## 1 14弦の振動［2014 早稲田大］

弦を伝わる波の速さ $v$ は，弦の張力の大きさ $T$ と線密度 $\rho$ によって定まり，$v=\sqrt{\dfrac{T}{\rho}}$ で表される。図1のように，点A，点Bにある滑車を介して両端に質量 $m$ のおもりをつるした，線密度 $\rho_0$ の弦がある。AB間の距離を $l_0$ とし，重力加速度の大きさを $g$ とする。次の問いに答えよ。

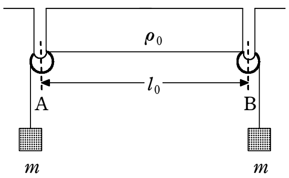


図1

(1) 弦を振動させたところ，3個の腹のある定常波が生じた。このとき，弦の振動数について，以下の中から正しいものを1つ選べ。

① $\dfrac{3}{2l_0}\sqrt{\dfrac{mg}{\rho_0}}$　② $\dfrac{3}{l_0}\sqrt{\dfrac{mg}{2\rho_0}}$　③ $\dfrac{3}{l_0}\sqrt{\dfrac{mg}{\rho_0}}$　④ $\dfrac{3}{l_0}\sqrt{\dfrac{2mg}{\rho_0}}$

⑤ $\dfrac{2l_0}{3}\sqrt{\dfrac{mg}{\rho_0}}$　⑥ $\dfrac{l_0}{3}\sqrt{\dfrac{2mg}{\rho_0}}$　⑦ $\dfrac{l_0}{3}\sqrt{\dfrac{mg}{\rho_0}}$　⑧ $\dfrac{l_0}{3}\sqrt{\dfrac{mg}{2\rho_0}}$

⑨ $\dfrac{2l_0}{3}\sqrt{\dfrac{\rho_0}{mg}}$　⑩ $\dfrac{l_0}{3}\sqrt{\dfrac{2\rho_0}{mg}}$　⑪ $\dfrac{l_0}{3}\sqrt{\dfrac{\rho_0}{mg}}$　⑫ $\dfrac{l_0}{3}\sqrt{\dfrac{\rho_0}{2mg}}$

(2) 両端のおもりの質量を $m'$ に変えて，弦を振動させたところ，腹の数が1個になったが，振動数は変化しなかった。ただし，最初のおもりの質量 $m$ を1.0 kgとする。

(a) おもりの質量 $m'$ を求め，最も近いものを1つ選べ。

① 0.5 kg　② 1.0 kg　③ 1.5 kg　④ 3.0 kg
⑤ 4.0 kg　⑥ 4.5 kg　⑦ 5.0 kg　⑧ 6.0 kg
⑨ 8.0 kg　⑩ 9.0 kg　⑪ 10.0 kg　⑫ 12.0 kg
⑬ 15.0 kg　⑭ 16.0 kg

(b) 振動している弦の近くで，おんさを鳴らしたところ，1秒間に5回のうなりが生じた。おもりを変えずに弦の長さ $l_0$ を1 cm縮めても，うなりの数は5回であった。弦の長さ $l_0$ を50 cmとするとき，このおんさの振動数を求め，以下の中から最も近いものを1つ選べ。

① 50 Hz　② 205 Hz　③ 255 Hz　④ 305 Hz
⑤ 375 Hz　⑥ 425 Hz　⑦ 495 Hz　⑧ 505 Hz
⑨ 535 Hz　⑩ 595 Hz　⑪ 625 Hz　⑫ 675 Hz
⑬ 785 Hz　⑭ 1005 Hz

次に，図2のように，$\rho_1$ と $\rho_2$ の異なる線密度の弦をつなぎ，点A，点Bにある滑車を介して，両端に質量 $m$ のおもりをつるした。弦のつなぎめをPとし，APの長さを $l_1$，BPの長さを $l_2$ とする。$l_1:l_2=2:1$ となるように調整し，弦を振動させたところ，点Pが節となり，AP間とBP間に定常波が生じた。このとき，次の問いに答えよ。

