

2018 年度 東京大学 前期 地学

第 1 問 宇宙

出題範囲	年周視差と距離/変光星/ダークマター
難易度	★★★★☆
所要時間	得意：18 分 ふつう：22 分 苦手：25 分
傾向と対策	問 1 では、地球から天体までの距離を測るさまざまな方法に関する問題が出題された。記述問題など多くは基本的な内容であるが、(2)(a)の計算問題だけは少し見慣れない問題だっただろうか。問 2 は銀河の円運動に関する問題であった。難しくはない問題であろう。計算は問 1 より分量が多くなっているが、基本的な知識と考え方を理解していれば手はちゃんと動くはずだ。落ち着いてしっかり得点したい。

解答

- 問 1 (1) (a) 衛星の望遠鏡では大気の影響を取り除くことができるから。
- (b) 年周視差が 1.0×10^{-4} 秒角の星は $\frac{1}{1.0 \times 10^{-4}} = 1.0 \times 10^4$ パーセクの距離にある。
これは $3.3 \times 1.0 \times 10^4 = 3.3 \times 10^4$ 光年に相当する。
- (2) (a) $P_1 > P_2 > P_3$
- 理由：周期光度関係より、セファイドの光度が小さいほど変光周期は短くなり、また変光周期 P_1, P_2, P_3 をもつセファイドの光度はこの順に小さくなっているから。
- (b) セファイドの光度には $10^{0.2}$ だけの不定性がある。天体の明るさはその天体までの距離の 2 乗に反比例するので、図 1-1 を使って求められる銀河までの距離の最大値を d_{max} 、最小値を d_{min} として
- $$10^{0.2} = \left(\frac{d_{max}}{d_{min}} \right)^2$$
- が成り立つ。よって
- $$\frac{d_{max}}{d_{min}} = 10^{0.1}$$
- また、0.1 が 1 より十分に小さいとして近似式を利用して
- $$10^{0.1} = 1 + 2.30 \times 0.1 + 2.65 \times 0.1^2 = 1.2565 \approx 1.26$$
- よって、図 1-1 を使って求められる銀河までの距離の最大値は、最小値に対して 26% 大きくなる。
- (3) I a 型超新星
- 問 2 (1) 絶対等級の差は $4.8 - (-20.2) = 25$ だから、銀河の光度は太陽の光度の $10^{\frac{2}{5} \times 25} = 1.0 \times 10^{10}$ 倍。
- (2) (a) $H\alpha$ 輝線の波長が銀河中心の右側で長く、左側で短くなっていることから、星間物質は右側では遠ざかり、左側では近づいているとわかり、回転方向は A である。
- (b) $3.0 \times 10^5 \text{ km/s} \times \frac{671.5 - 656.4}{656.4} = 6.90 \dots \times 10^3 \text{ km/s} \approx 6.9 \times 10^3 \text{ km/s}$

$$(3) \quad (a) \quad G \frac{mM(2 \text{ 万光年})}{(2 \text{ 万光年})^2} = m \frac{V^2(2 \text{ 万光年})}{2 \text{ 万光年}}, \quad G \frac{mM(4 \text{ 万光年})}{(4 \text{ 万光年})^2} = m \frac{V^2(4 \text{ 万光年})}{4 \text{ 万光年}}$$

より,

$$\frac{M(2 \text{ 万光年})}{M(4 \text{ 万光年})} = \frac{2 \text{ 万光年} \times V^2(2 \text{ 万光年})}{4 \text{ 万光年} \times V^2(4 \text{ 万光年})} = \frac{1}{2}$$

(b) $M(4 \text{ 万光年})$ のうち, 恒星と星間物質の質量を M_s とすると,

$$\frac{M_s}{M(4 \text{ 万光年})} = \frac{150^2}{200^2} = \frac{9}{16}$$

したがって, ダークマターの割合は

$$1 - \frac{9}{16} = \frac{7}{16} = 0.4375 \approx 0.44$$

解説

問 1

(1)

(a) 難易度: ★★★★★

地上の望遠鏡には, 大気の揺らぎの影響を受けて像が乱れるなどの欠点がある。宇宙空間に打ち上げられる衛星の望遠鏡を使うことで天体の鮮明な像を得ることができ, より小さな年周視差を測定できる。

