

2024 年 度

問 題 冊 子

教 科	科 目	ページ数
理 科	物 理	13

試験開始の合図があるまで、問題冊子を開かないこと。

解答の書き方

1. 解答は、すべて別紙解答用紙の所定欄に、はっきりと記入すること。
2. 解答を訂正する場合には、きれいに消してから記入すること。
3. 解答用紙には、解答と選択した選択問題の番号、志望学部及び受験番号のほかは、いっさい記入しないこと。
4. 問題〔Ⅰ〕、〔Ⅱ〕、〔Ⅲ〕、〔Ⅳ〕、〔Ⅴ〕は選択問題である。5つのうち4つを解答すること。5問すべてを解答してはいけない。選択問題〔Ⅰ〕、〔Ⅱ〕、〔Ⅲ〕、〔Ⅳ〕、〔Ⅴ〕のうち、選択した問題の番号を解答用紙(その1)の所定の枠内に記入すること。

注 意 事 項

1. 試験開始の合図の後、すべて(5枚)の解答用紙に志望学部及び受験番号を必ず記入すること。
2. 理科の選択科目は、出願時に選択したものと異なるものについて解答してはいけない。
3. 下書き用紙は、片面だけ使用すること。
4. 試験終了時には、解答用紙を必ずページ順に重ね、机上に置くこと。解答用紙は、解答していないものも含め、すべて(5枚)を回収する。
5. 試験終了後、問題冊子及び下書き用紙は持ち帰ること。

〔選択問題〕

- 〔Ⅰ〕 図1に示すように、水平に設置された直線コース上に置かれた質量 m の物体 A と質量 M の物体 B があり、物体 A には質量が無視できるばね定数 k のばねが物体 B 側にとりつけられている。

いま、物体 A が、図1中、右向きに大きさ v の速度で進み、静止していた物体 B と、ばね部分をはさんで衝突して、その後ふたたび離れた。このとき、コースと、物体 A、物体 B との間にはそれぞれ摩擦はないものとし、必要ならば重力加速度の大きさを g として、以下の問いに答えなさい。なお、図の右方向を正とする。

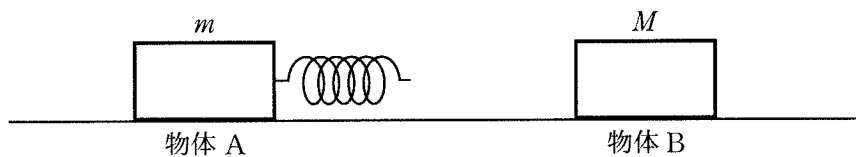


図1

- 【イ】 物体 A がもっとも物体 B に近づいた瞬間について、以下の(1)～(4)に答えなさい。

- (1) 物体 A から見た物体 B の相対速度を答えなさい。
- (2) 物体 B の速度を求めなさい。
- (3) 物体 A と物体 B の運動エネルギーの和を求めなさい。
- (4) ばねの自然長からの縮みの大きさを求めなさい。

- 【ロ】 物体 A と物体 B の衝突の過程について、つぎの(5)に答えなさい。

- (5) 衝突中に物体 B に生じる最大の加速度を求めなさい。

【ハ】 物体 A と物体 B がふたたび離れた後について，以下の(6)，(7)に答えなさい。

(6) 物体 A と物体 B の運動エネルギーの和を求めなさい。

(7) 物体 A の速度が衝突前の物体 A の速度と同じ向きで大きさが $\frac{1}{4}$ になるのは m 対 M の比がいくらのときか，もっとも簡単な整数比で答えなさい。

