

入学試験問題

理科



(配点 120 点)

令和 3 年 2 月 26 日 9 時 30 分—12 時

注 意 事 項

- 1 試験開始の合図があるまで、この問題冊子を開いてはいけません。
- 2 この問題冊子は全部で 89 ページあります(本文は物理 4～27 ページ, 化学 28～43 ページ, 生物 44～69 ページ, 地学 70～89 ページ)。落丁, 乱丁または印刷不鮮明の箇所があったら, 手を挙げて監督者に知らせなさい。
- 3 解答には, 必ず黒色鉛筆(または黒色シャープペンシル)を使用しなさい。
- 4 解答は, 1 科目につき 1 枚の解答用紙を使用しなさい。
- 5 物理, 化学, 生物, 地学のうちから, あらかじめ届け出た 2 科目について解答しなさい。
- 6 解答用紙の指定欄に, 受験番号(表面 2 箇所, 裏面 1 箇所), 科類, 氏名を記入しなさい。指定欄以外にこれらを記入してはいけません。
- 7 解答は, 必ず解答用紙の指定された箇所に記入しなさい。
- 8 解答用紙表面上方の指定された()内に, その用紙で解答する科目名を記入しなさい。
- 9 解答用紙表面の上部にある切り取り欄のうち, その用紙で解答する科目の分のみ 1 箇所をミシン目に沿って正しく切り取りなさい。
- 10 解答用紙の解答欄に, 関係のない文字, 記号, 符号などを記入してはいけません。また, 解答用紙の欄外の余白には, 何も書いてはいけません。
- 11 この問題冊子の余白は, 草稿用に使用してもよいが, どのページも切り離してはいけません。
- 12 解答用紙は, 持ち帰ってはいけません。
- 13 試験終了後, 問題冊子は持ち帰りなさい。

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

物 理

第1問 図1—1に示すようなブランコの運動について考えてみよう。ブランコの支点をOとする。ブランコに乗っている人を質量 m の質点とみなし、質点Pと呼ぶことにする。支点Oから水平な地面におろした垂線の足をGとする。ブランコの長さOPを l 、支点Oの高さOGを $l+h$ とする。ブランコの振れ角 $\angle GOP$ を θ とし、 θ はOGを基準に反時計回りを正にとる。重力加速度の大きさを g とする。また、ブランコは紙面内のみでたわむことなく運動するものとし、ブランコの質量や摩擦、空気抵抗は無視する。

I 以下の文章の ~ にあてはまる式を、それぞれ直後の括弧内の文字を用いて表せ。

質点Pが $\theta = \theta_0$ から静かに運動を開始したとする。支点Oにおける位置エネルギーを0とすると、運動を開始した時点における質点Pの力学的エネルギーは (l, θ_0, m, g) で与えられる。角度 θ における力学的エネルギーは、そのときの質点Pの速さを u として (u, l, θ, m, g) で与えられる。力学的エネルギー保存則から、 $u =$ (l, θ_0, θ, g) となる。

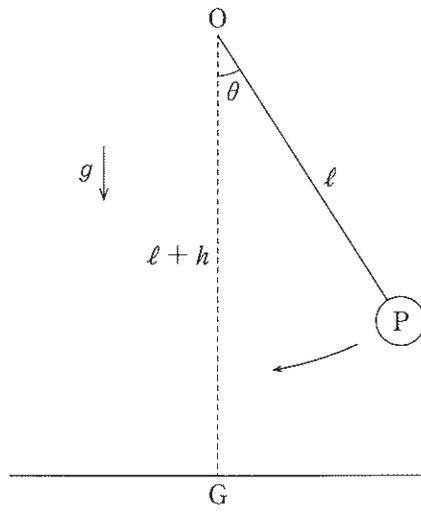


图 1—1

II ブランコに二人が乗った場合を考えよう。質量 m_A の質点 A と、質量 m_B の質点 B を考える。図 1—2 に示すように、初期状態では A と B が合わさって質点 P をなしているとし、質点 P が $\theta = \theta_0$ から静かに運動を始めたとする。 $\theta = 0$ において A はブランコを飛び降り、速さ v_A で水平に運動を始めた。一方、A が飛び降りたことにより、B を乗せたブランコは $\theta = 0$ でそのまま静止した。その後 A は G' に着地した。

- (1) A が飛び降りる直前の質点 P の速さを v_0 として、 v_A を v_0 、 m_A 、 m_B を用いて表せ。
- (2) 距離 GG' を ℓ 、 h 、 θ_0 、 m_A 、 m_B を用いて表せ。また、 $\ell = 2.0 \text{ m}$ 、 $h = 0.30 \text{ m}$ 、 $\cos \theta_0 = 0.85$ 、 $m_A = m_B$ のとき、距離 GG' を有効数字 2 桁で求めよ。

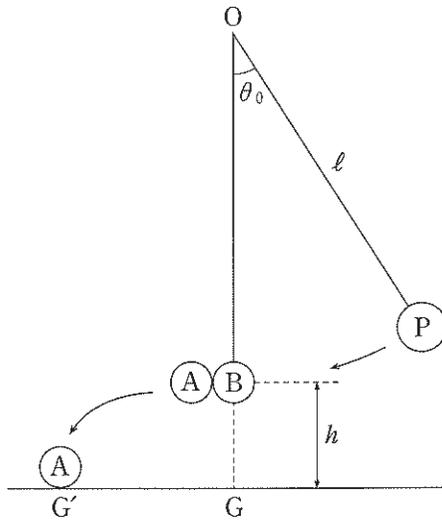


图 1—2

Ⅲ ブランコをこぐことを考えよう。ブランコに乗った人が運動の途中で立ち上がったたりしゃがみこんだりすることで、ブランコの振れ幅が変化していく。

まず図1—3に示すように、人がブランコで一度だけ立ち上がることを以下のように考える。質量 m の質点 P が $\theta = \theta_0$ ($\theta_0 > 0$) から静かに運動を始めた。次に角度 $\theta = \theta'$ において人が立ち上がったことにより、 OP の長さが l から $l - \Delta l$ へと瞬時に変化したとする ($\Delta l > 0$)。 OP の長さが変化する直前の P の速さを v とし、直後の速さを v' とする。その後、 OP の長さが $l - \Delta l$ のまま P は運動を続け、角度 $\theta = -\theta''$ ($\theta'' > 0$) で静止した。ただし以下では、ブランコの振れ角 θ は常に十分小さいとして、 $\cos \theta \approx 1 - \frac{\theta^2}{2}$ と近似できることを用いよ。

(1) $(\theta'')^2$ を v' , l , Δl , θ' , g を用いて表せ。

OP の長さが変化する前後に関して以下のように考えることができる。長さ OP の変化が十分速ければ、瞬間的に OP 方向の強い力が働いたと考えられる。 O を中心とした座標系で考えると、この力は中心力なので、面積速度が長さ OP の変化の前後で一定であるとしてよい。つまり、 $\frac{1}{2}(l - \Delta l)v' = \frac{1}{2}lv$ が成り立つ。

(2) $(\theta'')^2$ を l , Δl , θ_0 , θ' を用いて表せ。

(3) θ'' を最大にする θ' と、その時の θ'' を l , Δl , θ_0 を用いて表せ。

次に、人が何度も立ち上がったたりしゃがみこんだりしてブランコをこぐことを、以下のようなサイクルとして考えてみよう。 n 回目のサイクル C_n ($n \geq 1$) を次のように定義する。

「 $\theta = \theta_{n-1}$ で静止した質点 P が OP の長さ l で静かに運動を開始する。 $\theta = 0$ において立ち上がり OP の長さが l から $l - \Delta l$ へと瞬時に変化する。質点 P は OP の長さ $l - \Delta l$ のまま角度 $\theta = -\theta_n$ で静止した後、逆向きに運動を始め、角度 $\theta = \theta_n$ で再び静止する。このとき、 $\theta = \theta_n$ でしゃがみこみ、 OP の長さは $l - \Delta l$ から再び l へと瞬時に変化する。」

1回目のサイクルを始める前、質点Pは $\theta = \theta_0$ ($\theta_0 > 0$)にあり、OPの長さは l だった。その後、サイクル C_1 を開始し、以下順次 C_2, C_3, \dots と運動を続けていくものとする。

(4) n 回目のサイクルの後のブランコの角度 θ_n を、 $l, \Delta l, \theta_0, n$ を用いて表せ。

(5) $\frac{\Delta l}{l} = 0.1$ のとき、 N 回目のサイクルの後に、初めて $\theta_N \geq 2\theta_0$ となった。 N を求めよ。ただし $\log_{10} 0.9 \approx -0.046$ 、および $\log_{10} 2 \approx 0.30$ であることを用いてもよい。

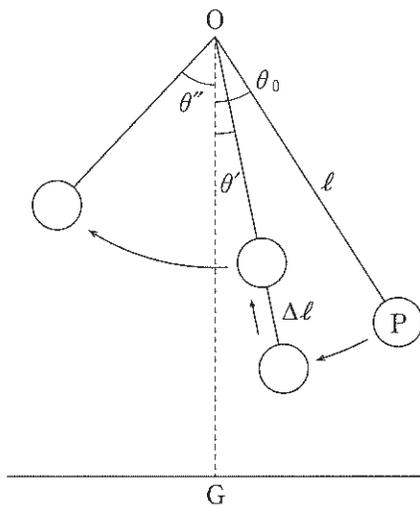


図1—3

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

第2問 面積 S の厚みの無視できる金属の板 A と板 B を空気中で距離 d だけ離して平行に配置した。 d は十分小さく、板の端の効果は無視する。図 2—1 のように、板、スイッチ、直流電源、コイルを導線でつないだ。直流電源の内部抵抗や導線の抵抗は無視できるほど小さい。空気の誘電率を ϵ とする。

I 図 2—1 のように、スイッチを 1 につなぎ、板 A と板 B の間に直流電圧 $V (V > 0)$ を加えたところ、板 A, B にそれぞれ電荷 $Q, -Q$ が蓄えられ、 $Q = C_0 V$ の関係があることが分かった。

(1) C_0 を S, d, ϵ を用いて表せ。

(2) 板 A, B と同じ形状をもつ面積 S の厚みの無視できる金属の板 C を図 2—2 のように板 A と板 B の間に互いに平行になるように差し入れた。板 A と板 C の距離は $x (x > \frac{d}{4})$ である。さらに、板 A と板 C を太さの無視できる導線 a で接続し、十分時間が経過したところ、板 A, C, B に蓄えられた電荷はそれぞれ一定となった。板 A, C, B からなるコンデンサーに蓄えられた静電エネルギーを求めよ。

(3) 外力を加え、板 C をゆっくりと板 A に近づけて板 A と板 C の距離を $\frac{d}{4}$ にした。導線 a はやわらかく、板 C を動かすための力には影響がないとする。板 C に外力がした仕事 W を求めよ。また、 W は電源がした仕事 W_0 の何倍であるか正負の符号も含めて答えよ。

