

2025年8月7日

令和8年度 (令和7年10月入学を含む)
北海道大学大学院理学院自然史科学専攻
(地球惑星ダイナミクス講座, 地球惑星システム科学講座,
および 地震学火山学講座)
博士前期(修士)課程入学試験

専門科目試験問題
試験時間 9:00 ~ 12:00

以下の注意事項をよく読むこと。

1. 問題冊子1冊(この冊子), 解答用紙6枚, 草案紙2枚を配布する。
2. 専門科目試験の問題は, I 数学, II 物理学, III 地球科学I (地球史, 堆積学, 地球惑星化学), および IV 地球科学II (岩石学・鉱物学・火山学) の4分野から出題される。このうち, 出願時に申請した2分野を必ず選択して解答せよ。
3. 各分野の出題は, 例えば II-1, II-2 のように, いくつかの問題からなる。解答の方法については, 各分野の問題に与えられている指示をよく読むこと。
4. 解答は, II-1, II-2 などの問題ごとに別々の解答用紙(1枚)を用い, 指定された欄に, 数学などの科目名, II-1 のように問題番号, そして受験番号を記入すること。氏名は記入しないこと。
5. 解答は解答用紙の裏面に及んでもよい。ただし, 一つの問題には1枚の解答用紙のみを用いること。
6. 草案紙が足りないときは, 試験監督者に申し出ること。
7. 解答用紙は選択した分野ごとに回収する。回収する解答用紙の枚数は, 分野I, II, IIIは3枚ずつ, 分野IVは2枚である。解答の如何に関わらず受験番号を記入し, これらの枚数の解答用紙を必ず提出すること。なお, 3分野以上にわたって提出しないこと。
8. 問題冊子と草案紙, および使用しなかった解答用紙は持ち帰ってもよい。
9. 試験時間が終了し, 監督員の指示があるまで退出することはできない。試験時間中, トイレや体調不良がある受験生は挙手の上, 監督員に知らせること。

I 数学

以下の3問 (I-1, I-2, I-3) すべてに解答せよ. 解答にあたっては, 結果だけでなく導出過程も記せ.

I-1 (必須) 以下の問題に解答せよ.

x, y, z に関する連立方程式

$$\begin{cases} x - y + z = 1 \\ x + y + z = -1 \\ -x + y - z = 0 \\ x - y - z = 2 \end{cases}$$

がある. この連立方程式を $\mathbf{G}\mathbf{m} = \mathbf{d}$ の形式で表せば, \mathbf{G} は係数行列, \mathbf{d} は右辺を表す列ベクトル, \mathbf{m} は未知数の列ベクトル

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

である.

問題1 \mathbf{G} の転置行列を \mathbf{G}^t とするとき, $\mathbf{G}^t\mathbf{G}$ を求めよ.

問題2 $\mathbf{G}^t\mathbf{G}$ の固有値と大きさ1の固有ベクトルをすべて求めよ.

問題3 $f(x, y, z) = (\mathbf{d} - \mathbf{G}\mathbf{m})^t(\mathbf{d} - \mathbf{G}\mathbf{m})$ とするとき, 以下の問いに答えよ.

問1 $f = a_1x^2 + a_2y^2 + a_3z^2 + a_4xy + a_5xz + a_6x + a_7y + a_8z + a_9$ と表せ.
ただし $a_1 \sim a_9$ は実数とする.

問2 f を最小にする x, y, z を求めよ.

問3 $f(x, y, z) = a_9$ を満たす面を考える. 原点 $(0, 0, 0)$ において, この面の法線ベクトルを求めよ. ただし大きさは1とする.

I - 2 (必須) 以下の問題に解答せよ.

x を実数, z を複素数, i を虚数単位とする.

問題 1 次の問いに答えよ. ただし, n は整数である.

問1 $e^{ix} = -1$ を満たす x を求めよ.

問2 $\cos nx + i \sin nx = (\cos x + i \sin x)^n$ を示せ.

問題 2 関数 $f(z)$ を次のように定義する.

$$f(z) = \frac{1}{z^2 - 2az + a^2 + 1}$$

a は正の実数とする. 以下の問いに答えよ.

問1 関数 $f(z)$ の特異点をすべて求めよ. また a が 1 のとき, それらの複素平面における座標を図示せよ.

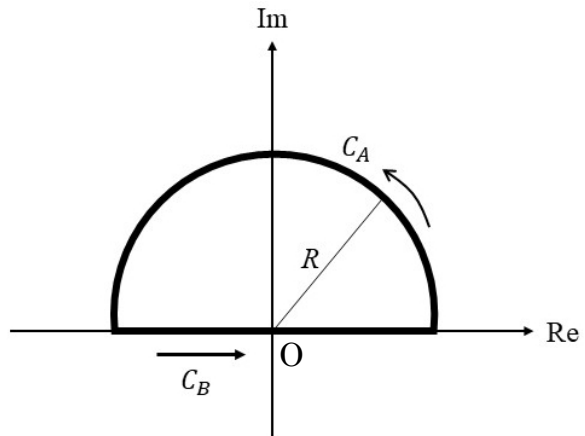
問2 複素平面において, 半円上の積分路 C_A および実軸上の積分路 C_B からなる閉曲線 C を下図のように定義する. ただし, 半円の半径 R は $\sqrt{a^2 + 1}$ より大きいとする. 閉曲線 C の内側に存在する関数 $f(z)$ の特異点について, 留数を求めよ.

問3 次の周回積分を計算せよ.

$$\oint_C f(z) dz$$

問4 次の積分を求めよ.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{x^2 - 2ax + a^2 + 1} dx$$



なお, 以下を用いて良い.

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \int_{C_A} f(z) dz = 0$$

I - 3 (必須) 以下の問題に解答せよ.

問題 1 関数 $f(x) = \log(x + 1)$ (ただし, $x > -1$) について, 以下の問いに答えよ.

問 1 関数 $f(x)$ の一階微分, 二階微分, n 階微分を求めよ. ただし, n は正の整数である.

問 2 $f(x)$ のマクローリン展開を, 総和記号 (Σ 記号) を用いて表せ.

問 3 n 番目の項が a_n である級数は, $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| < 1$ であれば収束する. 問 2 のマクローリン展開の収束半径を求めよ.

問 4 次の関数のマクローリン展開を求めよ.

$$\int_0^x f(t) dt$$

問題 2 次の級数は収束半径内において, ある関数 $h(x)$ のマクローリン展開となっている. $\frac{1}{1-x}$ のマクローリン展開が $\sum_{n=0}^{\infty} x^n$ になることを用いて $h(x)$ の展開前の表現を求めよ.

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{x^n}{n(n-1)}$$

II 物理

以下の3問(II-1, II-2, II-3)すべてに解答せよ. 解答にあたっては, 結果だけでなく導出過程も記せ.