〔選択問題〕

- 〔Ⅱ〕 抵抗，コンデンサーとコイルからなる回路がもつ特性について以下の各問いに答えなさい。

抵抗，コンデンサー，コイルの電流特性：

- (1) 抵抗値 $R[\Omega]$ の抵抗とインダクタンス $L[\text{H}]$ のコイル，電気容量 $C[\text{F}]$ のコンデンサーがある。図 2-1 に示すように矢印の方向を正の電圧とする交流電源を接続し，交流電圧 $V = V_0 \sin \omega t [\text{V}]$ を加える場合，各素子に流れこむ電流 $I_R[\text{A}]$ ， $I_C[\text{A}]$ ， $I_L[\text{A}]$ を表す式をそれぞれ求めなさい。ここで $V_0[\text{V}]$ は電圧の最大値， $t[\text{s}]$ は時刻， $\omega[\text{rad/s}]$ は角周波数であり，常に $\omega > 0$ を満たすものとする。

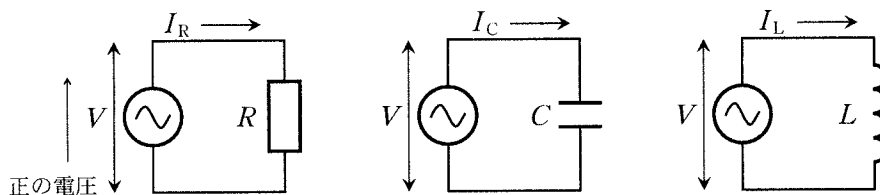


図 2-1

抵抗，コンデンサーとコイルからなる回路 A：

抵抗値 $R[\Omega]$ の抵抗とインダクタンス $L[\text{H}]$ のコイル，電気容量 $C[\text{F}]$ のコンデンサーを図 2-2 のように接続して回路 A を形成し，矢印の方向を正の電圧とする交流電源を接続して同様に交流電圧 $V[\text{V}]$ を加えた。

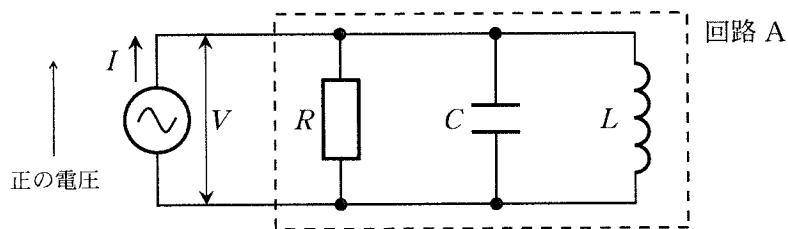


図 2-2

- (2) 電源電圧が $V = V_0 \sin \omega t [\text{V}]$ である場合の電流 $I[\text{A}]$ を求めなさい。
- (3) 電源電圧 $V[\text{V}]$ と電流 $I[\text{A}]$ の位相差が 0 となる角周波数 $\omega_0[\text{rad/s}]$ を式で求めなさい。ただし， V_0 ， R ， L ， C のうち，必要なものを用いること。また，求めた角周波数 $\omega_0[\text{rad/s}]$ の式を用いて，角周波数 $\omega_0[\text{rad/s}]$ における回路 A のインピーダンス $Z_{A0}[\Omega]$ を求めなさい。

抵抗，コンデンサーとコイルからなる回路 B：

図 2-2 の回路 A とは別に，インダクタンス L [H] のコイル，抵抗値 R [Ω] の抵抗と電気容量 C [F] のコンデンサーを用意して直列に接続した回路 B (図 2-3) を形成した。

