

2021. 8. 25

神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻
博士課程前期課程入学試験問題

専 門 科 目

解答時間 9 : 30 ~ 12 : 30

注意事項

- 1) 合図があるまで問題冊子を開いてはいけません。
- 2) 「はじめ」の合図があったら、先に解答用紙に受験番号と氏名を記入してから、解答を始めなさい。
- 3) 問題 1 ~ 問題 8 の中から 2 つ問題を選び、解答しなさい。各問題は 150 点満点です。
- 4) 問題ごとに別々の解答用紙を使いなさい。 解答用紙が足りない場合は、監督者に申し出なさい。

1. (数学 A)

1-1/1

次の文章を読んで、以下の問い(1) ~ (3) に答えなさい。

(1) 近似値を得る方法について以下の問いに答えなさい。

- (i) 無限階微分可能な関数 f について、ある点 a における $f(a), f'(a), f''(a)$ が既知であるとする。点 a の近傍にある点 $a + \epsilon$ における関数値 $f(a + \epsilon)$ に対して、 ϵ の 2 次の精度で以下の近似式が成り立つことを示しなさい。

$$f(a + \epsilon) \approx f(a) + \epsilon f'(a) + \frac{1}{2} \epsilon^2 f''(a)$$

- (ii) $\cos(62^\circ)$ の値を小数点以下第 3 位まで求めなさい。必要であれば $\frac{\sqrt{3}}{2} = 0.8660254, \pi = 3.1415926$ を用いて良い。

(2) y を x の関数とする。以下の常微分方程式の一般解を求めなさい。

(i) $y' - y = 0$

(ii) $y'' + y' - 6y = 0$

(iii) $y'' - 4y' + 4y = 0$

(3) 以下で定義する行列 A について以下の問いに答えなさい。

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -3 & 2 \\ -2 & 1 & -2 \\ 2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

- (i) A の固有値を求めなさい。

- (ii) A の逆行列を求めなさい。

2. (数学B)

2-1/2

次の文章を読んで、以下の問い(1)～(3)に答えなさい。解答にあたっては結果だけでなく、導出過程も記しなさい。

(1) $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ とする。ここで $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ はそれぞれデカルト座標における x, y, z 方向の単位ベクトルである。また、 $r \neq 0$ とする。次の値を計算しなさい。

(i) ∇r

(ii) $\nabla \cdot \mathbf{r}$

(iii) $\nabla \times \mathbf{r}$

(iv) $\nabla^2 \left(\frac{1}{r}\right)$

(2) ガウス積分とガンマ関数に関係した次の問いに答えなさい。

(i) ガウス積分とは次のような積分のことである。

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-ax^2) dx$$

ここで $a > 0$ である。2次元空間 (x, y) における次の積分

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-ax^2) \exp(-ay^2) dx dy$$

を極座標に変換して積分することで、

$$I = \sqrt{\frac{\pi}{a}}$$

であることを証明しなさい。

(ii) ガンマ関数とは次のような関数のことである。

$$\Gamma(s) = \int_0^{\infty} t^{s-1} \exp(-t) dt$$

ただし、 $s > 0$ 。適当な積分の変数変換を行い、ガウス積分を利用することで $\Gamma(1/2)$ の値を求めなさい。

- (3) ガウスの定理に関係した次の問いに答えなさい．ここでガウスの定理とは，あるベクトル \mathbf{A} の面積分と体積積分について

$$\int_S \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} dS = \int_V \nabla \cdot \mathbf{A} dV$$

という関係があるというものである．ここで V はある領域の体積であり，その表面を S と表す．また \mathbf{n} は体積 V から出ていく方向を正とする，面の単位法線ベクトルを表す．

- (i) ベクトル \mathbf{A} として具体的に次のようなベクトルを考える．

$$\mathbf{A} = (xy)\mathbf{i} + (5yz)\mathbf{j} - (2zy)\mathbf{k}$$

ここで $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ はそれぞれデカルト座標における x, y, z 方向の単位ベクトルである．図 1 にあるような単位立方体の 6 面についてベクトル \mathbf{A} の表面 S に対する面積分を行いその値を求めなさい．

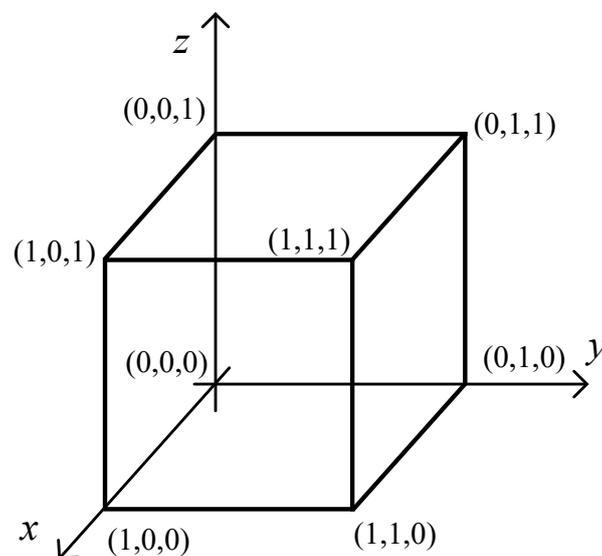


図 1 1つの頂点が原点に位置する単位立方体.

- (ii) 図 1 にあるような単位立方体にたいして \mathbf{A} の発散 ($\nabla \cdot \mathbf{A}$) の体積積分を行いその値を求めなさい．そしてこの結果と前問の結果からガウスの定理が成り立っていることを示しなさい．

3. (物理学 A)

3-1/2

以下の問い (1), (2) に答えなさい。解答にあたっては結果だけでなく導出過程も記しなさい。

- (1) xyz 空間内に壁がある。 $z = 0$ を地面とする。この壁に質量 m の質点を衝突させる。衝突後、質点の壁に垂直な相対速度成分は衝突前と反対向きに e 倍となり（垂直方向の反発係数が e ）、壁に平行な相対速度成分は衝突前と同じ向きに f 倍となる（接線方向の反発係数が f ）とする。重力加速度は、鉛直 (z 軸) 下向きに大きさ g とする。このとき以下の (i), (ii) に答えなさい。

- (i) 図 1 のように、じゅうぶんに高い壁が $x = 0$ に固定されている。点 $P(l, 0, 0)$ から、速度 $(-v, 0, w)$ で質点を壁に向けて投射する。質点の高さが壁の高さを超えることはないものとする。

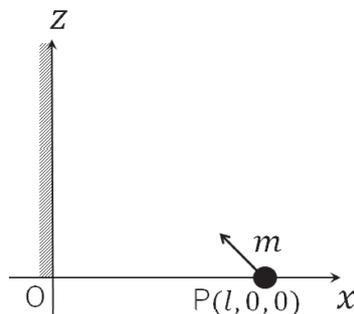


図 1

- (a) 質点が地面に落ちる前に壁と衝突する条件を示しなさい。
- (b) (a) で求めた条件が満たされるとき、質点が壁と衝突する地面からの高さを求めなさい。
- (c) 同じく、(a) で求めた条件が満たされるとき、壁と衝突する直前の質点の速度を示しなさい。
- (d) $vw = 2gl$ のときに、質点が壁との衝突後に初めて地面に衝突するのが点 P となるための条件を求めなさい。