II-1 (必須) 以下の問題に解答せよ.

剛体に固定された直交座標系 x, y, z を考えると剛体の z 軸周りの慣性モーメントは, $\int_V \rho(x, y, z)(x^2 + y^2)dV$ と書ける. ここで, V は剛体の体積, $\rho(x, y, z)$ は剛体の密度である.

問題1 以下の文章を読み, 空欄に当てはまる語句または式を答えよ.

半径 R_0 , 高さ h , 密度 ρ 一様で質量 M の円柱 A (図1) を考える. 図1の z 軸周りの慣性モーメント I_{zA} は円筒座標系 r, θ, z を用いて以下のように計算できる.

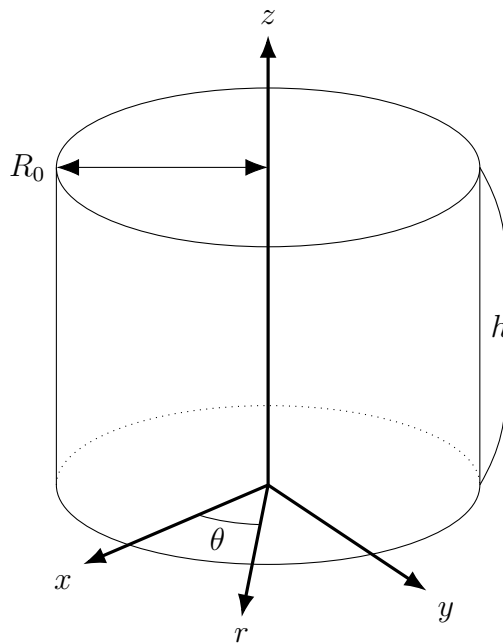


図1: 円柱 A

$$I_{zA} = \rho \int_{\text{イ}}^{\text{ア}} \text{ウ} dr \int_{\text{オ}}^{\text{キ}} d\theta \int_0^h dz$$

$$= \text{カ} M$$

円柱 A が水平からの角度 α の坂を滑らずに転がる場合を考える (図 2) . 斜面と平行な向きに X 軸を取り, 円柱の底面の中心の X 座標を X_C とする. 円柱の回転角を ϕ とする. 鉛直下向きに重力が働き, その重力加速度を g とする. 転がり摩擦は無視できるものとする.

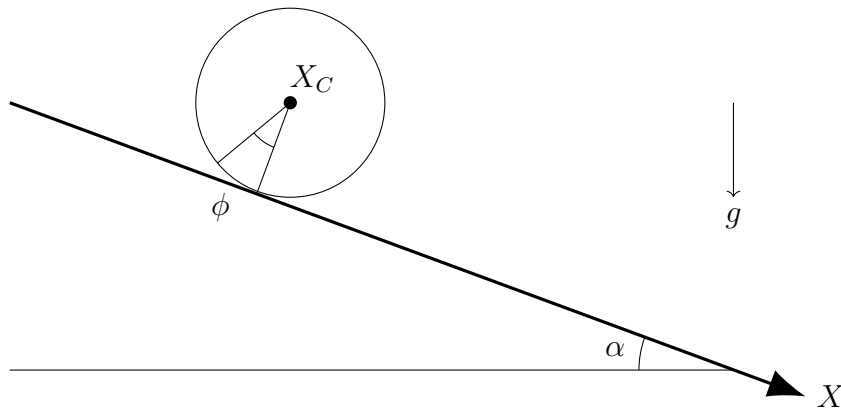


図 2: 斜面上を転がる円柱

$X = 0$ を重力の位置エネルギーの基準にするとラグランジアン L は

$$L = \text{キ} \left(\frac{dX_C}{dt} \right)^2 + \text{ク} M \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 + \text{ケ} \sin \alpha$$

$$= \text{コ} \left(\frac{dX_C}{dt} \right)^2 + \text{ケ} \sin \alpha$$

となり, 運動方程式は,

$$\text{サ} \frac{d^2 X_C}{dt^2} - \text{シ} = 0$$

となる.

問題 2 以下の文章を読み, 空欄に当てはまる語句または式を答えよ.

質量 M , 半径 R_0 で半径 r_0 までが空洞の円柱 B (図 3, 半径 r_0 から R_0 までの密度は一様とする) と, 質量 M の液体で満たされ, 半径 R_0 で円筒自体の重さは無視できる円筒 C (図 4) を考える. 円筒 C における液体と円筒の摩擦は無視できるものとする.