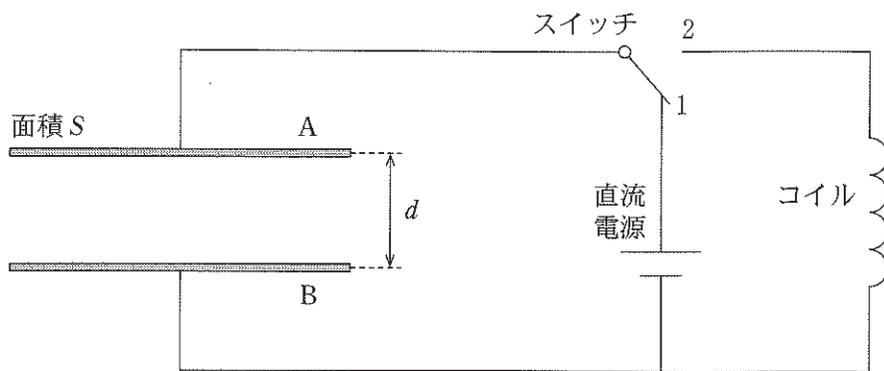


図 2—1

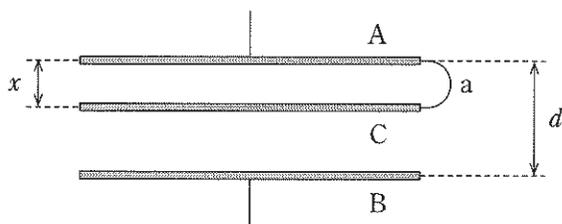


図 2—2

II 設問 I (3)の状態から，板 A, B, C と同じ形状をもつ面積 S の厚みの無視できる金属の板 D を，板 C と板 B の間に互いに平行になるように差し入れた。板 C と板 D の距離は $\frac{d}{4}$ である。さらに，板 C と板 D を太さの無視できる導線 b で接続した。十分時間が経過して各板に蓄えられた電荷がそれぞれ一定となった後に，図 2—3 のように導線 a を外した。

(1) 板 A に蓄えられた電荷は $Q_1 = \boxed{\text{ア}}$ C_0V ，板 B に蓄えられた電荷は $-Q_2 = -\boxed{\text{イ}}$ C_0V と表される。 $\boxed{\text{ア}}$ ， $\boxed{\text{イ}}$ に入る数を答えよ。

(2) その後，直流電源の電圧を a 倍 ($a > 0$) して aV とし，十分時間が経過したところ，各板に蓄えられた電荷はそれぞれ一定になった。板 A の板 C に対する電位 V_1 ，板 D の板 B に対する電位 V_2 を求めよ。

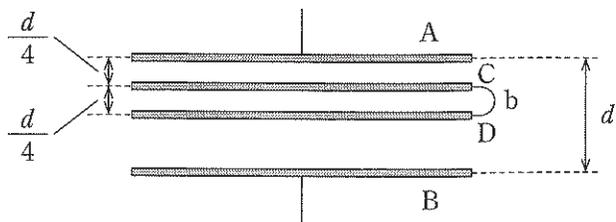


图 2—3

Ⅲ 設問Ⅱ(2)の状態から、時刻 $t = 0$ で図 2—4 のようにスイッチを 1 から 2 につなぎかえたところ、コイルには $I_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$ と表される電流 I が流れることが分かった。ただし、図中の矢印の向きを電流の正の向きにとる。コイルの抵抗は無視でき、自己インダクタンスは L である。他に説明がない場合は、直流電源の電圧は $2V$ とする。

(1) T を L と C_0 を用いて表せ。

(2) $t = 0$ でコイルの両端にかかる電圧を答えよ。また、 I_0 を T, V, L を用いて表せ。ただし、微小時間 Δt の間の電流変化は $\Delta I = I_0 \Delta t \left(\frac{2\pi}{T}\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$ であることを用いてよい。

(3) 板 A, B の電荷をそれぞれ $Q_3, -Q_4$ とすると、 $t = \frac{T}{4}$ のとき $Q_3 =$ ウ Q_4 の関係が成り立つ。 ウ に入る数を答えよ。また、 $Q_3 = 0$ となる時刻 t' を T を用いて表せ。ただし $t' < T$ とする。

(4) 板 A, C, D, B からなるコンデンサーに蓄えられる静電エネルギーが、 $t = 0$ のときに E_1 、 $t = \frac{T}{4}$ のときに E_2 であった。 E_1, E_2 をそれぞれ C_0, V を用いて表せ。また、 $\Delta E = E_2 - E_1$ として、 ΔE を I_0 を含み、 V および T を含まない形で表せ。

直流電源の電圧が $\alpha V (\alpha > 0)$ であった場合を考える。

(5) ある α に対して、 Q_3 と $-Q_4$ の変化の様子を表す最も適切な図を図 2—5 の①～⑥から選び、番号で答えよ。図中で点線は Q_3 を表し、実線は $-Q_4$ を表す。

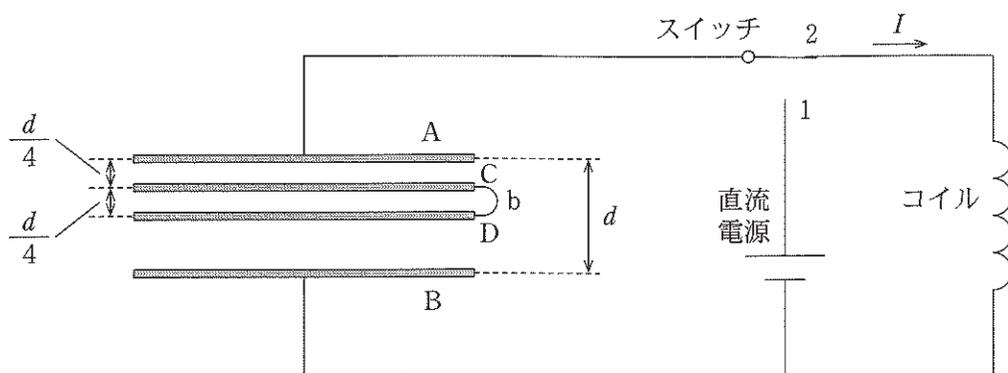


図 2—4

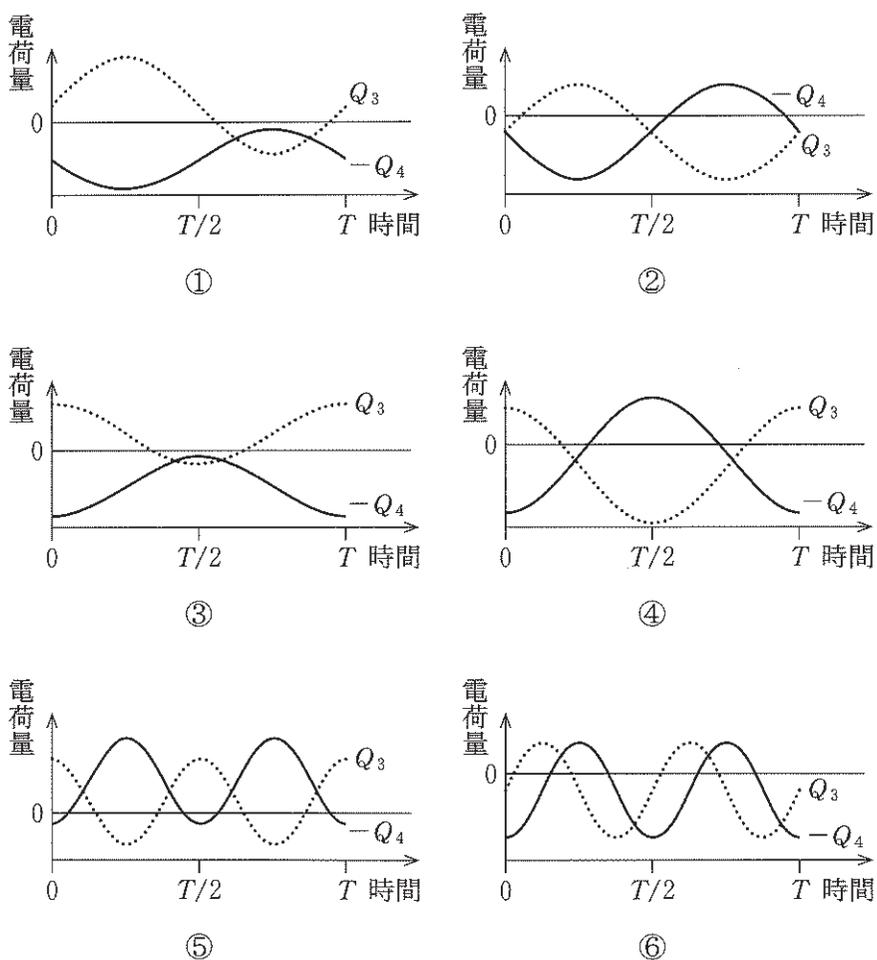


図 2—5

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

第3問 2018年のノーベル物理学賞は、「レーザー物理学分野における画期的な発明」に対して授与され、そのうちの1つは光ピンセット技術に関するものであった。光ピンセットとは、レーザー光で微小な粒子等を捕捉する技術である。本問では、光が微粒子に及ぼす力を考察することで、光で微粒子が捕捉できることを確認してみよう。

以下、図3-1に例を示すように、真空中に屈折率 $n(n > 1)$ の球形の微粒子があり、そこを光線が通過する状況を考える。光は光子という粒子の集まりの流れであり、光子は運動量をもつので、光の屈折に伴い光子の運動量が変化して、それが微粒子に力を及ぼすと考えられる。そこで以下では、光子の運動量の変化の大きさは、その光子が微粒子に及ぼす力積の大きさに等しいとする。また、光の吸収や反射の影響は無視する。さらに、微粒子に対して光線は十分に細く、光線の太さは考えない。

I 図3-1に示すように、真空中の微粒子を光線が通過している。微粒子の中心Oは光線と同一平面内にある。微粒子は固定されており、動かない。図3-2に示すように、光線が微粒子に入射する点を点A、微粒子から射出する点を点Bとする。入射前の光線を延長した直線と、射出後の光線を延長した直線の交点を点Cとする。線分ABと線分OCの交点を点Dとする。以下の設問に答えよ。

- (1) 光が微粒子に入射する際の入射角を θ 、屈折角を ϕ とする。 $\sin \theta$ を、 n 、 $\sin \phi$ を用いて表せ。

- (2) 光線中を同じ方向に流れる光子の集まりがもつ、エネルギーの総量 E と運動量の大きさの総量 p の間には、真空中では $p = \frac{E}{c}$ という関係が成り立つ。ここで、 c は真空中の光の速さである。図3-1の光は、単位時間あたり Q のエネルギーをもって、光源から射出されている。このとき、時間 Δt の間に射出された光子の集まりが真空中でもつ運動量の大きさの総量 p を、 Q 、 Δt 、 c 、 n のうち必要なものを用いて表せ。