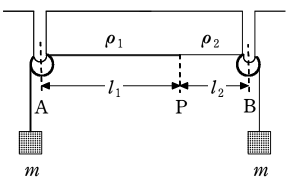


図2

(3) AP間に1個，BP間に2個の腹が生じたときの $\rho_1$ と $\rho_2$ の関係を求め，以下の中から正しいものを1つ選べ。

① $\rho_1:\rho_2=20:1$　② $\rho_1:\rho_2=16:1$　③ $\rho_1:\rho_2=9:1$
④ $\rho_1:\rho_2=8:1$　⑤ $\rho_1:\rho_2=4:1$　⑥ $\rho_1:\rho_2=3:1$
⑦ $\rho_1:\rho_2=2:1$　⑧ $\rho_1:\rho_2=1:1$　⑨ $\rho_1:\rho_2=1:2$
⑩ $\rho_1:\rho_2=1:3$　⑪ $\rho_1:\rho_2=1:4$　⑫ $\rho_1:\rho_2=1:8$
⑬ $\rho_1:\rho_2=1:9$　⑭ $\rho_1:\rho_2=1:16$　⑮ $\rho_1:\rho_2=1:20$

## 2 02透明な球体への光線の入射［2002 上智大］

図1のように，空気中におかれた半径 $r$ の透明な球体に光線が入射した場合について考える。原点を球体の中心にとったとき，光線は球体の中心を通る $xy$ 面上を $x$ 軸に平行に，$x$ 軸から $y_0$ だけ離れた点Aで入射するものとする。ただし，$0<y_0\leqq r$ とする。ここでは空気の絶対屈折率を1，光線の球体に対する絶対屈折率を $n$ とし，点Aにおける入射角，屈折角をそれぞれ $\alpha$，$\beta$ とする。また，光線の幅は $r$ に比べて十分小さいとする。なお，必要であれば $\sqrt{2}\fallingdotseq 1.414$，$\sqrt{3}\fallingdotseq 1.732$ を用いよ。［　　］内を正しく埋めよ。(カ)，(キ)，(コ)は文末の選択肢から正しいものを選びその記号を書け。

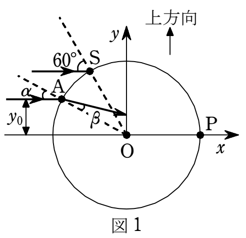


図1

(1) 点Aにおいて角度 $\alpha$ で入射した光線の一部は屈折して球体の内部に入る。このとき，$\sin\beta=$［ア］である。

(2) 点Aで屈折した光線が球体の表面に達した位置が図1の点Pと一致したとすれば，$\alpha=$［イ］であり，$y_0$ を $r$ および $n$ で表すと，$y_0=$［ウ］となる。とくに図1の点Sにおいて $\alpha=60°$ で入射した光線が屈折して点Pに達したとすれば，その光線の球体に対する絶対屈折率は $n=$［エ］である。一般に点Aで屈折した光線が点Pを通るためには，絶対屈折率が［オ］の範囲になければならないことがわかる。

次に青色から赤色までのさまざまな波長（450 ～ 700 nm，ただし $1\ \mathrm{nm}=1\times10^{-9}\ \mathrm{m}$）の混ざった光線が球体に入射した場合について考える。絶対屈折率の波長による変化の曲線が図2(Ⅲ)で示される球体に，図1の点Sにおいて $\alpha=60°$ で入射した赤色の屈折光線は［カ］を通る。

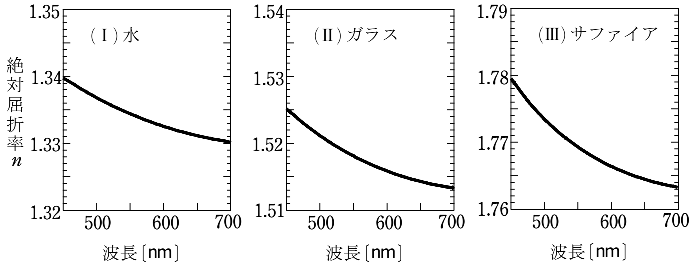


図2　絶対屈折率の波長による変化

また，この球体の同じ点Sから同じ角度で入射した青色の屈折光線は［キ］球表面に達する。一方，点Aに入射した450 ～ 700 nmの波長を含む光線が，球体の表面に達するまでに決して $x$ 軸を横切ることができないのは，球体の絶対屈折率の波長による変化の曲線が図2［ク］の場合である。

