出題の意図

［1］
問1　偏光顕微鏡の原理に関する知識を問う。
問2　鉱物の多形と相転移に関する知識を問う。

［2］
問1　地球内部の岩石レオロジーについて及び地震のメカニズムについての概略を問う。
問2　岩石の脆性変形の理解に必要なモール円及び有効圧の計算方法を問う。

［3］
問1　固相－メルト間での分配係数を反映した微量元素の挙動と，それがSr-Nd-Pb同位体組成の時間経過に伴う変化に関する理解を問う
問2　堆積構造と堆積環境についての基礎知識を問う。
問3　分化天体を起源とする隕石の成因と特徴に関する基礎知識を問う。

［4］
問1　熱力学的な岩石形成の解釈を問う。
問2　炭酸化学平衡の基礎知識と応用力を問う。
問3　炭素質小惑星試料の成因と進化過程の理解を問う。

［5］
問1　プレート境界における地震と重力異常に関する基礎知識を問う。
問2　地球内部の物質の性質と相転移についての理解を問う。

［6］
問1　マントルダイナミクスの基礎に関する知識・理解を，等高線やグラフを読み取る理学の基礎的能力と組み合わせて問うとともに，マントル対流理論と鉱物物性および地球物理学的観測との関係についての理解を問う。
問2　パイロライトおよび海洋プレートを構成するかんらん岩・玄武岩の高圧相転移と，それらが沈み込むプレートの浮力や660 km不連続面付近のダイナミクスに及ぼす影響についての理解を問う。

解答例

［1］

問1

（1）入射した光（自然光）の電場の振動方向のうち，偏光板の透過方向に平行な成分のみを通過させ，それ以外の方向の成分を遮断（吸収または反射）することで，特定の方向にのみ振動する偏光（直線偏光）を作り出す。

（2）1枚目の偏光板を通過した光は，その透過方向にのみ振動する直線偏光になっている。2枚目の偏光板の透過方向を1枚目と直交させると，光の電場振動方向は2枚目の偏光板の透過方向と完全に直交するため，透過方向に平行な成分を持たない。その結果，光は2枚目の偏光板を一切透過できなくなり，視野はほぼ暗黒になる。

（3）1枚目の偏光板を通過した直線偏光が光学的異方性をもつ結晶に入射すると，複屈折により2つの直交する偏光方向を持つ光（通常光と異常光）に分かれる。この2つの光は結晶内を進む速度が異なるため，両者の間に位相差が生じる。結晶を出るときに位相差を持った2つの直交する偏光が合成されると，合成された光の偏光状態（偏光方向の分布）が元の直線偏光から楕円偏光などへと変化し，2枚目の偏光板の透過方向と完全に直交しない成分を持つようになる。その成分が2枚目の偏光板を透過できるため視野が明るくなる。

（4）試料の厚さが変わると，光が試料内を進む距離（光路）が変わり，複屈折によって生じる2つの光の位相差も厚さに比例して変化する。白色光は様々な波長の光が混ざり合ったものであるため，位相差が変化すると，2つの光が合成される際の干渉条件（各波長が強め合うか弱め合うか）も波長ごとに異なる。このように，厚さの変化に伴って特定の波長が強調または減衰された結果，それらが混ざり合った干渉色の色合いも連続的に変化する。

問2

（1）

（ア）再構成型転移：結晶構造中の共有結合やイオン結合などの強い結合を一度切断し，原子の配置を全く新しく組み替える相転移。

（イ）変位型転移：結合を切断することなく，原子の結合角や位置がわずかに歪む（変位する）ことで起こる相転移。

（ウ）秩序－無秩序転移：結晶格子内の特定の原子サイトにおける，異種原子の配置の「規則正しさ」が変化する相転移。一般に低温では特定のサイトに特定の原子が規則正しく並ぶが，高温になると無秩序に配置される。

（2）（a）（イ），　（b）（ア），　（c）（ア），　（d）（ウ），　（e）（ア）

（3）最も高圧で安定な相：　藍晶石（Kyanite）
最も高温で安定な相：　珪線石（Sillimanite）

［2］

問1

（1）ア　弾性，　イ　塑性，　ウ　脆性，　エ　転位，　オ　拡散，　カ　アレニウス
キ　摩擦，　ク　表面，　ケ　地震波，　コ　非晶質

（2）③ 大きくなる
（3）① 転位クリープ
（4）2倍
（5）シュードタキライト，pseudotachylyte もしくは pseudotachylite

問2
（1）30°もしくは 3.0 x 10^{1}°
（2）0.58 もしくは 5.8 x 10^{-1} （tan30° = $1/\sqrt{3}$ = 0.5780...）
（3）③ 滑石
（4）せん断応力 216 MPa （(734-235) /2 x sin60° = 249.5 x 1.73/2 =215.8175）
（5）注入：モール円③，　排出：モール円④

