.5\sin(2.5\pi t - \pi x)$

③ $0.5\sin(2.5\pi t + 2\pi x)$　　④ $0.5\sin(2.5\pi t - 2\pi x)$

⑤ $0.5\sin(5\pi t + 2\pi x)$　　⑥ $0.5\sin(5\pi t - 2\pi x)$

⑦ $0.5\sin(5\pi t + 2.5\pi x)$　　⑧ $0.5\sin(5\pi t - 2.5\pi x)$

問 4　図4は，波が媒質1と媒質2の境界面で屈折するときの波の山の波面を表している。媒質1の中の波面と境界面との角度は60°，媒質2の中の波面と境界面との角度は30°である。媒質1の中の山の波面の間隔は3.0 cmで，点Pを山の波面が通過してから，次の山の波面が通過するまでの時間は0.30秒であった。媒質2における波の速さはいくらか。最も近い値を，下の①～⑧のうちから一つ選べ。ただし，$\sqrt{3} \fallingdotseq 1.7$として計算してよい。$\boxed{\quad 5 \quad}$ cm/s

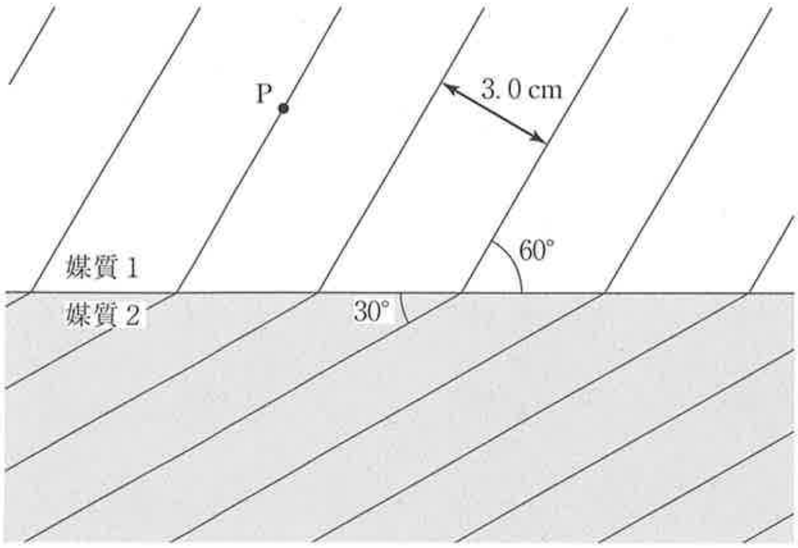

図4

① 2.9	② 3.4	③ 3.9	④ 4.4
⑤ 4.9	⑥ 5.4	⑦ 5.9	⑧ 6.4

問 5 n〔mol〕の単原子分子の理想気体を，体積 V，絶対温度 T の状態Aから定圧変化させて状態Bにした。このとき気体定数を R として，気体が外部にした仕事は $\frac{5}{2}nRT$ であった。次の問い((a)，(b))に答えよ。

(a) 状態Bの体積はいくらか。正しいものを，次の①～⑧のうちから一つ選べ。 $\boxed{\quad 6 \quad}$

① $\frac{4}{3}V$　② $\frac{3}{2}V$　③ $\frac{5}{3}V$　④ $2V$

⑤ $\frac{7}{3}V$　⑥ $\frac{5}{2}V$　⑦ $3V$　⑧ $\frac{7}{2}V$

(b) 状態Aから状態Bへの定圧変化で，気体が吸収した熱量はいくらか。正しいものを，次の①～⑧のうちから一つ選べ。 $\boxed{\quad 7 \quad}$