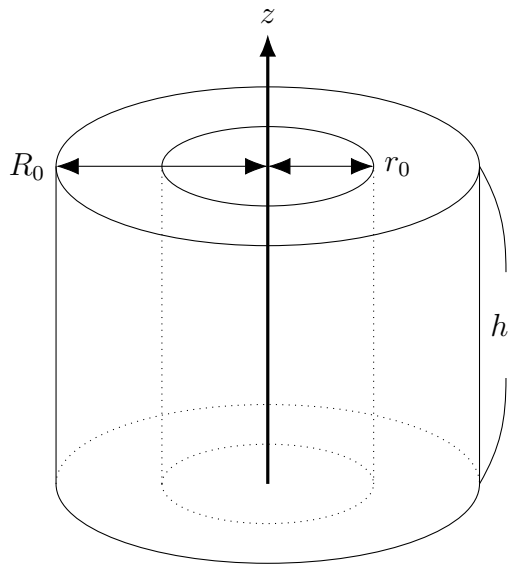


図 3: 円柱 B

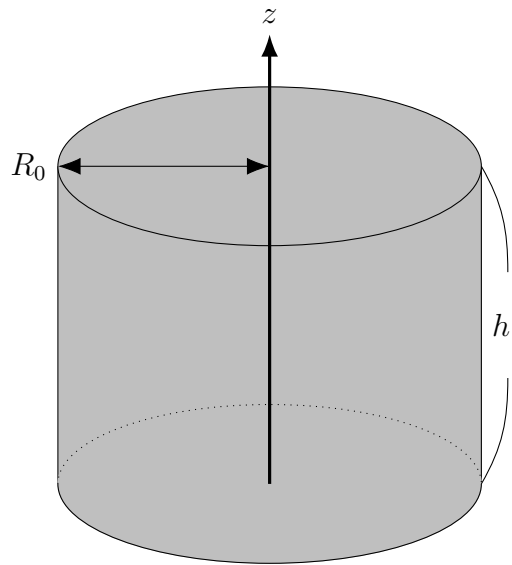


図 4: 円筒 C

円柱 B, 円筒 C それぞれの, 図 3, 図 4 の z 軸周りの慣性モーメント I_{zB}, I_{zC} は,

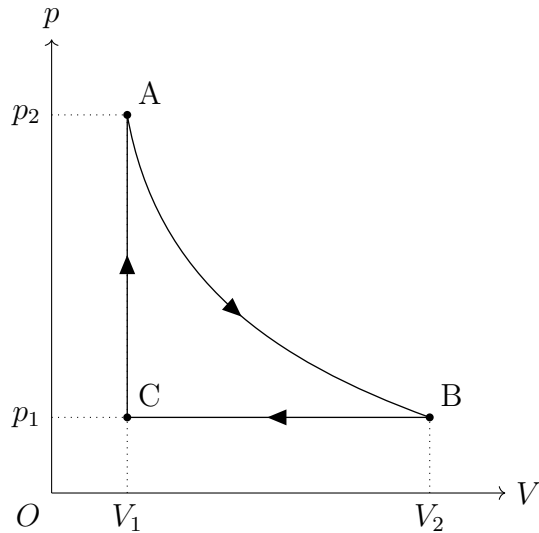
$$I_{zB} = \boxed{\text{ス}} M$$

$$I_{zC} = \boxed{\text{セ}}$$

となり, I_{zA}, I_{zB}, I_{zC} の大小関係は, $\boxed{\text{ソ}} > \boxed{\text{タ}} > \boxed{\text{チ}}$ である. よって, これらの円柱・円筒を図 2 の坂の同じ位置から同時に滑らかに転がしたとき, 同じ時刻 t_0 における速度は, $\boxed{\text{ツ}} > \boxed{\text{テ}} > \boxed{\text{ト}}$ (円柱 A・円柱 B・円筒 C のいずれかを入れよ) となる.

II - 2 (必須) 以下の問題に解答せよ.

図に示すサイクルにおける1モルの理想気体について考える. 横軸は体積 V , 縦軸は圧力 p である. 温度を T で表す. なお, R を気体定数とする. 1モルあたりの定圧比熱を C_p , 定積比熱を C_v とし, それぞれに一定値をとる.



問題1 図における全ての変化が準静的におこるとする. 状態Aから状態Bへの変化を断熱変化とし, 以下の問いに答えよ.

問1 状態Aから状態Bへ変化した場合の内部エネルギーの変化量 ΔU を求めよ.

問2 図の1サイクルの変化から $C_p - C_v = R$ を示せ.

問3 断熱変化について, $TV^{\gamma-1}$ が一定となることを示せ. なお, $\gamma = C_p/C_v$ である.

問題2 状態Aにある気体を体積 V_2 まで断熱自由膨張させた. このときの圧力を p'_1 とする. 以下の問いに答えよ.

問1 内部エネルギーの変化量 ΔU を求めよ.

問2 p_1 と p'_1 の大小関係を示せ.

II-3 (必須) 以下の問題に解答せよ.

真空中の誘電率を ϵ_0 , 真空中の透磁率を μ_0 とする.

問題 1 一辺が a の正方形の導体板を真空中に置き, これに電荷 Q を与えた ($Q > 0$). 導体板から垂直な方向に距離 r だけ離れた電場の大きさ E を, Q , a , ϵ_0 を用いて求めよ.

問題 2 図 1 のように, 問題 1 の導体板 2 枚を距離 d だけ隔てて平行に置き, 導体板 A に電荷 Q を, 導体板 B に電荷 $-Q$ を与えた. この平板コンデンサーについて以下の問いに答えよ. $a \gg d$ とし, 導体板の厚さは無視できるとする.

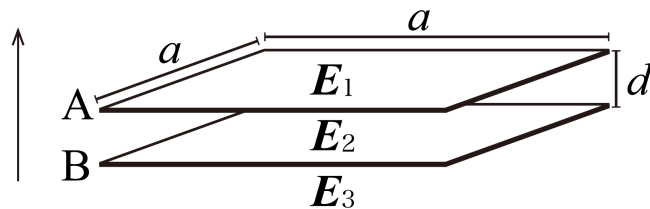


図 1 : 平板コンデンサー

問 1 図中の矢印の向きを正として, 導体板 A の上方, 導体板 A と B の間, 導体板 B の下方の電場ベクトル E_1 , E_2 , E_3 をそれぞれ求めよ.

問 2 導体板 B に対する導体板 A の電位 V を求めよ.

問 3 このコンデンサーの静電エネルギーが $\frac{QV}{2}$ になることを示せ.

問題 3 問題 2 で設置した平板コンデンサーに対し, 両導体板をその間を経由しない経路で銅線により接続する. 以下の問いに答えよ.

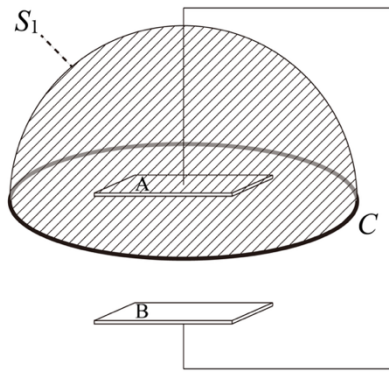


図 2 : 曲面 S_1

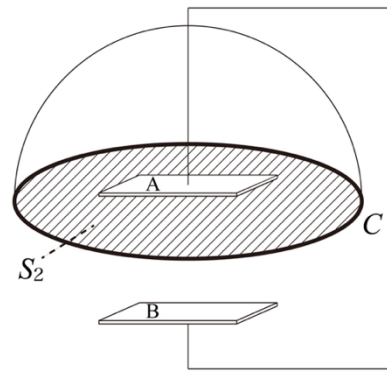


図 3 : 底面 S_2

問 1 以下の文章中の式の空欄 (ア) から (ウ) に当てはまる式を, ϵ_0 , μ_0 , I , および数字を用いて答えよ.

銅線で接続するふたつの導体板のうち, 導体板 A 全体を包む閉曲面 S を考える. S は半球の曲面 S_1 (図 2) と底面 S_2 (図 3) からなり, これらは底面の外周 C を共通の境界線に持つ. 導線に流れる電流を I , 作られる磁束密度を \mathbf{B} として, C と S_1 に対して静磁場に関するアンペールの法則を適用すると,

$$\int_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \text{(ア)}$$

となる. 一方で, C と S_2 に対しては,

$$\int_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \text{(イ)}$$

となる. (ア) と (イ) は一致しないが, 左辺は共通であるので, これは矛盾である.

次に, アンペールの法則に変位電流の項を追加した, アンペール・マクスウェルの法則

$$\int_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \mu_0 \left(\text{(ウ)} + \epsilon_0 \int_{S'} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \right)$$

において, C を境界とする曲面 S' として S_1 または S_2 を選んだ場合を考える. S_1 に対しては, アンペールの法則と同じ結果が得られる. S_2 に対しては以下の式が得られる.

$$\int_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_{S_2} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$$

問 2 $\mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_{S_2} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$ が (ア) に等しくなることを示せ.

