物　　　　　理

1 図1のように抵抗値Rの抵抗器，自己インダクタンスLのコイル，電気容量Cのコンデンサーを直列に接続した回路に，角周波数ωの交流電源を接続し，交流電圧Vを加えた。

時刻tにおいて，回路を流れる電流は，図1の矢印の向きを正として，$I = I_0 \sin \omega t$であった。このとき，抵抗器，コイル，コンデンサーにかかる電圧の瞬時値(瞬間値)はそれぞれV_{R}，V_{L}，V_{C}であった。電源電圧Vの位相は，回路を流れる電流Iの位相よりも，θだけ進んでいた。円周率をπとする。以下の問いに答えよ。

なお，必要ならば次の公式を用いてもよい。

$$A \sin x + B \cos x = \sqrt{A^2 + B^2} \sin (x + \alpha),\quad \text{ただし} \tan \alpha = \frac{B}{A}$$

問 1　電流の実効値I_{e}を求めよ。

問 2　V_{R}，V_{L}，V_{C}をそれぞれ求め，時刻tの関数で示せ。

問 3　$\cos \theta$の値を，I_0，R，ω，L，Cのうち必要なものを用いて表せ。

問 4　Vの最大値V_0および実効値V_{e}を求め，I_0，R，ω，L，Cを用いて表せ。

問 5　この回路のインピーダンスZを，R，$\cos \theta$を用いて表せ。

問 6　回路に加える交流電源の周波数をゆっくりと変化させたところ，特定の周波数で大きな電流が流れた。この現象のことを何というか，答えよ。また，最大電流が流れたときの周波数f_0を求めよ。

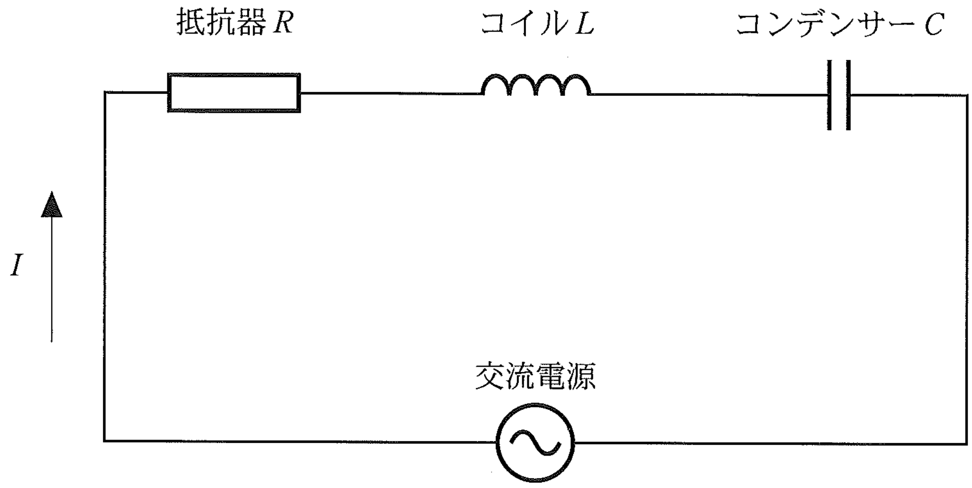

図 1

2　2つの液体 L_A，L_B と高さ h，底面積 S の円筒形の容器Cおよびばね定数 k のフックの法則に従うばねがある。容器の質量，厚みおよびばねの質量は無視できるものとする。また，液体の抵抗，表面張力，Cの運動にともなう液面の変化および周囲の空気による浮力，空気の抵抗は考慮しなくてよいものとする。液体 L_A の密度を ρ_A，L_B の密度を ρ_B とし，重力加速度を g，円周率を π とする。流体内にある物体には，常に鉛直上向きに，流体の密度および物体の体積に比例した浮力が働くものとして，以下の問いに答えよ。