解答例

衛星の望遠鏡では大気の揺らぎの影響を取り除くことができるから。

(b) 難易度: ★★★★★

1 パーセクとは年周視差が 1 秒角になる距離のことである。よって年周視差が 1.0×10^{-4} 秒角の星は $\frac{1}{1.0 \times 10^{-4}} = 1.0 \times 10^4$ パーセクの距離にある。これは $3.3 \times 1.0 \times 10^4 = 3.3 \times 10^4$ 光年に相当する。

(2)

(a) 難易度: ★★★★★

セファイドには周期光度関係といい, 変光周期と絶対等級の間に一定の関係があることが知られている。セファイドの光度が小さいほど変光周期も短くなるので, セファイドの光度の大小関係を図から読み取れば変光周期の大小もわかる。

解答例

$P1 > P2 > P3$

理由: 周期光度関係より, セファイドの光度が小さいほど変光周期は短くなり, また変光周期 $P1, P2, P3$ をもつセファイドの光度はこの順に小さくなっているから。

(b) 難易度：★★★★☆

精密なスペクトル型が測定されていないため、見つかったセファイドは図 1-1 の P2 の実線上のどこに位置するかわからない。であるからその光度を正確に決定することはできず、セファイドが実線の右下端にあるとすれば $10^{3.4}$ になり、実線の左上端にあるとすれば $10^{3.6}$ になる。つまり見つかったセファイドの光度には $10^{0.2}$ だけの不定性があることになる。

ここで天体の明るさはその天体までの距離の 2 乗に反比例することから、図 1-1 を使って求められる銀河までの距離の最大値を d_{max} 、最小値を d_{min} とすると

$$10^{0.2} = \left(\frac{d_{max}}{d_{min}} \right)^2$$

が成り立つ。よって

$$\frac{d_{max}}{d_{min}} = 10^{0.1}$$

また、0.1 が 1 より十分に小さいとして、あたえられた近似式を利用して

$$10^{0.1} = 1 + 2.30 \times 0.1 + 2.65 \times 0.1^2 = 1.2565 \approx 1.26$$

よって、図 1-1 を使って求められる銀河までの距離の最大値は、最小値に対して 26%大きくなる。

(3) 難易度：★★★★☆

I a 型超新星はその光度変化のピーク時の絶対等級がどの星でもほぼ一定であるので、標準光源として用いることができる。

解答例

I a 型超新星

問 2

(1) 難易度：★★★★☆

星の等級が 5 小さくなると、その明るさは 100 倍になる。1 等級の違いに対する明るさの変化を n 倍とすると $n^5 = 100$ なので、 $n = 10^{\frac{2}{5}}$ である。

銀河と太陽の絶対等級の差は $4.8 - (-20.2) = 25$ だから、銀河の光度は太陽の光度の $10^{\frac{2}{5} \times 25} = 1.0 \times 10^{10}$ 倍。

(2)

(a) 難易度：★★★★☆

ドップラー効果によって、観測者に近づく動きをする領域では輝線の波長は短くなり、観測者から遠ざかる動きをする領域では輝線の波長は長くなる。よって H α 輝線の波長観測の結果から、銀河円盤部の星間物質は銀河中心の右側では観測者から遠ざかる動きを、左側では観測者に近づく動きをしているとわかる。また、円盤部の像は上が観測者から見て近い側、下が観測者から見て遠い側であるとわかっているの、銀河の回転方向がわか

る。

解答例

H α 輝線の波長が銀河中心の右側で長く、左側で短くなっていることから、星間物質は右側では遠ざかり、左側では近づいているとわかるので、回転方向は A である。

(b) 難易度：★★★★☆

波長 λ の輝線の偏移を $\Delta\lambda$ とすると、銀河の後退速度 v が光の速度 c より十分に小さいとき、 $v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ が成り立つ。ここで H α 輝線の本来の波長は 656.4nm であり、銀河中心での観測波長は 671.5nm であるから、輝線の偏移 $\Delta\lambda$ は、 $671.5 - 656.4 = 15.1\text{nm}$ である

ここで、銀河中心での観測波長を用いているのは、銀河中心では銀河の回転運動は視線方向の成分をもたないために、銀河中心での赤方偏移には銀河回転の影響がなく、純粋に銀河の後退によるものだからである。

$$v = 3.0 \times 10^5 \text{km/s} \times \frac{15.1}{656.4} = 6.90 \dots \times 10^3 \text{km/s} \approx \mathbf{6.9 \times 10^3 \text{km/s}}$$