［3］
問1
（1）ア：小さ（低），イ：大き（高），ウ：高，エ：低，オ：エンリッチ（enrich, 肥沃），カ：ディプリート（deplete, 枯渇）
（2）$^{87}Sr/^{86}Sr = (^{87}Sr/^{86}Sr)_0 + {}^{87}Rb/^{86}Sr \cdot (e^{\lambda t}-1)$
（3）沈み込み帯で沈み込んだ，大陸地殻由来の物質（堆積物）が海洋島玄武岩の起源物質として循環しているから。

問2
（1） ア：垂直，イ：水平，ウ：複合，エ：振動，オ：一方向
（2） 平板型斜交層理は頂部が直線状のリップルまたはデューンから，トラフ型斜交層理は頂部が曲線状のリップルまたはデューンから形成される。
（3） 水深の深い方から順に，層準 A，層準 B，層準 C，層準 D となる。
（4） 晴天時波浪限界は層準 B と層準 C の間に，暴風時波浪限界は層準 A と層準 B の間に位置する。

問3
（1） ア：短寿命，　イ：分化，　ウ：鉄ニッケル合金，　エ：ケイ酸塩鉱物，
オ：月，　カ：SNC，　キ：ガラス，　ク：ガス，　ケ：400，　コ：いない
（2）名称：③，　説明：B
（3）ナクライト

［4］
問1
（1）液体では原子や分子が結晶格子に固定されず，移動・再配列することができる。一方，固体では原子や分子は結晶格子中のほぼ決まった位置に存在し，振動はするものの配置の自由度は小さいから。
（2）単斜輝石
（3）
固相 1 kg の体積は

$$V_{\mathrm{solid}} = 1/3300 = 3.03 \times 10^{-4}\ \mathrm{m}^3$$

メルト 1 kg の体積は

$$V_{\mathrm{melt}} = 1/2900 = 3.45 \times 10^{-4}\ \mathrm{m}^3$$

よって

$$\Delta V = 4.18 \times 10^{-5}\ \mathrm{m^3}$$

クラペイロンの式に代入すると

$$dP/dT = 7.18\ \mathrm{MPa\,K^{-1}}$$
$$dT/dP = 1.4\ \times 10^{2}\ \mathrm{K\,GPa^{-1}}$$

（４）上昇するマントルの温度低下率は 15 $\mathrm{K\,GPa^{-1}}$である。一方，レルゾライトのソリダスの圧力勾配は$1.4\ \times 10^{2}\ \mathrm{K\,GPa^{-1}}$であり，マントルが上昇するにつれてソリダスを横切ることになり断熱減圧溶融が起こる。

問２

（１） 平衡定数 K_2 は $K_2 = [CO_3^{2-}]\,[H^+] / [HCO_3^-]$ と定義される。これを $A_C = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}]$ に代入して変形すると $[CO_3^{2-}] = A_C / ([H^+] / K_2 + 2)$ となる。

（２） pH 8.3 であるから，$[H^+] = 10^{-8.3}$ mol/l となる。問（１）で得られた $[CO_3^{2-}] = A_C / ([H^+] / K_2 + 2)$ にそれぞれ値を代入すると，$[CO_3^{2-}] = 1.0 / (10^{-8.3} / 10^{-10.3} + 2) = 1.0 / 102 = 9.8 \times 10^{-3}$ mol/l。

（３） $\Omega = [Ca^{2+}]\,[CO_3^{2-}] / K_{SP}$ と定義される。これを変形すると $[Ca^{2+}] = \Omega\, K_{SP} / [CO_3^{2-}]$ となり，それぞれに値を代入すると $[Ca^{2+}] = 2.0 \times 4.9 \times 10^{-9} / 9.8 \times 10^{-3} = 1.0 \times 10^{-6}$ mol/l。

問３

（１） サポナイトは 2:1 型の層状ケイ酸塩で，結晶構造中の OH 基だけでなく，層と層の間にも水を取り込むことができる。一方，蛇紋石は 1:1 型の層状ケイ酸塩で，水は主に結晶構造中の OH 基として保持され，層間水はほとんど含まれない。

（２） 加熱や衝撃を受けると，脱水や結晶構造の乱れ，非晶質化が進み，XRD パターンでは回折ピークの強度低下や幅の増加がみられる。サポナイトでは，層間水が失われることで 001 反射が高角度側へ移動する。一方、蛇紋石では底面間隔はあまり変化しないが，結晶構造の乱れや非晶質化によって回折ピークが弱くなり，強い加熱や衝撃では消失する。

（３） 固体有機物の一部に，極低温環境でのイオン分子反応による同位体分別を示す重水素の濃集，および/またはイオン分子反応，星間塵表面反応，選択的光解離などにおける同位体分別を示す窒素 15 の濃集検出されたこと。

（４） リュウグウ微粒子の極表面は宇宙風化によって脱水，溶融していることが判明した。すなわち，反射スペクトルは宇宙風化を受けた小惑星表面を観測し，帰還試料分析では全岩分析を行ったことで，各手法によって小惑星の異なる部分における組成の違いが明らかになったため。