① $\frac{5}{4}nRT$　② $\frac{5}{3}nRT$　③ $\frac{7}{3}nRT$　④ $\frac{7}{2}nRT$

⑤ $\frac{15}{4}nRT$　⑥ $\frac{25}{4}nRT$　⑦ $\frac{15}{2}nRT$　⑧ $\frac{25}{2}nRT$

問 6　真空中で点電荷や帯電体の周囲に生じる電場について考える。真空中でのクーロンの法則の比例定数を k として，次の問い((a)，(b))に答えよ。

(a)　電場のようすを電気力線で表すとき，電場の向きに垂直な単位面積の断面を貫く電気力線の本数を，その場所の電場の強さに等しくなるように定める。真空中に置かれた点電荷から出る電気力線は放射状に広がり，点電荷を中心とする球面を垂直に貫く。図5は断面図であり，矢印は点電荷から出る電気力線を表し，破線は点電荷を囲む球面を示している。点電荷の電気量が $Q\,(>0)$ のとき，点電荷から出る電気力線の総本数はいくらか。正しいものを，下の①～⑨のうちから一つ選べ。 $\boxed{\ 8\ }$

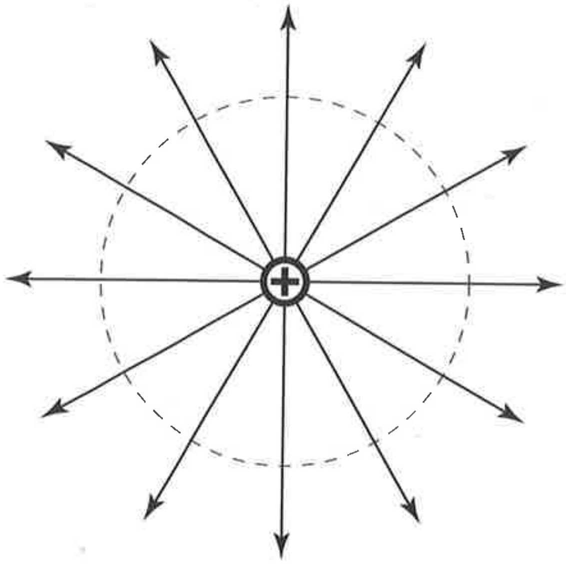

図5

① $\dfrac{Q}{4k}$　② $\dfrac{Q}{2k}$　③ $\dfrac{Q}{k}$

④ $\dfrac{kQ}{4\pi}$　⑤ $\dfrac{kQ}{2\pi}$　⑥ $\dfrac{kQ}{\pi}$

⑦ πkQ　⑧ $2\pi kQ$　⑨ $4\pi kQ$

(b) 帯電体から出る電気力線の総本数は，帯電体に含まれる電気量で決まり，帯電体の大きさや形によらない。図6のように，じゅうぶんに細く無限に長い金属棒が，単位長さあたり$\sigma(>0)$の電気量で均一に帯電している。この金属棒の位置に中心軸をもつ半径rの円筒を考えると，金属棒から出る電気力線は円筒の側面を垂直に貫く。金属棒から距離rの円筒側面の位置における電場の強さはいくらか。正しいものを，下の①～⑨のうちから一つ選べ。 $\boxed{\quad 9 \quad}$