◆Check!! 銀河の後退速度の求め方

銀河のスペクトルを観測してみると、吸収線が波長の長いほう、つまり赤色光寄りにずれて現れることがわかっている。この現象を赤方偏移といい、光のドップラー効果による。赤方偏移の値 z は、波長 λ の吸収線が $\Delta\lambda$ だけ波長がずれていたとすると、 $z = \Delta\lambda/\lambda$ で表される。

また、ドップラー効果の式を考えると、赤方偏移から銀河の後退速度が求まる。後退速度の大きさを v 、光速を c 、赤方偏移を受ける前と受けたあとの光の周波数をそれぞれ f 、 f' とすると、これらをドップラー効果の式に当てはめて、(ドップラー効果の公式において、光源から観測者への方向を正としているので、後退速度は負となることに注意)

$$f' = f \frac{c}{c + v}$$

となる。ここで、 $f = c/\lambda$ $f' = c/(\lambda + \Delta\lambda)$ であり、代入すると、

$$\frac{c}{\lambda + \Delta\lambda} = \frac{c}{\lambda} \times \frac{c}{c + v}$$

$$\therefore c(\lambda + \Delta\lambda) = \lambda(c + v)$$

これを展開して整理すると、 $c\Delta\lambda = v\lambda$ となり、両辺を λ で割ると、

$$c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = cz = v$$

という式が導かれた。こうして銀河の後退速度が求まる。

(3)

(a) 難易度：★★★★☆

銀河中心から 2 万光年の距離にある恒星と 4 万光年の距離にある恒星のそれぞれについて、回転運動で生じる遠心力と銀河からの万有引力のつり合いを式で表して、以下の 2 式を得る。

$$G \frac{mM(2 \text{ 万光年})}{(2 \text{ 万光年})^2} = m \frac{V^2(2 \text{ 万光年})}{2 \text{ 万光年}}$$

$$G \frac{mM(4 \text{ 万光年})}{(4 \text{ 万光年})^2} = m \frac{V^2(4 \text{ 万光年})}{4 \text{ 万光年}}$$

辺々割ると

$$\frac{M(2 \text{ 万光年}) \times (4 \text{ 万光年})^2}{M(4 \text{ 万光年}) \times (2 \text{ 万光年})^2} = \frac{4 \text{ 万光年} \times V^2(2 \text{ 万光年})}{2 \text{ 万光年} \times V^2(4 \text{ 万光年})}$$

ここで図 1-3 の実線から $V(2 \text{ 万光年}) = V(4 \text{ 万光年}) = 200 \text{ km/s}$ とわかるので、

$$\frac{M(2 \text{ 万光年})}{M(4 \text{ 万光年})} = \frac{2 \text{ 万光年} \times (200 \text{ km/s})^2}{4 \text{ 万光年} \times (200 \text{ km/s})^2} = \frac{1}{2}$$

(b) 難易度：★★★★☆

銀河中心を原点とする半径 4 万光年の球内にある全構成要素の質量の総和が $M(4 \text{ 万光年})$ であるが、ここからダークマターを除いた、恒星と星間物質だけの質量を M_s とする。銀河にダークマターが存在しないと仮定する場合とそうでない場合とで、(a)と同様に遠心力と万有引力のつり合いを式で表すと以下の 2 式を得る。

$$G \frac{mM_s}{(4 \text{ 万光年})^2} = m \frac{(150 \text{ km/s})^2}{4 \text{ 万光年}}$$

$$G \frac{mM(4 \text{ 万光年})}{(4 \text{ 万光年})^2} = m \frac{(200 \text{ km/s})^2}{4 \text{ 万光年}}$$

辺々割ると

$$\frac{M_s}{M(4 \text{ 万光年})} = \frac{150^2}{200^2} = \frac{9}{16}$$

したがって、ダークマターの割合は

$$1 - \frac{9}{16} = \frac{7}{16} = 0.4375 \approx \mathbf{0.44}$$

(辻有恒, 笠見京平, 神原祐樹, 芝田力)

2018 年度 東京大学 前期 地学

第 2 問 降水過程・エルニーニョ

出題範囲	大気の運動/海洋の構造/海水の運動
難易度	★★★★☆
所要時間	得意：20 分 ふつう：25 分 苦手：30 分
傾向と対策	例年大気海洋分野は宇宙分野に比べ立式のやさしい問題が多い一方で問題文が長く計算が煩雑な傾向にあるが、この年度は計算も比較的わかりやすかったといえるだろう。問題文を根気よく読み解き条件設定を正しく把握しよう。問 1 は単位に注意して計算すれば難しい問題ではないので、確実に得点したい。問 2 では長い記述問題が出題されたが、よく出題される内容なので文章をうまく組み立てられるよう練習しておこう。

