令 和 6 年 度

理　　科

問 題 冊 子

物　　理

第1問　次の文章を読んで $\boxed{}$ に適した式または値をそれぞれ記せ。$\boxed{7}$ については最も適当なものを解答群から一つ選び，記号を記せ。**問1**は，指示にしたがって解答せよ。なお，$\boxed{}$ は同じ番号の $\boxed{}$ ですでに与えられたものと同じ式または値を表す。また，角度の単位はラジアンとする。

図1－1のように，水平な台の上にブロックを置き，ばね定数 k のばねの一端をブロックに取り付け，他端に伸び縮みしないロープを取り付ける。ロープは，台の右側に設置された円柱の側面に点Bから点Aまで接触し，その先に質量 m のおもりが取り付けられている。円柱の中心をOとして $\angle AOB = \frac{\pi}{2}$ である。はじめ，ブロックは台に固定されている。重力加速度の大きさを g とする。なお，ばねとロープの質量，およびロープの太さは無視できるとする。また，ばねは常に円柱より左側にあるとし，ロープは紙面内にあり，たるまないとする。

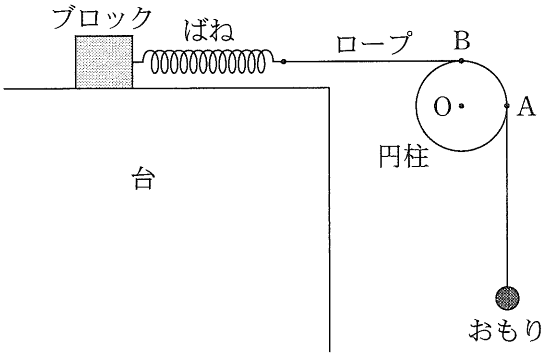


図1－1

I　ロープと円柱の側面の間の摩擦力が無視できる場合を考える。ばねを自然長にしておもりを静かにはなしたところ，おもりは単振動をした。ばねの伸びが a のときのロープの張力の大きさは $\boxed{1}$ ，おもりの速さは $\boxed{2}$ である。この単振動の振幅は $\boxed{3}$ ，周期は $\boxed{4}$ である。

次に，おもりに働く力がつり合う位置でおもりを静止させた。図1－2のように，$\angle POQ = \Delta\theta$

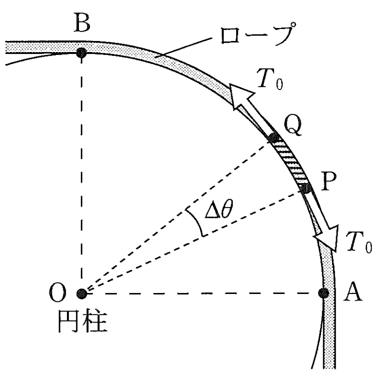


図1－2

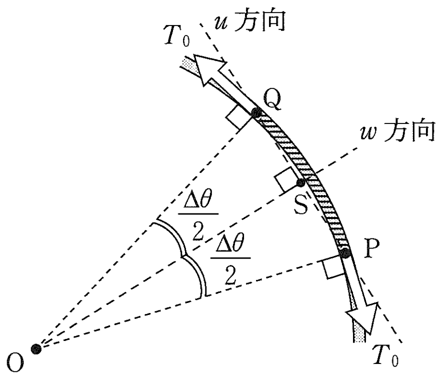


図1－3

となる点Pと点Qの間のロープの微小部分に働く力について考える。図1－3は点Pと点Qの付近について，$\Delta\theta$ の大きさを誇張して大きく描いたものである。点Pと点Qを通る直線の方向を u 方向，点Pと点Qの中点Sと中心Oを通る直線の方向を w 方向とする。PQ間のロープには，端点P，Qで円の接線方向に大きさ $T_0 = \boxed{\ 5\ }$ の張力が働く。この張力の合力の大きさは，$\Delta\theta$，T_0 を用いて表すと $\boxed{\ 6\ }$ であり，向きは $\boxed{\ 7\ }$ である。