(3) 図3のように点Aで入射した光線が半径 $r$ をもつ水滴球内のある点Qで1回だけ反射され，点Rにおいて再び屈折し，空気中に出ていく場合を考える。光線の入射方向に対する角度 $\theta$ を $\alpha$，$\beta$ によって表すと［ケ］となる。この水滴に緑(G)，赤(R)，黄(Y)，青(B)の波長の違う光線を同じ入射角で点Aから入射した場合，$\theta$ の大きい方から順に入射光線の色を並べると［コ］となる。

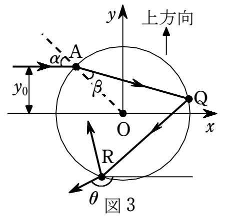


図3

［カ］の選択肢

［a］ 点Pの上側　［b］ 点Pの下側　［c］ 点P

［キ］の選択肢

［a］ 赤色の屈折光線よりも上側を通って
［b］ 赤色の屈折光線よりも下側を通って
［c］ 赤色の屈折光線と重なって

［コ］の選択肢

［a］ RYGB　［b］ BGYR　［c］ YGRB　［d］ BRGY
［e］ GBYR　［f］ RYBG　［g］ BRYG　［h］GYRB

$\boxed{3}$ 16組合せレンズ［2016 九州大］

図1のように，凸レンズLの光軸上に物体AA′がある。点FとF′はレンズLの焦点であり，$f$ は焦点距離である。点OはレンズLの中心であり，点PはA′Pが光軸に平行となるレンズL中の点である。物体AA′の位置は，レンズLの前方(左側)であり，焦点Fの外側である。

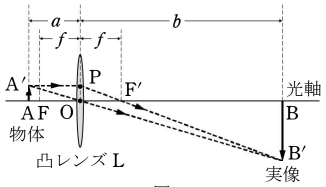


図1

図1は，点A′から出た光の一部が進む経路を破線で示している。レンズLを通過した光は，レンズの後方(右側)で集まり，実像BB′を形成している。物体AA′とレンズLの距離を $a$，実像BB′とレンズLの距離を $b$ とする。なお，レンズの厚さは無視できるものとする。

(1) $\boxed{\text{ア}}$〜$\boxed{\text{ウ}}$ に適する記号または数式を $a$，$b$，$f$ の中から必要なものを用いて答えよ。

図1より，△AA′Oは△BB′Oに相似であるため，$\dfrac{AA'}{BB'}=\boxed{\text{ア}}$ となる。また，△OPF′は△BB′F′に相似であるため，$\dfrac{OP}{BB'}=\boxed{\text{イ}}$ である。以上より $a$，$b$，$f$ の間にはレンズの式 $\boxed{\text{ウ}}$ が成立することがわかる。

$f=16$ cm，$a=20$ cm の場合を考える。このとき，レンズLの後方(右側)に形成される実像の位置にスクリーンを設置し，これを固定した。物体AA′を動かさずに，レンズLを光軸にそって後方(右側)へ移動させると，ある位置でスクリーン上に再び鮮明な像が現れた。

(2) スクリーン上に再び鮮明な像が現れたときの物体AA′とレンズLの距離を求めよ。また，このときのスクリーン上での像の倍率を求めよ。

次に，虫眼鏡による物体の観察方法を考える。この方法では，物体AA′の位置は，図2のようにレンズLの前方(左側)，焦点Fの内側である。AA′から出た光は，レンズLを通過した後に広がってしまうが，レンズLの後方(右側)から観察すると，観測者はAA′の方向に拡大された虚像(CC′)を肉眼で見ることができる。

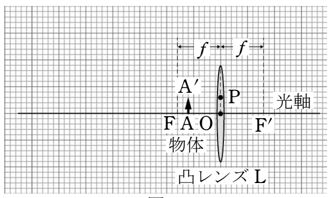


図2

(3) 点A′から出て，① 点Pへ向かう光が進む経路と ② 点Oへ向かう光が進む経路をそれぞれ図2に示せ。さらに，③ 虚像CC′の位置と大きさを作図により示せ。図2には①，②，③を明記すること。

(4) $f=16$ cm，AA′とLの距離を12 cmとするとき，レンズLと虚像CC′の距離を求めよ。

今度は，2枚の凸レンズを組合せて，顕微鏡のしくみを利用して物体の拡大像を得る。図3のように，光軸上に物体AA′，凸レンズ$L_1$，凸レンズ$L_2$を設置した。レンズ$L_1$の焦点は点$F_1$と$F_1'$であり，焦点距離は$f_1$である。また，レンズ$L_2$の焦点は点$F_2$と$F_2'$であり，焦点距離は$f_2$である。