(3) 図3—1に示すように、微粒子に入射する前の光子と、微粒子から射出した光子は、運動量の大きさは変わらないが、向きは変化している。時間 Δt の間に射出された光子の集まりが、微粒子を通過することにより受ける運動量の変化の大きさの総量 Δp を、 p , θ , ϕ を用いて表せ。また、その向きを、点 O, A, B, C のうち必要なものを用いて表せ。

(4) この微粒子が光から受ける力の大きさ f を、 Q , c , θ , ϕ のうち必要なものを用いて表せ。また、その向きを、点 O, A, B, C のうち必要なものを用いて表せ。

(5) 図3—2に示すように、OD 間の距離を d 、微粒子の半径を r とする。角度 θ , ϕ が小さいとき、設問 I(4) で求めた力の大きさ f を、 Q , c , n , r , d のうち必要なものを用いて表せ。小さな角度 δ に対して成り立つ近似式 $\sin \delta \doteq \tan \delta \doteq \delta$, $\cos \delta \doteq 1$ を使い、最終結果には三角関数を含めずに解答すること。

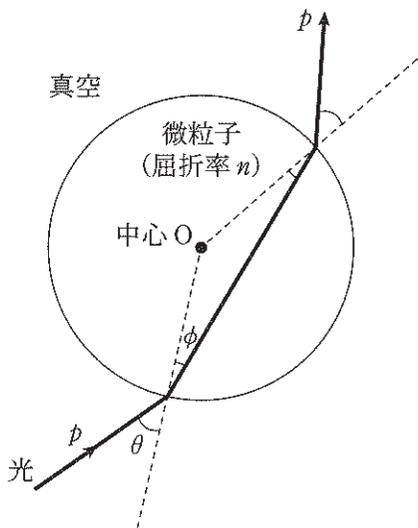


図3—1

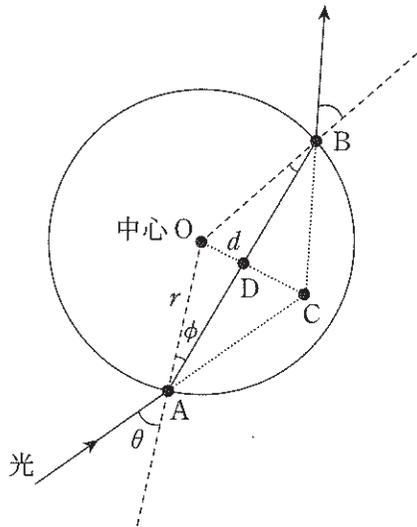


図3—2

(文字や補助線等を除き
図3—1と同じ図である。)

II 図3—3, 図3—4に示すように, 強度(単位時間あたりのエネルギー)の等しい2本の光線が点Fで交わるよう光路を調整したうえで, 設問Iと同じ微粒子を, それぞれ異なる位置に置いた。いずれの図においても, 入射光が鉛直線(上下方向)となす角度は2本の光線で等しく, 2本の光線と微粒子の中心Oは同一平面内にある。微粒子は固定されており, 動かない。以下の設問に答えよ。力の向きについては, 設問の指示に従って, 力が働く場合は図3—3の左側に図示した上下左右のいずれかを解答し, 力が働かない場合は「力は働かない」と答えること。

(1) 図3—3に示すように, 微粒子の中心Oが点Fと一致しているとき, 微粒子が2本の光から受ける合力の向きとして最も適切なものを「上」「下」「左」「右」「力は働かない」から選択せよ。

(2) 図3—4に示すように, 微粒子の中心Oが点Fの下にあるとき, 微粒子が2本の光から受ける合力の向きとして最も適切なものを「上」「下」「左」「右」「力は働かない」から選択せよ。点Fは微粒子の内部にあり, OF間の距離は十分小さいものとする。

(3) 設問II(2)において, OF間の距離を Δy とするとき, 微粒子が2本の光から受ける合力の大きさ f' と Δy の関係について, 最も適切なものを以下のア~エから選択せよ。なお, 微粒子の半径 r と比べて Δy は小さく, 設問I(5)の近似が本設問でも有効である。図3—4は, Δy の大きさが誇張して描かれているので注意すること。

ア: f' は Δy によらず一定である。

イ: f' は Δy に比例する。

ウ: f' は $(\Delta y)^2$ に比例する。

エ: f' は Δy に反比例する。

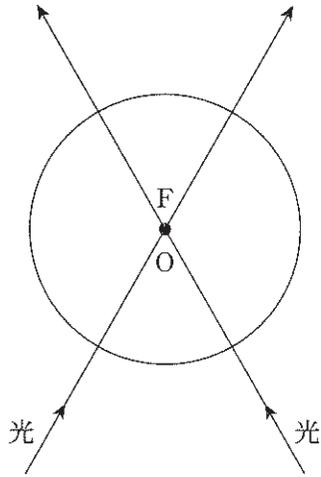
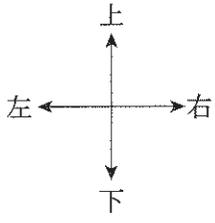


图 3—3

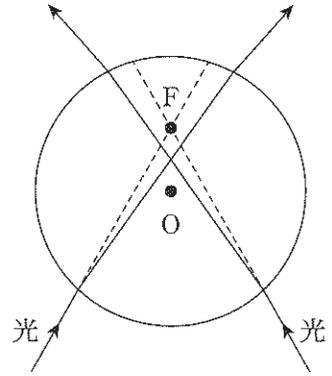


图 3—4

Ⅲ 図3—5に示すように、水平に置かれた薄い透明な平板の上方、高さ r の位置にある点Fで、強度の等しい2本の光線(光線1, 光線2)が交わるよう光路を調整したうえで、設問Ⅰ, Ⅱと同じ、半径 r の微粒子を置いた。微粒子は常に平板と接触しており、微粒子と平板の間に摩擦はないものとする。微粒子には、外部から右向きに大きさ f_0 の力が働いており、この力と、2本の光線から受ける力が釣り合う位置で微粒子は静止している。すなわち、この微粒子は、光によって捕捉されている。OF間の距離は Δx とし、点Fは、微粒子の内部、中心O付近にある。また、入射光が鉛直線となす角度 α は2本の光線で等しく、2本の光線と点Oは同一平面内にある。平板は十分薄く、平板による光の屈折や反射、吸収は考えない。光が微粒子に入射する際の入射角 θ は2本の光線で等しく、それに対する屈折角を ϕ とする。微粒子や平板の変形は考えない。

(1) 図3—5に示すように、光線1が微粒子に入射する点を点Aとし、微粒子の中心Oから微粒子内の光線1の上に降ろした垂線の長さを d とする。また、図3—6に示すように、点Oから直線AFに降ろした垂線の長さを h とする。 h および d を、 Δx , n , α のうち必要なものを用いて表せ。

(2) ここで用いた2本の光線は、それぞれ、単位時間あたり Q のエネルギーをもって、光源から射出されていた。入射角 θ や屈折角 ϕ が小さく、設問Ⅰ(5)と同じ近似が成り立つとして、2本の光線が微粒子に及ぼす合力の大きさ f' を、 Q , c , n , r , α , Δx を用いて表せ。ただし、 θ と ϕ は十分小さいため、 $\alpha \pm (\theta - \phi) \doteq \alpha$ と近似でき、合力の向きは水平方向とみなすことができる。

(3) $n = 1.5$, $r = 10 \mu\text{m} (= 1 \times 10^{-5} \text{m})$, $Q = 5 \text{mW} (= 5 \times 10^{-3} \text{J/s})$, $\alpha = 45^\circ$ としたところ、 $\Delta x = 1 \mu\text{m} (= 1 \times 10^{-6} \text{m})$ であった。このとき、外部から微粒子に加えている力の大きさ f_0 を、有効数字1桁で求めよ。真空中の光の速さは $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ である。図3—5, 図3—6は、 α や Δx 等の大きさが正確ではないので注意すること。

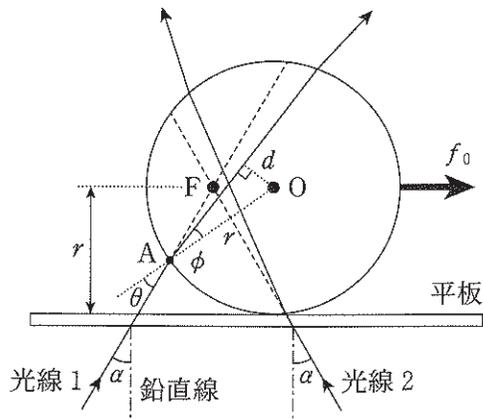


図 3—5

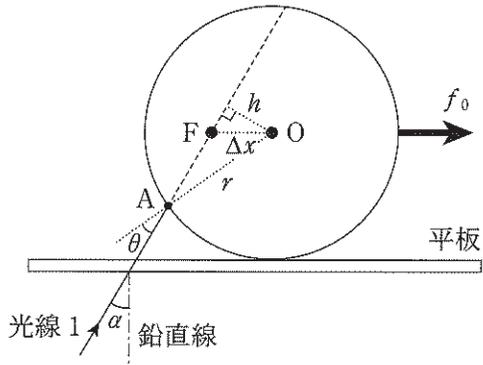


図 3—6

(文字や補助線等を除き)
 図 3—5 と同じ図である。

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

計 算 用 紙

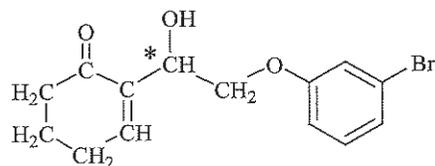
(切り離さないで用いよ。)

化 学

第1問

次の I, II の各問に答えよ。構造式は例にならって示せ。構造式を示す際には不斉炭素原子に*を付けること。ただし、立体異性体を区別して考える必要はない。

(構造式の例)

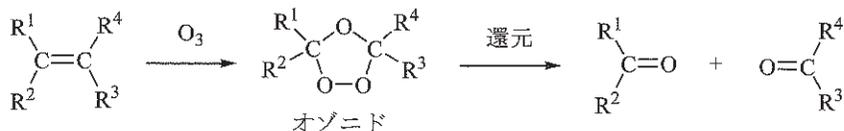


I 次の文章を読み、問ア～カに答えよ。

分子式 $C_6H_{12}O$ で表される化合物 A～F は、いずれも不斉炭素原子を一つだけもっている。それぞれの構造を決定するために、以下の実験を行った。

- 実験 1 : 金属ナトリウムを加えると、A と D からは水素が発生しなかったが、B, C, E, F からは発生した。
- 実験 2 : 白金触媒を用いた水素の付加を試みると、A と B への水素付加は起きなかったが、C, D, E, F からは分子式 $C_6H_{14}O$ の生成物が得られた。水素付加反応によって、C と D からは不斉炭素原子をもたない化合物^①が得られ、E と F からは同一の化合物^②が得られた。
- 実験 3 : ニクロム酸カリウムを用いて酸化を試みると、A, C, D は酸化されなかったが、B からはケトン、E と F からはカルボン酸が得られた。
- 実験 4 : ヨードホルム反応を示したのは B のみであった。
- 実験 5 : カルボニル基の有無を確認することができる赤外吸収スペクトルを測定した結果、A～F にカルボニル基の存在は認められなかった。
- 実験 6 : 下線部②の結果を受け、図 1—1 に示すオゾン分解実験を行った。E をオゾン分解すると、化合物 G とアセトアルデヒドが得られた。
- 実験 7 : G に存在するカルボニル基を還元すると、不斉炭素原子をもたない化合物が得られた。

