

出題の意図

[1]

問1 地球内部の岩石物性や変形に関する知識を問う問題である。

問2 鉱物の相転移に関する熱力学やイオン中の電子軌道に関する知識を問う問題である。

[2]

問1 層状ケイ酸塩鉱物の結晶化学に関する知識を問う問題である。

問2 X線の吸収端と固有X線の発生に関する知識を問う問題である。

問3 地質学では、地質図の読解は不可欠である。本問は、地質図を理解する上で最も重要な概念の一つである「地層等高線」の考え方を問うものである。

問4 岩石の変形特性は、その変形微細組織に反映される。本問は、岩石の変形微細組織に関する知識と、そこから読み取れる変形メカニズムの理解を問うものである。

[3]

問1 マグマの発生に関する基礎知識と、マグマ中での微量元素の挙動の基礎知識を問う問題である。

問2 砕屑物の特徴、形成過程、水中での挙動についての確かな知識を問う問題である。

問3 初期太陽系の化学進化について確かな知識を問う問題である。

[4]

問1 地球年代学の基礎知識と応用力を問う問題である。

問2 炭酸化学平衡の基礎知識と応用力を問う問題である。

問3 隕石の形成史・分類法の基礎とその応用力を問う問題である。

[5]

問1 岩石の力学的性質の基本的な知識と理解、および、岩石変形が関わる地学現象への応用に対する理解について問う問題である。

問2 地球内部構造および物性に関する基礎的理解を問う問題である。

[6]

問1 測地・重力の分野において重要なジオイドについての基礎的な数学と物理学にもとづいた理解を問う問題である。

問2 地球内部の相転移についての理解を問う問題である。

解答例

[1]

問1

- (1) 上載岩圧： $3.0 \text{ g/cm}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 10 \text{ km} = 2.94 \times 10^8 \text{ Pa}$ ($2.94 \times 10^2 \text{ MPa}$)
間隙水圧： $1.0 \text{ g/cm}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 10 \text{ km} = 9.80 \times 10^7 \text{ Pa}$ ($9.80 \times 10^1 \text{ MPa}$)
有効圧： $2.94 \times 10^2 \text{ MPa} - 9.80 \times 10^1 \text{ MPa} = 1.96 \times 10^2 \text{ MPa}$
- (2) 円①：正断層で角度は 60 度，円②：逆断層で角度は 30 度
- (3) $(610 - 196)/2 \times \sin 120^\circ = 414/2 \times 1.73/2 = 179 \text{ MPa}$ ($1.79 \times 10^2 \text{ MPa}$)
- (4) 直線 A の傾きは岩石の（内部）摩擦係数を反映している。沈み込み帯プレート境界断層には粘土鉱物が多く存在すると考えられる。粘土鉱物は一般的に通常の造岩鉱物よりも低い摩擦係数を示すので，モールクーロン破壊基準の傾きは直線 A より小さくなる。

問2

(1) (a)

① ギブズ自由エネルギー変化の式は， $\Delta G = \Delta H - T \Delta S$

ここで：

ΔH ：エンタルピー変化（アラゴナイト → カルサイト）

ΔS ：エントロピー変化（アラゴナイト → カルサイト）

T：温度（K）

② 25 °C, 1 気圧では，

$$\Delta H = \{-1207.37 - (-1207.74)\} \text{ kJ/mol} = \{1207.74 - 1207.37\} \text{ kJ/mol} \\ = 370 \text{ J/mol}$$

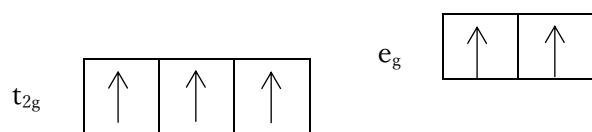
$$\Delta S = \{91.7 - 88\} \text{ J/mol/K} = 3.7 \text{ J/mol/K}$$

③ 体積変化の効果を無視し，25 °C (i.e. 298 K)，1 気圧，1 mol では，

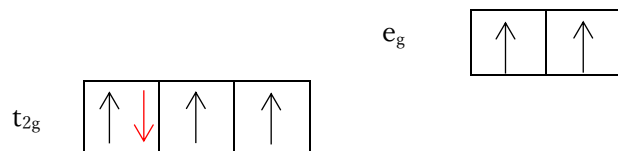
$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S = 370 - (298 \times 3.7) = -732.6 \text{ J}$$