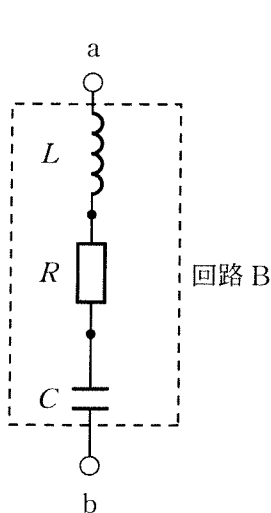


図 2-3

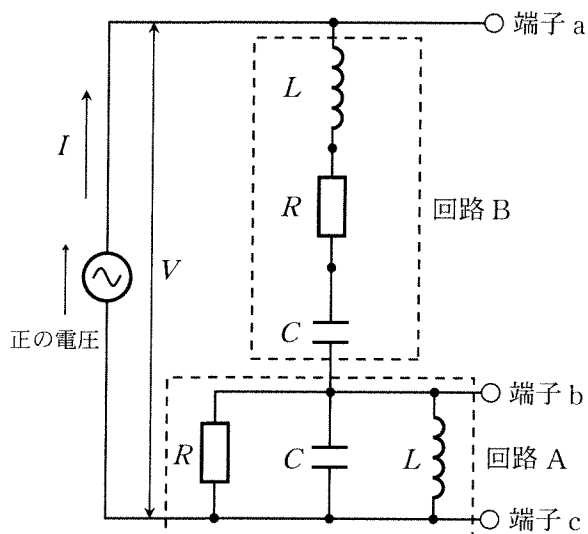


図 2-4

(4) 図 2-3 において，回路 B のインピーダンス Z_B [Ω] を表す式を求めなさい。

また，(3)で求めた角周波数 ω_0 [rad/s] の式を用いて，角周波数 ω_0 [rad/s] における回路 B のインピーダンス Z_{B0} [Ω] を求めなさい。

ここで参考となる三角関数の公式を示す。

$$\alpha \sin \phi + \beta \cos \phi = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \sin(\phi + \gamma)$$

$$\tan \gamma = \frac{\beta}{\alpha}$$

回路 A と回路 B の合成回路：

回路 A を回路 B と直列につなぎ，矢印の方向を正の電圧とする交流電源に接続して，端子 a と端子 c の間に $V = V_0 \sin \omega t$ [V] の交流電圧を加えた(図 2-4)。

- (5) 電圧 V の角周波数を(3)と同じ ω_0 [rad/s] に設定した。(3)で求めた角周波数 ω_0 [rad/s] の式を用いて、端子 b に対する端子 a の電圧 V_{ab} [V]、ならびに、端子 c に対する端子 b の電圧 V_{bc} [V] をそれぞれ求めなさい。
- (6) (3)で求めた角周波数 ω_0 [rad/s] の式を用いて、角周波数 ω_0 [rad/s] における電流 I [A]、ならびに回路全体が消費する電力 P [W] を表す式をそれぞれ求めなさい。
- (7) 図 2-4 の回路全体が消費する電力の時間平均の値は、電源電圧の角周波数 ω [rad/s] の変化とどのような関係となるか、理由と共に説明しなさい。
- (8) 図 2-4 の回路 A、B に含まれるコイルのインダクタンスをともに 2 倍の $2L$ [H] に変更する。さらに、新たに端子 X1 ～ X4 を設けて回路 X を接続することで、図 2-5 の回路を形成する。電源電圧 V [V] の角周波数を上記と同じ ω_0 [rad/s] とした場合に、電流 I [A] の振幅と位相が図 2-4 の回路と全く同一となるためには、回路 X の中身をどのような回路にすればよいか。回路 X に相当する回路図を描きなさい。