$\boxed{\ 7\ }$ の解答群

(ア) 中心Oから点Sに向かう向き　　(イ) 点Sから中心Oに向かう向き

Ⅱ　ロープと円柱の側面の間に摩擦力が働く場合を考え，静止摩擦係数を μ とする。おもりが静止した状態でブロックの固定を外し，ブロックをゆっくりと左に動かしてロープが円柱の側面で滑り始める直前に台に固定した。ロープと円柱が接触する点Aから点Bの間では，最大静止摩擦力が働くことになる。

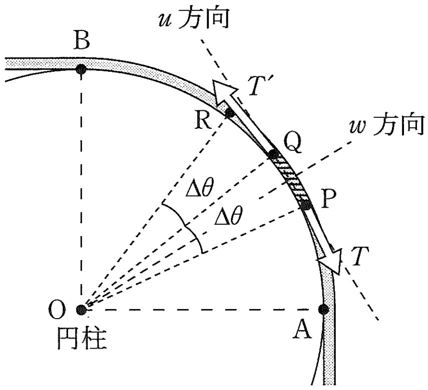


図1－4

図1－4のように，$\angle\mathrm{POQ} = \Delta\theta$ となる点Pと点Qの間のロープの微小部分に働く力について考える。端点P，Qには円の接線方向に張力が働き，その大きさをそれぞれ T，T' とする。この張力の合力の w 方向の大きさは $\boxed{\ 8\ }$ となり，円柱とPQ間のロープの最大静止摩擦力の大きさは $F = \boxed{\ 9\ }$ と表される。端点Qに働く大きさ T' の張力の u 方向の大きさは，$\Delta\theta$，T，F を用いて $\boxed{\ 10\ }$ と表される。x が十分に小さいときに成り立つ近似式 $\sin x \fallingdotseq x$，$\cos x \fallingdotseq 1$ を用いると，端点Qに働く張力の大きさ T' は，$\Delta\theta$，μ を用いて $T' = \dfrac{1 + \boxed{\ 11\ }}{1 - \boxed{\ 11\ }} \times T$ と近似できる。$\boxed{\ 11\ } \ll 1$ とし，$|y| \ll 1$ のときに成り立つ近似式 $\dfrac{1}{1-y} \fallingdotseq 1 + y$ を適用すると $T' = (1 + 2 \times \boxed{\ 11\ })T$ と近似できる。$\angle\mathrm{QOR} = \Delta\theta$ となる点Rの張力の大きさ T'' についても T' と同様に考え，$\Delta\theta$，μ，T，を用いて $T'' = \boxed{\ 12\ }$ と表される。ここで，点Aから点Bまでのロープを n 個の微小部分に分割すると，各微小部分の中心角は $\Delta\theta = \dfrac{\pi}{2n}$ となるため，ばねの張力の大きさは，n，m，μ，g を用いて $\boxed{\ 13\ }$ と表される。実数 z，自然対数の底 e について $\displaystyle\lim_{n\to\infty}\left(1 + \frac{z}{n}\right)^n = e^z$ が成り立つことを用いると，ばねの張力の大きさ $\boxed{\ 13\ }$ は，m，μ，g を用いて $\boxed{\ 14\ }$ と表される。

問 1　ロープと円柱の側面の間の静止摩擦係数を $\mu = 0.20$ とする。ロープを円柱のまわりにさらに一周巻いて，ロープと円柱の側面が $\frac{5}{4}$ 周だけ接触する場合，ばねの張力の大きさは $\boxed{\quad 5 \quad}$ の何倍になるか，有効数字 2 桁で求めよ。なお，円周率 π は 3.14 とし，e^z の値は下の表から最も近いものを用いること。

z	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
e^z	1.6	2.7	4.5	7.4	12	20

第 2 問　次の文章を読んで $\boxed{\qquad}$ に適した式または値をそれぞれ記せ。問 1 ，2 は，指示にしたがって解答せよ。また，角度の単位はラジアン(rad)とする。