(b) ΔG が負の値であることは，方解石が 25°C，1 気圧においてアラゴナイトよりも自由エネルギーが低いことを示している。したがって，この条件下では，方解石が熱力学的に安定な相である。

(2) Fe^{3+} ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5$) の場合、5つの3d軌道は以下のようになる。



一方、 Fe^{2+} ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6$) の場合、5つの3d軌道は以下のようになる。



余分な電子（赤い電子）は、3つの t_{2g} 軌道のどれでも等しい確率でスピンペアリングになることができるため、 Fe^{2+} では電子エントロピーが生じるが、 Fe^{3+} では生じない。

[2]

問 1

(1) ア : 3, イ : 2/3, ウ : 2/3

(2) (1) c (2) d (3) f (4) a (5) c (6) e (7) b (8) a

(3) K, Na, Ca (Ba, Rb, Cs なども可)

(4) c

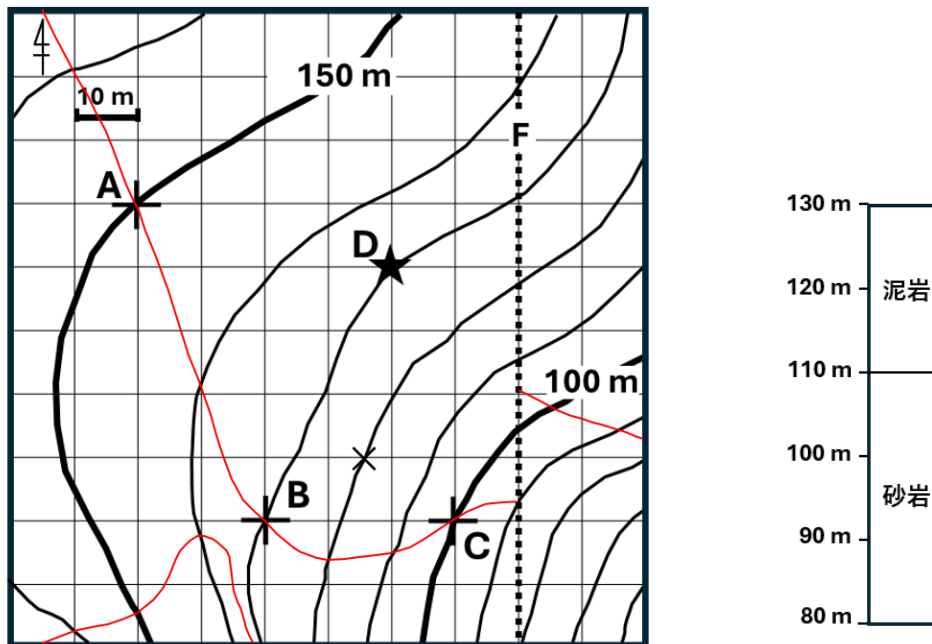
問 2

(1) 吸収したエネルギーにより内殻電子が電離されて原子から放出される。空いた内殻の軌道に、より外側の殻から電子が遷移し、そのエネルギー準位差に対応した波長の X 線が放出される。

(2) K 吸収端 $< K_{\beta}$ 線 $< K_{\alpha}$ 線

問 3

(1)



(2)

(3) 解答 (1) の×印。

問 4

(1) 超塑性

(2) 圧力溶解

(3)

この珪質片岩の薄片写真では、石英粒子の著しい微細化が認められ、動的再結晶により新たに形成された再結晶粒が発達している。いくつかの石英粒子にはコア-マントル構造が認められ、変形前のコア部分を保持したまま、その周囲を再結晶したマントル部分が取り囲む組織を呈している。また、変形を受けた粒子には結晶内部の歪が残されており、亜結晶粒回転によるサブグレイン境界が発達し、それは波動消光として偏光顕微鏡下で観察される。これらの特徴は、「本岩石の塑性変形が転位クリープを主要な変形メカニズム」として進行したことを示唆している。

[3]

問1

- (1) ア：中央海嶺，イ：沈み込み帯，ウ：かんらん，エ：低い，オ：マグマだまり
- (2) (かんらん岩がマントル対流で上昇し) 圧力が低下することで融点が下がる
- (3) マグマの密度と周囲の岩石の密度がほぼ等しくなるから
- (4) 微量元素の結晶中とメルト中の濃度比
- (5) A：ホットスポット，B：中央海嶺