3-2/2

- (ii) 図2のように，高さ $2s$ ，幅 $2s$ の壁が横幅の中心で z 軸に固定されており， z 軸周りに滑らかに回転するとする．壁の z 軸周りの慣性モーメントを I とする．今，壁は x 軸となす角 θ ($0 < \theta < \pi/2$) で静止しているとする．質点が，この壁面の点 R ($r\cos\theta, r\sin\theta, s$) に，速度 $(-v, 0, 0)$ で衝突する．ただし， $0 < r < s$ である．

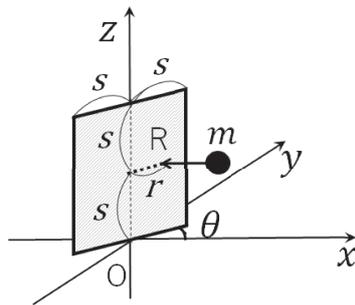


図2

- (a) 質点が壁と衝突した直後の壁の角速度 ω を求めなさい．
 (b) 質点が壁と衝突した直後の質点の速度の x 軸方向の成分を求めなさい．
- (2) 真空中に z 軸を中心軸として，半径 a, b ($0 < b < a$) で厚さの無視できる十分に長い筒状の2つの導体があり，その間に誘電体をはさまれている．中心軸に垂直な方向の，中心軸からの距離を r ($0 < r < a$) とし，2つの導体間の比誘電率が $\epsilon(r) = kr^\gamma$ (k, γ は定数) であるとする．電位を $V(r)$ ， r 方向の電場を $E(r)$ とする．また， $V(b) = 0$ とする．内側の導体 ($r = b$)，外側の導体 ($r = a$) それぞれに z 軸方向の単位長さあたり，各 $q, -q$ の電荷を与える．真空の誘電率を ϵ_0 とする．
- (i) $E(r)$ ($b < r < a$) を求めなさい．
 (ii) $V(r)$ ($b < r < a$) を求めなさい．

4. (物理学B)

4-1/2

以下の問い (1), (2) に答えなさい。解答にあたっては結果だけでなく導出過程も記しなさい。

(1) n モルの理想気体が図 1 のように 4 つの段階で準静的に変化する $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ のサイクルを考える。

- $A \rightarrow B$: 断熱的に体積を V_A から V_B ($V_B > V_A$) まで変化させる。体積が V_A, V_B のときの温度はそれぞれ T_H, T_L であった。
- $B \rightarrow C$: 温度を一定に保ちながら体積を V_B から V_C ($V_C < V_B$) まで変化させる。
- $C \rightarrow D$: 断熱的に体積を V_C から V_D ($V_D < V_C$) まで変化させる。体積が V_D のときの温度は T_H であった。
- $D \rightarrow A$: 温度を一定に保ちながら体積を V_D から V_A ($V_A > V_D$) まで変化させる。

このとき、以下の問いに答えなさい。ただし、気体定数を R とし、理想気体の定積モル比熱 C_V を定数とする。

- 理想気体の状態を変化させる際に、理想気体に与えられる熱を Q 、理想気体が行う仕事を W 、理想気体の内部エネルギーの変化を ΔU とするとき、 $Q, W, \Delta U$ の間の関係を答えなさい。
- 過程 $A \rightarrow B$ において理想気体が行う仕事 W_{AB} と理想気体の内部エネルギーの変化 ΔU_{AB} を求めなさい。
- 過程 $B \rightarrow C$ において理想気体が行う仕事 W_{BC} と理想気体の内部エネルギーの変化 ΔU_{BC} を求めなさい。
- このサイクルの熱効率 $\eta = \frac{W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA}}{Q_{DA}}$ が $1 - \frac{T_L}{T_H}$ となることを示しなさい。ここで、 Q_{DA} は過程 $D \rightarrow A$ において理想気体に与えられる熱とし、 W_{CD}, W_{DA} はそれぞれ過程 $C \rightarrow D, D \rightarrow A$ において理想気体が行う仕事である。
- 図 1 のサイクルを、温度を横軸、エントロピーを縦軸とする空間に図示し、そのような図になる理由を説明しなさい。ただし、 A, B, C, D の各点の位置を示し、サイクルの向きを矢印で示すこと。

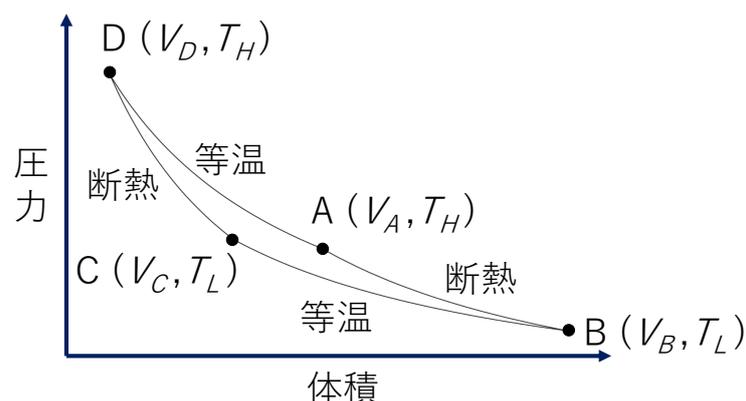


図 1

- (2) 質量 m , 長さ $2l$ の一様な細い棒がある. 図 2 のように, この棒の中心から h の長さの点を P とし, 棒が点 P を通る水平な軸の周りに鉛直面内で自由に回転できるものとする. 重力加速度の大きさを g とする.
- 棒の単位長さあたりの質量 (線密度) ρ を求めなさい.
 - 回転軸 P の周りの棒の慣性モーメントが $\frac{m}{3}(l^2 + 3h^2)$ となることを示しなさい.
 - この棒を鉛直方向からわずかに傾け, 手を離すと, 鉛直面内で振り子運動をした. この振り子運動の角周波数を求めなさい. ただし, 鉛直方向と棒のなす角度 θ は小さいとして, $\sin \theta$ を θ としてよい.
 - この振り子運動の周期が最も小さくなるときの h の値を求めなさい.

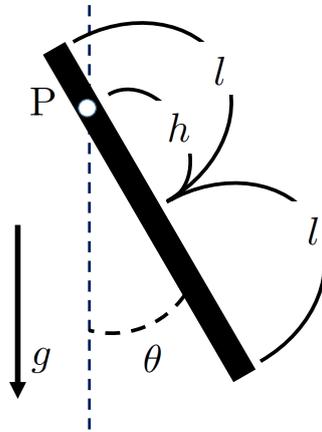


図 2

5. (岩石学・鉱物学)

5 - 1/4

以下の問い (1) ~ (4) に答えなさい。

(1) 次の文章を読んで、以下の問い (i) ~ (iii) に答えなさい。

多成分多相の系においては、一般的に、ある成分 X の濃度は異なる相の間で互いに異なる。(ア)平衡状態にある系に含まれる A 相と B 相の成分 X の濃度の比の値を、A 相と B 相間の成分 X の分配係数という。マグマにおいて、メルトとある固相間の成分 X の分配係数は、メルト中の成分 X 濃度に対する固相中の成分 X 濃度の比の値として示されるのが普通である。

例えば、メルト 60 wt% とカンラン石 40 wt% の 2 相のみからなる平衡状態のマグマにおいて、マグマ全体を平均した成分 X の濃度が 320 ppm、カンラン石中の濃度が 50 ppm であった場合、メルト中の成分 X の濃度は である。この時、メルトとカンラン石間の成分 X の分配係数は である。成分 X のようなメルトに強く分配される元素を総称して 元素と呼ぶ。