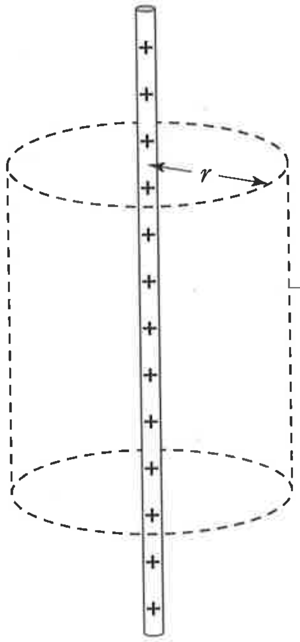

図6

① $\dfrac{k\sigma}{r^2}$　② $\dfrac{2k\sigma}{r^2}$　③ $\dfrac{4k\sigma}{r^2}$

④ $\dfrac{k\sigma}{r}$　⑤ $\dfrac{2k\sigma}{r}$　⑥ $\dfrac{4k\sigma}{r}$

⑦ $k\sigma$　⑧ $2k\sigma$　⑨ $4k\sigma$

第２問　図１のようにばね定数 k の軽いばねの一端を壁に固定し，他端に質量 M の木片を取りつけてなめらかな水平面の上に置く。ばねは自然の長さの状態にあり，木片は静止している。このときの木片の左端の位置を原点Ｏとして水平面に沿って x 軸をとり，ばねが縮む向きに x 軸の正の向きを定める。この木片に質量 m の弾丸を，速さ v_0 で x 軸の正の向きに水平に打ち込む。弾丸の大きさと，弾丸の運動への空気抵抗および重力の影響は無視できるとする。弾丸は，木片に速さ v_0 で接触したあと x 軸の正の向きに水平に進み，木片の中をめり込んでいくものとする。弾丸が接触してから動きはじめた木片は，ばねの伸び縮みによって x 軸に沿う方向に運動するものと仮定する。また，ばねの伸び縮みはフックの法則が成立する範囲内にあるとし，木片の運動に対する水平面からの摩擦および空気の抵抗は無視できるとする。弾丸が木片に接触した瞬間を時刻 $t = 0$ として，下の問い（**問１～問４**）に答えよ。〔**解答番号** $\boxed{1}$ ～ $\boxed{6}$ 〕

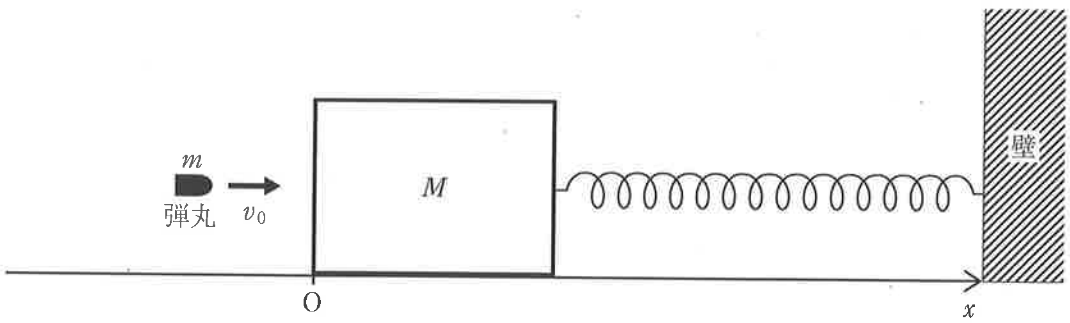

図１

問１　木片に打ち込まれた弾丸は，木片から水平方向に一定の大きさ f の抵抗力を受け減速しながら木片の中を進むものとしよう。このようにして，弾丸は木片の中にめり込んで止まり，そのあとは弾丸と木片は一体となって運動したとする。時刻 $t = 0$ に速さ v_0 の弾丸が図１の木片に接触してから，木片に対して静止するまでの任意の時刻 t における，弾丸と木片それぞれの運動について，次の問い（(a)～(c)）に答えよ。

(a) 時刻 t における弾丸の速度は，水平面に対していくらか。正しいものを，次の①〜⑧のうちから一つ選べ。ただし，x 軸の正の向きを速度の正の向きとする。 $\boxed{\quad 1 \quad}$

① $v_0 - \dfrac{ft}{2m}$

② $v_0 - \dfrac{ft}{m}$

③ $v_0 - \dfrac{ft}{2(m+M)}$

④ $v_0 - \dfrac{ft}{m+M}$

⑤ $v_0 \cos\left(t\sqrt{\dfrac{k}{m+M}}\right) - \dfrac{ft}{2m}$

⑥ $v_0 \cos\left(t\sqrt{\dfrac{k}{m+M}}\right) - \dfrac{ft}{m}$

⑦ $v_0 \cos\left(t\sqrt{\dfrac{k}{m+M}}\right) - \dfrac{ft}{2(m+M)}$

⑧ $v_0 \cos\left(t\sqrt{\dfrac{k}{m+M}}\right) - \dfrac{ft}{m+M}$

(b) 図１の状態から時刻 $t = 0$ に動きはじめた木片の左端は，時刻 t には位置 x にきているとしよう。この時刻 t の瞬間に，木片にはたらく合力の x 成分はいくらか。正しいものを，次の①〜⑧のうちから一つ選べ。ただし，x 軸の正の向きを力の x 成分の正の向きとする。 $\boxed{\quad 2 \quad}$

① kx

② $kx - f$

③ $kx + f$

④ $kx + \dfrac{m-M}{m+M}f$

⑤ $-kx$

⑥ $-kx - f$

⑦ $-kx + f$

⑧ $-kx + \dfrac{m-M}{m+M}f$

(c) 木片は，前問の合力の x 成分が0になる位置に向かう復元力を受けることになる。このことから，前問の x（木片の左端の時刻 t における位置）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。