問2

- (1) ア：気温，イ：凍結，ウ：根，エ：粘土，オ：土壌，カ：続成
- (2) ④
- (3) 一般的に水底では，底面の摩擦によって流速が低くなっており，層流が卓越することから層流境界層と呼ばれている。水底に存在する泥は質量が小さいが，層流境界層に収まるため，上向きの力を受けにくく，動きにくい。一方，礫は大部分が層流境界層の上に発達する乱流領域に到達し，上向きの力を受けるが，質量が大きいため動きにくい。砂のうち粗粒のものは乱流領域に到達して上向きの力を受け，質量も大きくないために動きやすい。

問3

- (1) ア：水素，イ：ヘリウム，ウ：減少，エ：軽い，オ：重い，カ：恒星，キ：核融合，ク：鉄，ケ：超新星爆発，コ：中性子捕獲
- (2) CI (CI グループ，CI コンドライトでも可)
- (3)

解答例

- 1. 彗星塵の方が，隕石有機物より炭素含有量が高い
- 2. 彗星(塵)の方が，隕石有機物より窒素および/または酸素を含む官能基の割合が高い
- 3. 彗星塵の方が，隕石有機物より水素（脂肪族炭素の割合）に富むなど

[4]

問 1

- (1) 0.2
- (2) +9
- (3) chondritic uniform reservoir
- (4) 2×10^{10} y
- (5) 方法：アイソクロン法，条件：同位体平衡に達していた，変成作用でリセットされていないなど

問 2

- (1)

ア

 : HCO_3^- ,

イ

 : CO_2 ,

ウ

 : CO_3^{2-} ,

エ

 : 2
- (2) CO_2 と HCO_3^- の割合が等しくなるとき, $[\text{CO}_2] = [\text{HCO}_3^-]$ である。
ゆえに式 1 は $K_1 = [\text{HCO}_3^-][\text{H}^+] / [\text{CO}_2] = [\text{H}^+] = 10^{-6.4}$ となる。
 $-\log[\text{H}^+] = \text{pH} = 6.4$ 。
 HCO_3^- と CO_3^{2-} の割合が等しくなるとき, $[\text{HCO}_3^-] = [\text{CO}_3^{2-}]$ である。
ゆえに式 2 は $K_2 = [\text{CO}_3^{2-}][\text{H}^+] / [\text{HCO}_3^-] = [\text{H}^+] = 10^{-10.3}$ となる。
 $-\log[\text{H}^+] = \text{pH} = 10.3$ 。
- (3) $[\text{CO}_3^{2-}]$: 式 2 を式 3 に代入して変形すると $[\text{CO}_3^{2-}] = A_c / ([\text{H}^+] / K_2 + 2)$ となる。
これに値を代入すると $[\text{CO}_3^{2-}] = 2.6 \times 10^{-2} / (10^{-6.3} / 10^{-10.3} + 2) \doteq 2.6 \times 10^{-2} / 10^4 = 2.6 \times 10^{-6}$ 。
 $\Omega : \Omega = [\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] / K_{\text{SP}}$ である。
これに値を代入すると $1.7 \times 10^{-2} \times 2.6 \times 10^{-6} / 10^{-8.4} = 4.42 \times 10^{-8} / 10^{-8.4} \doteq 10^{-7.4} / 10^{-8.4} = 10$ 。
- (4) 二股温泉の温泉水には CO_2 が多く含まれているため，湧出して大気に接すると CO_2 脱ガスが起き，下流に向かって pCO_2 が低下する。脱ガスによって水中の CO_2 の割合が低下すると，図で示されるように CO_3^{2-} の割合と pH が上昇することから，下流に向かって pH と $[\text{CO}_3^{2-}]$ の値が上昇する。