実験 8 : F をオゾン分解すると化合物 H が得られた。H の分子式は $C_5H_{10}O_2$ であったが、図 1-1 の例から予測されるカルボニル化合物ではなかった。H は二つの不斉炭素原子をもっており、銀鏡反応を示した。



(R^{1-4} : 水素もしくはアルキル基など)

図 1-1 オゾン分解の例

注 1) 炭素間二重結合を形成する炭素原子に酸素原子が直接結合した構造は考慮しない。

注 2) 反応中に二重結合の移動は起こらないものとする。

[問]

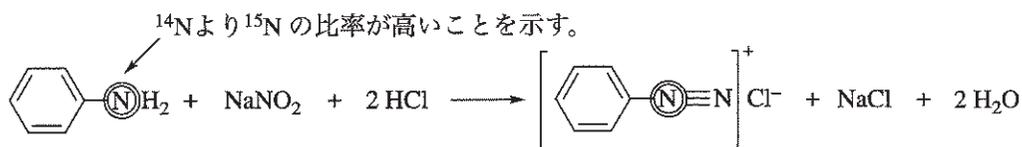
- ア 化合物 A として考えられる構造異性体のうち、五員環をもつものすべての構造式を示せ。
- イ 化合物 B として考えられる構造異性体のうち、四員環をもつものは一つである。その構造式を示せ。
- ウ 化合物 C として考えられる構造異性体は一つである。その構造式を示せ。
- エ 下線部①を考慮すると、化合物 D として考えられる構造異性体は一つである。その構造式を示せ。
- オ 実験 6 と 8 において生成した化合物 G と H の構造式をそれぞれ示せ。
- カ 以下の空欄 ~ にあてはまる適切な語句を答えよ。

化合物 C の沸点は化合物 D の沸点より高い。その主な理由は、D には存在しない 基が分子間の 結合を形成するからである。一方、C の沸点は化合物 E の沸点より低い。C と E はともに 基をもっている。この沸点差を説明するためには、分子間の 結合の強さを比較する必要がある。そこで、 基周辺の空間的な状況に着目する。すなわち、C は E と比較して 基周辺が空間的にこみ合っているため、分子間の 結合の形成がより いると理解できる。これが、C の沸点が E の沸点より低い主な理由の一つである。

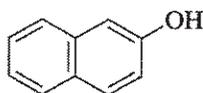
II 次の文章を読み、問キ～サに答えよ。

多くの元素には、中性子の数が異なる d が存在し、それらの相対質量 (^{12}C の質量を 12 とする質量) とその存在比から加重平均で算出される原子量が、分子量計算に用いられる。たとえば大気中の窒素には、その 99.6 % を占める相対質量 14.003 の窒素原子 (^{14}N) の他に、中性子が一つ多い相対質量 15.000 の窒素原子 (^{15}N) が 0.4 % 含まれているため、窒素の原子量は 14.007 となる。

d どうしの化学的性質は、ほぼ同じであるため、これらを含む化合物の反応性もほとんど変化しないことが知られている。したがって、分子内の特定の位置にある元素の d の存在比を操作した化合物を用いて反応を行い、得られた生成物の特定の位置にある元素の d の存在比の変化を調べると、反応に伴う結合の形成や切断の過程を追跡することができる。たとえば、 ^{15}N をもつアニリン ($\text{C}_6\text{H}_5^{15}\text{NH}_2$) と亜硝酸ナトリウム (NaNO_2) を用いた以下に示す反応においては、ジアゾニウム塩に含まれる二つの窒素は、それぞれ異なる起源をもつことが明らかにされている。



今回、 ^{15}N の存在比を 100 % に高めた試薬 $\text{Na}^{15}\text{NO}_2$ を用いて、以下の実験を行った。ニトロベンゼン ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$) を塩酸中でスズ (Sn) と反応させて得られた化合物 I に対し、濃塩酸中で氷冷しながら $\text{Na}^{15}\text{NO}_2$ を加えたところ、化合物 J の沈殿が生じた。 続いてこの J の沈殿を回収し、これを水に溶かし、 $^{14}\text{N}_2$ ガスで満たした密閉容器内において、室温で分解させたところ、化合物 K が主として得られ、それに伴い化合物 L および化合物 M がそれぞれ少量ずつ得られた。 K、L および M はともにベンゼン環を有していた。 下線部④の操作で得られた J を 2-ナフトールと反応させたところ、橙赤色の化合物 N を含む試料が得られた。 この試料に含まれる化合物 N の分子量は 249.00 であった。



2-ナフトール

一方、下線部⑤と同じ反応を行い、Jの分解反応が大部分進行したところで、^⑦残ったJを回収し、2-ナフトールと反応させたところ、分子量 248.96 の化合物 N を含む試料が得られた。

[問]

- キ d にあてはまる適切な語句を答えよ。
- ク 下線部③の操作で化合物 I が生成する反応の化学反応式を示せ。なお、スズはすべて塩化スズ (SnCl_4) に変換されるものとする。
- ケ 化合物 M を熱した銅線に触れさせて、その銅線を炎の中に入れたところ、青緑色の炎色反応がみられた。また、M を水酸化ナトリウム水溶液と高温高压下で反応させ、反応後の溶液を中和したところ、化合物 K が得られた。一方、反応後の溶液を中和することなく、下線部④の操作で得られた化合物 J と 0°C で反応させたところ、化合物 L が得られた。L と M の構造式をそれぞれ示せ。 ^{15}N を含む場合には、 ^{14}N より ^{15}N の存在比が高いと考えられる窒素を、反応式中の例にならって◎で囲って示せ。
- コ 下線部⑦の操作で得られた化合物 N に含まれる ^{15}N と ^{14}N の存在比を整数値で示せ。なお、ここでは原子量を $\text{H} = 1.00$, $\text{C} = 12.00$, $\text{O} = 16.00$, ^{14}N および ^{15}N の相対質量を $^{14}\text{N} = 14.00$, $^{15}\text{N} = 15.00$ と仮定して計算せよ。
- サ 下線部⑥、⑦それぞれの操作で得られた化合物 N に含まれる ^{15}N と ^{14}N の存在比が異なるのはなぜか、下線部⑤の条件で起こっている反応に含まれる過程の可逆性に着目して、理由を簡潔に説明せよ。

第2問

次の I, II の各問に答えよ。必要があれば以下の値を用いよ。

気体定数 $R = 8.31 \times 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{L}/(\text{K}\cdot\text{mol}) = 8.31 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$

$\sqrt{2} = 1.41, \sqrt{3} = 1.73, \sqrt{5} = 2.24$

I 次の文章を読み、問ア～キに答えよ。

ある水素吸蔵物質(記号 X で表す)は式 1 の可逆反応により水素を取り込み(吸蔵し) XH_2 となる。



気体物質が平衡状態にある場合、各成分気体の濃度の代わりに分圧を用いて平衡定数を表すことができ、この平衡定数を圧平衡定数という。式 1 の反応が平衡状態にある場合、その圧平衡定数 $K_p^{(1)}$ は水素の分圧 p_{H_2} を用いて

$$K_p^{(1)} = p_{H_2}$$

と表すことができる。また、水素の分圧が $K_p^{(1)}$ より小さいとき、式 1 の反応は起こらない。

内部の体積を自由に変えることのできるピストン付きの密閉容器に、水素を含む混合気体と、その物質量よりも十分大きい物質量の X を入れ、以下の実験を行った。式 1 の反応は速やかに平衡状態に達するものとし、 527°C において $K_p^{(1)} = 2.00 \times 10^5 \text{ Pa}$ とする。また、X への水素以外の成分気体の吸蔵は無視でき、X および XH_2 以外の物質は常に気体として存在するものとする。気体はすべて理想気体とし、容器内の固体の体積は無視できるものとする。

実験 1 : 容器を水素 1.50 mol とアルゴン 1.20 mol で満たした。その後、容器内^①の混合気体の圧力を $2.70 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、温度を 527°C に保ったまま、長時間放置した。このとき、X に水素は吸蔵されていなかった。その後、温度を 527°C に保ちながら徐々に圧縮すると、ある体積になったとき^②、水素の吸蔵が始まった。その後、さらに圧縮すると、混合気体の圧力は $2.20 \times 10^6 \text{ Pa}$ となった。^③

実験 2 : 容器を水素 1.50 mol とヨウ素 1.20 mol で満たした。その後、容器内の混合気体の圧力を $2.70 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、温度を 527°C に保ったまま、式 2 の反応が平衡状態に達するまで放置した。



このとき、容器内にヨウ化水素は 2.00 mol 存在しており、また、X に水素は吸蔵されていなかった。その後、温度を 527°C に保ちながら徐々に圧縮すると、ある体積になったとき、水素の吸蔵が始まった。^④その後、さらに平衡状態を保ちながら圧縮すると、混合気体の圧力は $2.20 \times 10^6 \text{ Pa}$ となった。^⑤

〔問〕

- ア 下線部①のときの混合気体の体積は何 L か、有効数字 2 桁で答えよ。
 イ 下線部②のときの混合気体の圧力は何 Pa か、有効数字 2 桁で答えよ。
 ウ 下線部②のときと同じ体積と温度で、容器に入れる水素とアルゴンの全物質量を一定としたまま、全物質量に対する水素の物質量比 x を変えて圧力を測定した。このとき、 x と容器内の混合気体の圧力の関係として適切なグラフを、以下の図 2—1 に示す(1)~(4)の中から一つ選べ。ただし、X は容器内にあり、混合気体を容器に入れる前に水素は吸蔵されていないものとする。

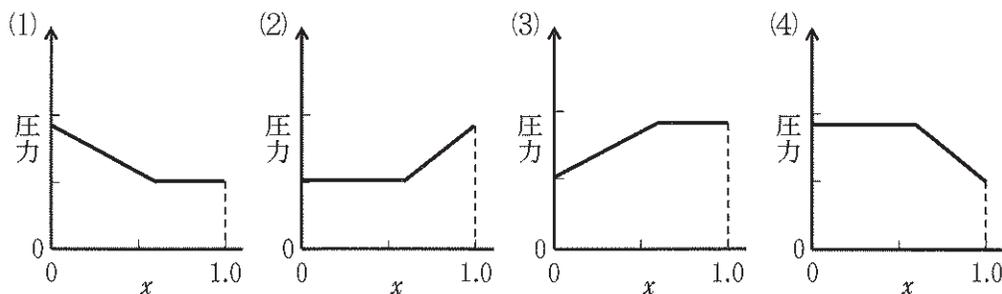


図 2—1 水素の物質量比 x と容器内の混合気体の圧力の関係

- エ 下線部③のとき、 X は何 mol の水素を吸蔵したか、有効数字 2 桁で答えよ。答えに至る過程も記せ。
- オ 式 2 の反応の圧平衡定数を有効数字 2 桁で答えよ。
- カ 下線部④のときの混合気体の圧力は何 Pa か、有効数字 2 桁で答えよ。答えに至る過程も記せ。
- キ 下線部⑤のときのヨウ化水素の分圧は何 Pa か、有効数字 2 桁で答えよ。答えに至る過程も記せ。