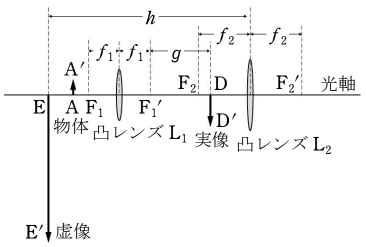


図3

物体AA′の位置はレンズ$L_1$の焦点$F_1$の外側であり，$L_1$によってAA′の実像DD′が形成されている。このとき，点$F_1'$とDD′の距離は $g$ である。また，DD′の位置は，レンズ$L_2$の焦点$F_2$の内側である。この条件では，虫眼鏡による観察と同じように，レンズ$L_2$の後方(右側)に実像は形成されない。顕微鏡では，観測者はレンズ$L_2$の後方(右側)から実像DD′の方向を眺め，拡大された虚像を肉眼で観察する。この虚像をEE′とする。$L_2$からEE′までの距離は $h$ である。

(5) 倍率 $\dfrac{DD'}{AA'}$ を $f_1$，$f_2$，$g$，$h$ の中から必要なものを用いて表せ。

(6) 倍率 $\dfrac{EE'}{AA'}$ は，レンズ$L_1$の倍率と$L_2$の倍率の積で表される。$\dfrac{EE'}{AA'}$ を $f_1$，$f_2$，$g$，$h$ の中から必要なものを用いて表せ。

次に，レンズ$L_1$を焦点距離が$f_3$の凸レンズ$L_3$に交換した。レンズ$L_3$の位置は$L_1$と同じであり，また $f_3<f_1$ である。物体AA′を光軸にそって適切な位置に移動させると，虚像JJ′が虚像EE′と同じ位置に形成された。

(7) 物体AA′はどの向きに移動させたか。また，倍率 $\dfrac{JJ'}{AA'}$ と $\dfrac{EE'}{AA'}$ はどちらが大きいか。正しい組合せを番号で答えよ。

| | | |
|---|---|---|
| ① | 物体AA′を右へ移動させた | $\dfrac{EE'}{AA'}>\dfrac{JJ'}{AA'}$ |
| ② | 物体AA′を右へ移動させた | $\dfrac{EE'}{AA'}<\dfrac{JJ'}{AA'}$ |
| ③ | 物体AA′を左へ移動させた | $\dfrac{EE'}{AA'}>\dfrac{JJ'}{AA'}$ |
| ④ | 物体AA′を左へ移動させた | $\dfrac{EE'}{AA'}<\dfrac{JJ'}{AA'}$ |

(8) 倍率 $\dfrac{JJ'}{AA'}$ を $f_1$，$f_2$，$f_3$，$g$，$h$ の中から必要なものを用いて表せ。

$\boxed{4}$ 96ヤングの実験②［1996 九州大］

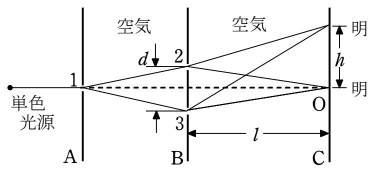
図のようにスリット1のあるついたてA，スリット2と3のあるついたてB，およびついたてCを置く。Bはスリット2と3の中心線を軸に，Cと平行な位置よりわずかに傾けることができる。スリット2と3の間隔 $d$ はAB間距離やBC間距離 $l$ に比べて非常に短いので，スリット1からスリット2，3に向かう光は平行と見なせるし，スリット2，3からC上の1点に向かう光も平行と見なせる。また以下に現れる角度 $\alpha, \beta, \gamma$ はいずれも小さいので，