［５］

問１

（１）実線：中央海嶺（または発散境界）
破線：トランスフォーム断層（またはすれ違い境界）

（２）(a)：正断層，　(b)：左横ずれ断層

（３）

(a)：



(b)：



（４）中央海嶺ではアイソスタシーが成立していることを意味する。
（理由）フリーエア異常はその領域での質量の過不足を表し，おおよそゼロの場合はアイソスタシーが成立していることを示す。中央海嶺では地殻の割れ目を地下から沸き上がったマグマが埋めていくことでプレートが生成されている。アイソスタシーは地下の低密度なマグマによる負の質量異常が中央海嶺による正の質量異常を補償することで成立している。
（５）海溝ではフリーエア異常は負になっている。
（理由）海溝は高密度な海洋プレートが自重により沈み込むことで形成されている。これによる負の質量異常を補償するような正の質量異常は存在しない。

問２
（１）①
（２）かんらん石
（３）3.5 g/cm^3

<計算過程>

$$\frac{化学組成式の式量 \times 単位胞中の分子数}{アボガドロ数 \times 単位格子体積} \times Å^3 から cm^3 への単位換算係数$$
$$= \frac{(24\times2+28+16\times4)\times8}{6\times10^{23}\times538} \times \frac{10^{10\times3}}{10^{2\times3}}$$

（４）3.3 重量%

<計算過程>

$$\frac{化学組成式中の H_2O の式量}{化学組成式の式量} \times 100 = \frac{(1\times2+16)\times\frac{0.5}{2}}{24\times1.75+28+1\times0.5+16\times4} \times 100$$

（５）太平洋スラブ内部が低温であり，過剰圧が大きくなるまで相転移を始めないから。

［６］問１
（１）　ア　粘性率　　イ　層流　　ウ　小さな，小さい
　　エ　年代　　オ　水深　　カ　ホットスポット
（２）（流線関数の式より，流速の垂直方向の成分は左側で正であり上昇している。上部では，流速の水平方向の成分が正であり，右方向へ流れていることを示す。一方，）速度の大きさは流線関数の勾配が大きい，すなわち流線が密になっているところほど大きい。このため，速度は外周ほど大きい。また，流線はモデルの中心に向かって徐々に疎になるので，速度は緩やかに減少することを表している。流れの方向の変化も小さい。これは，層流の特徴であり，粘性率が高いことの結果である。（また，下降速度は上昇速度よりも大きい。）
（３）熱伝導率が小さいため，この部分は断熱的で一様な温度となる。上下の圧力差が大きい場合には下降・上昇に伴って断熱圧縮・膨張が起きるので，下部ほど温度が高くなる。すなわち，垂直方向のみ温度勾配ができる。このため，等温線は水平となる。また，この温度勾配を断熱温度勾配という。
（４）熱伝導率と上面の平均温度勾配の積が上面の平均熱流量である。上面の平均温度勾配は図(d)の水平平均温度から求めることができる。
（５）660km などの相転移，粘性率の温度依存性，化学的不均質，含水率の粘性率や密度

への影響...など

（6）図(c)

地震波速度は温度に依存して変化する。また，地震波速度異常は地震波速度のその深さにおける平均地震波速度からのずれ（の割合）である。よって温度異常と対応させることが適切である。

問2

（1）パイロライトは，地球深部からもたらされた捕獲岩（かんらん岩）と中央海嶺玄武岩（MORB）の組成に基づいて推定された，仮想的なモデルマントル物質である。ダナイトと玄武岩を質量比約 3：1 で混合した組成をもち，Ringwood によって提唱された。現在では，上部マントルの代表的なモデル組成として広く用いられている。

（2）かんらん石と直方（斜方）輝石

（3）パイロライトが部分溶融すると，玄武岩質マグマ（中央海嶺玄武岩）が生成される。一方，溶融後に残る残渣のかんらん岩はハルツバージャイトに相当する。そのため，海洋プレートでは，海洋地殻（玄武岩質物質）の直下にハルツバージャイトが存在する。

（4） エクロジャイト（eclogite）（榴輝岩でも可）

エクロジャイトは周囲のマントルより高密度の岩石であり，この相転移によりプレートの沈み込みが促進される。

（5）(a) パイロライト及びハルツバージャイトの主要構成鉱物はかんらん石である。この不連続面は 660 km 不連続面に相当し，リングウッダイト（ringwoodite）からブリッジマナイト（bridgmanite）とフェロペリクレース（ferropericlase）へ相転移する。この相転移のクラペイロン勾配は負であるため，低温の沈み込むプレート内では，周囲のマントルよりも高圧力にならなければ相転移が進行しない。その結果，660 km 付近ではプレートは周囲よりも低密度のまま残存し，浮力を生じることで，メガリス（巨大岩塊）の形成につながる。

(b) 玄武岩質物質の主要構成鉱物は，マントル遷移層付近ではメジャライト・ガーネット（majorite garnet）である。メジャライトもブリッジマナイトへ相転移するが，Al_2O_3成分を多く含むため，相転移は幅広い固溶体領域で進行する。その結果，660 km 不連続面付近では玄武岩質物質の密度が周囲のマントルよりも低くなり，浮力を生じることでメガリス（巨大岩塊）の形成につながる。