解答

問 1 (1) ア：乾燥断熱 イ：低下 ウ：湿潤断熱

(2) 求める高さを $x[\text{km}]$ とすると、

$$\frac{2.0 \times 10^{-6} \text{g/cm}^3 / \text{km} \times x[\text{km}]}{200 \text{ 個/cm}^3 \times 1.0 \text{g/cm}^3} = \frac{4}{3} \pi \times (2.0 \times 10^{-3})^3$$

$$x = 3.2 \text{km}$$

(3) 降水粒子が落下中に取り込んだ雲粒の分だけ体積が増加する。半径 R 、高さ Δz の円柱内にある雲粒の体積の総和は

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \pi R^2 \Delta z n$$

よって

$$\Delta V = \frac{4}{3} \pi^2 r^3 R^2 \Delta z n$$

(4) 落下開始時の降水粒子の体積は無視できるので

$$\frac{4}{3} \pi \times (1.0 \times 10^{-3} \text{cm})^3 \times 1.0 \times 10^5 \text{ 個} \times 2.0 \times 10^{-4} \text{ 個/cm}^3 \times 5.0 \times 10^2 \text{cm/s} \times \frac{3600 \text{s}}{1 \text{h}} \times \frac{10 \text{mm}}{1 \text{cm}}$$

$$= 1.44 \text{mm} \approx 1.4 \text{mm}$$

問 2 (1) 海上を吹く貿易風により太平洋熱帯域の表層水が東から西へと吹き寄せられ、東部太平洋熱帯域においてこれを補うような湧昇が起こって水温躍層の深度が浅くなる。これによってこの海域の海面水温が低下し、大気の大気活動が抑制されて海面気圧は高くなる。一方で、吹き寄せにより表層が厚くなる西部太平洋熱帯域では海面水温が上昇して、対流活動が活発化し海面気圧は低下する。こうして生じた東から西へと低下するような気圧傾度が貿易風を強化することによって、この状況が維持されている。

(2) (a) 北側側面の流量は、

$$Q \times 6000\text{km} = -1.3 \times 10^{-6} \times \frac{10\text{m/s} \times (-10\text{m/s})}{0.13 \times 10^{-4}/\text{s}} \times 6.0 \times 10^6\text{m} = 6.0 \times 10^7\text{m}^3/\text{s}$$

よって、北向きに $6.0 \times 10^7\text{m}^3/\text{s}$ 。

- (b) 南緯 5° の南側側面ではコリオリ力が逆向き・同じ大きさのため、 f の絶対値が同じで符号が反対になるから。

- (c) 長方形領域に流入・流出する海水の収支のつり合いから、

$$w[\text{m/s}] \times 6000\text{km} \times (100 \times 10)\text{km} = 6.0 \times 10^7\text{m}^3/\text{s} \times 2$$

$$w[\text{m/s}] = \frac{6.0 \times 10^7\text{m}^3/\text{s} \times 2}{6000\text{km} \times (100 \times 10)\text{km}} = 2.0 \times 10^{-5}\text{m/s}$$

- (3) 南北の側面での流出量は $|U|^2$ に比例するから、これとつり合う下側側面からの流入量 (= 流速 $w[\text{m/s}]$ $\times$ 下側側面の面積) も $|U|^2$ に比例する。よって、 $w[\text{m/s}]$ は $\left(\frac{5.0\text{m/s}}{10\text{m/s}}\right)^2 = \frac{1}{4}$ に減少する。

解説

問 1

- (1) 難易度：★★★★☆

ア：乾燥断熱

未飽和の空気塊が断熱的に(外部との熱の授受がない状態で)上昇すると、気圧の減少により膨張し外部に仕事をするため温度が低下する。この時の高度の変化量に対する温度減率を乾燥断熱減率という。およそ $0.98^\circ\text{C}/100\text{m}$ である。