$\sin\theta=\tan\theta=\theta$ $(\theta=\alpha,\ \beta,\ \gamma)$

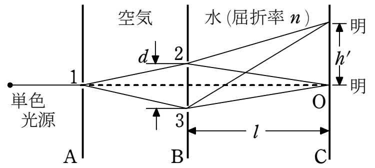
と近似してよい。

下の $\boxed{1}$，$\boxed{2}$，$\boxed{4}$ に語句を，それ以外の $\boxed{\phantom{0}}$ に数式を入れよ。

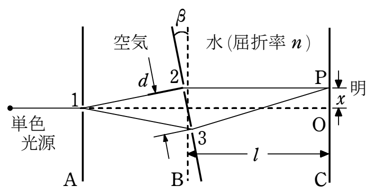
波長 $\lambda$ の単色光源をAの左側に置く。スリット1から出た光は $\boxed{1}$ してスリット2，3を通過し，その後お互いに $\boxed{2}$ してC上に明暗の縞模様をつくる。C上の隣りあう明線の間隔を $h$ とし，$\alpha=\dfrac{h}{l}$ とおく。



1図



2図



3図

まずAB間もBC間も空気で満たし，BとCを平行にする(1図)。このときの $h$ は $l$，$d$，$\lambda$ を用いて $\boxed{3}$ と表せる。

次にAB間を空気で満たしたままで，BC間を水で満たす(2図)。水が漏れないようにスリット2と3は透明な薄膜で覆うが，この膜が光に及ぼす影響は無視してよい。BとCは平行なままである。空気に対する水の屈折率を $n$ ($n$ は約1.33)とする。水中での光の速さは空気中での速さよりも $\boxed{4}$。水中での光の波長 $\lambda'$ と空気中での光の波長 $\lambda$ の間には $\boxed{5}$ の関係式が成りたつ。したがってBC間を水で満たした場合のC上の隣りあう明線の間隔 $h'$ は $l$，$d$，$\lambda$，$n$ を用いて $\boxed{6}$ と表せる。

さらにBC間に水を満たしたままでBを角度 $\beta$ だけ傾けたところ，C上の位置Oにあった明線が距離 $x$ だけ離れた位置Pに移動した(3図)。$\gamma=\dfrac{x}{l}$ とおく。スリット1を通過後スリット2，3を通過して位置Pに達する光を考える。スリット1からスリット2，3までの空気中での光路差(光の経路の差)は $\boxed{7}$ であり，スリット2，3から位置Pまでの水中での光路差は $\boxed{8}$ であるから，$x$ は $l$，$\beta$，$n$ を用いて $\boxed{9}$ と表せる。これより，AB間もBC間も空気で満たされている場合にはBが傾いても明線が移動しないことがわかる。

## 5 17気柱の共鳴とドップラー効果［2017 東北大］

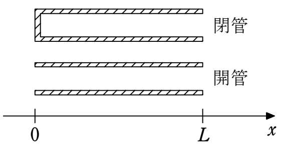


図1

図1のように，両端の位置が $x=0$，$x=L$ となるように $x$ 軸にそって置かれた，長さ $L$ の2種類の円筒管での音の共鳴について考える。一方は $x=0$ の端部が閉じ，$x=L$ の端部が開いた閉管であり，他方は両端が開いた開管である。管壁の厚さ，および開口端補正はないものとして，次の問いに答えよ。

(1) 円筒管の中で共鳴する振動数 $f$，波長 $\lambda$ の音波に関して，進行波と定常波の関係を考える。時刻 $t$，位置 $x$ における管の中の媒質(空気)の $x$ 軸の正の向きの変位を $F(t,\ x)$ と書くことにする。このとき

$$F_1(t,\ x)=A_1\sin\left\{2\pi\left(ft+\frac{x}{\lambda}\right)\right\}\quad\cdots\cdots①$$

は，$x$ 軸の負の向きに進行する波(左進行波)を表し

$$F_2(t,\ x)=A_2\sin\left\{2\pi\left(ft-\frac{x}{\lambda}\right)\right\}\quad\cdots\cdots②$$

は，$x$ 軸の正の向きに進行する波(右進行波)を表す。ここで，$|A_1|$ と $|A_2|$ は，それぞれの波の振幅である。ただし，円筒管端部での反射の際に，進行波の振幅の変化はないものとする。

(a) 閉管に関する下記考察の $\boxed{ア}$～$\boxed{オ}$ に入る適切な式を，それぞれ $f$，$t$，$x$，$\lambda$，$L$，および正の整数 $m$ の中から必要なものを用いて記せ。