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

II 次の文章を読み、問ク〜シに答えよ。

生物の体内では様々なタンパク質が化学反応に関わり、生命活動の維持に寄与している。タンパク質は、約 20 種類のアミノ酸がペプチド結合を介して直鎖状^⑥につながった高分子で、一般に図 2—2 のヘモグロビンの様に複雑な立体構造をとる。

タンパク質の中で酵素として働くものは、立体構造の決まった部位に特定の化合物を結合させ、生体内の化学反応の速度を大きくする役割を持つ。例えばカタラーゼと呼ばれる酵素は、生体反応で発生し毒性を持つ過酸化水素を速やかに分解する^⑦。

また、酵素の中には、それ自身を構成するカルボキシ基など、酸塩基反応に関わる特定の官能基から、酵素に結合した基質 Y へ水素イオン H⁺ を供給することで、式 3 で示される反応を促進するものがある。



反応後、酵素の官能基は水から十分大きい速度で H⁺ を獲得し、反応前の状態に戻ることで新たな Y へ H⁺ を供給する。酵素の周り^⑧にある水から Y への H⁺ の供給よりも、酵素の官能基から Y への H⁺ の供給が十分に速く起こる場合、Y に H⁺ が供給される速度は溶液の pH によらず一定となる。

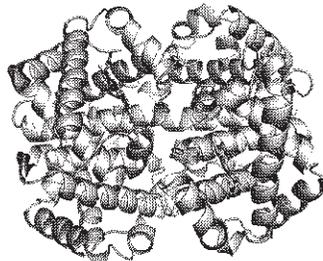
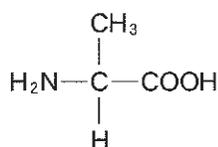


図 2—2 ヘモグロビンの立体構造

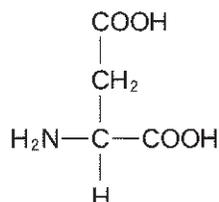
〔問〕

ク 下線部⑥に関連して、図2-3の構造式で示される(a)アラニン、(b)アスパラギン酸、(c)リシン、それぞれの水溶液に塩酸を加えて酸性にし、さらにアミノ酸の濃度が同一となるよう水で希釈した。ここへ一定の濃度の水酸化ナトリウム水溶液を滴下したとき、滴下した水酸化ナトリウム水溶液の体積 V_{NaOH} に対する pH の変化について、(a)~(c)の3種類のアミノ酸それぞれに対応するものを、図2-4に示した(5)~(7)のグラフより選べ。

(a) アラニン



(b) アスパラギン酸



(c) リシン

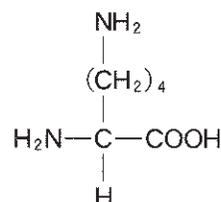


図2-3 アミノ酸の構造式

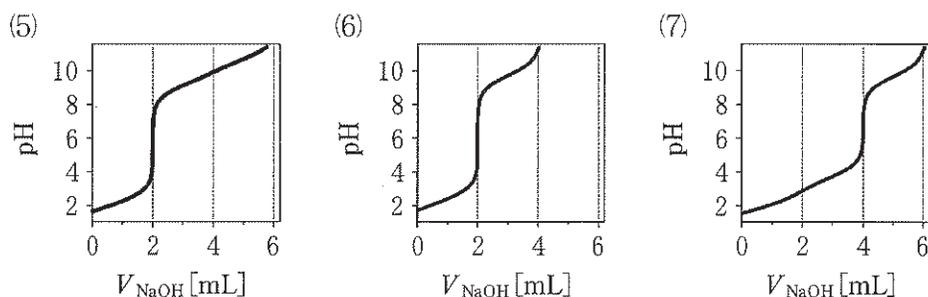


図2-4 アミノ酸の滴定曲線

ケ 下線部⑦について、ウレアーゼと呼ばれる酵素は、尿素 $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ がアンモニアと二酸化炭素に加水分解する反応を促進する。この反応の化学反応式を示し、反応開始時のアンモニアの生成速度は尿素の減少速度の何倍か答えよ。

コ 下線部⑧について、 H_2O_2 (液)と H_2O (液)の生成反応の熱化学方程式をそれぞれ記せ。また、 H_2O_2 (液)から H_2O (液)と酸素への分解反応の反応熱を求め、有効数字2桁で答えよ。ただし、 H_2O_2 (液)と H_2O (液)の生成熱はそれぞれ187.8 kJ/mol, 285.8 kJ/molとする。

サ 下線部⑧について、 H_2O_2 (液)が H_2O (液)と酸素に分解する反応の速度定数は、カタラーゼを加えることで27℃で 10^{12} 倍大きくなる。過酸化水素の分解反応の反応速度定数 k が、定数 A 、分解反応の活性化エネルギー E_a 、気体定数 R 、絶対温度 T を用いて式4で表されるとき、カタラーゼの存在下における E_a を求め、有効数字2桁で答えよ。答えに至る過程も記せ。ただし、27℃におけるカタラーゼを加えない場合の E_a は75.3 kJ/molとし、 A はカタラーゼの有無によらず一定とする。

$$\log_{10} k = -\frac{E_a}{2.30 RT} + A \quad (\text{式4})$$

シ 下線部⑨に関連して、 H^+ の供給について説明した次の文章中の , にあてはまる語句を、以下よりそれぞれ一つ選べ。ただし、酵素は高いpH領域においても変性を起こさないものとする。

高いpH領域では、 H^+ を供給する官能基から H^+ が失われ、 H^+ が酵素の周りの水からYに供給される。このとき、酵素とYの濃度が一定とすると、溶液のpHの増加に伴い、式3の反応速度はpHの 関数に従って する。

… 1次, 2次, 指数, 対数

… 増加, 減少

草 稿 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

第3問

次の I, II の各問に答えよ。必要があれば以下の値を用いよ。

元 素	H	C	O
原子量	1.0	12.0	16.0

AgCl の溶解度積 (25 °C) $K_{sp1} = 1.6 \times 10^{-10} \text{ mol}^2/\text{L}^2$

Ag₂CrO₄ の溶解度積 (25 °C) $K_{sp2} = 1.2 \times 10^{-12} \text{ mol}^3/\text{L}^3$

アボガドロ定数 $N_A = 6.02 \times 10^{23}/\text{mol}$

$\sqrt{2} = 1.41, \sqrt{3} = 1.73, \sqrt{5} = 2.24, \sqrt{6} = 2.45$

I 次の文章を読み、問ア～オに答えよ。

試料水溶液中の塩化物イオン Cl⁻ の濃度は、塩化銀 AgCl とクロム酸銀 Ag₂CrO₄ の水への溶解度の差を利用した滴定実験により求めることができる。ここに $x \text{ mol/L}$ の Cl⁻ を含む試料水溶液が 20.0 mL ある。 試料水溶液には、あらかじめ指示薬としてクロム酸カリウム K₂CrO₄ を加え、クロム酸イオン CrO₄²⁻ の濃度を $1.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ とした。試料水溶液に $1.0 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ の硝酸銀 AgNO₃ 水溶液を滴下すると、すぐに白色沈殿 (AgCl) が生じた。さらに AgNO₃ 水溶液を滴下すると白色沈殿の量が増加し、ある滴下量を超えると試料水溶液が赤褐色を呈した。 この赤褐色は Ag₂CrO₄ の沈殿に由来する。

本滴定実験において、AgCl により濁った水溶液が赤褐色を呈したと目視で認められた終点は、Ag₂CrO₄ が沈殿し始める点 (当量点) とは異なる。そこで、対照実験として、試料水溶液と同体積・同濃度の K₂CrO₄ 水溶液に炭酸カルシウムを添加し、下線部②の赤褐色を呈する直前の試料水溶液と同程度に濁った水溶液を用意した。 この濁った水溶液に、滴定に用いたものと同濃度の AgNO₃ 水溶液を滴下し、下線部②と同程度の呈色を認めるのに必要な AgNO₃ 水溶液の体積を求めた。 対照実験により補正を行った結果、当量点までに滴下した AgNO₃ 水溶液は 16.0 mL であることがわかった。実験はすべて 25 °C で行った。

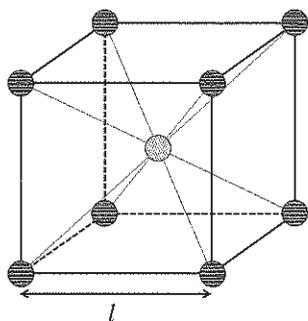
[問]

- ア この滴定実験は、試料水溶液の pH が 7 から 10 の間で行う必要がある。pH が 10 より大きいと、下線部③とは異なる褐色沈殿が生じる。この褐色沈殿が生じる反応のイオン反応式を答えよ。
- イ 本滴定実験に関連した以下の(1)~(5)の文のなかで、誤りを含むものを二つ 選べ。
- (1) 対照実験により得られた下線部④の値を、下線部②で赤褐色を呈するまでに滴下した AgNO_3 水溶液の体積より差し引くことにより、当量点までの滴下量を求めることができる。
 - (2) フッ化銀は水への溶解度が大きいため、本滴定実験は、フッ化物イオンの定量には適用できない。
 - (3) AgCl は、塩化ナトリウム NaCl 型構造のイオン結晶であるが、 NaCl とは異なり水への溶解度は小さい。これは、 Na と Cl の電気陰性度の差と比べて、 Ag と Cl の電気陰性度の差が大きいためである。
 - (4) 問アの褐色沈殿に水酸化ナトリウム水溶液を加えると、錯イオンが生成することにより沈殿が溶解する。
 - (5) 試料水溶液の pH が 7 より小さいと、 CrO_4^{2-} 以外に、クロムを含むイオンが生成するため、正確な定量が難しくなる。
- ウ 当量点において、試料水溶液中に溶解している Ag^+ の物質は何 mol か、有効数字 2 桁で答えよ。答えに至る過程も記せ。
- エ 当量点において、試料水溶液中のすべての Cl^- が AgCl として沈殿したと仮定し、下線部①の x を有効数字 2 桁で答えよ。答えに至る過程も記せ。
- オ 実際には、当量点において、試料水溶液中に溶解したままの Cl^- がごく微量存在する。この Cl^- の物質は何 mol か、有効数字 2 桁で答えよ。答えに至る過程も記せ。