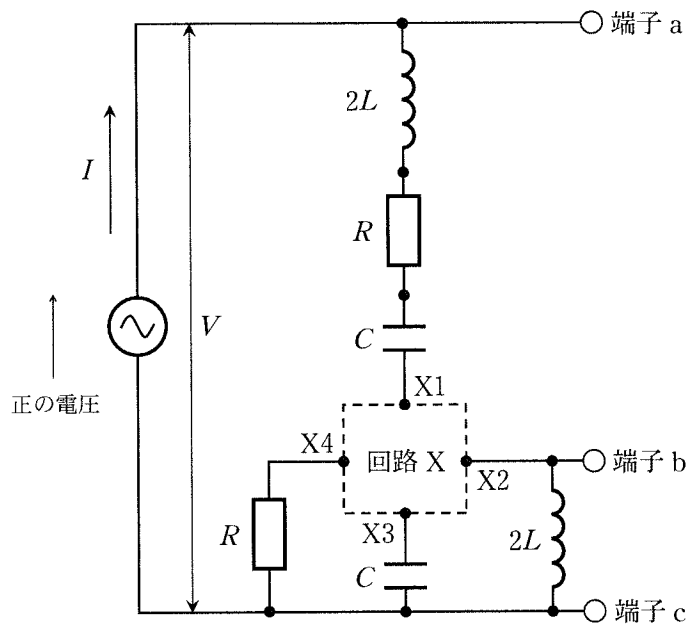


図 2-5

試験問題は次に続く。

〔選択問題〕

〔Ⅲ〕 図 3-1 のように、光源から真空中での波長 λ の単色光を回折格子に垂直に入射し、スクリーン上の干渉パターンを観測することを考える。回折格子には一定の間隔 d で多数のスリットが並んでいる。回折格子から距離 L だけ離れた位置に、回折格子と平行にスクリーンを置く。光源の正面をスクリーンの原点(点 O)とする。距離 L は回折格子の間隔 d に比べて非常に大きく、各スリットからスクリーン上の点に向かう光は平行とみなすことができる。空気の絶対屈折率を 1、真空中の光の速さを c として、以下の問いに答えなさい。

- (1) 空气中で光源からの単色光(真空中での波長 λ)を回折格子(スリットの間隔 d)に垂直に入射し、入射光の方向となす角度 θ の方向に回折格子からの光が強め合うとき、角度 θ の満たす条件を表す式を、0 以上の整数 m を用いて求めなさい。

この回折格子を用いて、次の実験イ、ロ、ハを行った。以下、角度 θ は十分に小さく、 $\sin \theta \approx \tan \theta$ と近似できるものとする。

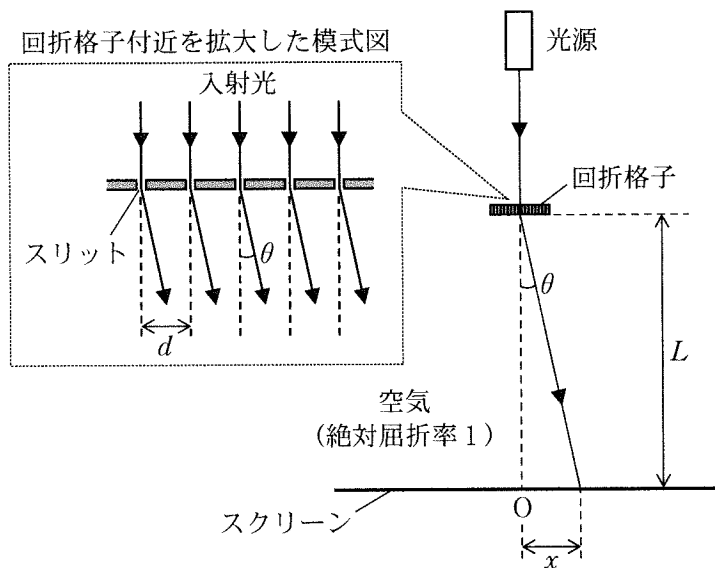


図 3-1

実験イ

図3-1において、空気中で単色光(真空中での波長 λ)を回折格子(スリットの間隔 d)に入射したところ、スクリーン上の点O上に明線が観測され、そのほかにも明線が観測された。

- (2) スクリーン上の点O上の明線の隣に観測された明線と点Oとの距離 x を求めなさい。

実験ロ

図3-2のように、実験イからさらに、液面がスクリーンに平行となるように絶対屈折率 n_1 ($n_1 > 1$)の透明な液体に回折格子とスクリーンを浸したところ、スクリーン上に明線が観測された。以下、液面で反射した光は無視できるものとする。

- (3) 光源からの単色光の液体中での速さを求めなさい。
(4) 光源からの単色光の液体中での波長を求めなさい。
(5) スクリーン上の点O上の明線の隣に観測された明線と点Oとの距離を求めなさい。