図 2－1 のように，レーザー光源，ハーフミラー，2 枚の鏡 M 1 ，M 2 ，容器 A，スクリーンからなる装置が真空中に置かれている。レーザー光源からは位相がそろった波長 λ の単色平行光線が出る。厚さの無視できるハーフミラーは光の経路に対して $\frac{\pi}{4}$ 傾けてあり，レーザー光源からの光を鏡 M 1 に向かう反射光と鏡 M 2 に向かう透過光に分ける。鏡 M 1 に向かう反射光は M 1 で反射したのち，ハーフミラーを直進してスクリーンに到達する。この光のレーザー光源からスクリーンまでの経路を経路 1 とする。鏡 M 2 に向かう透過光は M 2 で反射したのち，ハーフミラーで反射してスクリーンに到達する。この光のレーザー光源からスクリーンまでの経路を経路 2 とする。なお，鏡 M 1 ，M 2 ，スクリーンは光の経路に対して垂直になるように設置されている。また，容器 A はハーフミラーと鏡 M 2 の間に設置され，経路方向の長さは d，内部は真空である。容器 A の両端は光の経路に対して垂直であり，透明で反射を無視してよい。

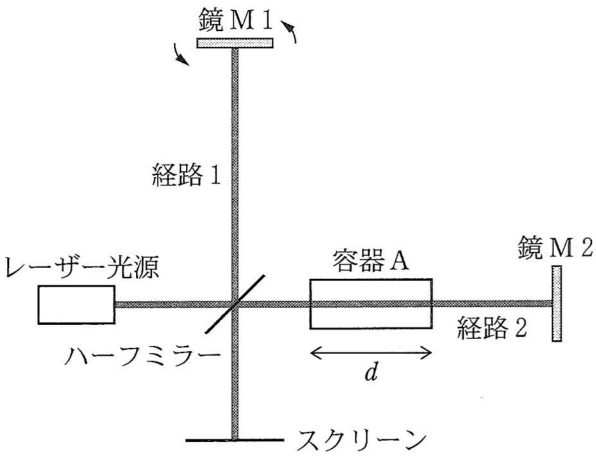


図 2－1

Ⅰ　鏡 M 1 の位置をゆっくりとハーフミラーに近づけたところ，スクリーン上で経路 1 と経路 2 の光が干渉し，明暗を繰り返した。最も暗くなってから再び最も暗くなるまでを 1 回として，100 回の明暗を数えたときの鏡 M 1 の移動距離は $\boxed{\quad 1 \quad}$ である。

鏡 M 1 を停止させ，反時計回り(図 2 − 1 の矢印の向き)に微小角 α だけ回転したところ，経路 1 を通る光は到達するスクリーンの位置によって光路長が変わり，スクリーン上に干渉縞が現れた。図 2 − 2 はスクリーン付近の光の波面の様子を表しており，経路 1 の光の進む向きを矢印，波面を傾いた実線，経路 2 の光の波面を破線で表している。なお，θ の大きさは誇張して大きく描かれている。ここで，スクリーン上に x 軸をとり，経路 1 を通り光路長が s_1 となる位置を原点 O にとる。経路 1 を通りスクリーン上の位置 x_1 に到達する光の光路長は $\boxed{\quad 2 \quad}$ と表される。スクリーン上の干渉縞は，明線と暗線が交互に平行に並んでおり，隣り合う明線と明線の間隔は $\boxed{\quad 3 \quad}$ である。また，鏡 M 1 の傾き α は，θ を用いて $\boxed{\quad 4 \quad}$ と表される。