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

① $\dfrac{f}{k}\sin\left(t\sqrt{\dfrac{k}{M}}\right)$　② $\dfrac{2f}{k}\sin\left(t\sqrt{\dfrac{k}{M}}\right)$

③ $\dfrac{f}{k}\left[1-\cos\left(t\sqrt{\dfrac{k}{M}}\right)\right]$　④ $\dfrac{2f}{k}\left[1-\cos\left(t\sqrt{\dfrac{k}{M}}\right)\right]$

⑤ $\dfrac{f}{k}\sin\left(t\sqrt{\dfrac{k}{m+M}}\right)$　⑥ $\dfrac{2f}{k}\sin\left(t\sqrt{\dfrac{k}{m+M}}\right)$

⑦ $\dfrac{f}{k}\left[1-\cos\left(t\sqrt{\dfrac{k}{m+M}}\right)\right]$　⑧ $\dfrac{2f}{k}\left[1-\cos\left(t\sqrt{\dfrac{k}{m+M}}\right)\right]$

問 2　木片の中をめり込んだ弾丸は，時刻 $t = \dfrac{\pi}{6}\sqrt{\dfrac{M}{k}}$ に木片に対して静止した。この時刻以降は，弾丸が木片に対して静止したまま，弾丸と木片は一体となって運動したとする。このとき，弾丸に $0 \leqq t < \dfrac{\pi}{6}\sqrt{\dfrac{M}{k}}$ の間だけはたらいた**問 1** の抵抗力の大きさ f はいくらか。正しいものを，次の①～⑨のうちから一つ選べ。

$f = \boxed{\quad 4 \quad}$

① $\dfrac{mMv_0}{m+M}\sqrt{\dfrac{k}{M}}$　② $\dfrac{3\,mMv_0}{m+M}\sqrt{\dfrac{k}{M}}$　③ $\dfrac{6\,mMv_0}{m+M}\sqrt{\dfrac{k}{M}}$

④ $\dfrac{mMv_0}{2\,m+\pi M}\sqrt{\dfrac{k}{M}}$　⑤ $\dfrac{3\,mMv_0}{2\,m+\pi M}\sqrt{\dfrac{k}{M}}$　⑥ $\dfrac{6\,mMv_0}{2\,m+\pi M}\sqrt{\dfrac{k}{M}}$

⑦ $\dfrac{mMv_0}{3\,m+\pi M}\sqrt{\dfrac{k}{M}}$　⑧ $\dfrac{3\,mMv_0}{3\,m+\pi M}\sqrt{\dfrac{k}{M}}$　⑨ $\dfrac{6\,mMv_0}{3\,m+\pi M}\sqrt{\dfrac{k}{M}}$

問 3　抵抗力の大きさ f が前問の結果で与えられるとき，木片中にめり込んだ弾丸が木片に対して静止するまで（$t=0$ から $t = \dfrac{\pi}{6}\sqrt{\dfrac{M}{k}}$ まで）の，木片にはたらくばねの弾性力の力積の大きさはいくらか。正しいものを，次の①～⑨のうちから一つ選べ。$\boxed{\quad 5 \quad}$

① $\dfrac{mMv_0}{m+M}$　② $\dfrac{(\pi-1)mMv_0}{m+M}$　③ $\dfrac{(\sqrt{2}-1)\pi mMv_0}{m+M}$

④ $\dfrac{2\,mMv_0}{2\,m+\pi M}$　⑤ $\dfrac{(\pi-2)mMv_0}{2\,m+\pi M}$　⑥ $\dfrac{(\sqrt{3}-\sqrt{2})\pi mMv_0}{2(2\,m+\pi M)}$

⑦ $\dfrac{3\,mMv_0}{3\,m+\pi M}$　⑧ $\dfrac{(\pi-3)mMv_0}{3\,m+\pi M}$　⑨ $\dfrac{(2-\sqrt{3})\pi mMv_0}{4(3\,m+\pi M)}$