問 1　図2−1のように，液体 L_A を容器Cに満たして液体 L_B の中に入れると，Cの $\dfrac{2}{5}$ が液体面上に出て静止した。L_A を満たした容器Cに働く重力の大きさ W_A および浮力の大きさ F_A を，ρ_A，ρ_B，h，S，g のうち必要なものを用いて表せ。

問 2　L_A の密度 ρ_A と L_B の密度 ρ_B の比 $\dfrac{\rho_B}{\rho_A}$ を求めよ。

図2−2のように，L_B で満たした容器Cを天井に固定したばねにつるし，L_A に入れたところ，Cの $\dfrac{2}{5}$ が液体面上に出て静止した。

問 3　Cに働く浮力の大きさ F_B およびばねから受ける力の大きさ F_K を，ρ_A，ρ_B，h，S，g，k のうち必要なものを用いて表せ。

問 4　ばねの自然長からの伸び l_0 を，ρ_A，ρ_B，h，S，g，k のうち必要なものを用いて表せ。

問 5　図2−3のようにCが静止の位置から鉛直下向きに $x\left(<\dfrac{2}{5}h\right)$ だけ変位しているとき，Cに働く力の大きさ F を，ρ_A，ρ_B，h，S，g，k，x のうち必要なものを用いて表せ。また，鉛直下向きを正の向き，Cの加速度を a として，Cの運動方程式を ρ_A，ρ_B，a，h，S，g，k，x のうち必要なものを用いて表せ。

問 6　Cを静止の位置から鉛直下向きに$d\left(<\dfrac{2}{5}h\right)$だけ変位させて静かに離すと，Cは単振動をした。その周期TおよびCが静止の位置を通過するときの速さvを，ρ_A，ρ_B，h，S，g，π，k，dのうち必要なものを用いて表せ。Cは鉛直方向にのみ運動するものとする。

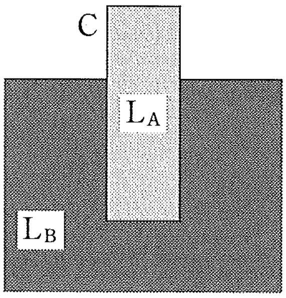

図 2 − 1

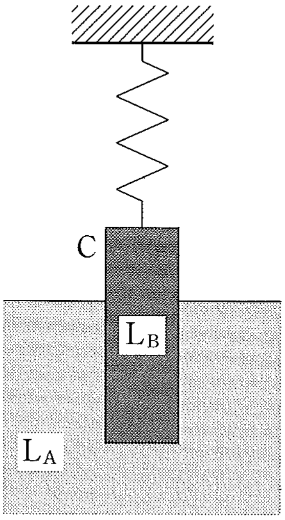

図 2 − 2

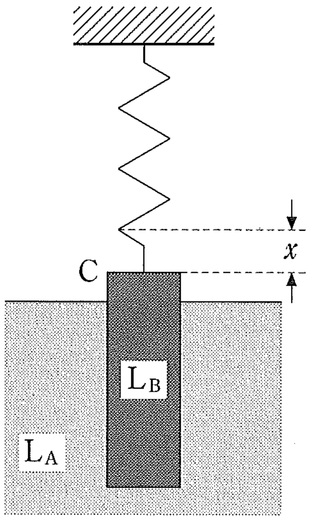

図 2 − 3

3 図3－1のように，断面積Sのシリンダーとその内部をなめらかに移動できるピストンからなる断熱容器の中に比熱比γの理想気体を封入した。シリンダーの底には，容器内部の気体の温度調節を担い，ヒーターとクーラーからなる温度コントローラーを設置した。外気圧をp_0，気体定数をR，重力加速度をg，ヒーターの電気抵抗をZとして，以下の問いに答えよ。ただし，温度コントローラーの体積および熱容量，ピストンの質量および体積は無視でき，ヒーターにより生じる熱はすべて気体の温度変化に使われるものとする。

問 1　シリンダー内の理想気体の温度がT_0のとき，シリンダーの底からピストンまでの高さ(以降，ピストンの高さ)はh_0で，シリンダー内の気体は，外気とつり合った。シリンダー内に封入されている気体のモル数nをS，R，p_0，T_0，h_0を用いて表せ。