一方、天然の火山岩中には、様々な非平衡な性質が観察される。例えば、ある火山岩中に組成が明確に異なる斜長石斑晶が共存する場合がある。これは、組成の異なる複数のマグマが混合を起こし、平衡に達する前に冷却固結したものであると考えられる。このような火山岩中の斑晶には、(オ)混合を反映した累帯構造がしばしば記録されている。

(i) 下線部 (ア) について、多成分多相系の物質の平衡な状態とはどのような状態を指すか説明しなさい。ただし、説明には「化学ポテンシャル」の語句を用いること。

(ii) 以下の問い (a) ~ (d) に答えなさい。

- (a) 本文中 の数値を有効数字 2 桁で求めなさい。
- (b) 本文中 の数値を有効数字 2 桁で求めなさい。
- (c) 本文中 に当てはまる語句を書きなさい。

- (d) マグマが分別結晶作用によって分化する場合を考える。成分 X の分配係数を D とし、メルト中の濃度を C とする。濃度 C はメルトの結晶化に伴い、以下の式に従って変化する。

$$\frac{dC}{dM} = (D - 1) \frac{C}{M}$$

ここで M はメルトの質量である。分別結晶作用により、メルト質量が初期メルト質量の F 倍 ($F < 1$) になったとき、メルト中の成分 X の濃度 C を F の関数として求めなさい。ただし初期状態でのメルト中の成分 X の濃度は C_0 であるとし、 D は定数とする。

- (iii) 下線部(オ)に関して、斜長石の累帯構造を考える。玄武岩質マグマとデイサイト質マグマがあり、どちらにも斑晶として斜長石が含まれている。これらのマグマが混合した時、斜長石斑晶に生じる累帯構造について、アノーサイト ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)-アルバイト ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) の定圧二成分相関係に基づいて説明しなさい。

- (2) 次の文章は鹿児島県の桜島火山で発生した噴火の後に気象庁から発表された火山活動解説資料の一部を改変した物である。この文章を読んで、以下の問い(i)～(iv)に答えなさい。

本日 07 時 19 分に南岳山頂火口で(ア)爆発的噴火が発生し、(イ)多量の噴煙が上昇し、西方向に流れました。(ウ)弾道を描いて大きな噴石が飛散し、火砕流が南西側へ流下しました。(エ)桜島島内に設置している傾斜計及び伸縮計では、昨日から山体の隆起(伸び)が認められましたが、07 時 19 分の爆発的噴火により沈降(縮み)しました。

- (i) 下線部(ア)に関して、火山噴火には爆発的な噴火と非爆発的な噴火とがある。両者の違いを引き起こす要因として考えられることをマグマに含まれる揮発性成分量に着目して 2～3 行程度で述べなさい。
- (ii) 下線部(イ)に関連して、図 1 は噴煙および大気密度と、火口からの高さの関係を示した概念図である。図 1 には噴煙密度と大気密度に逆転が見られる。この理由を説明しなさい。

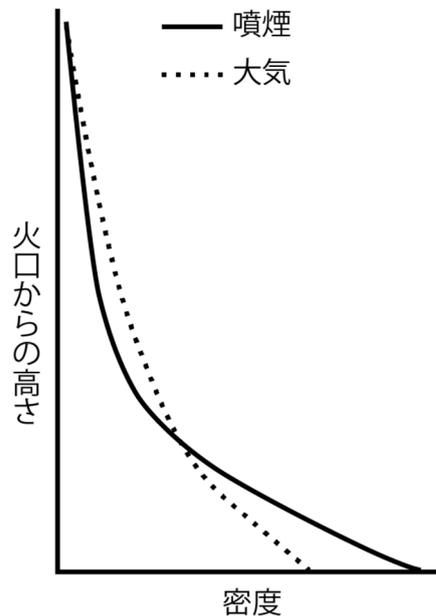


図 1：噴煙および大気の密度と，火口からの高さの関係

- (iii) 下線部(ウ)について，標高 1000 m の火口から噴石の 1 つが水平より上向き 60° の放出角度で噴出し，水平距離 1000 m，標高 700 m の地点に落下するのが観測された．この噴石の初速を有効数字 2 桁で求めなさい．ただし重力加速度を 10 m/s^2 とし，空気抵抗や風の影響は無視できるものとする．
- (iv) 桜島火山で続いている噴火はブルカノ式噴火に分類される噴火である．ブルカノ式噴火は間欠的な噴火であるが，そのような噴火が起こるメカニズムとして考えられることを，下線部(エ)の事実も参考にして 3～5 行程度で説明しなさい．

(3) 次の文章を読んで以下の問い(i)～(v)に答えなさい．

Ca-Mg-Fe 輝石は，多くの火成岩や変成岩に含まれる代表的な造岩鉱物であり，基本的な化学組成は $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$ で表される．Ca-Mg-Fe 輝石は，大きく分けて空間群 $C2/c$ に属する単斜輝石と，空間群 $Pnma$ に属する直方輝石がある．図 2 は，空間群 $C2/c$ の対称操作の空間配置を示している．

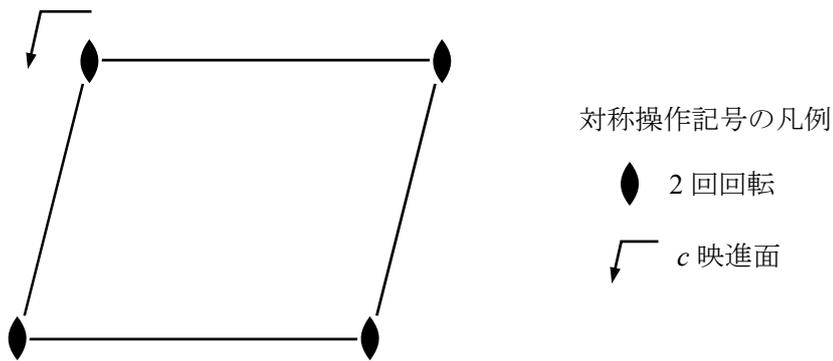


図2：空間群 $C2/c$ の単位格子と対称操作を b 軸から投影した図。平行四辺形の右方向の辺が a 軸，左下方向の辺が c 軸に対応している。

- (i) 解答用紙に輝石台形を描き，4つの頂点に対応する化学組成と鉱物名を答えなさい。
- (ii) 単斜輝石と直方輝石の偏光顕微鏡下での光学的特徴を，両者の共通点と相違点を明確にして説明しなさい。
- (iii) 輝石の結晶構造における陽イオンの配位環境について簡潔に説明しなさい。単斜輝石と直方輝石の違いについては述べなくてよい。
- (iv) 直方晶系の結晶の格子定数を a, b, c としたとき，結晶面 (hkl) の面間隔 d は

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}$$

と表すことが出来る。この関係式を幾何学的に導出しなさい。

- (v) 図2にならって解答用紙に空間群 $C2/c$ の単位格子の枠を描き，結晶学的に等価な関係となる一般位置を示しなさい。紙面垂直方向の分率座標も書き込むこと。

(4) 次の用語群(i)～(vi)の中から2つ選び，岩石学，鉱物学，あるいは火山学の観点から3行程度で説明しなさい。

- | | |
|---------------|-------------|
| (i) 結晶族点群 | (ii) ギブスの相律 |
| (iii) エクロジャイト | (iv) 火山フロント |
| (v) ラハール | (vi) 火山爆発指数 |

6. (地質学)