まず，円筒管端部での進行波の反射について考える。左進行波 $F_1(t,\ x)$ は，$x=0$ で固定端反射をして右進行波 $F_2(t,\ x)$ となる。固定端反射では変位の符号が反転する。すなわち，$F_1(t,\ 0)=-F_2(t,\ 0)$ から次式が得られる。

$$A_1=-A_2\quad\cdots\cdots③$$

また，右進行波 $F_2(t,\ x)$ は $x=L$ で自由端反射をする。この反射波が左進行波 $F_1(t,\ x)$ に一致する場合に共鳴が起きる。自由端反射では変位の符号は保たれる。すなわち，$F_1(t,\ L)=F_2(t,\ L)$ から次式が得られる。

$$A_1\sin\left\{2\pi\left(ft+\frac{L}{\lambda}\right)\right\}=A_2\sin\left\{2\pi\left(ft-\frac{L}{\lambda}\right)\right\}\quad\cdots\cdots④$$

④式に③式を代入して，加法定理 $(\sin(\alpha\pm\beta)=\sin\alpha\cos\beta\pm\cos\alpha\sin\beta$，複号同順$)$ を使って整理すると，次式が得られる。

$$2A_1\sin(\boxed{ア})\cos(\boxed{イ})=0\quad\cdots\cdots⑤$$

任意の $t$ に対して⑤式が成りたつためには

$$(イ)=\frac{2m-1}{2}\pi\ \ (m=1,\ 2,\ 3,\ \cdots)\quad\cdots\cdots⑥$$

でなければならない。このことから，共鳴が起きる波長の条件として，次式が得られる。

$$\lambda=\boxed{ウ}\ \ (m=1,\ 2,\ 3,\ \cdots)\quad\cdots\cdots⑦$$

次に，閉管内の波全体を表す式について考える。管の中の媒質の変位は，左進行波 $F_1(t,\ x)$ と右進行波 $F_2(t,\ x)$ の重ねあわせとなるから，$F(t,\ x)=F_1(t,\ x)+F_2(t,\ x)$ と書ける。この式に①②③⑦式を代入して加法定理を使って整理すると，次式が得られる。

$$F(t,\ x)=2A_1\sin(\boxed{エ})\cos(\boxed{オ})\ \ (m=1,\ 2,\ 3,\ \cdots)\quad\cdots\cdots⑧$$

⑧式は，媒質が変位しない位置，すなわち節の位置，が時刻によって変わらない定常波を表している。このとき，閉管の中の定常波の節の数は $m$ である。

(b) (1)(a)の閉管で，$m=3$ で共鳴している定常波のすべての節の位置 $x$ を，$L$ を用いて表せ。

(c) (1)(a)にならって，開管の場合について，定常波の波長 $\lambda$ が満たす条件を，開管の中の定常波の節の数 $n\ (=1,\ 2,\ 3,\ \cdots)$ と $L$ を用いて表せ。また，開管の中の定常波 $F(t,\ x)$ を，$A_1$，$f$，$t$，$x$，$n$，$L$ を用いて表せ。

(2) 図2のように，$x>L$ の範囲で，振動数 $f_S$ の音を発する音源が，音の速さ $V$ よりも小さい一定の速さ $v_S$ で，$x$ 軸にそって正または負の向きに移動している。音源からの音波は，$x$ 軸と平行に進んで円筒管に到達する。音源が $x$ 軸の正の向きに移動して円筒管から遠ざかるとき，閉管の中に $m$ 個の節をもつ定常波が生じて共鳴が起きた。また，音源が $x$ 軸の負の向きに移動して円筒管に近づくとき，開管の中に $n$ 個の節をもつ定常波が生じて共鳴が起きた。

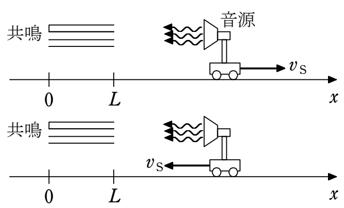


図2

(a) このときの音源の速さと音の速さの比 $\dfrac{v_S}{V}$ を，$m$ と $n$ を用いて表せ。

(b) $v_S\leqq\dfrac{1}{3}V$，$300\ \mathrm{Hz}\leqq f_S\leqq 400\ \mathrm{Hz}$，$L=1\ \mathrm{m}$，$V=340\ \mathrm{m/s}$ の条件のもとで，$m$ がとりうる値を求めよ。