問 2　温度コントローラーによりシリンダー内の気体の温度をT_0に保ちながら，質量mのおもりをピストンの上にゆっくりとのせたところ，しばらくしてピストンはある高さh_1で静止した。このときのシリンダー内の気体の圧力p_1およびh_1をS，R，g，p_0，T_0，h_0，mのうち必要なものを用いてそれぞれ表せ。

次に，温度コントローラーのヒーターに電流Iをt秒間流したところ，しばらくしてピストンは，図3－2のように高さh_2で静止した。

問 3　シリンダー内部の理想気体が温度コントローラーのヒーターにより加えられた熱量Qを，Z，I，tのうち必要なものを用いて表せ。また，シリンダー内部の理想気体の圧力p_2を，S，R，g，p_0，T_0，h_0，h_2，mのうち必要なものを用いて表せ。

問 4　シリンダー内の気体が外部にした仕事Wおよびシリンダー内の理想気体の内部エネルギー増加量ΔUを，S，R，g，Z，p_0，T_0，h_1，h_2，m，I，tのうち必要なものを用いてそれぞれ表せ。

問 5　図 3－2 の状態のまま温度コントローラーを取りはずし，ピストンを図 3－3 のように，d($d \ll h_2$)だけ押し下げた。このときのシリンダー内の理想気体の圧力 p_3 を S，R，g，p_0，T_0，h_0，h_2，m，γ，d のうち必要なものを用いて表せ。なお，一般に比熱比が γ である理想気体の断熱変化において，圧力 p と体積 V の間には，pV^{γ} = 一定，が成り立つ。

問 6　このとき，ピストンを押し下げるのに必要な力の大きさ F を S，R，g，p_0，T_0，h_0，h_2，m，γ，d のうち必要なものを用いて表せ。

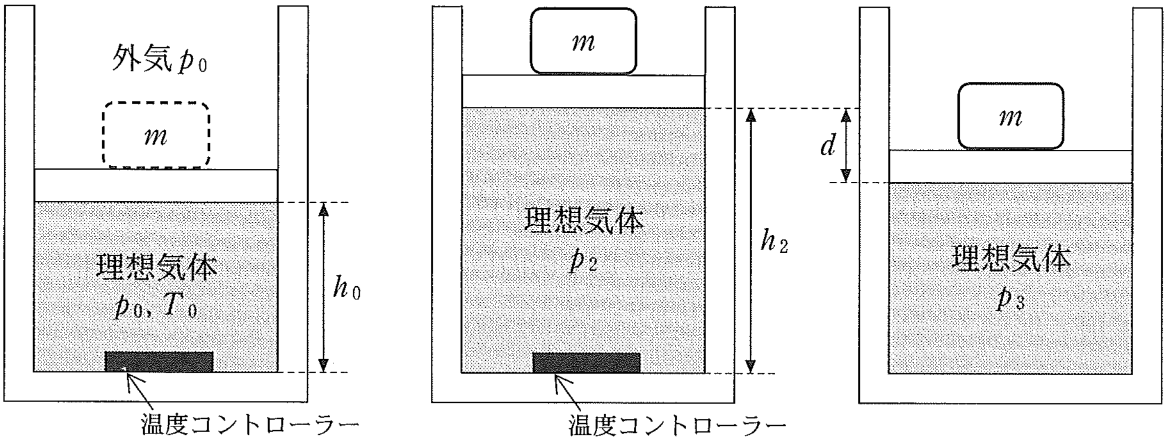

図 3－1　　図 3－2　　図 3－3

4　図4に示すように，屈折率 n_1 のガラス板の表面に，屈折率 n_2，厚さ d の均一な薄膜が形成されている。上方から平行光線が入射角 i（$0° \leqq i < 90°$）で入射する場合を考える。光 α は空気と薄膜の境界面の点 A_2 で反射して点 D に到達する。一方，光 β は点 B_1 において屈折角 r で屈折して薄膜中を進み，薄膜とガラス板の境界面上の点 C で反射し，さらに点 A_2 で屈折して空気中の点 D に到達する。空気の屈折率を 1 とし，$1 < n_2 < n_1$ の関係があるものとして以下の問いに答えよ。