イ：低下

飽和水蒸気圧は気温が下がると急激に低下する。高度が上昇するとともに乾燥断熱減率に従って空気塊の温度が低下するため、それに伴って飽和水蒸気圧も低下する。

ウ：湿潤断熱

飽和した空気塊では断熱膨張により気温が下がる際に飽和水蒸気圧が低下して水蒸気が凝結するため、潜熱が放出される。この潜熱の放出が空気塊を暖めるため、未飽和の空気塊に比べ上昇時の気温の低下が緩やかになる。この場合の温度減率を湿潤断熱減率という。この効果により、対流圏の平均的な気温減率は乾燥断熱減率よりも小さい $0.65^\circ\text{C}/100\text{m}$ 程度となっている。なお、湿潤断熱減率は一定ではない。飽和水蒸気圧の気温に対する変化率が低温であるほど小さいために、気温が低く上昇時の凝結量が少なくなる上空に行くにしたがって湿潤断熱減率は乾燥断熱減率の値に近づいてゆく。

よって、解答はア：乾燥断熱 イ：低下 ウ：湿潤断熱 となる。

- (2) 難易度：★★★★☆

求める高さを x とすると、 $x[\text{km}]$ 上昇する間に増加する雲水の体積は、雲粒 1 つあたりに

$$\frac{2.0 \times 10^{-6} \text{g/cm}^3 / \text{km} \times x [\text{km}]}{200 \text{ 個/cm}^3 \times 1.0 \text{g/cm}^3}$$

と表せる。一方、降水粒子として落下し始めるときの雲粒の体積は

$$\frac{4}{3} \pi \times (2.0 \times 10^{-3} \text{cm})^3$$

であるから、増加した雲水の雲粒 1 つ当たりの体積が雲粒が落下するのに必要な体積に達したとき落下を始めるので、

$$\frac{2.0 \times 10^{-6} \times x}{200 \times 1.0} = \frac{4}{3} \pi \times (2.0 \times 10^{-3})^3$$

$$x = 3.2 \text{km}$$

この考察により、降水をもたらす雲には一定の厚さが必要であることがわかる。

(3) 難易度：★★★★☆

降水粒子が落下中に取り込んだ雲粒の分だけ体積が増加する。半径 R 、高さ Δz の円柱内にある雲粒をすべて取り込むので、その体積の総和は

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \pi R^2 \Delta z n$$

で表される。よって

$$\Delta V = \frac{4}{3} \pi^2 r^3 R^2 \Delta z n$$

◆Column 拡散過程と併合過程

雨粒はおおまかには拡散過程と併合過程を経て形成される。

まず、飽和した空気塊において吸湿性のエアロゾルを核とした小さな雲粒が生じると、水蒸気分子は水滴表面に拡散して、表面において凝結する。または氷晶核を中心に生じた小さな氷晶の表面に水蒸気分子が拡散して昇華し氷晶を成長させる。これを拡散過程という。

雲粒から雨粒となる過程では、落下速度は半径の大きな雲粒のほうが大きい(半径の平方根に比例)ので、一部の大きな半径をもつものが落下しながらほかの雲粒を取り込み雨粒へと成長する。

この問題では、(2)で拡散過程を、(3)で併合過程を扱っている。

(4) 難易度：★★★★☆

数濃度 $2.0 \times 10^{-4} \text{個/cm}^3$ と速度 $5.0 \times 10^2 \text{cm/s}$ から、1秒間に 1cm^2 あたり $(2.0 \times 10^{-4} \times 5.0 \times 10^2)$ 個の雨粒が落下する。落下開始時の降水粒子の体積は無視できるので、地面に落下したときの雨粒の体積は $\frac{4}{3} \pi \times (1.0 \times 10^{-3} \text{cm})^3 \times 1.0 \times 10^5$ 個である。よって、1時間あたりの降水量は、