(c) (2)(b)の条件のもとで，題意のような開管と閉管の共鳴が起きる振動数 $f_S$ を有効数字3桁で求め，単位とともに記せ。

## 6 13ニュートンリング［2013 大阪大］

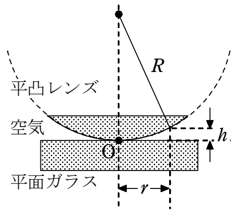


図1

図1のように，屈折率 $n_1$ の平面ガラスの上に，一方が平面で他方が半径 $R$ の球面になっている屈折率 $n_2$ の平凸レンズをのせ，レンズの真上から波長 $\lambda$ の単色光を入射させる。ここで $n_2\geqq n_1>1.0$ である。これを真上から見ると，平凸レンズの下面で反射した光と平面ガラスの上面で反射した光が干渉して，接点Oを中心とする明暗の輪(リング)が同心円状に形成される。これをニュートンリングとよぶ。この現象について次の問いに答えよ。また，選択肢については正しいものを選択せよ。

［A］ 平面ガラスと平凸レンズの間が空気の場合を考える。ただし，空気の屈折率は1.0である。ここで，光が，屈折率のより大きな媒質で反射するときは，位相が逆になることに注意せよ。

(1) 接点Oから平面ガラスにそって距離 $r$ だけ離れた点における，平面と球面の距離 $h$ を，$r$ と $R$ を用いて表せ。ただし，$h$ は $R$ に比べて十分に小さいとし，絶対値が1より十分小さい $x$ に対しては，$(1+x)^{\alpha}\fallingdotseq 1+\alpha x$ の近似式を用いよ。

(2) 接点O付近は，円状に $\boxed{①明るく，②暗く}$ 見える。その理由を記せ。

(3) 接点Oから $m$ 番目 $(m=1,\ 2,\ 3,\ \cdots)$ の明輪の半径 $r_m$ を，$m$，$R$，$\lambda$ のうちの必要なものを用いて表せ。

(4) このニュートンリングを真下から観測した場合，明暗の輪は真上から観測したときと比べてどう見えるか。次のうちの正しいものを選択せよ。

① まったく同じに見える。　② 輪の明暗が反転して見える。
③ ニュートンリングは見えない。

［B］ 平面ガラスと平凸レンズの間を，屈折率 $n$ の液体で満たす場合を考える。

(5) 液体の屈折率 $n$ がある条件を満たすときに，ニュートンリングは観測できなくなる。その条件を表せ。

(6) ニュートンリングが観測される場合，リングの中心Oから $m$ 番目の明輪の半径 $r_m$ を，$m$，$R$，$\lambda$，$n$ のうちの必要なものを用いて表せ。必要があれば，液体の屈折率 $n$ の値によって場合分けをすること。

［C］ 液体が残ったまま，図2のように平面ガラスから平凸レンズをゆっくりと持ち上げていく場合を考える。ここで，屈折率は $n_1=n_2$ であるとし，平凸レンズの平面ガラスからの高さを $d$ とする。平凸レンズを持ち上げても平面ガラスとの間は常に液体で満たされており，空気は入らない。また，$d=0$ でニュートンリングは観測されていた。

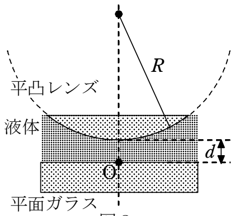


図2

(7) 平凸レンズをゆっくりと持ち上げ始めると，明暗の輪の半径は $\boxed{①大きく，②小さく}$ なっていく。

高さ $d$ がある条件を満たすときに，ニュートンリングは，平凸レンズを持ち上げる前と同じ形状になる。最初に同じ形状になる高さを $d_1$，2回目に同じ形状になる高さを $d_2$ とする。

(8) $d_1$ を $R$，$\lambda$，$n$ のうちの必要なものを用いて表せ。

(9) 高さ $d$ が $d_1<d<d_2$ のとき，リングの中心Oから $m$ 番目の明輪の半径 $r_m$ を $m$，$R$，$\lambda$，$n$，$d$ のうちの必要なものを用いて表せ。必要があれば，高さ $d$ の値によって場合分けをすること。