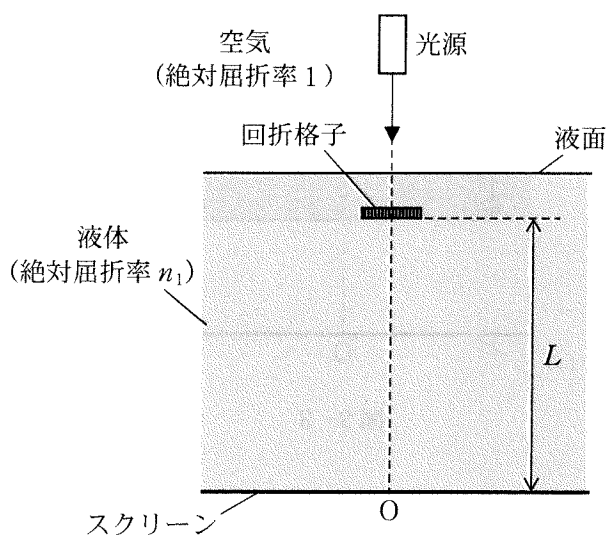


図3-2

実験ハ

図 3-3 のように、実験イからさらに、回折格子とスクリーンの上に絶対屈折率 n_2 ($n_2 > 1$)、厚さ D の透明で平坦な板をスクリーンに平行に設置したところ、スクリーン上に明線が観測された。以下、板と空気との境界で反射した光は無視できるものとする。

(6) スクリーン上の点 O 上の明線の隣に観測された明線と点 O との距離を求めなさい。

(7) 真空中での波長 λ が $5.3 \times 10^{-7} \text{ m}$ である単色光の光源を用いて、 1.0 cm あたりのスリット数が 5.0×10^2 本の回折格子を用いたときと 3.0×10^2 本の回折格子を用いたときのそれぞれについてスクリーン上の明線の位置を調べたところ、点 O 上の明線の隣に観測された明線と点 O との距離には 4.5 mm だけ差があった。 $L = 0.50 \text{ m}$ 、 $D = 0.20 \text{ m}$ であるとき、挿入した板の絶対屈折率 n_2 を有効数字 2 桁で求めなさい。

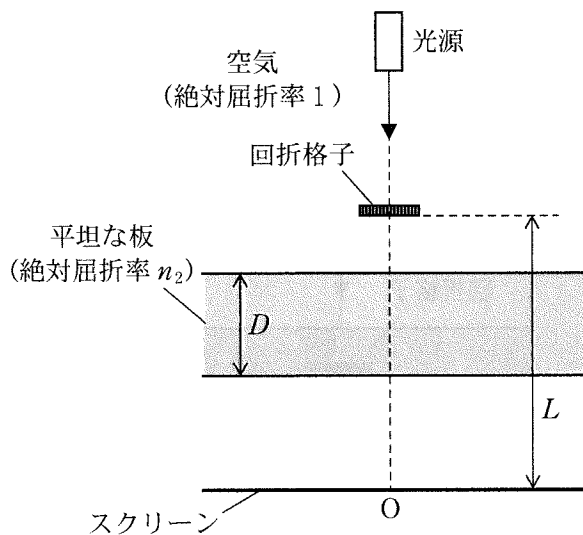


図 3-3

試験問題は次に続く。

〔選択問題〕

〔Ⅳ〕 次の文章を読んで、以下の問いに答えなさい。

図 4-1 のように、高さと底面積が十分な容器に、密度 ρ [kg/m³] が深さと温度に依存せず一定な液体が入っている。液面は水平に静止している。この液体中になめらかに動くピストンのある、円柱のシリンダーがあり、1 モルの理想気体が封入されているとする。ピストンの質量 M [kg]、断面積 S [m²]、シリンダーの質量 M [kg]、断面積 S [m²] とし、各面の厚さは無視できるものとする。以下の実験を通してシリンダーは鉛直方向のみの移動を考え、回転はせず底面とピストンの面が水平の姿勢を維持している。ピストンの面とシリンダーの底面までの距離をピストンの高さとする。ピストンの高さが最大になったとき、ピストンはシリンダーから抜けられない構造になっているものとする。液面における大気圧を p_0 [Pa]、重力加速度を g [m/s²]、気体の定積モル比熱を C_V [J/(mol・K)]、定圧モル比熱を C_p [J/(mol・K)]、封入した気体の質量は無視できるものとする。