問 4　抵抗力の大きさ f が**問 2** の結果で与えられるとき，**問 1**(c)の x(木片の左端の位置)の時刻 $t = \frac{\pi}{6}\sqrt{\frac{M}{k}}$ における値を x_1 としよう。$t \geqq \frac{\pi}{6}\sqrt{\frac{M}{k}}$ の時刻においては，木片と弾丸は一体となって運動する。木片の左端が $x = -x_1$ の位置(原点 O に関して $x = x_1$ と対称な点)をはじめて通過する時刻は，

$$t = \frac{\pi}{6}\sqrt{\frac{M}{k}} + \boxed{\quad 6 \quad}$$

となる。$\boxed{\quad 6 \quad}$ を埋めるのに正しいものを，次の①～⑧のうちから一つ選べ。

① $\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{m+M}{k}}$　② $\pi\sqrt{\frac{m+M}{k}}$　③ $\frac{3\pi}{2}\sqrt{\frac{m+M}{k}}$

④ $2\pi\sqrt{\frac{m+M}{k}}$　⑤ $\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{mM}{k(m+M)}}$　⑥ $\pi\sqrt{\frac{mM}{k(m+M)}}$

⑦ $\frac{3\pi}{2}\sqrt{\frac{mM}{k(m+M)}}$　⑧ $2\pi\sqrt{\frac{mM}{k(m+M)}}$

第 3 問　図 1 のような半径 r の球形の容器(中心 O)に封入された N 個の粒子の運動を考える。粒子の衝突により容器の位置は動かないものとして，下の問い(**A**・**B**)に答えよ。

〔**解答番号** $\boxed{\ 1\ }$ ～ $\boxed{\ 6\ }$ 〕

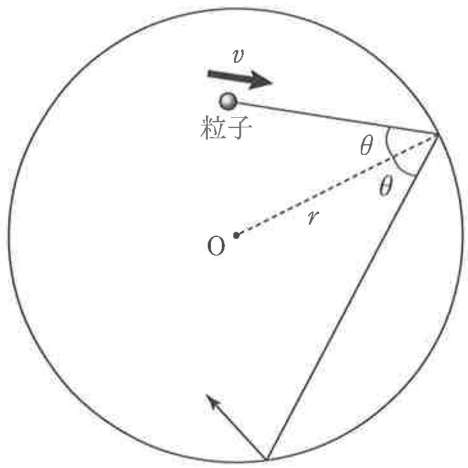

図 1

A　容器内の N 個の粒子はすべて同じ質量 m をもち，各粒子は容器の壁と弾性衝突をする。粒子どうしの衝突は無いものとして，次の問い(**問 1** ～**問 3**)に答えよ。

問 1　図 1 のように，1 個の粒子が入射角 θ，速さ v で容器の壁と弾性衝突し，はね返ったとき，粒子の運動量の変化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。 $\boxed{\ 1\ }$

① $mv\cos\theta$　② $mv\sin\theta$　③ $2mv\cos\theta$　④ $2mv\sin\theta$

⑤ $\dfrac{mv}{\cos\theta}$　⑥ $\dfrac{mv}{\sin\theta}$　⑦ $\dfrac{2mv}{\cos\theta}$　⑧ $\dfrac{2mv}{\sin\theta}$

問 2　この粒子が単位時間に容器の壁と衝突する回数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。 $\boxed{\ 2\ }$

① $\dfrac{v}{r}$　② $\dfrac{v}{r\cos\theta}$　③ $\dfrac{v}{r\sin\theta}$　④ $\dfrac{v}{r\tan\theta}$

⑤ $\dfrac{v}{2r}$　⑥ $\dfrac{v}{2r\cos\theta}$　⑦ $\dfrac{v}{2r\sin\theta}$　⑧ $\dfrac{v}{2r\tan\theta}$

問 3　前問までに得られた結果から，粒子 1 個が単位時間に壁にあたえる力積の大きさの和が求められる。容器中の粒子は，いろいろな速さと入射角で容器の壁と衝突をくり返している。N 個の粒子の速さをそれぞれ v_1，v_2，…，v_N とすると，速度の 2 乗の平均 $\overline{v^2}$ は

$$\overline{v^2} = \frac{{v_1}^2 + {v_2}^2 + \cdots + {v_N}^2}{N}$$

となる。容器の壁が N 個の粒子から受ける圧力は $\overline{v^2}$ を用いて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。 $\boxed{\quad 3 \quad}$