6-1/3

以下の問い (1) ~ (4) に答えなさい。

- (1) 下の図は、ある岩石試料に対して実施した破壊試験の結果 (図 1, 2) および地殻浅部の強度断面 (図 3) を表したものである。岩石の破壊特性と強度に関する以下の問い (i) ~ (v) に答えなさい。

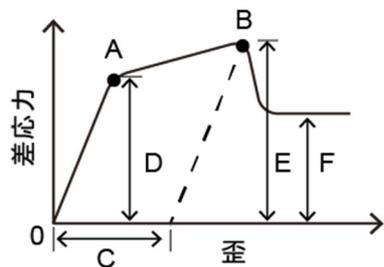


図 1

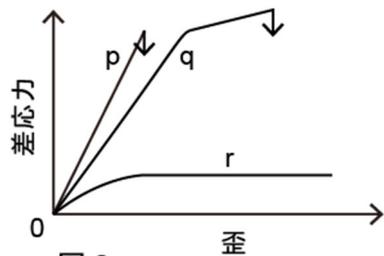


図 2

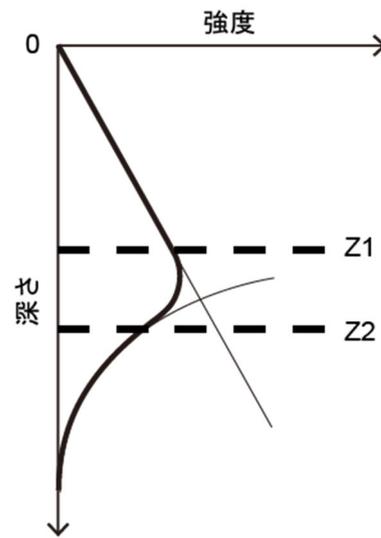


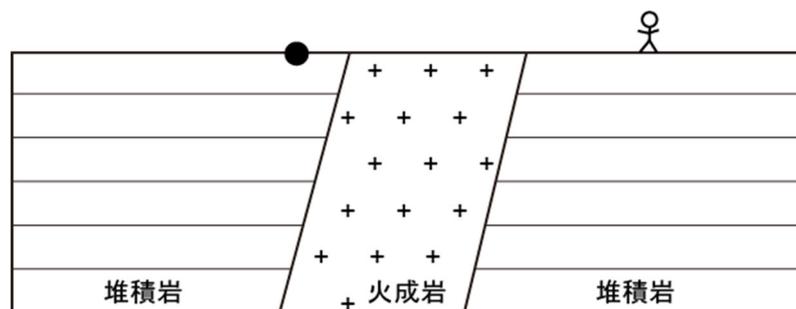
図 3

- (i) 図 1 の差応力-歪関係における A~F が何を示しているのか、答えなさい。図中の点線は、B 点において除荷した際の歪経路である。
- (ii) 図 1 の原点から A 点までは、弾性変形の領域である。弾性変形の定義を簡潔に説明しなさい。
- (iii) 試験の結果、差応力-歪関係において異なる破壊 (変形) 様式を示した (図 2)。このうち、p, r の破壊 (変形) の性質を答えなさい。
- (iv) 図 3 において、深度 Z1 以浅と Z2 以深では、強度特性が異なる。それぞれの領域を支配する要素を簡潔に答えなさい。
- (v) 図 3 において、深度 Z1 以浅、Z1-Z2、および Z2 以深の環境下で観察される、岩石の変形機構とその特徴をそれぞれ答えなさい。また、それぞれの深度における岩石の差応力-歪み関係を図 2 の p~r から選びなさい。

(2) 年代測定とそこから組み立てられる地史について、以下の問い (i) , (ii) に答えなさい。ただし、閉鎖温度は、U-Pbが900°C、ジルコンフィッシュョントラック (FT) が300°C、アパタイトFTが100°Cとする。

(i) ある火成岩体からジルコンを取り出し、U-Pb年代を測定したところ、14Maの値を得た。さらにFT年代測定を行ったところ、ジルコンは10Ma, アパタイトは8Maという結果を得た。この岩体に起こった地史を書きなさい。

(ii) 下図のような火成岩の貫入岩体に対してジルコンU-Pb年代を測定したところ、12Maの値を得た。周辺の堆積岩からは、20-18Maの生息範囲を示す放散虫化石が得られた。黒丸地点の堆積岩のFT年代測定を行ったところ、ジルコンは $19 \pm 1\text{Ma}$, アパタイトは10Ma, という結果を得た。以上の年代をすべて含んだ地史を書きなさい。



(3) 以下の (i) ~ (iii) に示した二つの地質構造について、違いがわかるようにそれぞれを説明しなさい。必要ならば、図を描いても良い。

- (i) Fault-bent foldとFault-propagation fold
- (ii) Imbricate thrustとDuplex structure
- (iii) Pull-apart basinとPressure ridge

(4) 地球環境の変化と古生物の進化に関する問い (i) ~ (iii) に答えなさい。

- (i) 最初の生命が誕生した場所として、熱水噴出孔が有力な候補と考えられている。その理由を答えなさい。
- (ii) 約 24-20 億年前に起きた「大酸化イベント」は、大気中の酸素を急激に増加させた。「大酸化イベント」が生じた理由、およびそれが真核生物の誕生に及ぼした影響を答えなさい。
- (iii) 過去 5 回おきたと考えられている大量絶滅に関して、以下の問い (a) , (b) に答えなさい。
 - (a) ペルム紀末と白亜紀末におきた大量絶滅の概要を、それぞれ 3 行程度で答えなさい。
 - (b) 他の 3 回の大量絶滅のおよその時代 (単位は紀とする) をそれぞれ答えなさい。また、それにより衰退あるいは絶滅した生物を、それぞれひとつ答えなさい。

7. (固体地球物理学 A)

7-1/5

以下の問い (1) ~ (3) に答えなさい。

(1) 中央海嶺で作られた海洋リソスフェアの年代と水深の関係は、海洋リソスフェアの誕生後約 80 Myr までは、半無限一様媒質冷却モデルに従うことが知られている。これに関する次の問い (i)~(v) に答えなさい。

(i) 中央海嶺から離れた場所の海洋リソスフェアの厚さと水深の関係は、アイソスタシーの成立を仮定することで計算できる。図 1 を参考に、中央海嶺から離れた場所での水深 d を、その場所における海洋リソスフェアの厚さ L 、中央海嶺における水深 d_0 、海水密度 ρ_w 、海洋リソスフェアの密度 ρ 、アセノスフェアの密度 ρ_a を用いて表しなさい。

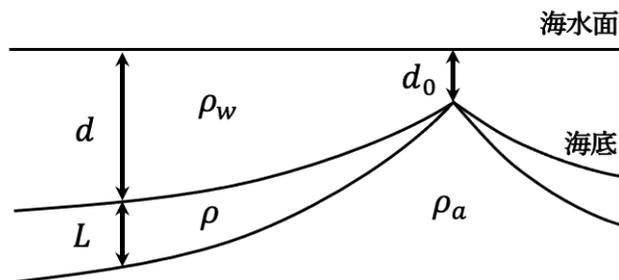


図 1

(ii) 中央海嶺で生まれた海底下物質の冷却過程を、半無限一様媒質冷却モデルで考えた場合、海底下の温度 T は、冷却開始からの経過時間 t の関数として、

$$T = T_a + (T_s - T_a) \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}} \right)$$