問 1　波長 λ の光が入射する場合，薄膜中を進む光の波長を求めよ。

問 2　図4に示す破線 A_1B_1，A_2B_2 は平行光線の波面を示しており，A_1 と B_1，および，A_2 と B_2 は，それぞれ同位相の点である。距離 A_1A_2 と B_1B_2 の比はいくらか。

問 3　波長 λ の光が入射する場合，点 D に到達した光 α と光 β が強め合う条件を，λ，n_2，d，i，および正の整数 m を用いて式で示せ。

次に，薄膜に垂直（$i = 0°$）に波長 λ_0 の単色光が入射する場合を考える。
$n_2 = 1.4$，$\lambda_0 = 560$ nm のとき，以下の問いに対する答えを有効数字 2 桁で示せ。

問 4　膜の表面で反射した光（光 α）と膜の裏面で反射した光（光 β）が強め合う最も薄い膜の厚さ d_1〔nm〕の値を求めよ。

問 5　膜の厚さを d_1 から徐々に厚くしていくと，波長 λ_0 の反射光はいったん弱めあうが再び強め合い，これが繰り返される。ここで，膜を徐々に厚くして，膜の厚さ d_1 の場合も含めて 9 回目に強め合う厚さを d_9 とする。この間の厚さの変化 $d_9 - d_1$〔nm〕の値を求めよ。