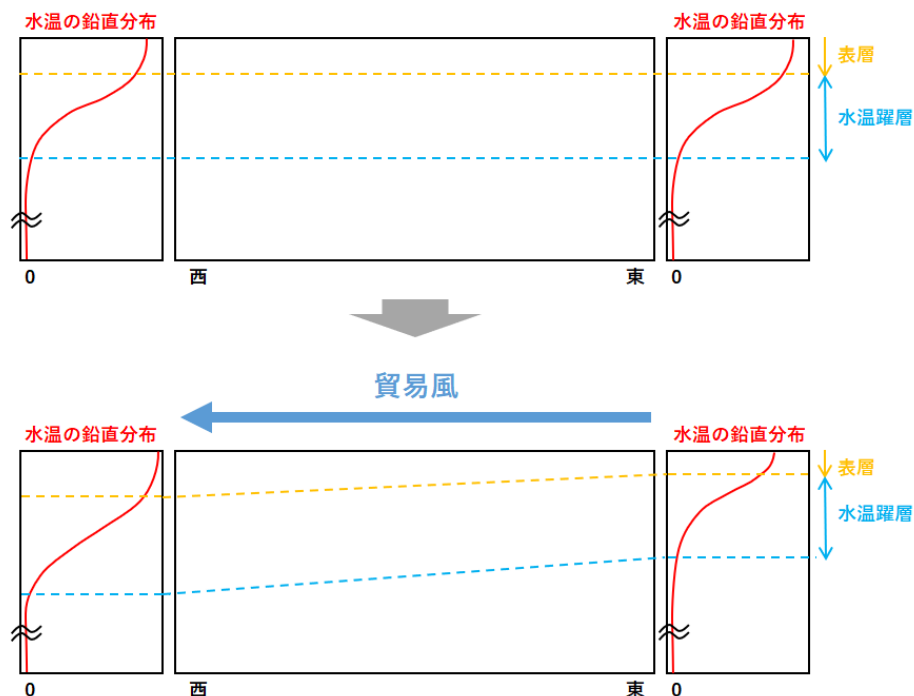
$$\frac{4}{3} \pi \times (1.0 \times 10^{-3} \text{cm})^3 \times 1.0 \times 10^5 \text{ 個} \times 2.0 \times 10^{-4} \text{ 個/cm}^3 \times 5.0 \times 10^2 \text{ cm/s} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \times \frac{10 \text{ mm}}{1 \text{ cm}} = 1.44 \text{ mm} \approx \mathbf{1.4 \text{ mm}}$$

問 2

(1) 難易度：★★★★☆

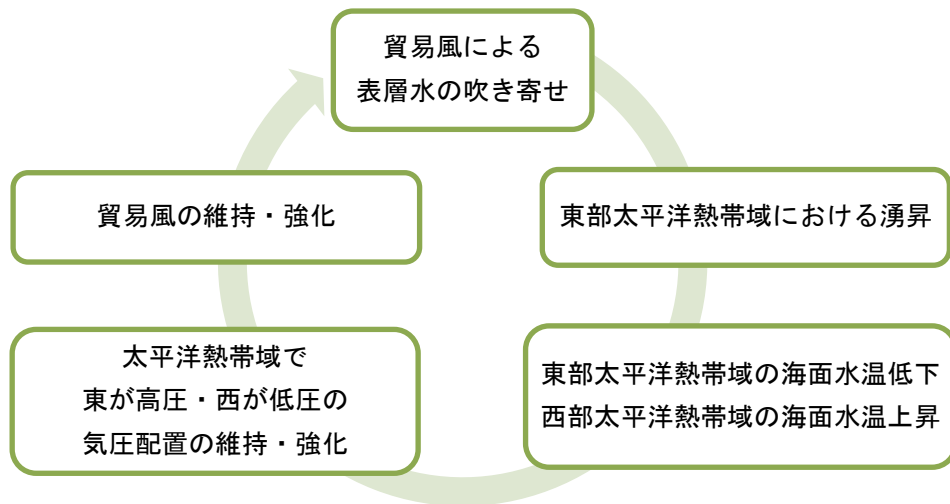
貿易風が太平洋熱帯域を東から西へと吹くことにより、海洋表層の暖かい海水は西へと吹き寄せられる。下の図を参考に、海洋の鉛直構造を思い出してほしい。東部太平洋熱帯域では、表層が吹き寄せによって薄くなるとそれを補うように湧昇が起こって浅い場所まで水温躍層が伸びるため、海面水温が低下する。反対に暖かい海水の吹き寄せによって西部太平洋熱帯域の表層は厚くなり、水温躍層の深度が深くなる。

海面水温の高い海域では大気を暖めて上昇気流が発達しやすく、加えて海水の蒸発量が多く潜熱の供給が起きやすいため、対流活動が活発であり上空に低気圧が生じやすくなる。反対に海面水温が低いと高気圧に覆われやすくなる。したがって、上に述べた理由により東で温度が低く西で温度が高い太平洋熱帯域では、東が高く西が低い気圧傾度が生じる。この気圧傾度力が貿易風を強める向きにはたらくため、貿易風を維持し、ひいてはこのような大気・海洋の状況が維持されている。