と与えられる。ここで、 erfc は相補誤差関数と呼ばれる関数 (図 2 参照) で、 κ は熱拡散率、 z は海底からの深さ、 T_s は海底 ($z = 0$) の温度、 T_a はアセノスフェア深部 ($z \rightarrow \infty$) の温度を表す。今、温度 T が $(T - T_a)/(T_s - T_a) = 0.1$ を満たす深さを、海洋リソスフェアとアセノスフェアの境界と考える。このとき、海洋リソスフェアの厚さ L を、 κ と t で表しなさい。ただし、相補誤差関数の値が必要な場合は、図 2 から読み取ること。

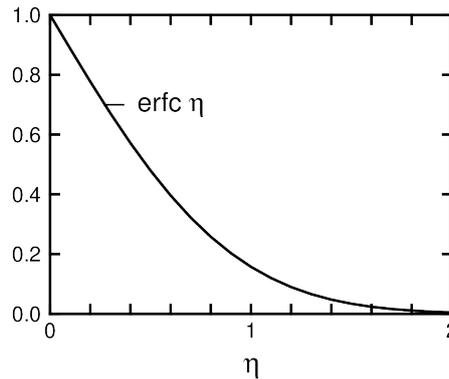


図2 相補誤差関数。

- (iii) (i), (ii) の結果から、水深 d を時間 t の関数として表し、水深 d の時間変化の特徴について述べなさい。
- (iv) (ii) で採用した海洋リソスフェアとアセノスフェアの境界の定義式 $(T - T_a)/(T_s - T_a) = 0.1$ の物理的意味を述べなさい。
- (v) 中央海嶺で海洋リソスフェアが誕生してから経過した時間と水深の関係について、半無限一様媒質冷却モデルを用いて計算した結果と観測データの比較を図3に示す。ただし、モデルによる水深の計算では、パラメタの値として、 $d_0 = 2500$ m, $\rho_w = 1000$ kg/m³, $\rho = 3400$ kg/m³, $\rho_a = 3300$ kg/m³, $\kappa = 1.0 \times 10^{-6}$ m²/s を用いた。図3によれば、モデル計算の結果は、観測データを十分に説明していない。用いたパラメタをどのように変化させれば、観測データをよりよく説明できるか考察しなさい。その際、少なくとも一つのパラメタについては、定量的に考察すること。

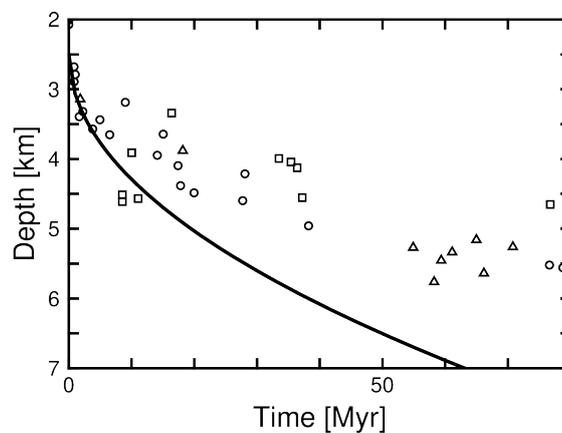


図3 水深と海底年代の関係。実線はモデル計算の結果、丸は太平洋、四角は大西洋、三角はインド洋の観測値を表す。

(2) 北東太平洋の地磁気異常図 (図 4) に関する次の問い (i), (ii) に答えなさい。



図 4 北東太平洋の地磁気異常図 (Maus et al. 2009 のデータを使用)。黒の部分が正の地磁気異常、白の部分が負の地磁気異常を示す。

- (i) 地磁気異常図では、正負の地磁気異常による縞模様を確認できる。この地磁気異常縞模様が形成される仕組みを説明しなさい。説明には、「海嶺」、「磁化」、「キュリー温度」の3語を含めること。
- (ii) 図4の中で確認できる地磁気異常縞模様の特徴を2つ挙げ、それぞれの成因について論じなさい。

(3) 物質の相転移境界に関する次の問い (i)~(iii) に答えなさい。

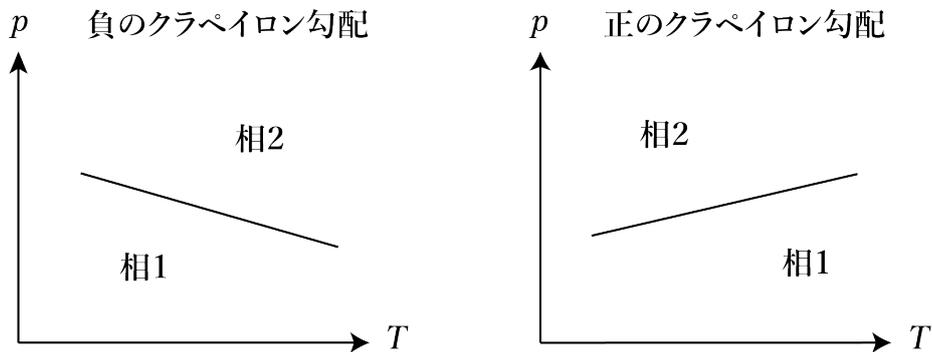


図5 クラペイロン曲線の概念図。

- (i) 物質の2つの相（例えばカンラン石とウォズレアイト）が平衡状態にある圧力と温度を示す曲線をクラペイロン曲線と呼ぶ。曲線の勾配 γ は、

$$\gamma \equiv \frac{dp}{dT}$$

で定義されるため、図5に示されるように、 $\gamma < 0$ 、 $\gamma > 0$ となるクラペイロン曲線の勾配は、それぞれ、負のクラペイロン勾配、正のクラペイロン勾配と呼ばれる。圧力 p の深さ z に対する増加率が、密度 ρ と重力加速度 g を用いて、

$$\frac{dp}{dz} = \rho g$$

と表せる時、温度の変化に対する相転移境界の深さの変化 (dz/dT) を γ 、 ρ 、 g を用いて表しなさい。

- (ii) 図6では、沈み込み帯における温度構造と、カンラン石 - ウォズレアイトの相転移境界（相転移境界1とする）、ウォズレアイト - リングウッドイトの相転移境界、並びに、リングウッドイト - ブリッジマナイト + フェロペリクレスの相転移境界（相転移境界2とする）が示されている。沈み込む海洋プレート内における相転移境界の深さは、例えば、相転移境界1では周囲に比べて浅く、相転移境界2では周囲に比べて深くなっている。相転移境界1と相転移境界2が、それぞれ、正と負、いずれのクラペイロン勾配に相当するか答えなさい。また、そう判断できる理由を (i) で得られた式を用いて説明しなさい。