Ⅲ 地球科学 I

以下の3問（Ⅲ－1，Ⅲ－2，Ⅲ－3）すべてに解答せよ。

Ⅲ－1（必須） 以下の文章を読み，問題に解答せよ。

ある地域で凝灰岩層 X と Y を挟む一連の (a) ハイパーピクナイト を含む堆積物の調査を行った。凝灰岩層 X は地点 A と C とに露出し，地点 A での走向・傾斜は N60E45NW であった。一方，地点 C での凝灰岩層 X の走向は地点 A と同じで，その走向・傾斜に基づくと図 1 に示すような露頭線が描けた。また，地点 C の真北に 40 m の位置にある地点 D では，凝灰岩層 Y が観察された。なお，解答する上で，凝灰岩層の層厚は無視してよい。また，必要に応じて次の値を使用してもよい。

$$\sqrt{2} = 1.4, \sqrt{3} = 1.7, \sqrt{5} = 2.2$$

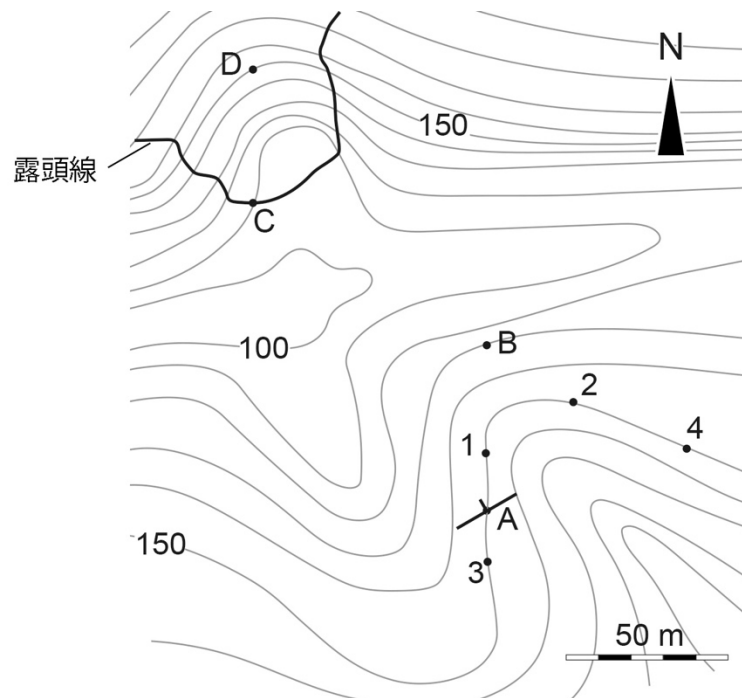


図 1 地点 C 付近の凝灰岩層 X の分布（露頭線）および調査地点の位置。
等高線上の数字は標高 (m) を表す。

問題 1 地点 A から真北に 50 m 離れた地点 B においてボーリング調査を行った。このとき，凝灰岩層 X は地表から何メートル下に現れるか，有効数字 2 桁で答えよ。

- 問題 2 凝灰岩層 Y は凝灰岩層 X の何メートル上位，あるいは何メートル下位にあるか，有効数字 2 桁で答えよ．なお，地点 C と D とにおける走向・傾斜は同じで，傾斜はある方位に 60 度であった．
- 問題 3 凝灰岩層 X と Y との間にある堆積物の厚さは，地点 A 付近でも地点 C, D 付近と同じだった．このとき，凝灰岩層 Y が観察される地点を図 1 の 1～4 からすべて選び，答えよ．なお，地点 1 は地点 A の真北に 16 m, 地点 3 は地点 A の真南に 16 m の位置にある．
- 問題 4 下線部 (ア) のハイパーピクナイトとはどのようなものか，50 字程度で説明せよ．
- 問題 5 下線部 (ア) に関連して，この堆積物の上下判定を行う方法を 30 字程度で 1 つ答えよ．

III-2 (必須) 以下の文章を読み、問題に解答せよ。

地質学的証拠から、過去に二度の急激な大気酸素濃度の上昇期があった。最初の上昇期は (a)ある生物のはたらきに起因するもので、それまで海水中に溶け込んでいた二価の鉄イオン (Fe^{2+}) は酸化され (ア) として沈殿し、縞状鉄鉱床を形成した。海水中の鉄が酸化されつくした後に、酸素は大気に放出され、約 25～20 億年前に最初の大気酸素濃度の上昇イベントである (イ) が起こった。その後、約 7～5 億年前に発生した二度目の酸素濃度上昇イベント (ウ) を経て、ほぼ現在の酸素濃度になった。また、約 23 億年前や約 7 億年前には (b)地球表面の大部分が氷に覆われる (エ) が起こった。その後、古生代に入ると (c)「カンブリア爆発」 と呼ばれる複雑な体構造を持った多様な生物が出現するイベントがあった。

問題 1 文章中の空欄 (ア) ～ (エ) にあてはまる適切な語句を答えよ。

問題 2 下線部(a)について、生物名とその生物活動に伴って生成された縞状構造をもつ岩石の名称を答えよ。また、なぜそのような構造をなすのか 100 字程度で説明せよ。

問題 3 下線部(b)について、地質学的証拠の一つとして世界各地でこの時代の氷河性堆積物が見つかっている。その具体的な氷河性堆積物の名称を答えよ。

問題 4 下線部(b)について、形成された氷河性堆積物の直上にはキャップカーボネートと呼ばれる炭酸塩堆積物が形成されている場合が多い。これは氷床の消失の際に急速に堆積したものだと考えられている。このようなキャップカーボネートの成因について、以下の語句を全て用いて 100 字程度で説明せよ。

語句：氷床，二酸化炭素，炭酸塩

問題 5 下線部(c)について，かつてはカンブリア爆発は，突如生物種や数が増大した爆発的多様化の現象であると考えられていたが，現在ではこの急激な多様化の度合いは過大評価されており，緩やかな進化の一部を見ているだけの可能性が指摘されている．その理由を 80 字程度で説明せよ．

Ⅲ－3（必須）以下の文章を読み、問題に解答せよ。

(a)太陽のような質量をもつ恒星は、その一生の大部分を（ア）星として過ごす。この段階では、(b)恒星中心部で水素の核融合反応によりヘリウムが生成される。やがて中心部では水素が枯渇し始め、ヘリウムの中心核が形成される。恒星の温度が上昇することで、外層は膨張し（イ）星となる。水素燃焼殻での核融合反応によりヘリウム核が質量を増し、重力収縮が進行することで中心温度が1億 K を超えると、(c)3 個の ${}^4\text{He}$ から ${}^{12}\text{C}$ 原子核がつくられる（ウ）反応が開始する。さらに炭素・酸素の中心核が形成され、その周りでの高温のヘリウム燃焼殻における核反応により自由中性子が供給されると、(d)s プロセスと呼ばれる中性子捕獲反応による元素合成がおこなわれる。