問 3

- (1)
最も古い時代に形成された物質は CAIs である。CAIs (カルシウム・アルミニウム包有物) は、難揮発性元素を多く含む鉱物の集合体であり、原始太陽系星雲内で高温のガスが冷却される過程において最初に生成された固体物質である。そのため、太陽系で最も古い形成年代を持つ物質とされている。
- (2)
本試料は、月の高地に由来する 月起源隕石である。酸素同位体比が地球型質量分別線(TFL)上にプロットされるのは、エンスタタイトコンドライトおよび月起源隕石に限られる。エンスタタイトコンドライトは輝石が主要な構成鉱物であるため、斜長石が約 9 割を占める本試料の候補からは除外される。月起源隕石には、月の海に由来する玄武岩様岩石と、高地に由来する斜長石岩質角礫岩が存在する。いずれにも斜長石が多く含まれるが、斜長石の構成比が 9 割近くに達するのは、高地起源の斜長石岩質角礫岩に限られる。
- (3)
コンドライト母天体内部に存在した短寿命放射性核種 (^{26}Al など) の壊変により加熱され

るため。

(4)

HED 隕石：ベスタ。理由：隕石の鉱物組成と小惑星表面の反射スペクトルが一致するため。
SNC 隕石：火星。理由：隕石に含まれていた母天体ガスの組成が、火星大気組成と一致するため。

[5]

問 1

- (1) ① ばね ② ダッシュポット, ダンパー
 ③ 脆性 ④ ヤング率 ⑤ 封圧, 圧力

(2) 式(2)を式(1)に代入すると,

$$\frac{2\eta}{E\tau}\dot{\epsilon}\exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] + \dot{\epsilon}\left(1 - \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right]\right) = \dot{\epsilon} \quad (A1)$$

となるので,

$$\frac{2\eta}{E\tau}\dot{\epsilon}\exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] = \dot{\epsilon}\exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] \quad (A2)$$

$$\frac{2\eta}{E\tau} = 1 \quad (A3)$$

となる。よって, τ は

$$\tau = \frac{2\eta}{E} \quad (A4)$$

と求められる。

(3) 式(1)の第 2 項より, 粘性歪速度 $\dot{\epsilon}_V$ は,

$$\dot{\epsilon}_V = \dot{\epsilon}\left(1 - \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right]\right) \quad (A5)$$

である。弾性歪速度 $\dot{\epsilon}_E$ と $\dot{\epsilon}_V$ との和が $\dot{\epsilon}$ なので,

$$\dot{\epsilon}_E = \dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_V \quad (A6)$$

より,

$$\dot{\epsilon}_E = \dot{\epsilon}\exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] \quad (A7)$$

と求められる。すなわち, 弾性歪速度は τ 程度の時間で指数関数的に減衰し, 粘性歪速度の割合が増加することを表す。つまり, τ は物質が弾性的にふるまう時間のおおよその上限を意味している。それ以上の時間では, 物質は粘性的あるいは塑性的にふるまう。

(4) 定常的なプレート運動によってプレート内部やプレート境界付近に歪が蓄積される現象をモデル化していると考えられる。

(5) $\sigma < \sigma_B$ のとき。ここで, σ_B は脆性強度である。

(6) 地震が起きるのはモデルにおいてモデル要素 B が滑るときである。すなわち, 脆性強度 σ_B に応力 σ が達した場合であると考えることができる。モデル要素 E と η と B は直列につながっているので, 応力はどのモデル要素でも σ である。一方, 式(2)より最大応力は $2\eta\dot{\epsilon}$ であり, これは粘性(塑性)強度と一致する。このため, 粘性強度と脆性強度のみ比較することにより議論することができる。

問 2

(1)

$$V_p = \sqrt{\frac{K + 4/3\mu}{\rho}}$$
$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

(2) 深くなるにつれて物質は圧縮され、密度が増加する。一方で、密度の圧力変化よりも体積弾性率や剛性率の圧力変化の方が大きいため、結果として P 波速度および S 波速度はともに増加する。

(3) I: 上部マントル, II: マントル遷移層, III: 下部マントル, IV: D'層, V: 外核, VI: 内核

(4)

A: カンラン石の高压相リングウッドイト (ringwoodite) からブリッジマナイト (bridgmanite) とフェロペリクレーズ (ferropericlasite) への相転移