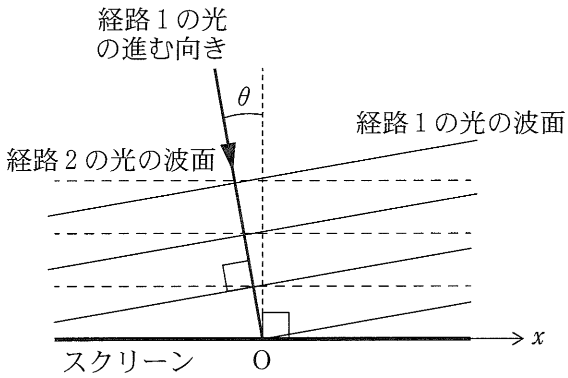


図 2 − 2

Ⅱ　鏡 M 1 を微小角 α だけ傾けたままの状態で容器 A にゆっくりと気体を入れて，容器 A 内の絶対屈折率を $1 + \Delta n$(ただし $\Delta n > 0$)にした。真空中の光の速さを c とすると，容器 A 内の光の速さは $\boxed{\quad 5 \quad}$ となる。容器 A 内が真空のときの経路 2 の光路長を s_2 すると，気体を入れたことによって経路 2 の光路長は $\boxed{\quad 6 \quad}$ となった。また，容器 A 内が真空のときにスクリーン上の位置 x_2 にあった暗線は，気体を入れたことによって位置 $\boxed{\quad 7 \quad}$ に動いた。

以下の**問 1**，**2** では，レーザー光の周波数を 5.0×10^{14} Hz，スクリーン上の干渉縞の間隔を 25 μm(ただし 1 μm $= 1 \times 10^{-6}$ m)，光速を 3.0×10^{8} m/s とする。また，β が十分小さいときの近似式 $\tan\beta \fallingdotseq \beta$，$\sin\beta \fallingdotseq \beta$，$\cos\beta \fallingdotseq 1$ を用いてよい。

問 1　鏡 M 1 の傾き α を有効数字 2 桁で求めよ。

問 2　スクリーン上の干渉縞が，容器 A 内に気体を入れたことにより x 軸上で 3.0 mm 動いたとき，Δn を有効数字 2 桁で求めよ。なお，容器 A の長さを 0.1 m とする。

第3問 次の文章を読んで，$\boxed{\ 1\ }$ と $\boxed{\ 3\ }$ ～ $\boxed{\ 10\ }$ に適した式または値を記せ。$\boxed{\ 2\ }$ については，(ア)と(イ)のいずれか正しいものを選び，記号を記せ。また，**問1**は指示にしたがって解答せよ。

質量 m，電気量の大きさ q の粒子Aの，電場(電界)や磁場(磁界)の中での運動を考える。粒子Aの大きさと重力の影響は無視でき，Aは真空中を運動するものとする。

Ⅰ　図3－1のように，厚さの無視できる2つの電極板1，2を，x 軸に垂直に，原点Oをはさんでそれぞれ $x=-\dfrac{d}{2}$，$\dfrac{d}{2}$(ただし $d>0$)の位置に置き，電極板1に対する電極板2の電位が V(ただし $V>0$)となるように電圧をかけた。

電極板1，2の面積は十分広く，間隔は十分狭いとすると，電極板の間の電場は一様となり，電場の大きさは $\boxed{\ 1\ }$ である。粒子Aを原点Oから y 軸の正の向きに速さ v_0 で打ち出したところ，Aは電場から力を受けて運動し，電極板1に到達した。粒子Aの電気量の符号は $\boxed{2\quad (ア)正\quad (イ)負}$ で，Aが電極板1に到達した位置の y 座標は $\boxed{\ 3\ }$ である。

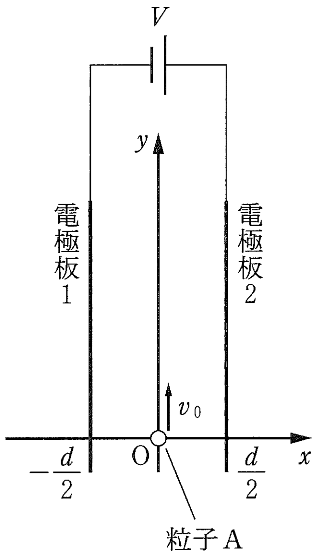


図3－1

次に，電極板の間に，紙面に垂直に裏から表の向きに一様な磁場をかけ，再び粒子Aを原点Oから y 軸の正の向きに速さ v_0 で打ち出したところ，Aが電場と磁場から受ける力はつり合い，Aは直進した。このときの磁束密度の大きさは $\boxed{\ 4\ }$ である。