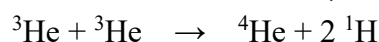
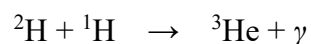
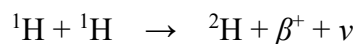
問題 1 空欄（ア）～（ウ）に当てはまる適切な語句を答えよ。

問題 2 下線部(a)について、太陽のような（ア）星が、数十億年もの長期間にわたり安定して輝き続けることができるのはなぜか。理由を1つ挙げ、50 字程度で説明せよ。

問題 3 表にいくつかの核種の質量を示す。1 amu（原子質量単位）の質量がエネルギーに変換されると 932 MeV のエネルギーが放出されることとする。以下の問いに答えよ。

核種	質量（原子質量単位; amu）
${}^1\text{H}$	1.00782503223
${}^2\text{H}$	2.01410177812
${}^3\text{He}$	3.01602932007
${}^4\text{He}$	4.00260325413

問 1 下線部(b)について、太陽での主要な陽子－陽子連鎖反応（pp-1 チェイン）では、下記の一連の反応により水素からヘリウムが生成される。



なお、 β^+ 、 ν 、 γ はそれぞれ陽電子、ニュートリノ、光子である。この連鎖反応において、 ${}^4\text{He}$ が1原子生じる際に放出されるエネルギー（MeV）を有効数字2桁で答えよ。導出過程も示すこと。

- 問 2 下線部(c)の反応過程において、 ^{12}C が 1 原子生じる際に放出されるエネルギー (MeV) を有効数字 2 桁で答えよ。導出過程も示すこと。
- 問題 4 下線部(b)について、水素燃焼の CNO サイクルは、ビッグバン以降の第 1 世代の星では起こらない。その理由を 50 字程度で説明せよ。
- 問題 5 下線部(d)について、恒星進化末期におこなわれる中性子捕獲反応の s プロセスと r プロセスの違いを 100 字程度で説明せよ。

IV 地球科学 II

以下の2問 (IV-1, IV-2) すべてに解答せよ.

IV-1 (必須) 以下の問題に解答せよ.

問題1 以下の文章を読み, 問いに答えよ.

放射性核種は, 地球惑星科学に関わる様々な現象の年代測定に活用される. U-Pb系において, 親核種の一つである ^{238}U は, (ア)回の α 壊変および6回の β 壊変を経て安定な ^{206}Pb に至る. 時間 $t=0$ における ^{238}U の個数を $^{238}\text{U}_0$ とし, 壊変定数を λ_{238} とすると, $t=T$ における ^{238}U の個数は(イ)となる. これを用いて $t=T$ における ^{206}Pb の個数を表し, さらに放射性起源ではない ^{204}Pb を分母にとると, 時間 $t=T$ における $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比(個数比)は, 以下の式で与えられる.

$$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_0 + \frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} (e^{\lambda_{238}T} - 1) \quad (1)$$

ここで $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_0$ は, $t=0$ における初生比である. 例えば対象試料の鉛同位体比の初生値が既知であり, さらに試料について(ア)ある条件が満たされている場合, 試料の現在の $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比と $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 比を測定することにより, $t=0$ から現在までの経過時間を得ることができる.

U-Pb系においては, もう一つの親核種である ^{235}U が複数回の α 壊変と β 壊変を経て安定な ^{207}Pb に至る. ^{235}U の壊変定数を λ_{235} とすると, 時間 $t=T$ における $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比は, 以下の式で表わされる.

$$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_0 + \frac{^{235}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} (e^{\lambda_{235}T} - 1) \quad (2)$$

ここで $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_0$ は, $t=0$ における初生比である. 地球上における現在の $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ 比が一定であるとみなして式(1)と式(2)を結合させることにより, 地球(bulk Earth), 岩石, 鉱物などについて, μ 値(= $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$)を変数とする同位体比進化曲線を $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 図上で表すことができる(図1).

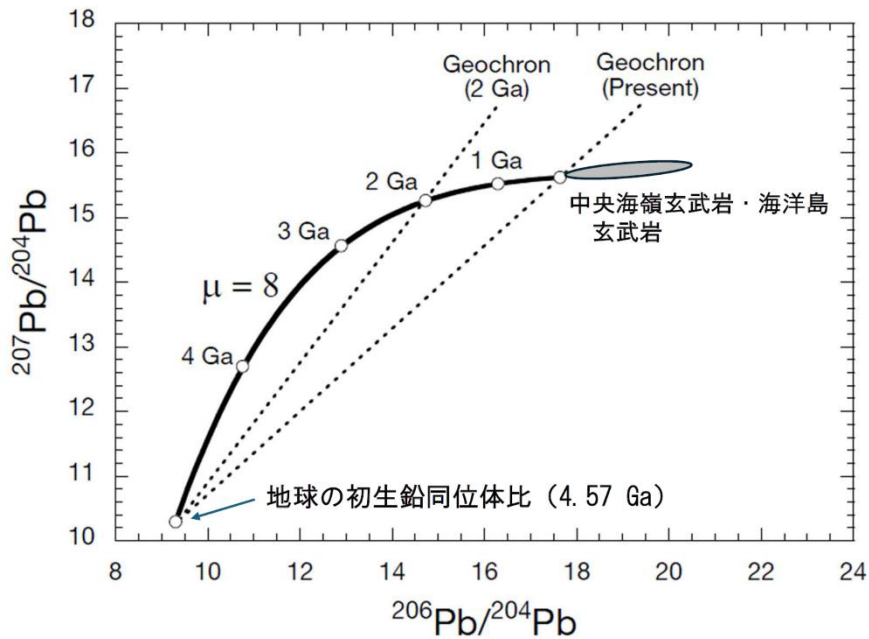


図1 地球 (bulk Earth) の $\mu = 8$ における鉛同位体比進化曲線. 点線は Geochron を示す.

- 問1 空欄 (ア)・(イ) に入る適切な数値および数式を答えよ.
- 問2 ^{238}U の半減期 [year] を計算し, 有効数字 2 桁で答えよ. 計算には $\lambda_{238} = 1.54 \times 10^{-10} [\text{year}^{-1}]$ および $\ln 2 = 0.693$ を用いること.
- 問3 下線部(a)について, 放射性元素を用いて年代測定を正しく行うために必要な前提条件を答えよ.
- 問4 地球の鉛同位体の初生比 (図1) として, 鉄隕石の現在の鉛同位体比が用いられる. 地球の初生鉛同位体比が鉄隕石の現在の鉛同位体比と同じであると考えられる理由を述べよ.
- 問5 現在の地球 (bulk Earth) の鉛同位体比の平均値は, 下線部(a)の前提条件を満たしていれば, 図1 で示される Geochron (Present) 上に位置する必要があるが, 地球を代表するマグマ活動の産物である中央海嶺玄武岩や海洋島 (ホットスポット) 玄武岩の現在の同位体組成は, Geochron よりも右側に位置している. これらの玄武岩の同位体組成が現在の Geochron の右側に位置する理由を考察し, 100 字程度で答えよ.