太平洋熱帯域の海水温鉛直分布に対する貿易風の影響

問題であたえられている必要語句の使い方に戸惑うかもしれないが、これらの語句を用いつつも自分が理解している内容を順に説明すればよい。



太平洋熱帯域における大気・海洋の相互作用

解答例

海上を吹く貿易風により太平洋熱帯域の表層水が東から西へと吹き寄せられ、東部太平洋熱帯域においてこれを補うような湧昇が起こって水温躍層の深度が浅くなる。これによってこの海域の海面水温が低下し、大気の大気対流活動が抑制されて海面気圧は高くなる。一方で、吹き寄せにより表層が厚くなる西部太平洋熱帯域では海面水温が上昇して、対流活動が活発化し海面気圧は低下する。こうして生じた東から西へと低下するような気圧傾度が貿易風を強化することによって、この状況が維持されている。

(2)

(a) 難易度：★★★★☆

貿易風の東西成分 U は東向きを正にとっており、貿易風は東風(つまり西向き)のため U は負、つまり $U = -|U| = -10\text{m/s}$ である。これをあたえられた流量 Q の式に代入すれば単位東西幅あたりの流量が求められる。したがって北側側面の流量は、東西幅 6000km をかけて、

$$Q \times 6000\text{km} = -1.3 \times 10^{-6} \times \frac{10\text{m/s} \times (-10\text{m/s})}{0.13 \times 10^{-4}/\text{s}} \times 6.0 \times 10^6\text{m} = 6.0 \times 10^7\text{m}^3/\text{s}$$

流量は北向きを正としているため、北向きに $6.0 \times 10^7\text{m}^3/\text{s}$ となる。

(b) 難易度：★★★★☆

Q を求める式の各変数のうち、南北側面で正負が変わりうるものは何かを考える。 U は等しいので、コリオリ力の効果を表す係数 f であることが直ちにわかる。コリオリ力は南北半球で反対向きで、北緯 5° と南緯 5° では大きさは同じであるので、コリオリの効果を表す係数は北側側面と南側側面では逆符号で絶対値は同じになる。よって、南側側面での流量は北側側面と同じ大きさで向きは反対となる。

解答例

南緯5°の南側側面ではコリオリ力が逆向き・同じ大きさのため、 f の絶対値が同じで符号が反対になるから。

◆Column 流量 Q の式はどこからきているか

吹送流の南北流量 Q としてあたえられている式はどのように求められているのかについて気になる人のために説明しておこう。

海上に風が吹くと海水の引きずりが起きる。風が海面を引きずる力の大きさを τ とする。海中では下層に行くにしたがって流速が弱くなりながら、コリオリ力により流れの向きが北半球で右へ、南半球で左へずれていくようならせん状の流れの分布ができる。これをエクマンらせんという。この流れベクトルの分布を風の影響がなくなる深さ(問題の領域の下面)まで深さ方向に積分すると北半球で風に対して右向きに $\tau/|f|$ の重さの海水が輸送されることがわかる。これはエクマン輸送とよばれる。

ここで、大気の密度を $\rho(\equiv 1.3\text{kg/m}^3)$ 、海面抵抗係数(境界面に依存する比例定数)を $C_D(\equiv 1.2 \times 10^{-3})$ として、引きずる力の大きさは単位面積当たり $\tau = \rho C_D |U|^2$ と表される。エクマン輸送量 $\tau/|f|$ に海水の比容(密度の逆数)をかけて体積に直し、向きも考慮してやれば(定数の値に幅があるためおおよそではあるが)流量 Q の式が得られる。

(c) 難易度：★★★★☆

下面からの流入量を Q_b 、北側・南側側面からの流出量をそれぞれ Q_N 、 Q_S とおく。東側側面での流入量と西側側面での流出量は常に等しいことを踏まえ、長方形領域に流入・流出する海水の収支のつり合いから、

$$Q_b = Q_N + Q_S$$

下面の面積は $6000\text{km} \times (100\text{km/度} \times 10 \text{度})$ だから $Q_b = w[\text{m/s}] \times 6000\text{km} \times (100 \times 10)\text{km}$ と表され、これと(a)の結果を用いると、

$$\begin{aligned} w[\text{m/s}] \times 6000\text{km} \times (100 \times 10)\text{km} &= 6.0 \times 10^7 \text{m}^3/\text{s} \times 2 \\ w[\text{m/s}] &= \frac{6.0 \times 10^7 \text{m}^3/\text{s} \times 2}{6000\text{km} \times (100 \times 10)\text{km}} = \mathbf{2.0 \times 10^{-5} \text{m/s}} \end{aligned}$$