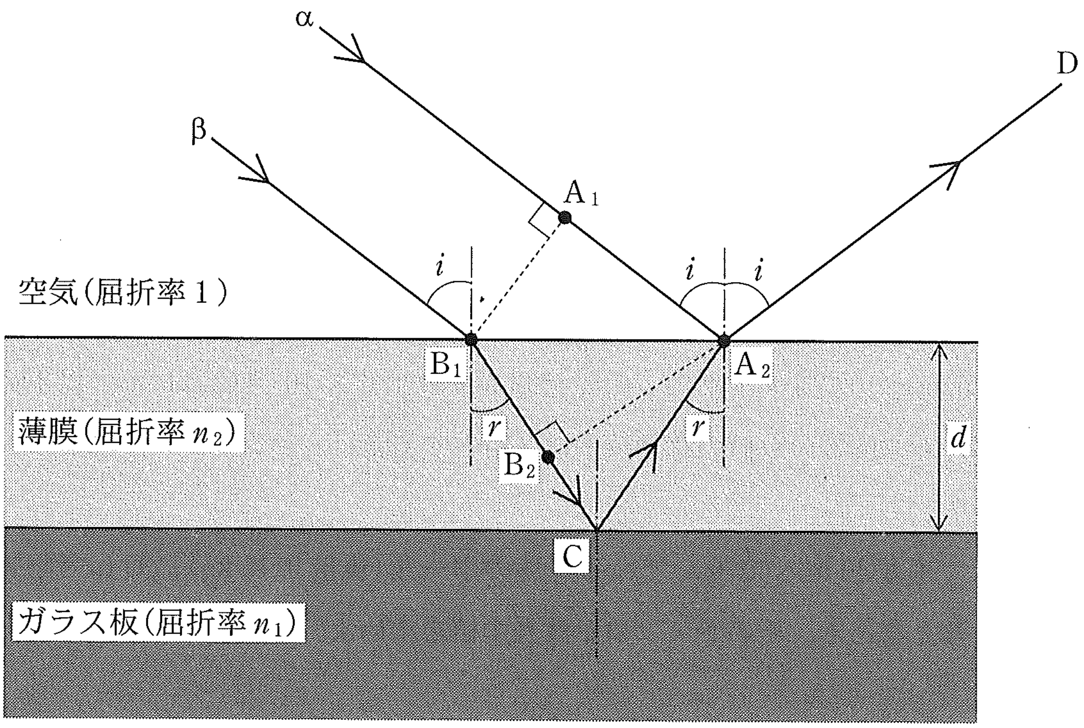

図4

5 1924年，フランスの物理学者ド・ブロイは，粒子と考えられていた電子も，光のように波の性質をもつという考えを提唱した。この考えは1927年から翌年にかけて，電子線について実験により確認された。電子だけでなく陽子などについても波の性質が認められるため，一般に粒子が波動としてふるまうときの波を，物質波(あるいは，ド・ブロイ波)という。運動量pの粒子の物質波では，波長(ド・ブロイ波長)λが$\lambda = \dfrac{h}{p}$で与えられる。ここで，hはプランク定数で$h = 6.6 \times 10^{-34}\,\mathrm{J{\cdot}s}$である。電気素量を$e = 1.6 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$として，以下の問いに答えよ。解答の数値の有効数字は2桁とする。

問 1　速さ40 m/sで飛んでいる野球のボール(質量0.15 kg)に対して物質波を考えるとき，そのド・ブロイ波長の値を求めよ。

問 2　電圧Vで加速された電子のド・ブロイ波長を，電子の質量をm，電荷を$-e$として求めよ。

電圧Vで加速された電子線を，図5のように，格子面の間隔がdの物質の結晶面に斜めに入射させ，反射電子線を観測した。電子線の入射方向と結晶の格子面がなす角θを固定し，電子線の加速電圧を0から徐々に上げていくと，電圧V_1のときに反射電子線の強度が最初に極大となった。電子の質量をm，電荷を$-e$とする。

問 3　V_1を表す式を求めよ。

問 4　ある物質についての実験において得られたV_1の値は182 Vであった。この電圧で加速されたときの1つの電子のエネルギーの値を求めよ。また，この電子のド・ブロイ波長の値を$m = 9.1 \times 10^{-31}\,\mathrm{kg}$として求めよ。

問 5　問4の実験で，入射電子線と格子面のなす角θの正弦$\sin\theta$は0.10であった。試料とした物質の結晶格子面の間隔dの値を求めよ。

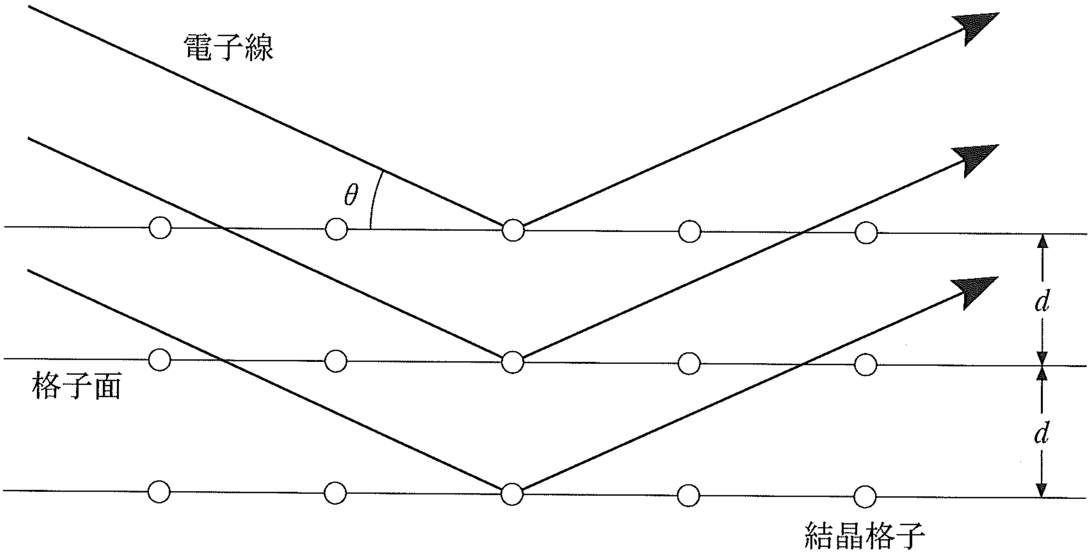

図 5