① $\dfrac{Nm\overline{v^2}}{8\pi r^3}$　② $\dfrac{Nm\overline{v^2}}{4\pi r^3}$　③ $\dfrac{3Nm\overline{v^2}}{8\pi r^3}$　④ $\dfrac{2Nm\overline{v^2}}{3\pi r^3}$

⑤ $\dfrac{Nm\overline{v^2}}{8\pi r^2}$　⑥ $\dfrac{Nm\overline{v^2}}{4\pi r^2}$　⑦ $\dfrac{3Nm\overline{v^2}}{8\pi r^2}$　⑧ $\dfrac{2Nm\overline{v^2}}{3\pi r^2}$

B　容器内の粒子が N 個の光子である場合を考える。光子どうしは衝突せず，光子は容器の壁と弾性衝突をするものと仮定する。プランク定数を h，光の速さを c として，次の問い(**問 4**～**問 6**)に答えよ。

問 4　容器の壁と光子の衝突による光子の運動量の変化は**問 1** と同様に求めることができる。また，光子が単位時間あたりに容器の壁と衝突する回数も**問 2** と同様に求めることができる。光子の振動数を f，入射角を θ として，この光子 1 個が単位時間に容器の壁に与える力積の大きさの和はいくらか。正しいものを，次の①～⑧のうちから一つ選べ。 $\boxed{\quad 4 \quad}$

① $\dfrac{hf}{r}$　② $\dfrac{hf}{r\sin\theta}$　③ $\dfrac{hf}{r\cos\theta}$　④ $\dfrac{hf}{r\tan\theta}$

⑤ $\dfrac{chf}{r}$　⑥ $\dfrac{chf}{r\sin\theta}$　⑦ $\dfrac{chf}{r\cos\theta}$　⑧ $\dfrac{chf}{r\tan\theta}$

問 5　N 個の光子の振動数をそれぞれ f_1，f_2，…，f_N として，振動数の平均値 $\overline{f}$ を

$$\overline{f} = \frac{f_1 + f_2 + \cdots + f_N}{N}$$

とする。容器の壁が N 個の光子から受ける圧力を p とすると，p は $\overline{f}$ を用いて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。

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

① $\dfrac{Nh\overline{f}}{4\pi r^4}$　② $\dfrac{Nh\overline{f}}{2\pi r^4}$　③ $\dfrac{2Nh\overline{f}}{3\pi r^4}$　④ $\dfrac{3Nh\overline{f}}{4\pi r^4}$

⑤ $\dfrac{Nh\overline{f}}{4\pi r^3}$　⑥ $\dfrac{Nh\overline{f}}{2\pi r^3}$　⑦ $\dfrac{2Nh\overline{f}}{3\pi r^3}$　⑧ $\dfrac{3Nh\overline{f}}{4\pi r^3}$

問 6　N 個の光子のエネルギーの合計を E とする。E と容器の容積の比は，**問 5** の p を用いて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。

$$\frac{E}{\text{容器の容積}} = \boxed{\ 6\ }$$

① $\dfrac{1}{3}p$　② $\dfrac{2}{3}p$　③ p　④ $\dfrac{3}{2}p$

⑤ $2p$　⑥ $\dfrac{5}{2}p$　⑦ $3p$　⑧ $\dfrac{7}{2}p$

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，鉛直上向きで磁束密度の大きさBの一様な磁場中において，導線が水平面内に固定されている。導線は点Oで2θ（$0<\theta<\frac{\pi}{2}$）の角度に折れ曲がっていて，この角を2等分するように，Oを原点とし水平右向きを正の向きとしてx軸をとる。この導線の上に質量mの長くて細い金属棒を置き，導線と金属棒の2つの接点をそれぞれP，Qとする。金属棒はx軸に直角なまま，x軸に沿って導線の上を摩擦なくすべることができるとする。導線の電気抵抗は無視できるものとし，金属棒の電気抵抗は単位長さあたりσとする。また，金属棒や導線に流れる電流によって，図1の磁場は変化しないものとする。x軸の正の向きを金属棒の速度と加速度の正の向きとする。下の問い（**問1**～**問4**）に答えよ。