7 12薄膜による光の干渉と回折格子［2012 名古屋大］

ガラス板上の薄膜の厚さを求めるため，光と回折格子を用いた以下の一連の実験を行う。空気の屈折率を $n_0=1.0$，薄膜の屈折率を $n_1=1.5$，ガラスの屈折率を $n_2=1.7$ とする。また，可視光は $4.0\times10^{-7}$ m から $8.0\times10^{-7}$ m の間の波長の光であるとする。次の問いに答えよ。

初めに，図１に示すように，平行光線を薄膜に対して垂直に入射させ，薄膜の上面で反射した光と下面で反射した光の干渉を観察する。

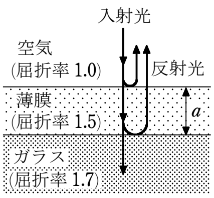


図１

(1) 入射光の空気中の波長を $\lambda$ としたとき，干渉によって反射光が強めあう $\lambda$ の条件と打ち消しあう $\lambda$ の条件を，薄膜の厚さ $a$ ($>0$)，薄膜の屈折率 $n_1$，整数 $m$ を用いて表せ。また，このとき $m$ の満たすべき条件も示せ。ただし，屈折率が小さい媒質から大きい媒質に光が入射するとき，その境界面で反射光の位相は逆転する (位相が $\pi$ ずれる) ことに注意せよ。

(2) 薄膜の厚さ $a$ が $5.0\times10^{-7}$ m であると仮定する。この薄膜に白色光線を入射させたとき，可視光領域の中で，反射光が強めあって明るく見える光の空気中の波長 $\lambda$〔m〕をすべてあげよ。

次に，実験に用いる回折格子の特性を調べるため，図２のように，空気中で回折格子に垂直に光線を入射させ，距離 $L$ 離して置いたスクリーンで観察する。スクリーンは入射光に対して垂直に置かれている。また，回折格子の溝は紙面に対して垂直に刻まれている。入射光と回折光の角度 (回折角) を $\theta$，入射光の延長線とスクリーンとの交点を O とし，点 O から回折光がスクリーンに当たる位置までの距離を $x$ とする。

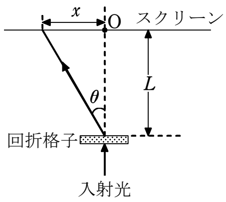


図２

(3) 次の文章の $\boxed{\text{ア}}$～$\boxed{\text{ウ}}$ に入る適当な数式または数値を答えよ。

回折格子の格子定数を $d$ とし，$L$ は $d$ に比べて十分長いとする。このとき回折格子に入射する光の波長を $\lambda$ とすると，$\theta$ 方向に明るい点ができる条件は $d$ と $\theta$ を用いて $\boxed{\text{ア}}=n\lambda$ ($n=0$，$\pm1$，$\pm2$，…) と表せる。$|\theta|$ が十分に小さいとして，$\sin\theta\fallingdotseq\tan\theta$ と近似すると，スクリーン上に現れる明るい点の間隔 $\Delta x$ は，$L$，$\lambda$，$d$ を用いて $\Delta x=\boxed{\text{イ}}$ と表せる。

$L$ を 50 cm に設定し，$5.0\times10^{-7}$ m の波長の単色光線を回折格子に入射したとき，5.0 cm 間隔で明るい点が観測された。$\Delta x=$(イ) の式を用いると，この回折格子の 1 mm 当たりの溝の数は $\boxed{\text{ウ}}$ 本であると計算できる。

最後に，薄膜の厚さを求めるため，図３のように，薄膜からの反射光の光路上にこの回折格子を置き，そこから 50 cm 離してスクリーンを置いた。回折格子とスクリーンの面は反射光の光路に対して垂直であり，回折格子の溝の向きは図２と同様に紙面に対して垂直である。薄膜に白色光線を垂直に入射し，その反射光を回折格子に通してスクリーン上で観察した。

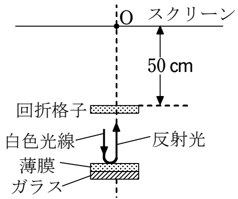


図３

(4) 点 O 以外では，点 O から近い順に $x=4.5$ cm および $x=6.0$ cm の位置にそれぞれ異なる色の明るい点が観測された。点 O から $x=6.0$ cm の間には他に明るい点は観測されなかった。この観測結果から，薄膜の厚さ $a$〔m〕を求めよ。この際，回折角を十分に小さいとして，(3) の結果を用いよ。ただし，観測された明るい点は可視光であるとする。