問題 2 ある深成岩について薄片を作成し，構成鉱物の量比を測定した結果，斜長石：33%，アルカリ長石：30%，石英：18%，黒雲母：12%，角閃石：7%であった．この岩石に関する以下の問いに答えよ．

問 1 この岩石の色指数を答えよ．

問 2 以下の分類図をもとに，この岩石の名称を答えよ．

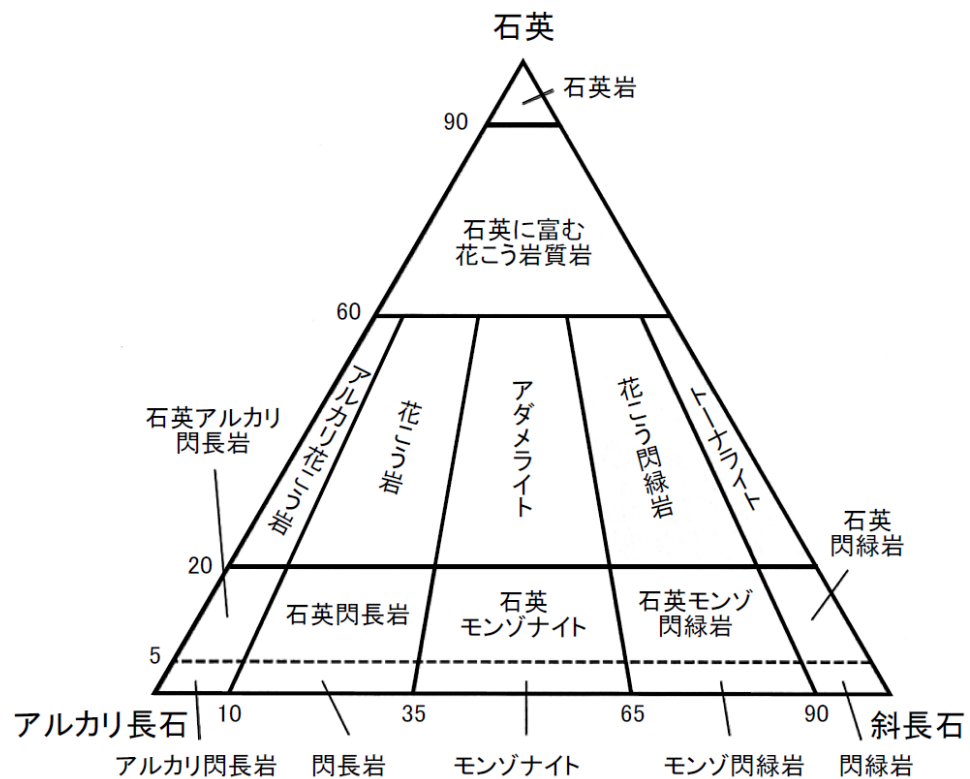


図 2 珪長質な深成岩の分類図（周藤・小山内（2001）を一部改変）

問 3 偏光顕微鏡を用いてこの岩石薄片中の黒雲母を同定するにあたり，直交ニコルと開放ニコルにおいて着目すべき鑑定根拠を，それぞれ一つずつ挙げよ．

問 4 この岩石薄片を偏光顕微鏡の直交ニコルで観察したところ，ある鉱物中にパーサイト組織がみられた．この組織を含む鉱物の名称を答え，さらにこの組織の概略を解答用紙に図示せよ．

- 問 5 この岩石薄片を偏光顕微鏡の直交ニコルで観察したところ、図 3 に示すようなモザイク状の組織が観察された。この組織の正式名称、および組織内で明色と暗色に見える鉱物の名称をそれぞれ答えよ。



図 3 深成岩で観察される組織（写真の横幅は 2 mm）。
写真は <https://www.alexstrekeisen.it/english/index.php> による。

- 問 6 この岩石薄片に含まれる斜長石について化学組成を分析したところ、以下の結果が得られた。酸素イオンの数を 8 としたときの陽イオンの数の合計を、整数値で答えよ。必要に応じて、以下のモル質量を使用すること。SiO₂ = 60.1, Al₂O₃ = 102.0, CaO = 56.1, Na₂O = 62.0, K₂O = 94.2.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
質量%	64.3	22.3	3.4	9.6	0.4	100.0

問題 3 以下の問いに答えよ.

問 1 爆発的噴火によって生じる代表的な堆積物の名称を 2 つ挙げ, それぞれについて, 堆積物の堆積構造と分布の地形的特徴を 50 字程度で説明せよ.

問 2 以下の図 4a は, 地下の深さ 0~8 km における 1100°C のメルトの飽和含水量を, 図 4b は, ある鉱物のメルト含水量に対するリキダス温度を示す. これらの図を踏まえ, 地下 7 km に存在する, 含水量が 5 質量% のメルトが 1100°C の温度を維持したまま上昇する際, 結晶化が開始する深さ [km] を答えよ. ただし, マグマの上昇中は常に化学平衡が成立しており, また図 4b における圧力依存性および他の鉱物相の存在は考えなくてよいものとする.

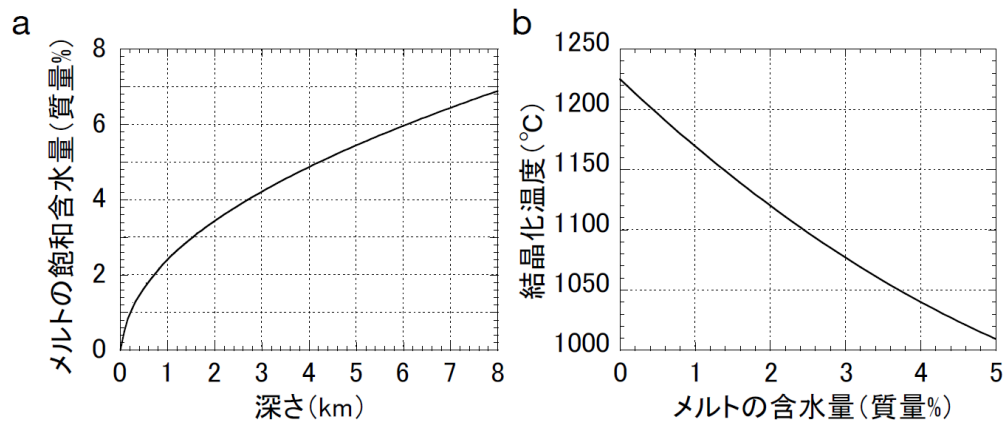


図 4 (a) 深さ 0~8 km における 1100°C のメルトの飽和含水量, および (b) ある鉱物のメルト含水量に対するリキダス温度.