Ⅱ　電極板1，2を取り除き，図3－2のように，$x<-\dfrac{h}{2}$ の領域1(ただし $h>0$)と，$x>\dfrac{h}{2}$ の領域2に，紙面に垂直に裏から表の向きに一様な磁場をかけた。領域1，2の磁束密度の大きさは，それぞれ B_1，B_2 である。ただし，$B_1>B_2$ とする。また，$-\dfrac{h}{2}\leqq x\leqq\dfrac{h}{2}$ の領域3には，電場および磁場はなく，領域1と3および領域2と3の境界をそれぞれ境界1，2とする。

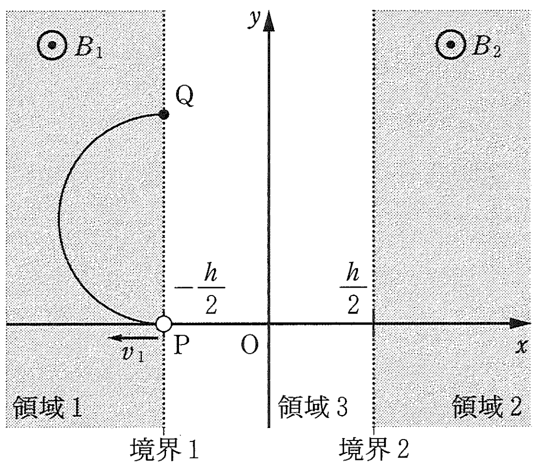
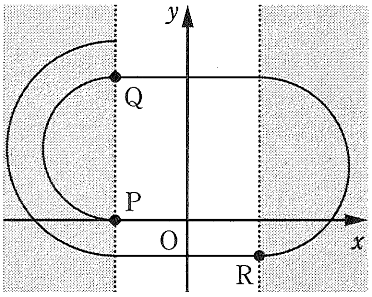


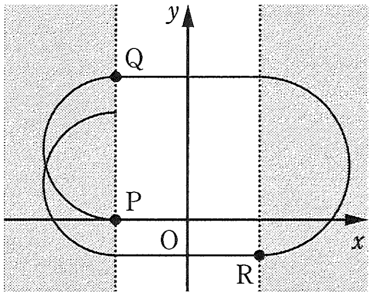
図3－2

粒子Aを，境界1とx軸の交点Pからx軸の負の向きに速さv_1で打ち出したところ，Aは領域1で半円を描き，$y = \boxed{\quad 5 \quad}$ で境界1上の点Qを通過した。その後，粒子Aは領域3を直進し，領域2に入ると再び半円を描いて$y = \boxed{\quad 6 \quad}$ で境界2上の点Rを通過した。

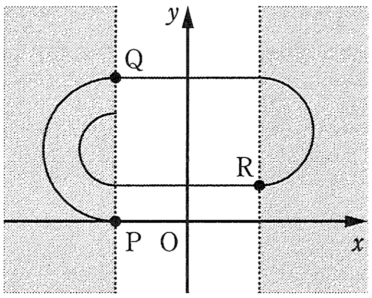
問 1　点Pを出発してから境界1を3回通過するまでの粒子Aの軌跡と，点Rの位置を表す図として最も適切なものを，次の(ア)～(エ)から選んで記号で答えよ。



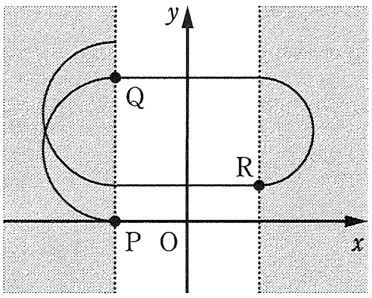
(ア)



(イ)



(ウ)



(エ)

Ⅲ　次に，図3－3のように，領域1，2の磁場は変えず，領域3にy軸の正の向きに磁束密度の大きさB_3の一様な磁場をかけ，再び粒子Aを点Pからx軸の負の向きに速さv_1で打ち出した。ここで，図3－3で紙面に垂直に裏から表の向きを正としてz軸をとる。境界1，2はx軸に垂直な平面であることに注意せよ。