実験 1

シリンダーは固定されておらず、受ける力に応じて液体中を鉛直方向に移動するものとする。ピストンの面が液面からの深さ H [m] の位置で静止しており、ピストンの高さが h [m] であったとする。

- (1) ピストンの上面が受ける圧力を求めなさい。
- (2) シリンダー内の気体の圧力を求めなさい。
- (3) シリンダー底面における力のつり合いに関する式を書いた上で、これにもとづいて浮力について説明しなさい。

実験 2

実験 1 から、液体の温度を上昇させた。シリンダーとピストンの各面は熱をよく伝えるものとする。

- (4) ピストンの高さ、シリンダーの運動について考えられることを理由とともに書きなさい。

実験 3

シリンダーとピストンの各面は断熱であるとする。シリンダーは固定されていない状態で静止していた。気体の温度 T [K]，シリンダー内の圧力 p [Pa]，ピストンの高さ h [m]であったとする(状態 A)。

- (5) ピストンをシリンダーに固定し，気体に熱量 Q [J]を吸収させた(状態 B)。

気体の温度変化の大きさ ΔT_1 [K]と Q との関係式を書きなさい。

- (6) シリンダーを液体中で固定した。ピストンの固定を外したところピストンが移動した(状態 C)。ピストンの高さの変化を Δh [m] (体積が増加するとき $\Delta h > 0$) とし，状態 A, B, C への変化について p - V グラフを書きなさい。

- (7) 状態 B から C において，気体がした仕事に相当する部分を(6)の p - V グラフに斜線で示しなさい。

- (8) ポアソンの式(法則)から Δh と ΔT_1 の関係が以下のように求められた。

$$(1 + [\text{ア}] \Delta T_1) = (1 - [\text{イ}] \Delta h) (1 + [\text{ウ}] \Delta h)^\gamma$$

空欄 [ア]，[イ]，[ウ]を埋めなさい。 $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ とする。

- (9) 状態 B から C において，気体がした仕事を，導出過程を示しながら， C_v ， T ， Q ， Δh ， h ， γ を用いて表しなさい。

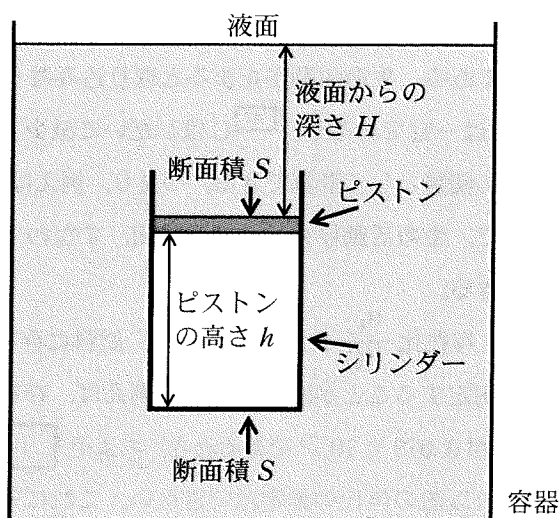


図 4-1

〔選択問題〕

- 〔V〕 放射性炭素による年代測定に関する以下の文章を読み、問いに答えなさい。なお、必要であれば、 $\sqrt{2} = 1.4$, $\log 2 = 0.70$ の値を用いること。

宇宙空間から地球にたえずふりそそいでいる宇宙線により、大気中の原子が崩壊する過程において ア が生成されると、この ア は多くの場合、大気中の窒素の原子核に衝突し次の核反応を起こす。



この反応により大気中では、イ が 14 の炭素の ウ 性同位体 (${}^{14}\text{C}$) が、常時生成されている。他方、生じた ${}^{14}\text{C}$ は半減期 5.7×10^3 年の、次式で示されるような エ 崩壊を起こす。