問3 以下の表は、ある火成岩についてのノルム計算の最終盤における状況を示す。各枠内の“/”の左右に配置されている **A** ~ **R** に数値を入れよ（「使用した分子数」/「残った分子数」とすること）。なお「使用した分子数」に **0** が入ることがある。かんらん石と直方輝石の両方を作る場合、両者の **FeO** と **MgO** の分子数の比は等しいものとする。

		SiO ₂	FeO	MgO
ここまで残っている分子数		*** / 120	*** / 50	*** / 150
直方輝石	MgSiO ₃	A / B	-	C / D
	FeSiO ₃	E / F	G / H	-
かんらん石	Mg ₂ SiO ₄	I / J	-	K / L
	Fe ₂ SiO ₄	M / N	O / P	-
石英	SiO ₂	Q / R	-	-

IV-2 (必須) 以下の文章を読み、問題に解答せよ。

鉱物はいろいろな化学組成を持つが、結晶構造を変えないまま、原子の置換によって化学組成が一定の範囲にわたって変化する結晶相のことを固溶体という。(a)かんらん石、(b)輝石、(c)長石など、造岩鉱物の多くは固溶体を形成する。かんらん石では、フォルステライトおよびファヤライトを端成分とし、それらの中間のすべての化学組成が存在する連続固溶体を形成するが、2相に分離する不混和領域が存在するような鉱物も多く、(d)固溶体を形成しない鉱物もある。これらの違いは、(e)ギブスの自由エネルギーを用いて解釈できる。

問題1 下線部(a)のかんらん石について、以下の問いに答えよ。

問1 かんらん石の結晶構造に関連して述べた以下の文章のうち、誤っているものを下線に着目して1つ選び、記号で答えよ。

- (1) 酸素がおおよそ六方最密充填した構造が基本となっている。
- (2) 陽イオンが入るサイトは、最近接の酸素が六面体をかたちづくる。
- (3) それぞれの結晶軸が直交する直方晶系である。
- (4) 顕著なへき開を示さない。

問2 ケイ酸塩鉱物における SiO_4 四面体の結合様式に基づく分類では、かんらん石が属するグループは何とよばれるか答えるとともに、このグループに属する鉱物を、かんらん石以外に一つ挙げよ。また、このグループにおける SiO_4 四面体の配列の特徴を 30 字程度で述べよ。

問題 2 下線部(b)の輝石について、以下の問いに答えよ。

問 1 輝石の構造中における、架橋酸素と非架橋酸素の数の比を答えよ。

問 2 下記「 」内は、輝石の結晶構造の特徴をおおまかに述べたものである。この説明から推測される Mg-Fe-Ca 系の輝石の固溶領域の概略を、図 1 のような三角ダイアグラムを解答用紙に描き写し、そこに示せ。ただし、厳密な輝石の相平構図を描く必要はない。

「輝石の結晶構造中には、陽イオンが入るサイトが M1, M2 の 2 つある。これらは同数存在するが、M2 のほうがやや大きい。イオン半径が近い Mg^{2+} および Fe^{2+} は、M1, M2 両方に入ることができ、かつ自由な割合で置換し得る。一方で、大きな Ca^{2+} は M1 には入らず、M2 に優先的に入る。ただし、その場合も Mg^{2+} や Fe^{2+} と自由な割合では置換できず、M2 はほとんどが Ca^{2+} で占められるか、 Ca^{2+} がわずかにしか入らないかのどちらかとなる。」

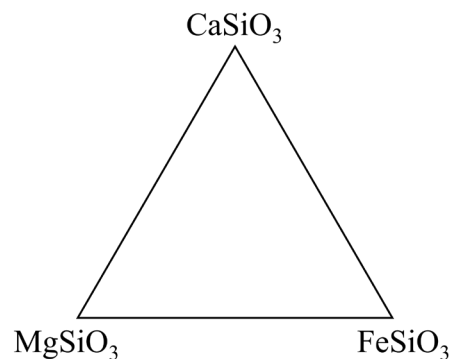


図 1 Mg-Fe-Ca 輝石の三角ダイアグラム

問題 3 下線部(c)の長石の固溶体について、(A) アルカリ長石系列：カリ長石—曹長石（アルバイト）および (B) 斜長石系列：曹長石—灰長石（アノーサイト）ではそれぞれどのような原子の置換が起こっているか、答えよ。

問題 4 下線部(d)に関して、主要な造岩鉱物の中で、ほとんど固溶体を形成しない鉱物の名称を答えよ。ただし、和名・英語名どちらで答えてもよい。

問題 5 下線部(e)に関して述べた次の文章を読み、以下の問いに答えよ。

成分 A と B が固溶体 A_xB_{1-x} を形成する場合を考える (ただし, $0 \leq x \leq 1$)。温度圧力が一定のとき, 固溶体を形成することによるギブスの自由エネルギー変化 ΔG_{mix} は,

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}} \quad (1)$$

と表せる。ここで, ΔH_{mix} , ΔS_{mix} はそれぞれ固溶体を形成することによるエンタルピー変化およびエントロピー変化, T は絶対温度である。

この固溶体中の N 個のサイトに, 原子 A あるいは原子 B が配置するとき, 原子 A の占めるサイトの数は (ア) 個, 原子 B の占めるサイトの数は (イ) 個である。A と B がランダムに配列するとき, 配置の方法は (ウ) 通りとなる。これを ω とすると, エントロピー変化 ΔS_{mix} がこれらの配置のエントロピーのみに起因するとき, ボルツマン定数 k を用いて以下のように表される。

$$\Delta S_{\text{mix}} = k \ln \omega \quad (2)$$

このとき $\Delta S_{\text{mix}} \geq 0$ となるため, 固溶体の形成によりエントロピーは必ず増大することがわかる。

一方, 固溶体のエンタルピーは, A, B 原子の結合エネルギーの総和として考えることができる。A, B 原子の配位数をともに Z とすると, 結合の総数は (エ) である。その中で, A-A 結合の割合は x^2 , B-B 結合の割合は (オ), A-B 結合の割合は (カ) であるため, 最近接の A-A 結合, B-B 結合, A-B 結合のエネルギーをそれぞれ H_{A-A} , H_{B-B} , H_{A-B} とすると, 固溶体全体のエンタルピー ΔH は,

$$\Delta H = \frac{1}{2}NZ\{xH_{A-A} + (1-x)H_{B-B}\} + x(1-x)NZ\{H_{A-B} - \frac{1}{2}(H_{A-A} + H_{B-B})\} \quad (3)$$