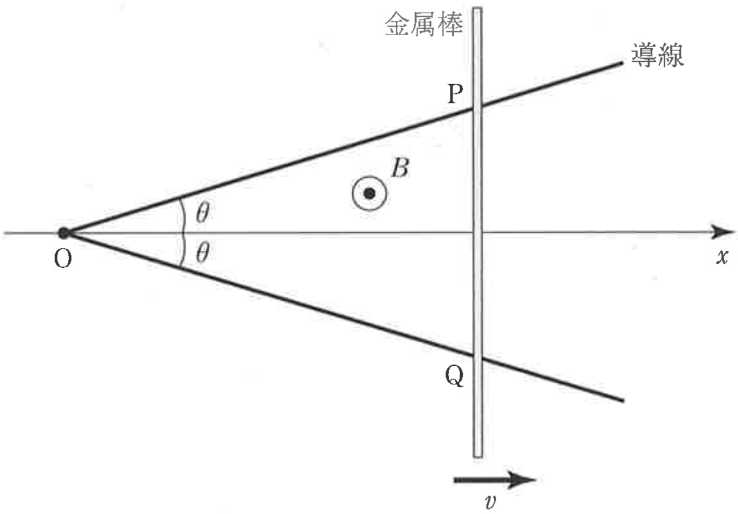

図1

問 1　時刻tの瞬間の金属棒のx軸上の位置を$x(>0)$，速度を$v(>0)$とする（図1）。時刻tから$t+\Delta t$までの短い時間Δtの間の，閉回路PQOPを貫く磁束の変化の大きさを求めよ。ただし，Δtはじゅうぶん短い時間であり，$(\Delta t)^2$は無視できるものとする。

問 2　前問の磁束の変化によって，閉回路PQOPに誘導起電力が発生する。この誘導起電力によって，時刻tに金属棒に流れる電流の強さはいくらか。

問 3　前問の電流が流れることによって，図1の金属棒は磁場から力をうける。この力によって，時刻tから$t+\Delta t$までの短い時間Δtの間に，金属棒の速度がΔvだけ変化したとする。このとき，Δtの間の金属棒の運動量変化と力積の関係より，

$$m\Delta v + \boxed{\text{あ}} \times xv\Delta t = 0 \qquad (1)$$

が成り立つ。$\boxed{\text{あ}}$を埋めるのに正しい式をσ，B，θを用いて表せ。

問 4　位置の変化 Δx を用いて，速度は $v = \dfrac{\Delta x}{\Delta t}$ と表されるので，式(1)は

$$m\Delta v + \boxed{\quad あ \quad} \times x\Delta x = 0$$

となり，時刻 t から $t + \Delta t$ の短い時間の間に，

$$mv + \boxed{\quad あ \quad} \times \frac{1}{2}x^2 \tag{2}$$

は変化しないことがわかる。(ただし，Δx はじゅうぶん小さいので，n を整数として，

$$\Delta(x^n) = (x + \Delta x)^n - x^n \fallingdotseq nx^{n-1}\Delta x$$

の関係を用いた。) このことから，式(2)は時刻 t に関係なく一定の値となる。金属棒は，時刻 $t = 0$ に x 軸方向に初速度 $v_0 (> 0)$ で位置 $x = 0$ にあったとして，このあとの金属棒の運動について，次の問い((a)〜(c))に答えよ。

(a)　初速度 v_0 を位置 $x = 0$ で与えた金属棒が運動して，位置 x にきたときの速度 v を，x，v_0，m，σ，B，θ を用いて表せ。

(b)　運動方程式から，この金属棒の速さは時間とともに小さくなり続けることがわかり，じゅうぶん時間が経過すると，金属棒の位置の x 座標は一定となる。この一定の値を x_f とすると，x_f は v_0，m，σ，B，θ を用いてどのように表されるか。

(c)　初速度 v_0 を位置 $x = 0$ で与えた金属棒が運動して，$x (\leqq x_f)$ の位置にくるまでに，金属棒で発生するジュール熱は，x，v_0，m，σ，B，θ を用いてどのように表されるか。