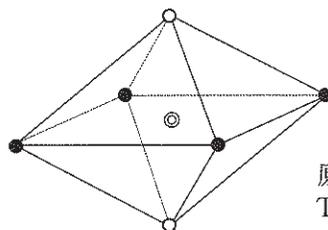
II 次の文章を読み、問カ～コに答えよ。

水素 H_2 は、太陽光や風力等の再生可能エネルギーにより水から製造可能な燃料として注目されている。燃料電池自動車は、 1.0 kg の H_2 で 100 km 以上走行できる。しかし、 1.0 kg の H_2 は 1 気圧 25°C における体積が $1.2 \times 10^4\text{ L}$ と大きいため、燃料として利用するには H_2 を圧縮して貯蔵する技術が必要となる。燃料電池自動車では、 1.0 kg の H_2 を $7.0 \times 10^7\text{ Pa}$ に加圧して 25°C における体積を 18 L にしている。 H_2 を輸送する際には、 -253°C に冷却して液化し、 1.0 kg の H_2 を 14 L にしている。また、炭化水素への可逆的な水素付加反応を用いて、 H_2 を室温で液体の炭化水素として貯蔵する技術も開発されている。たとえば、トルエンに水素を付加し、トルエンと同じ物質量のメチルシクロヘキサンを得る^⑤反応が用いられる。

1.0 kg の H_2 を適切な金属に吸蔵させると、液化した 1.0 kg の H_2 よりも小さな体積で貯蔵することができる。Ti-Fe 合金は、Fe 原子を頂点とする立方体の中心に Ti 原子が位置する単位格子を持つ(図 3-1)。この合金中で H_2 は水素原子に分解され、水素原子の直径以上の大きさを持つすき間に水素原子が安定に存在できる。このとき、6 個の金属原子からなる八面体の中心^⑥(図 3-2)に水素原子が位置する。

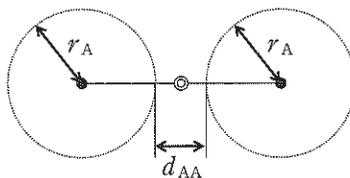


● Fe ● Ti
 図 3-1 Ti-Fe 合金の単位格子



● : 原子 A の中心
 ○ : 原子 B の中心
 ◎ : 八面体の中心
 原子 A, 原子 B はそれぞれ Ti, Fe のいずれかを表す

図 3-2 Ti-Fe 合金中で 6 個の金属原子からなる八面体



● : 原子 A の中心
 ◎ : 八面体の中心
 r_A : 原子 A の半径
 d_{AA} : 原子 A どうしの間隔

図 3-3 八面体の中心◎を中点とする原子 A どうしの間隔

〔問〕

- カ 下線部⑤に関して、1.0 kg の H_2 をトルエンとすべて反応させて得たメチルシクロヘキサンの 25 °C における体積は何 L か、有効数字 2 桁で答えよ。ただし、メチルシクロヘキサンの密度は 0.77 kg/L (25 °C) である。
- キ 下線部⑥に関して、Ti-Fe 合金の単位格子の一辺の長さ $l = 0.30$ nm, Ti の原子半径 0.14 nm, Fe の原子半径 0.12 nm のとき、図 3-2 の八面体において隣り合う原子 A と原子 B は接する。一方、図 3-3 に例を示す、八面体の中心◎を中点とする原子どうしの間隔(原子 A どうしは d_{AA} , 原子 B どうしは d_{BB}) は 0 より大きな値をとり、八面体の中心◎にすき間ができる。このとき、 d_{AA} , d_{BB} それぞれを l および原子 A, B の半径 r_A , r_B を用いて表せ。さらに、 d_{AA} , d_{BB} のどちらが小さいかを答えよ。
- ク 図 3-2 において、原子 A, B の組み合わせにより八面体は 2 種類存在し、このうち原子 A が Ti で原子 B が Fe である八面体の中心◎にのみ水素原子が安定に存在できる。この理由を、原子どうしの間隔と水素原子の大きさを比較して述べよ。ただし、Ti-Fe 合金中の水素原子の半径は 0.03 nm とする。
- ケ 原子 A が Ti である八面体の中心◎にのみ水素原子が 1 個ずつ吸蔵されるとき、Ti-Fe 合金中の水素原子の数は Ti 原子の数の何倍かを答えよ。
- コ La-Ni 合金(図 3-4)も H_2 を水素原子として吸蔵する。図中の面 α , β は、ともに一辺 a の正六角形である。この合金は金属原子 1 個あたり 1 個の水素原子を吸蔵した結果、 $a = 0.50$ nm, $c = 0.40$ nm となる。図 3-4 の結晶格子中に吸蔵される水素原子の数を答えよ。さらに、このように 1.0 kg の H_2 を吸蔵した La-Ni 合金の体積は何 L か、有効数字 2 桁で答えよ。

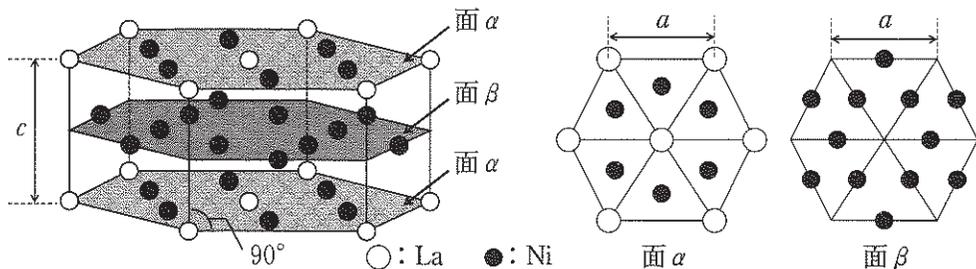


図 3-4 La-Ni 合金の結晶格子

地 学

第1問 宇宙に関する次の問い(問1～2)に答えよ。

問1 地球から天体までの距離を求めるには様々な方法がある。天体までの距離を求める方法について、以下の問いに答えよ。数値での解答には有効数字2桁で単位とともに答え、計算の過程も示せ。

(1) 太陽、金星、地球がほぼ一直線上に並ぶ位置にあるとき、地球上からは、太陽の表面に金星の影(太陽の光球を背景とした黒い円)を観測できる。ここでは簡単のため、これら3天体の中心が完全に一直線上に並んでいるとしよう。太陽と金星の間の距離は、太陽と地球の間の距離の0.72倍である。図1—1のように観測者Aは太陽、金星、地球の中心を結ぶ線分上に、観測者Bはその線分から垂直方向に直線距離 d 離れた場所にいるとする。観測者AとBは金星の影を同時に観測し撮影する。両者から見える太陽表面での影の中心位置は距離 D ずれている。観測者Aから太陽表面までの距離を L とする。ただし、天体間の距離は天体のサイズに比べて非常に大きい。

(a) 距離 D は d の何倍か求めよ。

(b) 観測者Bから送られてきた写真を、観測者Aが自分で撮影した写真と詳しく比較したところ、両者の観測した金星の影の中心位置は、図1—1のように角度にして θ ずれていた。距離 L を d と θ を用いて表せ。

(c) 距離 d が3000 kmのとき、 θ は $11''$ であった。この観測結果から、距離 L を求めよ。ただし、 $1''$ は 4.8×10^{-6} ラジアンとしてよい。また、必要であれば、 θ が微小の時、 $\tan \theta \approx \theta$ と近似してよい。

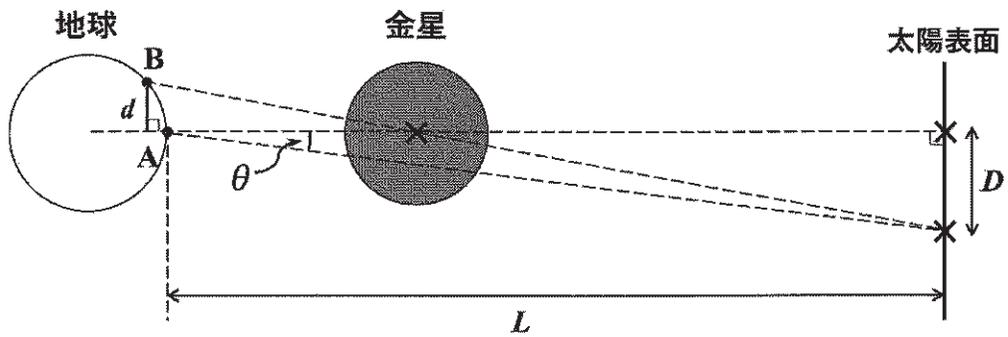


図1—1 金星の影の観測を表す模式図。天体間の距離は、実際には天体のサイズに比べて非常に大きい。

(2) 地球からある銀河までの距離は、その銀河内にある Ia 型超新星や脈動型変光星を観測することで推定できる。

(a) Ia 型超新星は、爆発に伴う急激な増光後、数十日かけて徐々に減光していくが、最も明るくなったときの絶対等級は -19.5 等であることが知られている。ある遠方の銀河で Ia 型超新星が観測され、最も明るくなったときの見かけの等級は 15.5 等であった。地球からこの銀河までの距離は何パーセクか推定せよ。

(b) 距離測定のための観測対象として Ia 型超新星と脈動型変光星を比較したとき、それぞれの利点として考えられることを 1～2 行ずつ述べよ。

問 2 ケプラーの法則に従って、太陽を焦点の1つとする軌道長半径 a 、離心率 e の楕円軌道を描く、公転周期 P の彗星があるとする。このとき、以下の問いに答えよ。なお、地球もケプラーの法則にしたがうものとし、その軌道長半径 a_E と公転周期 P_E に対して、 $K = a_E^3/P_E^2$ とする。

- (1) 彗星の公転周期 P を a 、 K を用いて表せ。
- (2) 太陽と彗星を結ぶ線分がある時間 τ (ただし、 $\tau < P$ とする) の間に通過する面積を S とするとき、 S/τ を a 、 e 、 K を用いて表せ。なお楕円の面積が $\pi\sqrt{(1-e^2)}a^2$ と書けることを用いてよい。
- (3) 図1—2の太線部分のように、近日点をはさんで角度 θ にわたって、この彗星の核から H_2O の氷が気化(蒸発)し、 H_2O ガスが放出されたとする。この過程で単位時間あたりに放出される H_2O 分子の個数 Q は、太陽に近いほど大きく、太陽と彗星の間の距離 r を用いて $Q = A/r^2$ (A は定数) と表せるとする。以下では図1—2の角度 θ にわたるガスの総放出量を、順を追って考える。
 - (a) ある微小な時間 Δt の間に、彗星の公転運動により太陽と彗星を結ぶ線分が $\Delta\theta$ だけ回転したとする。この Δt の間に線分の通過する面積が ΔS であったとして、この間の H_2O ガス放出量 $Q \Delta t$ を A 、 $\Delta\theta$ 、 Δt 、 ΔS を用いて表せ。ただし、ここでは Δt が十分小さいことを用いて $\Delta S = r^2 \Delta\theta / 2$ と近似すること。
 - (b) $r = 2.0$ 天文単位 のときに $Q = 2.0 \times 10^{27}$ 個/秒 だったとする。
 $a = 9.0$ 天文単位、 $e = 0.80$ 、 $\theta = 2\pi/3$ ラジアン として、角度 θ にわたる彗星の H_2O ガスの総放出質量を kg の単位で求めて有効数字 2 桁で答えよ。計算の過程も示すこと。ただし、 H_2O 分子 1 個の質量を 3.0×10^{-26} kg とする。また、ガスの放出に伴う彗星の軌道の変化は無視できるものとする。