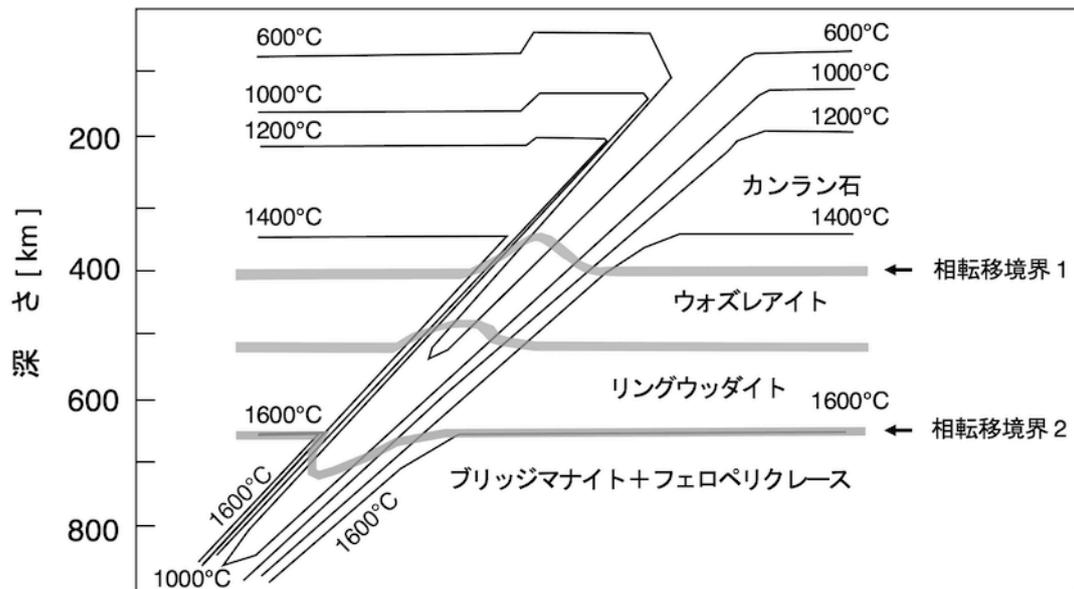


図6 沈み込み帯における温度構造 (実線) と相転移境界 (灰色線) (Turcotte and Schubert 2002 を改変)。

- (iii) カンラン石-ウォズレアイトの相転移に関しては、沈み込む海洋プレート内で相転移境界1が周囲に対して浅くなることから、海洋プレートに対し沈み込む方向の駆動力が生じることが知られている。この理由を説明しなさい。

8. (固体地球物理学B)

8-1/4

以下の問い(1)～(3)に答えなさい。ただし、専用の解答用紙(2枚)と定規が用意してあるので、必ず監督者に請求すること。

- (1) 図1は1998年から2004年の7年間に発生した深さ30km以浅、M3.8以上の地震の震央をプロットしたものである。このうち、図中の四角で示した範囲内の地震の震源情報を表2に示す。表2から地震の規模別頻度分布のグラフ(Gutenberg-Richter則のグラフ)を作成することを考える。

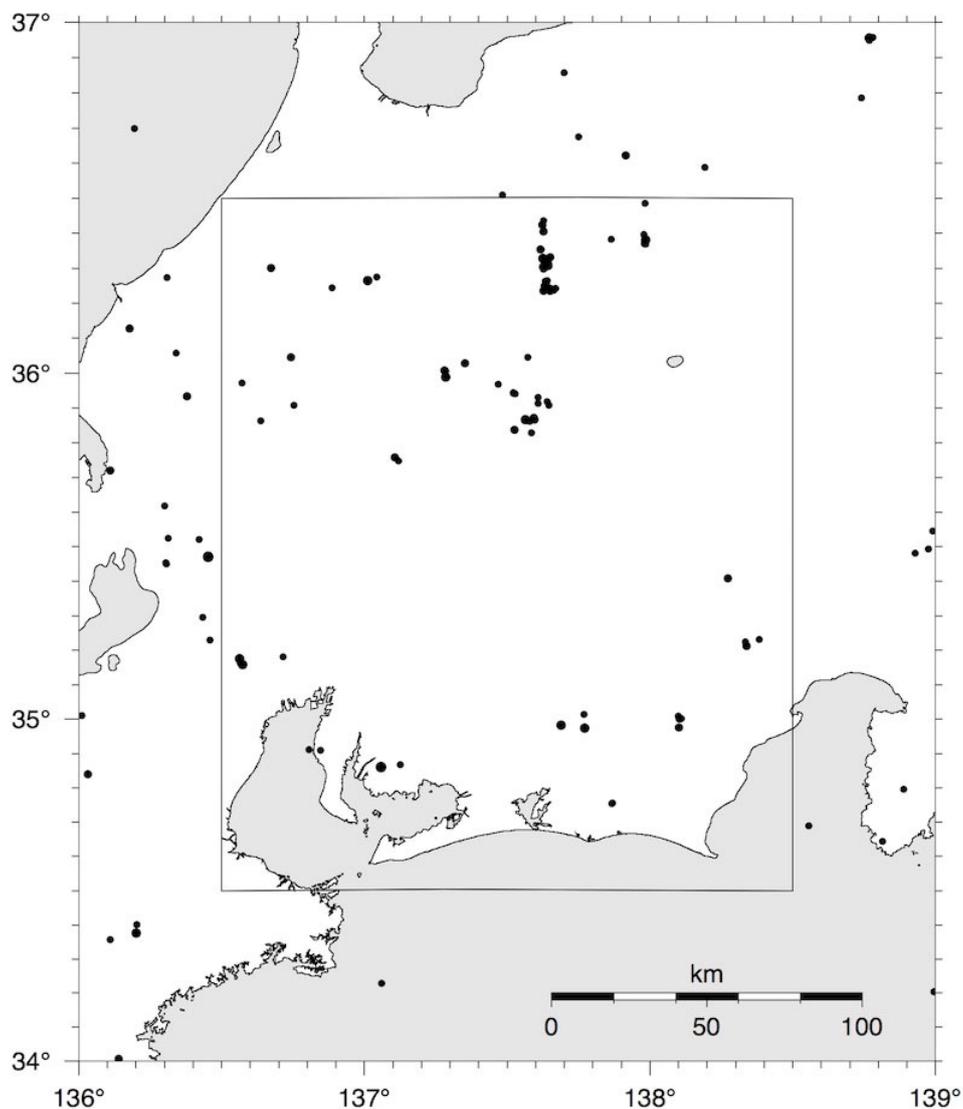


図1. 1998年から2004年の7年間に発生した深さ30km以浅、M3.8以上の地震の震央。

(i) マグニチュード M の地震の個数 $n(M)$ の表を作成しなさい (表は専用の解答用紙に用意されている、以下同様)。ここでは、 M の範囲を以下のように区切って $n(M)$ を定義することにする。

M3.8 - 4.2 の地震の総数 → M4.0 の地震の個数 $n(4.0)$

M4.3 - 4.7 の地震の総数 → M4.5 の地震の個数 $n(4.5)$

M4.8 - 5.2 の地震の総数 → M5.0 の地震の個数 $n(5.0)$

M5.3 - 5.7 の地震の総数 → M5.5 の地震の個数 $n(5.5)$

M5.8 - 6.2 の地震の総数 → M6.0 の地震の個数 $n(6.0)$

M6.3 - 6.7 の地震の総数 → M6.5 の地震の個数 $n(6.5)$

※なお、表 2 の地震の総数は 89 個である。

(ii) マグニチュード M 以上の地震の総数 (累計個数) $N(M)$ の表を、(i) で作成した $n(M)$ の表を使って作成しなさい。

(iii) 表 1 の対数表を使って、 $\log_{10} n(M)$ と $\log_{10} N(M)$ の値を有効数字 2 桁で求め、 $\log_{10} n(M)$ と $\log_{10} N(M)$ の表を作成しなさい。ただし、 M は 5.5 まででよい。

(iv) 専用解答用紙のグラフの横軸にマグニチュード M 、縦軸に $\log_{10} n(M)$ または $\log_{10} N(M)$ をとり、(iii) で作成した表からグラフを描きなさい。ただし、 $\log_{10} n(M)$ を白丸で、 $\log_{10} N(M)$ を黒丸でプロットすること。