B: ペロブスカイト構造をもつブリッジマナイト (bridgmanite) からポストペロブスカイト (post-perovskite) への相転移

C: 珪酸塩鉱物を主成分とするマントルと、液体の鉄・ニッケル合金からなる外核との化学的境界

D: 液体の鉄・ニッケル合金からなる外核と、固体の鉄・ニッケル合金からなる内核との相境界

(5) マントル遷移層においては、輝石成分がザクロ石に固溶する漸移的な相転移が進行しており、これが急激な速度勾配を生じさせていると考えられる。

(6) 外核は液体であるため、せん断変形を伝えることができず、S 波は伝播しない。

(7) 鉄・ニッケル合金の融点 (融解曲線) および地球内部の断熱温度勾配は、いずれも圧力の上昇とともに高くなるが、圧力に対する上昇の程度は、鉄・ニッケル合金の融点の方が大きい。このため、深さ E 付近で両者の曲線が交差し、鉄・ニッケル合金は液体から固体へと相変化する。その結果、外核と内核の境界が形成される。

[6]

問 1

$$(1) \quad g(r) = |\mathbf{g}(\mathbf{r})| = \left| -G \frac{M}{r^2} \right| \left| \frac{\mathbf{r}}{r} \right| = G \frac{M}{r^2}$$

(2) (1) の結果より

$$\frac{dU}{dr} = G \frac{M}{r^2}$$

積分すると

$$U(r) = -G \frac{M}{r} + C$$

$U(\infty) = 0$ より $C = 0$ なので

$$U(r) = -G \frac{M}{r}$$

(3)

(a) ΔU は均質球状質量異常 ΔM による距離 $\sqrt{x^2 + a^2}$ での重力ポテンシャルなので

$$\Delta U = -G \frac{\Delta M}{\sqrt{x^2 + a^2}}$$

(b) $U(r_0 + \Delta r)$ を Δr の一次の項までで近似すると

$$U(r_0) + \left(\frac{dU}{dr} \right)_{r=r_0} \Delta r = U_0$$

上式から $U(r_0) = U_0 + \Delta U$ を辺々引くと

$$\left(\frac{dU}{dr} \right)_{r=r_0} \Delta r = -\Delta U$$

ここで

$$\left(\frac{dU}{dr} \right)_{r=r_0} = g_0$$

なので

$$g_0 \Delta r = -\Delta U$$

(c) (a) と (b) の結果より

$$\Delta r(x) = -\frac{\Delta U}{g_0} = \frac{G}{g_0} \frac{\Delta M}{\sqrt{x^2 + a^2}}$$

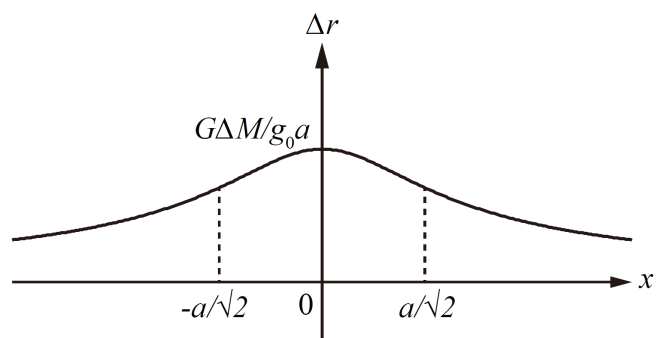
ここで $A = G\Delta M/g_0$ とすると 1 階微分は

$$\Delta r'(x) = -Ax (x^2 + a^2)^{-\frac{3}{2}}$$

これより $\Delta r(x)$ は x が負で増加, 0 で最大 (A/a), 正で減少となる。2 階微分は

$$\Delta r''(x) = A(2x^2 - a^2) (x^2 + a^2)^{-\frac{5}{2}}$$

これより $x = \pm a/\sqrt{2}$ で変曲点をもつ。以上よりグラフの概形は下図の通り。



問 2

- (1) α , $\alpha+\beta$, β , $\beta+\gamma$, γ
- (2) α から β
- (3) 図中の全ての鉱物について Mg の配位数は 6, Si の配位数は 4 なので, 図中の相転移では配位数に変化がない。
- (4) Fe^{2+} イオンが Mg^{2+} イオンよりも大きいため, 高圧相へ相転移する圧力は, 低下する。
- (5) 相律の式は, 「自由度 = 成分の数 - 相の数 + 2」である。温度一定のときは「自由度 = 成分の数 - 相の数 + 1」となる。図中の $\beta+\gamma$ 領域について, 成分の数は 2 であり, 相の数は 2 であるので, 自由度は 1 となる。