- (4) 公転軌道を保って太陽に繰り返し接近する彗星では、近日点に近づくたびに H_2O の氷の気化(蒸発)によるガス放出が繰り返されるが、その放出量は長期的に減っていく傾向が想定される。そのように考えられる要因1つを1～2行で答えよ。

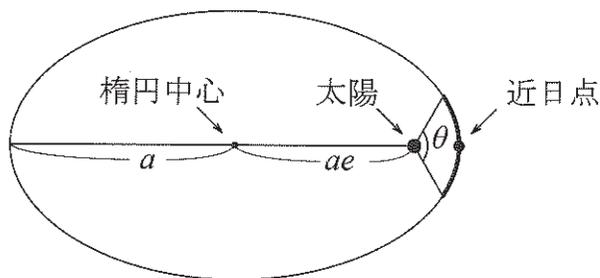


図1—2 彗星が描く楕円軌道と太陽の位置関係

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

第2問 大気と海洋に関する次の問い(問1～2)に答えよ。

問1 次の文章を読み、以下の問いに答えよ。

地表付近の水蒸気を含む未飽和の空気塊が上昇し続け、その間、周囲と熱のやりとりがないとすると、空気塊の温度は乾燥断熱減率にしたがって低下する。やがて空気塊の水蒸気が飽和に達すると、その後は高さとともに湿潤断熱減率にしたがって温度が低下する。最初に飽和に達する高さを(ア)といい、これは雲底の目安になる。

気温減率が乾燥断熱減率よりも大きい場合の大気の状態を(イ)といい、湿潤断熱減率よりも小さい場合を(ウ)という。その中間にある場合には、条件つき不安定という。このように、対流圏においては高さとともに気温が低下しているのが一般的だが、(エ)と呼ばれる、高さとともに気温が上昇する領域が形成されることもある。

- (1) 空欄(ア)～(エ)に入る適切な語句をそれぞれ答えよ。
- (2) 下線部について、どのような条件が満たされると不安定になるか、1行程度で説明せよ。
- (3) 図2—1の(a)と(b)のうち、積乱雲がより発生・発達しやすいと考えられるのはどちらか答えよ。また、その理由を3行程度で説明せよ。
- (4) 対流圏において空欄(エ)が形成される仕組みを2つ挙げ、それぞれ2行程度で説明せよ。

- (5) ある空気塊が、山頂の標高が 3000 m の山を越える場合を考える。標高 0 m の風上側山麓における空気塊の温度を $T = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、露点を $T_d = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ とし、空欄(ア)の高さ h (単位は m) は $h = 125(T - T_d)$ で与えられるとする。山頂を越えるときにちょうど雲が消失するとして、空気塊が標高 0 m の風下側山麓に達した時の温度を有効数字 2 桁で求めよ。ただし、乾燥断熱減率を $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 、湿潤断熱減率を $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ で一定とし、計算の過程も示すこと。

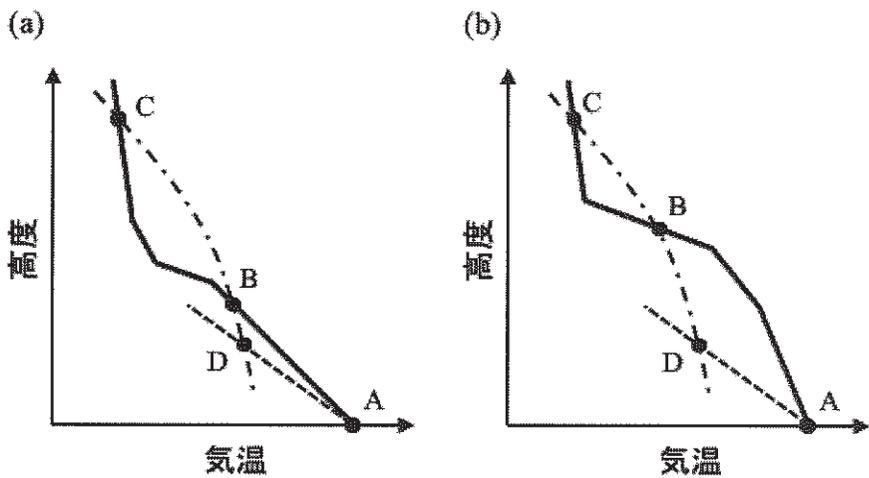


図 2—1 気温の高度分布の模式図。実線は観測された状態曲線(高度による気温変化)、破線は乾燥断熱線(乾燥断熱減率にしたがう気温変化)、鎖線は湿潤断熱線(湿潤断熱減率にしたがう気温変化)を表す。点 A, B, C, D はそれぞれ交点を表す。点 D は文中の空欄(ア)に相当し、点 A, C, D のそれぞれの高度および気温は(a)と(b)で等しい。

問 2 次の文章を読み、以下の問いに答えよ。

図 2—2 は長期平均した海面高度(ジオイド面からの海面高低差)分布である。海面高度の水平分布から、赤道付近を除き、大まかな海流の方向を推定^①することができる。日付変更線(経度 180 度)に沿う海面高度の緯度変化から、南緯 50~60 度に周囲の緯度帯に比べて速い海流が分布していることがわかる。^②

図 2—3 は、日付変更線付近の経度での水深 0~2000 m における、長期平均した水温の南北断面図である。南北 30 度付近で 10℃ 前後の等温線が下に凸^③の形状をしている。この構造は、海面直上の風によって引き起こされる海洋表層の沈降流と関係していると考えられている。北緯約 35 度から約 45 度にかけて、4℃ 以上の等温線が右上方向に傾いている。このことは、各水深で、北ほど冷たく高密度の海水が分布することを示している。この緯度帯での、各水深における海水圧力の南北勾配(絶対値)が、深くなるにつれて(大きく、小さく)^(ア)なることを考慮すると、海面で(東、西)^(イ)向きの海流は、深くなるにつれて(強く、弱く)なる、と推定できる。^(ウ)

- (1) 下線部①の海流の方向を推定できる理由について、2 行程度で説明せよ。
- (2) 下線部②の海流の名称を答えよ。また、周囲の緯度帯に比べて海流が速いと判断できる理由を 2 行程度で説明せよ。
- (3) 下線部③の沈降流が生じる理由を、上空の風の向きと強さに関連付けて、2 行程度で説明せよ。
- (4) 下線部(ア)~(ウ)に入る適切な語句を選択せよ。

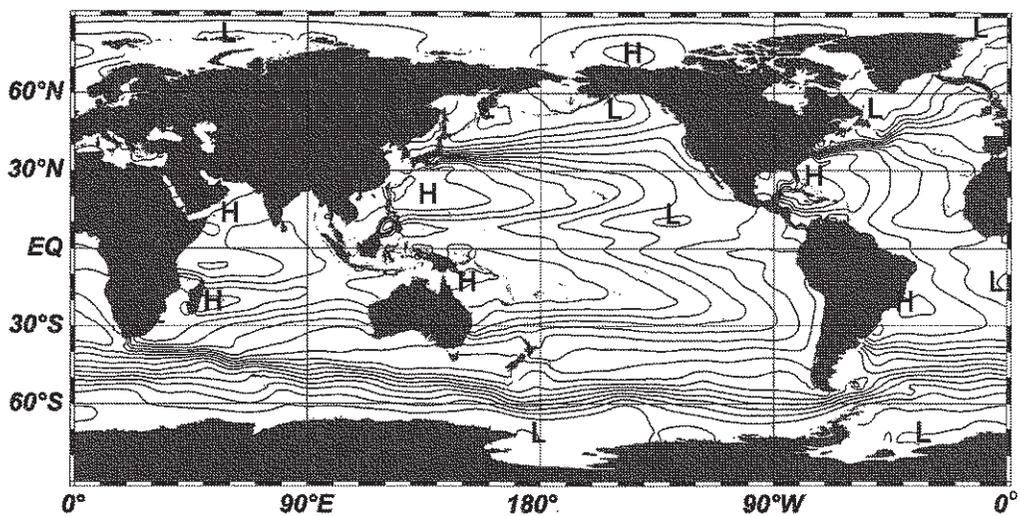


図 2—2 長期平均した海面高度分布(等値線間隔 0.1 m, H: 極大, L: 極小)

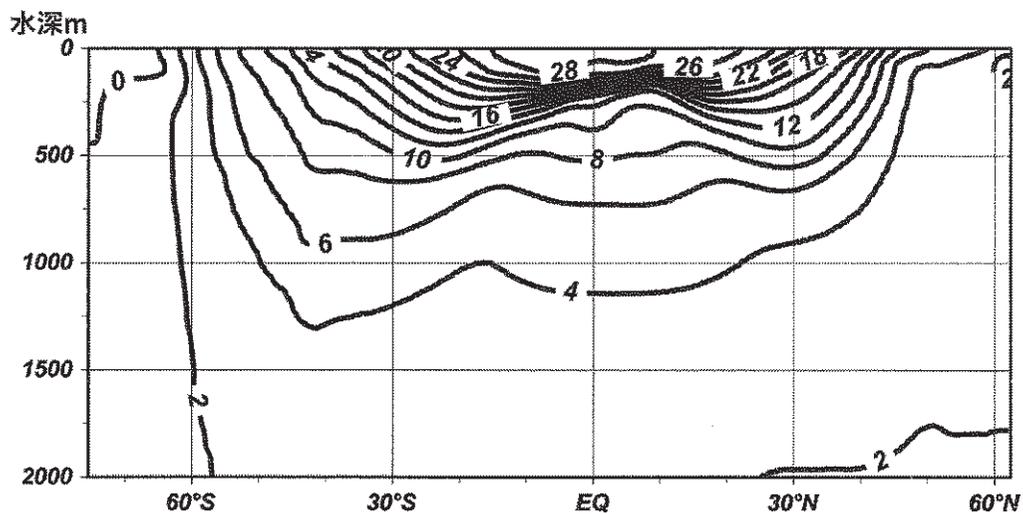


図 2—3 日付変更線(経度 180 度)付近を南北に横切る長期平均水温断面図(単位 °C, 等値線間隔 2 °C)