(v) $\log_{10} N(M)$ のグラフの傾きを有効数字 1 桁で求めなさい。

| x | $\log_{10} x$ |
|-----|---------------|-----|---------------|-----|---------------|-----|---------------|-----|---------------|
| 1.0 | 0.000 | 3.0 | 0.48 | 5.0 | 0.70 | 7.0 | 0.85 | 9.0 | 0.95 |
| 1.1 | 0.041 | 3.1 | 0.49 | 5.1 | 0.71 | 7.1 | 0.85 | 9.1 | 0.96 |
| 1.2 | 0.079 | 3.2 | 0.51 | 5.2 | 0.72 | 7.2 | 0.86 | 9.2 | 0.96 |
| 1.3 | 0.11 | 3.3 | 0.52 | 5.3 | 0.72 | 7.3 | 0.86 | 9.3 | 0.97 |
| 1.4 | 0.15 | 3.4 | 0.53 | 5.4 | 0.73 | 7.4 | 0.87 | 9.4 | 0.97 |
| 1.5 | 0.18 | 3.5 | 0.54 | 5.5 | 0.74 | 7.5 | 0.88 | 9.5 | 0.98 |
| 1.6 | 0.20 | 3.6 | 0.56 | 5.6 | 0.75 | 7.6 | 0.88 | 9.6 | 0.98 |
| 1.7 | 0.23 | 3.7 | 0.57 | 5.7 | 0.76 | 7.7 | 0.89 | 9.7 | 0.99 |
| 1.8 | 0.26 | 3.8 | 0.58 | 5.8 | 0.76 | 7.8 | 0.89 | 9.8 | 0.99 |
| 1.9 | 0.28 | 3.9 | 0.59 | 5.9 | 0.77 | 7.9 | 0.90 | 9.9 | 1.0 |
| 2.0 | 0.30 | 4.0 | 0.60 | 6.0 | 0.78 | 8.0 | 0.90 | | |
| 2.1 | 0.32 | 4.1 | 0.61 | 6.1 | 0.79 | 8.1 | 0.91 | | |
| 2.2 | 0.34 | 4.2 | 0.62 | 6.2 | 0.79 | 8.2 | 0.91 | | |
| 2.3 | 0.36 | 4.3 | 0.63 | 6.3 | 0.80 | 8.3 | 0.92 | | |
| 2.4 | 0.38 | 4.4 | 0.64 | 6.4 | 0.81 | 8.4 | 0.92 | | |
| 2.5 | 0.40 | 4.5 | 0.65 | 6.5 | 0.81 | 8.5 | 0.93 | | |
| 2.6 | 0.41 | 4.6 | 0.66 | 6.6 | 0.82 | 8.6 | 0.93 | | |
| 2.7 | 0.43 | 4.7 | 0.67 | 6.7 | 0.83 | 8.7 | 0.94 | | |
| 2.8 | 0.45 | 4.8 | 0.68 | 6.8 | 0.83 | 8.8 | 0.94 | | |
| 2.9 | 0.46 | 4.9 | 0.69 | 6.9 | 0.84 | 8.9 | 0.95 | | |