と表せる。この式の第一項は, 端成分 A と B を比率 x および $1-x$ で機械的に混合したときのエンタルピーであるため, 固溶体を形成することによるエンタルピー変化 ΔH_{mix} は以下で表される。

$$\Delta H_{\text{mix}} = x(1-x)NZ\{H_{A-B} - \frac{1}{2}(H_{A-A} + H_{B-B})\} \quad (4)$$

固溶体を形成することによるエントロピー変化はすべての組成範囲にわたって正の値をとるため, 式(1)で与えられたギブスの自由エネルギーの変化の特徴は, 結合の自由エネルギーの大小関係によって, 以下の3つに場合分けして考えることができる。

- ① $2H_{A-B} > H_{A-A} + H_{B-B}$
- ② $2H_{A-B} = H_{A-A} + H_{B-B}$
- ③ $2H_{A-B} < H_{A-A} + H_{B-B}$

このうち、(キ)のとき、この組成範囲にわたって常に連続固溶体を形成し、(ク)のときは温度によって2相分離が起こり得る。

問1 文章中の(ア)～(カ)に入る適切な式を答えよ

問2 式(3)を、この式の上部に書かれた説明を参考にして導出せよ。

問3 文章中の(キ)、(ク)にあてはまる条件を、①～③の中から選べ。ただし、解答は1つとは限らない。また、(キ)にその条件を選んだ理由を、簡潔に説明せよ。

問4 図2は、圧力一定の条件下で、2相分離が起こり得るときの固溶の自由エネルギー変化の温度依存性の一例を、示したものである。このとき、2相が分離して共存する範囲を、図3のような縦軸に温度、横軸に組成比 x をとったグラフを解答用紙に描き写し、そこに図示せよ。ただし、縦軸の温度の絶対値と、組成の関係がわかるように描くこと。また、1相領域と、分離した2相が共存する領域を分ける境界線のことを何というか、答えよ。

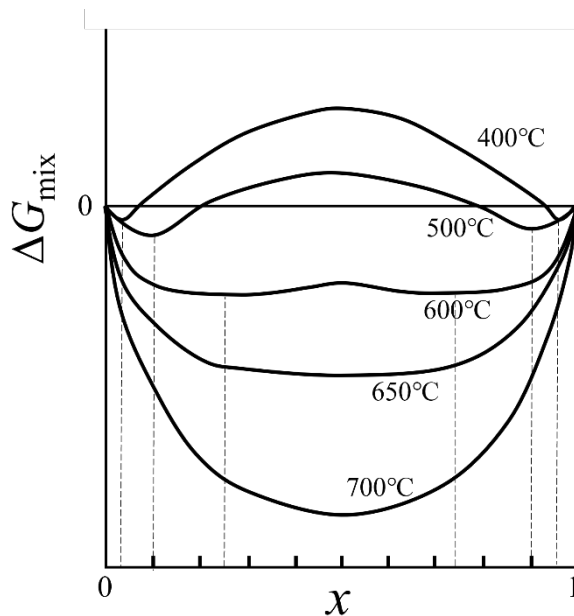


図2 固溶によるギブスの自由エネルギー変化の温度依存性

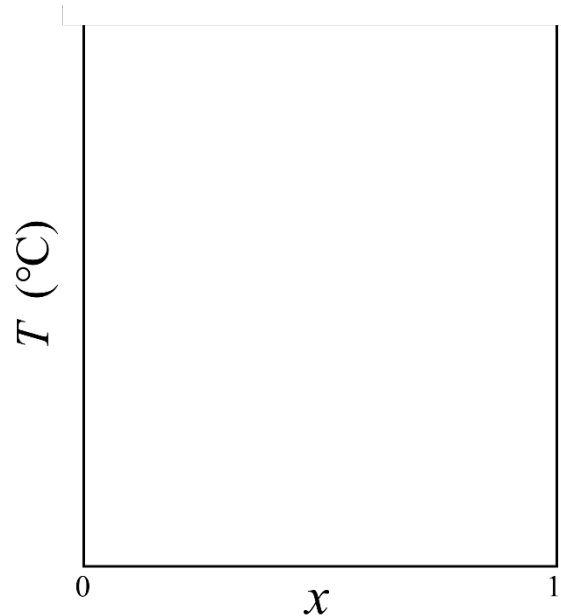


図3 2相分離の領域を示す相図

問5 問4で作成したダイアグラム中の2相分離が起こる領域を、実験的に確かめることを考える。そのために、成分AとBをある割合で混合し、温度を一定にして十分に保持したのち、急冷したサンプルについて、X線回折実験を行って相同定することを計画した。端成分AとBのX線回折実験を行ったとき、同一指数のピークがそれぞれ $2\theta = p, q$ の位置に現れるとすると、 $x = 0.4$ の割合で混合した出発物質を(i) 700°C 、ならびに(ii) 500°C で保持したサンプルのこの指数のX線回折ピークの位置は、以下の(あ)~(え)のどれになるか。一番近いものをそれぞれ選んで記号で答えよ。ただし、急冷して得られたサンプルは、保持した温度での相関係をそのまま保っているとする。

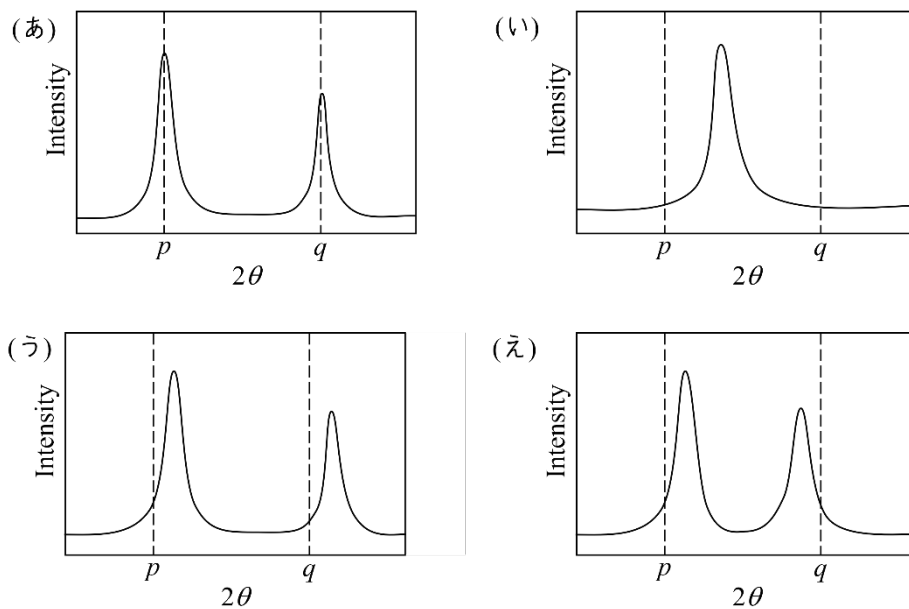


図4 実験により得られたサンプルのX線回折パターン