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

第3問 地球の形・地質・地震に関する次の問い(問1～3)に答えよ。

問1 地球の形に関する以下の問いに答えよ。

- (1) エラトステネスは地球が球形であると仮定し、ほぼ同じ経度にある2地点間の緯度差と距離から地球の全周の長さを求めた。その後、地球が赤道方向に膨らんだ回転だ円体に近いことが18世紀の幾何学的測量で確かめられた。どのような根拠に基づいてそのことが確かめられたのか、地球の断面図を描いて緯度の定義を示すとともに2行程度で説明せよ。
- (2) 地球の形は、地球を構成する物質による万有引力と自転による遠心力との合力である重力に垂直な地表面の形と考えることができる。
- (a) 北極と赤道において同一の振り子で測定した周期はどちらが何%短くなるか、計算の過程を示すとともに有効数字1桁で答えよ。簡単のため、地球は半径 6×10^3 km の球体で、万有引力だけにより生じる加速度の大きさ (10 m/s^2) は地球上のどこでも一定としてよい。また、測定環境は緯度によらず空気抵抗やコリオリ力も無視できるとする。遠心力により生じる加速度の大きさは、自転軸からの距離 r 、自転角速度 ω (ラジアン/s) を用いて $r\omega^2$ で与えられること、振り子の周期は重力加速度の大きさの平方根に反比例すること、微小量 Δ に対して $\sqrt{1-\Delta} \approx 1 - \frac{1}{2}\Delta$ が成り立つことを用いてよい。円周率は3とせよ。
- (b) ニュートンは、地球を構成する物質が一様な密度をもった流体である場合に地球の形が回転だ円体になることを示し、その偏平率として $1/230$ を得た。一方、ホイヘンスは地球中心に地球の質量が集中していると仮定して地球の形を求め、その偏平率として $1/578$ を得た。現実の地球の赤道半径は約 6378 km、極半径は約 6357 km である。現実の地球の偏平率と、ニュートンとホイヘンスが求めた2つの偏平率の大小関係を、地球の内部構造と関係付けて2行程度で説明せよ。

(3) 近年の観測の結果、地球表層の質量分布の変化によって地球の形が時間的にも変動することがわかってきた。広域的な質量分布の変化を引き起こす現象の一つに氷床の変動がある。第四紀には、数万年～10万年程度の周期で氷期・間氷期が繰り返した。最終氷期に厚さ最大数 km の氷床で覆われていた北極域周辺の陸域では、浅瀬に生息する貝類の化石に基づいて過去の海面の高さが復元されている。図3—1は、約1万年前から現在までのそれらの化石の年代と採取地の現在の標高を示す。図から読み取れることと、その原因として考えられることを、下記の語句をすべて用いてあわせて5行程度で説明せよ。ただし、グラフの傾きがしだいにゆるやかになっている点は考慮しなくてよい。

語群：最終氷期、急速な融解、アイソスタシー、アセノスフェア

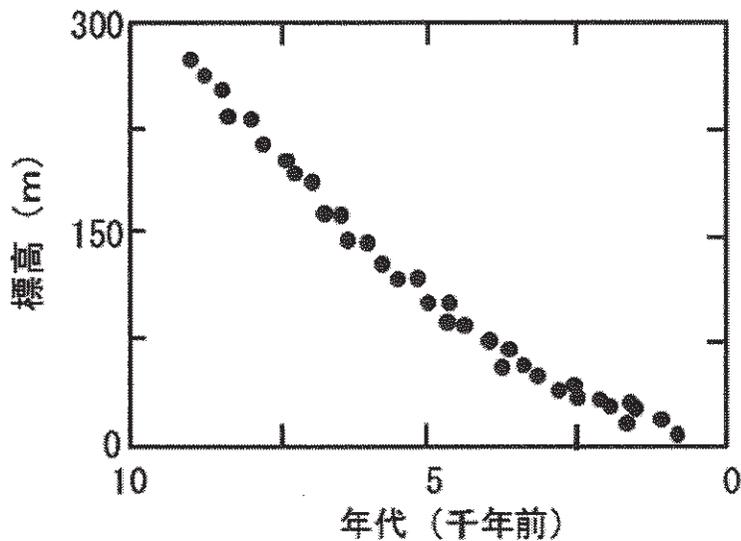


図3—1 北極域周辺の陸域における貝類の化石の年代と採取地の現在の標高

問 2 地質に関する以下の問いに答えよ。

図 3—2 は、ある場所における露頭の地質スケッチである。ただし、**D**層より上位の各堆積岩については、整合的に堆積したことが観察されている。

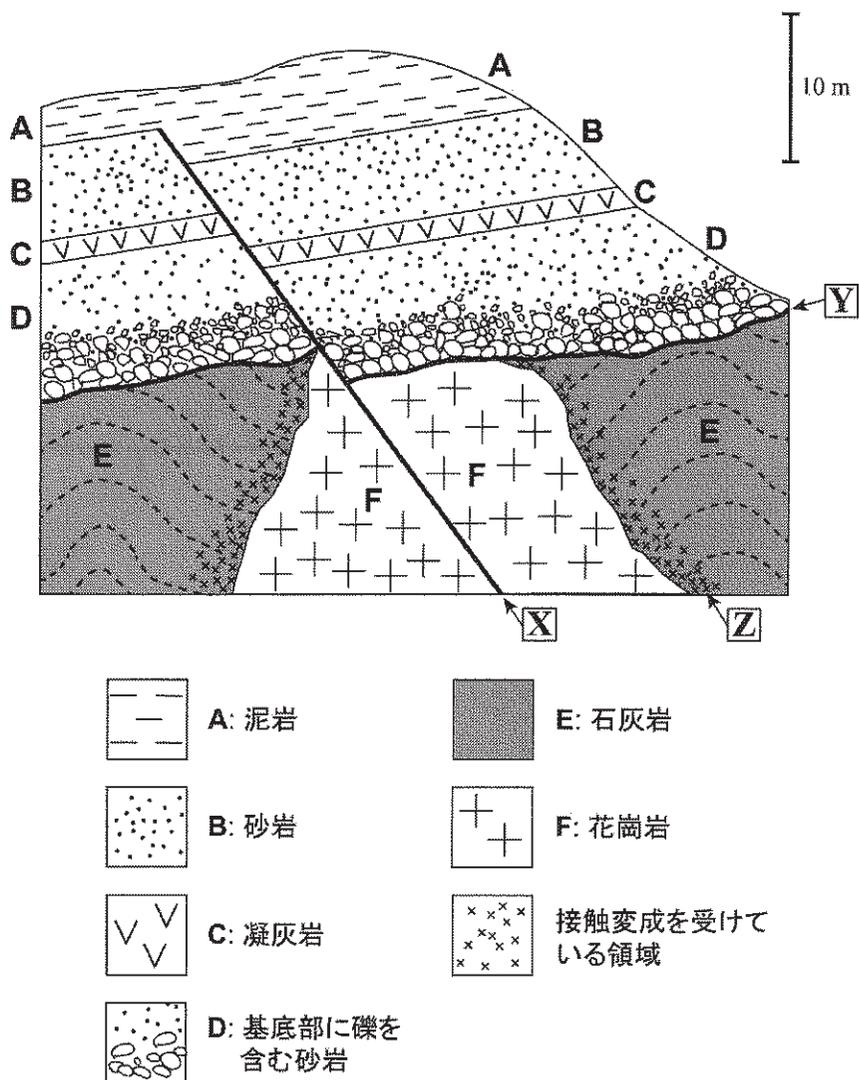


図 3—2 ある露頭の地質スケッチ。なお石灰岩中に見られる破線は、層理面を示す。

(1) 境界 **X** と **Y** をそれぞれ何と呼ぶか答えよ。また、**Z** において形成された接触変成岩の名称を答えよ。

(2) **F** の花崗岩から黒雲母を取り出し、K-Ar(カリウム-アルゴン)法によって放射年代を測定した。分析の結果、**F** の形成時にあった ^{40}K の 10% が壊変(崩壊)して ^{40}Ar 等の安定な同位体になっていたことがわかった。 ^{40}K の半減期を 13 億年とすると、**F** は何年前に形成されたものか、計算式を示し、有効数字 2 桁で答えよ。必要であれば、 $\log_{10} 2 = 0.30$ 、 $\log_{10} 3 = 0.48$ を用いてよい。

(3) **A**、**B**、**C**、**D** には化石が含まれていなかったため、どの地質年代に属するのかが不明であった。しかし、**C** は他の露頭でも認められ、その露頭では 化石を含む堆積岩層には含まれていた。その化石によって、**C** の年代がわかり、**B** と **D** のおおよその年代も推定することができた。

(a) 下線部の化石として適当なものを 1 つ選べ。

- | | |
|-----------|----------------|
| ① アノマロカリス | ② フズリナ |
| ③ 三葉虫 | ④ ヌンムリテス(カヘイ石) |

(b) **C** のように、地層の対比に重要な役割を果たす地層を鍵層と呼ぶ。鍵層として用いることができるために望ましい地層の特徴を 2 つ挙げよ。

(4) 設問(1)~(3)の情報をふまえ、図 3-2 の露頭から読み取れる、過去から現在に至る地層形成や地殻変動の歴史を、下記の語をすべて用いて 3 行程度で述べよ。なお、石灰岩は古生代に形成されたものとする。

語群：貫入、新生代、褶曲

問 3 地震に関する以下の問いに答えよ。

地下のマグマの動きによって生じた地震活動を地表に置かれた2つの地震計で観測した。図3-3に示すように、観測点Qの直下で発生した地震から放射されたP波を観測点Qと観測点Rで記録した。震源、観測点Q、観測点Rを通る鉛直断面の2次元座標系を考え、 x 軸を水平方向にとり、 z 軸は地表をゼロとし鉛直下向きを正として定義する。なお、地表面は水平であるとし、また、地下のP波速度は一定とする。観測点Qを原点 $(0, 0)$ 、観測点Rの位置を $(r, 0)$ 、震源の位置を $(0, z_0)$ 、P波速度を v とする。

- (1) 震源から観測点QまでのP波の走時を t_Q 、震源から観測点RまでのP波の走時を t_R とおく。P波の走時差 $(t_R - t_Q)$ を r, z_0, v を用いて式で表せ。
- (2) 震源が z 軸に沿って浅い場所から深い場所へ移動すると、P波の走時差 $(t_R - t_Q)$ はどのように変化するか。震源の深さを横軸に、P波の走時差 $(t_R - t_Q)$ を縦軸にとってグラフを描いて1行程度で説明せよ。
- (3) P波の走時差 $(t_R - t_Q)$ が設問(2)のような変化を示す理由を、波の伝わる様子と関係付けて、3行程度で述べよ。

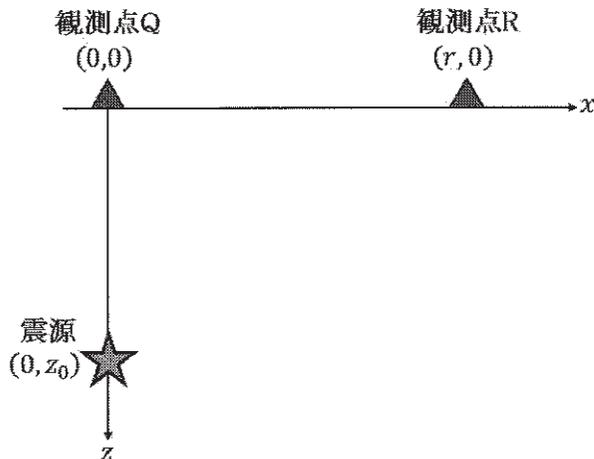


図3-3 震源、観測点Q、観測点Rを通る鉛直断面

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)