表 1. 対数表

| 年月日時分秒 | 緯度 | 経度 | 深さ | M | 年月日時分秒 | 緯度 | 経度 | 深さ | M | | |
|--------------|-------|---------|----------|-------|--------|--------------|-------|---------|----------|-------|-----|
| 199802100120 | 48.65 | 35.7472 | 137.1192 | 10.63 | 4.3 | 199905072148 | 25.58 | 35.2130 | 138.3388 | 19.82 | 4.9 |
| 199804051053 | 55.38 | 35.4097 | 138.2725 | 11.60 | 4.6 | 199905081035 | 3.26 | 35.2243 | 138.3350 | 18.97 | 3.8 |
| 199804222028 | 48.96 | 35.1738 | 136.5620 | 9.01 | 4.1 | 199906120321 | 35.29 | 34.7547 | 137.8668 | 14.22 | 3.8 |
| 199804222032 | 48.42 | 35.1757 | 136.5632 | 7.78 | 5.5 | 199907072222 | 43.68 | 36.3025 | 137.6353 | 2.21 | 4.1 |
| 199805171259 | 55.95 | 35.1635 | 136.5643 | 8.92 | 3.9 | 199907072222 | 47.80 | 36.3060 | 137.6468 | 0.05 | 4.1 |
| 199805310330 | 25.49 | 34.8607 | 137.0583 | 13.56 | 6.4 | 199908021829 | 35.72 | 35.9678 | 137.4697 | 8.48 | 3.9 |
| 199806101232 | 42.90 | 36.4865 | 137.9835 | 12.29 | 3.8 | 199908221429 | 33.65 | 36.2455 | 136.8873 | 9.41 | 4.0 |
| 199808071447 | 14.60 | 36.2398 | 137.6580 | 4.55 | 4.2 | 199909091856 | 53.85 | 36.3838 | 137.8650 | 0.77 | 3.8 |
| 199808071447 | 59.28 | 36.2427 | 137.6523 | 5.69 | 4.2 | 199910050617 | 34.46 | 36.2753 | 137.0440 | 7.63 | 4.3 |
| 199808072102 | 15.35 | 36.2412 | 137.6368 | 4.91 | 3.9 | 200003030923 | 19.62 | 35.1813 | 136.7162 | 16.15 | 3.8 |
| 199808072202 | 18.73 | 36.2413 | 137.6392 | 5.26 | 4.2 | 200003242300 | 21.50 | 35.9082 | 136.7535 | 9.29 | 4.2 |
| 199808081951 | 57.58 | 36.2383 | 137.6442 | 3.84 | 4.2 | 200006282252 | 46.96 | 36.3113 | 137.6472 | 6.90 | 4.4 |
| 199808091242 | 20.75 | 36.2377 | 137.6500 | 4.65 | 3.9 | 200008121515 | 10.77 | 35.0137 | 137.7705 | 17.39 | 4.1 |
| 199808091245 | 23.01 | 36.2417 | 137.6385 | 4.30 | 4.6 | 200103031911 | 39.23 | 35.2320 | 138.3833 | 22.72 | 3.8 |
| 199808120940 | 34.56 | 36.2367 | 137.6513 | 4.31 | 4.6 | 200104090450 | 2.05 | 35.8375 | 137.5258 | 9.28 | 4.7 |
| 199808121513 | 3.67 | 36.2368 | 137.6282 | 2.78 | 5.0 | 200104232307 | 0.91 | 36.2650 | 137.0125 | 7.71 | 5.1 |
| 199808141406 | 53.15 | 36.2972 | 137.6267 | 3.38 | 4.2 | 200105262100 | 15.32 | 36.0287 | 137.3522 | 8.79 | 4.5 |
| 199808141936 | 14.81 | 36.3043 | 137.6257 | 4.79 | 4.7 | 200106010044 | 4.86 | 34.9770 | 138.1022 | 28.70 | 5.0 |
| 199808142132 | 13.44 | 36.3300 | 137.6265 | 1.72 | 3.8 | 200106011116 | 42.04 | 35.0088 | 138.0997 | 29.80 | 4.3 |
| 199808142352 | 42.99 | 36.2642 | 137.6347 | 4.87 | 4.0 | 200106031133 | 43.18 | 35.0018 | 138.1032 | 29.82 | 4.5 |
| 199808160328 | 18.57 | 36.3202 | 137.6342 | 2.51 | 4.4 | 200106032101 | 6.41 | 35.0027 | 138.1093 | 29.91 | 3.9 |
| 199808160329 | 18.42 | 36.3200 | 137.6365 | 2.83 | 4.5 | 200108250636 | 49.12 | 35.9888 | 137.2855 | 11.97 | 5.3 |
| 199808160331 | 7.83 | 36.3282 | 137.6257 | 3.16 | 5.6 | 200109271814 | 50.40 | 34.8677 | 137.1255 | 15.82 | 4.3 |
| 199808171015 | 4.99 | 36.3552 | 137.6175 | 0.00 | 4.7 | 200110101038 | 54.74 | 34.9825 | 137.6885 | 27.49 | 5.3 |
| 199808220344 | 10.65 | 36.2407 | 137.6578 | 1.58 | 4.1 | 200111091214 | 32.93 | 35.9087 | 137.6463 | 7.89 | 3.8 |
| 199808220355 | 45.05 | 36.2415 | 137.6487 | 4.10 | 4.6 | 200112240955 | 1.39 | 35.9140 | 137.6093 | 8.55 | 4.0 |
| 199808220448 | 23.16 | 36.2427 | 137.6702 | 3.91 | 4.0 | 200204032353 | 26.47 | 35.9305 | 137.6090 | 10.84 | 4.1 |
| 199808241120 | 43.17 | 36.2493 | 137.6302 | 6.35 | 4.1 | 200209080011 | 4.23 | 35.9712 | 136.5718 | 9.70 | 4.2 |
| 199808281413 | 12.68 | 36.2650 | 137.6413 | 4.92 | 3.9 | 200211171347 | 53.97 | 36.3020 | 136.6735 | 7.66 | 4.7 |
| 199809051008 | 0.42 | 36.4052 | 137.6272 | 1.07 | 4.9 | 200212040809 | 34.70 | 35.8712 | 137.5937 | 7.79 | 4.5 |
| 199809051202 | 0.82 | 36.4242 | 137.6243 | 0.00 | 4.8 | 200212161014 | 8.03 | 35.9190 | 137.6397 | 10.07 | 3.8 |
| 199809071653 | 25.06 | 36.2377 | 137.6632 | 6.47 | 3.8 | 200212180247 | 47.03 | 36.0062 | 137.2838 | 11.43 | 3.9 |
| 199809071654 | 38.50 | 36.2575 | 137.6388 | 9.39 | 3.8 | 200304010925 | 28.97 | 35.9428 | 137.5217 | 8.37 | 4.4 |
| 199809181716 | 10.64 | 36.3325 | 137.6518 | 0.00 | 4.8 | 200304010927 | 7.71 | 35.9435 | 137.5223 | 9.10 | 4.4 |
| 199809181716 | 47.32 | 36.3238 | 137.6417 | 0.61 | 4.7 | 200305180323 | 25.10 | 35.8672 | 137.5958 | 7.16 | 4.7 |
| 199809200653 | 3.12 | 36.4363 | 137.6272 | 1.28 | 4.4 | 200306131007 | 36.26 | 35.9412 | 137.5290 | 8.00 | 4.2 |
| 199811251047 | 54.10 | 35.8630 | 136.6362 | 10.56 | 4.0 | 200307090214 | 22.28 | 34.9103 | 136.8462 | 17.47 | 4.1 |
| 199901110910 | 39.46 | 36.0463 | 136.7438 | 6.33 | 4.6 | 200307180857 | 0.49 | 35.8610 | 137.5782 | 7.21 | 4.1 |
| 199901281025 | 45.93 | 36.3722 | 137.9825 | 9.39 | 4.8 | 200310050029 | 15.49 | 36.0073 | 137.2803 | 12.56 | 4.5 |
| 199902120019 | 42.39 | 35.8663 | 137.5637 | 6.11 | 5.5 | 200401111657 | 27.81 | 36.3978 | 137.9788 | 7.53 | 4.0 |
| 199902182317 | 56.55 | 34.7563 | 137.8688 | 13.85 | 3.8 | 200404010759 | 49.12 | 34.9123 | 136.8072 | 11.85 | 3.8 |
| 199904050906 | 11.30 | 35.8293 | 137.5860 | 5.89 | 3.9 | 200406041004 | 17.34 | 36.0458 | 137.5720 | 8.14 | 4.1 |
| 199905032345 | 56.91 | 36.3705 | 137.9848 | 10.72 | 3.9 | 200407270054 | 56.65 | 35.7583 | 137.1080 | 10.82 | 4.5 |
| 199905032346 | 28.28 | 36.3722 | 137.9810 | 10.43 | 3.9 | 200408290117 | 59.47 | 34.9737 | 137.7718 | 20.09 | 5.3 |
| 199905040302 | 48.83 | 36.3827 | 137.9848 | 12.27 | 5.1 | | | | | | |

表 2. 震源リスト

(2) スネルの法則を、不連続境界で接する2つの媒質中の2点間を波が最短時間で伝播する経路を求めることで導出しよう。媒質1(波の伝播速度 v_1)と媒質2(波の伝播速度 v_2)を伝わる波の経路に関する長さや角度を図2のように定義する。図2で、点Aと点Bの位置は固定され、不連続境界上で経由点Pの位置を動かすものとする。この時、以下の問いに答えなさい。

- (i) 媒質1中と媒質2中の波の伝播経路の長さ l_1 と l_2 を、 a 、 b 、 c 、 x を使って書き下しなさい。
- (ii) 波が点Aから点Pを経由して点Bに至るのにかかる時間 $T(x)$ を求めなさい。
- (iii) $dT(x)/dx$ を計算しなさい。最終的に $dT(x)/dx$ を x 、 l_1 、 l_2 、 v_1 、 v_2 、 c のみで表すこと。
- (iv) $T(x)$ が最小値をとる時、 $dT(x)/dx=0$ となることを利用して、その時の x を求めなさい。最終的に x を l_1 、 l_2 、 v_1 、 v_2 、 c のみで表すこと。
- (v) x が(iv)の値をとる時、 $\sin i_1/\sin i_2$ を計算し、その時スネルの法則が成立することを示しなさい。

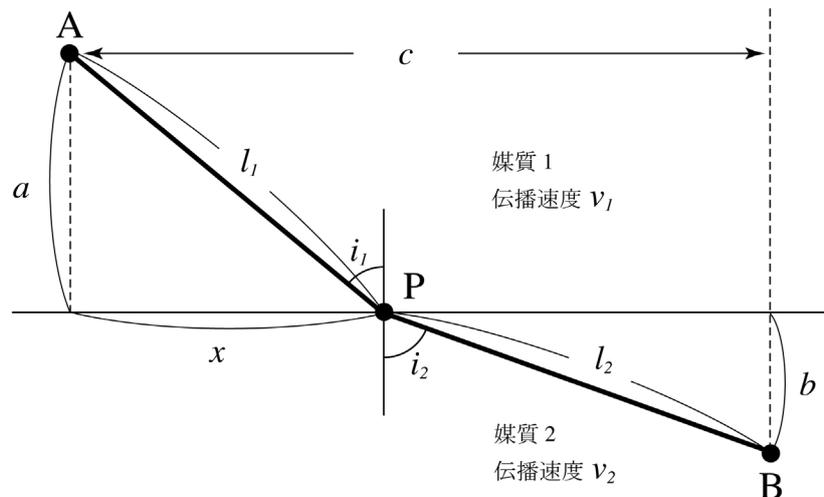


図2. 不連続境界で接する2つの媒質中の2点間を伝わる波の経路。

(3) 以下の用語を説明しなさい。

- (i) ディレクティブティ効果
- (ii) アウターライズ地震
- (iii) 地球の自由振動