ただし、 $\bar{\nu}_e$ は反電子ニュートリノと呼ばれる素粒子である。式①、②で表される生成と崩壊のバランスにより、大気中の ${}^{14}\text{C}$ の量はほぼ一定に保たれており、大気中の ${}^{12}\text{C}$ に対する ${}^{14}\text{C}$ の存在比 $\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}$ は 1.25×10^{-12} となっている。生物は生きている間、様々な形で大気中の炭素を体内に取り込むが、その時の存在比 $\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}$ は大気中と同じである。生命活動が止まると取り込みは止まるが、式②の崩壊は続くので、カ C は一定であるが、キ C はしだいに減少することとなる。存在比 $\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}$ は経過時間の関数として計算できる。つまり、例えば枯木の中の存在比 $\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}$ を計測することで、生命活動停止後の経過時間、すなわち生存していた年代を推定することができる。

しかしながら、存在比 $\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}$ の計測において、試料に存在する ${}^{14}\text{C}$ の個数が小さい場合、正確に測定することが困難となる。例えば、存在比 $\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}$ の測定限界(測定可能な最小値)が 0.078×10^{-12} であるとき、およそ ク 万年前までの推定しかできず、それ以前の年代の推定はできない。これに対し、式②の崩壊に伴う放射能の強さ(単位時間あたりに崩壊する原子核の個数)を計測することで年代を推定する方法もある。

(1) 文章の空欄を埋めよ。ただし、カ，キ，クには整数を使うこと。

(2) 下の表は式①の反応に関わる窒素と炭素の原子核について，陽子数と中性子数を示した表である。表中の空欄に数字を入れ，表を完成させよ。

	${}^{14}_7\text{N}$	${}^{14}_6\text{C}$
陽子数		
中性子数		

(3) いま，古い木材 A 中の存在比 $\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}$ を計測し，木材 A が生存中の大気中の存在比 $\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}$ が今と同じ 1.25×10^{-12} であるとして推定したところ，この木材 A の生きていた年代は今から 2850 年前と計算された。この木材 A 中の存在比 $\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}$ を導出せよ。ただし，導出過程も示すこと。

(4) いま，別の古い木材 B について，下線部「放射能の強さ(単位時間あたりに崩壊する原子核の個数)」を計測したところ，この木材 1 リットル当たりについて崩壊する原子核の個数が毎時 400 個であった。木材 1 リットルに含まれる ${}^{12}\text{C}$ は 20 mol (1.2×10^{25} 個) とし，この木材が生存中の大気中の存在比 $\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}$ は今と同じ 1.25×10^{-12} とする。以下の文章の空欄を埋めよ。ただし，ケ と コ には数式を入れ，サ と シ には有効数字 2 桁の数値を入れること。

木材 B が生命活動を停止してからの経過時間を t とし，この木材の 1 リットル中の ${}^{14}\text{C}$ の個数を N とすれば N は t の関数として以下のように表される。ただし，生命活動が停止した時点($t = 0$)における ${}^{14}\text{C}$ の個数を N_0 とし，半減期を T とする。

$$N(t) = N_0 \boxed{\text{ケ}}$$

時間 t に対する $N(t)$ の変化率 (単位時間あたり N がどれだけ増減するか) を計算することで、単位時間あたりに崩壊する個数 I (すなわち放射能の強さ) を得ることができ、

$$I(t) = \left| N_0 \left(\log \frac{1}{2} \right) \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} \cdot \frac{1}{T} \right|$$

$$= \boxed{\text{コ}} \cdot N$$

となる。いま、 $I(t)$ が毎時 400 個であることと、半減期 T が 5.7×10^3 年 (すなわち $5.7 \times 10^3 \times 8760$ 時間) であることを使えば、 ^{14}C の個数 N は $\boxed{\text{サ}}$ 個と計算される。これに対し、この木材 1 リットルに含まれる ^{12}C は 20 mol (1.2×10^{25} 個) であるから、存在比 $\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}}$ は $\boxed{\text{シ}}$ となる。これより、この木材 B の生きていた年代は今から 6 万年前と推定される。