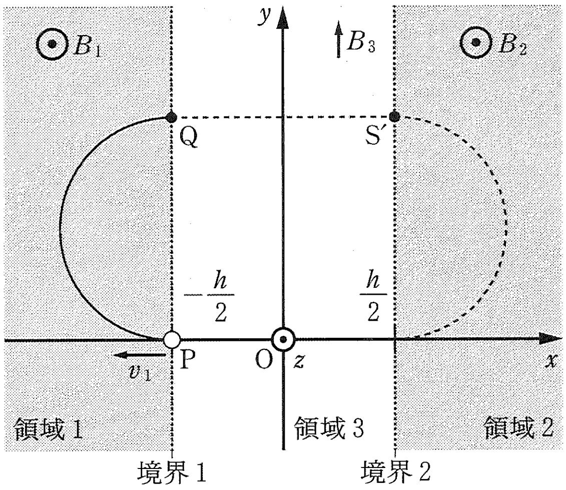


図3－3

粒子Aは点Qを通過し，領域3に入ると，図3－4のように，点Qを含みy軸に垂直な$x'z'$平面内で円弧を描いて境界2上の点Sを通過した。x'軸，z'軸はそれぞれx軸，z軸に平行であり，点Sからxy平面におろした垂線の足を点S′とする。図3－5は$x'z'$平面内での粒子Aの運動を表したものである。円弧QSの中心角をθとすると，点Sでの粒子Aのx'軸方向の速さは，v_1，θを用いて $\boxed{\quad 7 \quad}$ と表される。また，中心角θとm，v_1，h，q，B_3の間には，$\sin\theta = \boxed{\quad 8 \quad}$ の関係が成り立つ。

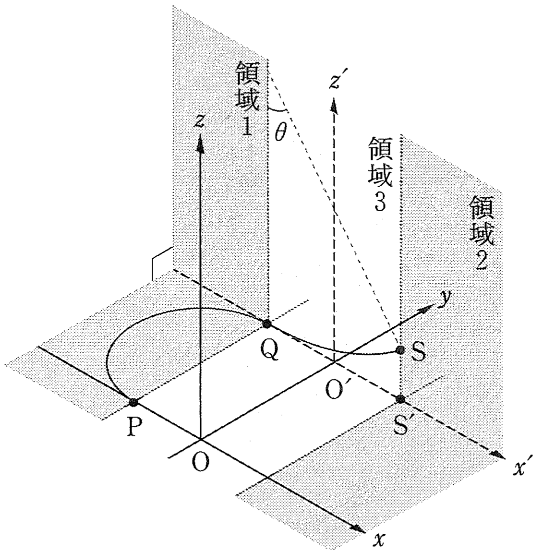


図3－4

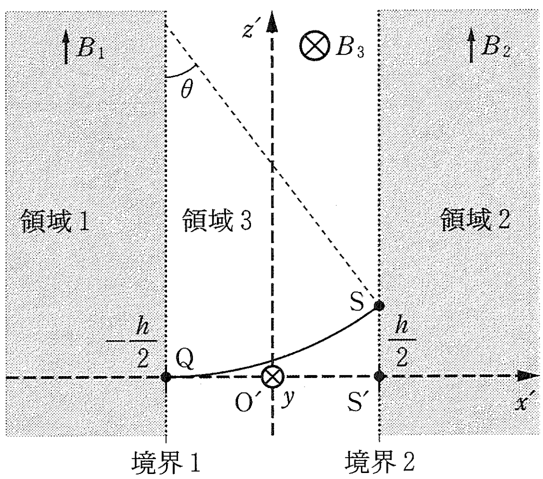


図3－5

粒子Aが点Sを通過した後，Aをxy平面に垂直に投影した点の軌跡は，図3－3の領域2内の破線で示した半円となり，Aは$y = 0$で境界2に到達した。この半円の半径は，m，v_1，h，q，B_2，B_3を用いて $\boxed{\quad 9 \quad}$ と表されることから，磁束密度の大きさB_3は，m，v_1，h，q，B_1，B_2を用いて$B_3 = \boxed{\quad 10 \quad}$ となる。