(3) 難易度：★★★★☆

貿易風の強さの変化と東太平洋赤道域の湧昇流の流速の関係を求める問題。(2)(a)で用いた式からわかるように南北の側面での流出量は $|U|^2$ に比例するから、これとつり合う下面からの流入量(=流速 $w[\text{m/s}] \times$ 下面の面積)も $|U|^2$ に比例する。これと、下面の面積は一定であることから、

$$w[\text{m/s}] \propto |U|^2$$

が成り立ち、

$$\left(\frac{5.0\text{m/s}}{10\text{m/s}} \right)^2 = \frac{1}{4}$$

より, $w[m/s]$ は1/4に減少する。

◆Column エルニーニョ・南方振動

海面気圧と海水温は連動している。エルニーニョ・ラニーニャ現象と連動して太平洋熱帯域の気圧が東西でシーソーのような変動をすることを、南方振動とよぶ。また、エルニーニョ・南方振動をあわせて ENSO(El Niño-Southern Oscillation)とよぶ。

問 2(1)で見たように、貿易風と海水温分布、気圧配置は互いに強め合って構造を維持している。これは、提唱者の名をとってビヤークネス・フィードバック(Bjerknes feedback)とよばれる。しかし、これだけでは一度エルニーニョ(あるいはラニーニャ)となったらその状態はずっと維持されそうに思える。

しかし、実際にはそうはなっていない。水温・気圧の変化の振幅が十分に大きい場合、負のフィードバックがはたらくことによってエルニーニョ・ラニーニャの転換が起こる。ここでは、これを説明する理論の 1 つである遅延振動子理論について簡単に紹介しよう。

まず、東太平洋の赤道上に暖水域が存在し下層大気を加熱するとき(エルニーニョ時)、加熱域で収束する風が生じる。すると、コリオリ力により、この南北では低気圧性の循環が発生する。この低気圧性循環による吹送流がコリオリ力を考えると外向きに海水を輸送するため、暖水域の南北に冷水域ができる。詳しくは大学で学ぶが、コリオリ力の緯度差によりロスビー波という西向きの波動としてこの冷水域が西へ移動する。

ロスビー波が太平洋西岸にぶつかると、沿岸でぶつかった海水が盛り上がることで東向きの圧力傾度力が生じこれにコリオリ力がはたらい赤道上に向かう流れとなる。これを沿岸ケルビン波という。南北半球の沿岸ケルビン波が赤道でぶつかるため、沿岸ケルビン波と同様の効果で赤道ケルビン波とよばれる東に向かう波動となる。これによって東太平洋熱帯域へと戻る。

このようにして東太平洋熱帯域の海水温が下がり、ラニーニャにシフトする。ラニーニャからエルニーニョへの転換はこれとちょうど逆符号の現象が起こる。このように「遅れて」もたらされる負のフィードバックが海水温偏差・気圧配置を反転させるという考え方が Schopf & Suarez(1988)が提唱した「遅延振動子理論」の概要である。

しかし、遅延振動子理論には欠点がある。周期が約 2 年となってしまう、実際の 3~6 年より短いのである。そこで、現在は充填-放出振動子という Jin(1997)の理論が標準理論とされている。これは、スベルドラップ流という流れが表層の暖水が極向きに輸送⇔再充填という振動を起こすことにより反転が起こるという理論である。

大雑把にはこのようにして、一見安定に見える太平洋熱帯域の海水と大気の状態はゆっくりと振動を繰り返し、テレコネクションによって全球的な気候の変化をもたらしているのだ。

(奥井晴香, 笠見京平, 神原祐樹, 坂井郁哉)

2018 年度 東京大学 前期 地学

第 3 問 地震と地質

出題範囲	地震/鉱物/火山/地表の変化
難易度	★★★★☆
所要時間	得意：22 分 ふつう：28 分 苦手：35 分
傾向と対策	問 1 は基本的な地震の問題で、計算なども困難なものではなかった。(3)の近似計算にはやや注意を要するかもしれない。できなかったならば確認しておこう。問 2 は珍しい鉱床の分野からの出題であるのに加えて、記述で問われた内容は(1), (3), (5)のように細かい知識を要求するものであり、苦勞する問題だと思われる。さらに、第 3 問を通じて要求される記述量は 17 行にも及び、文章を素早くまとめる力も要求された。全体で見ると難度の高い大問といってい

解答

問 1 (1) $\sqrt{(x_0 - x)^2 + y_0^2 + z_0^2}$

(2) $x_0 : (h) \quad y_0 : (b)$

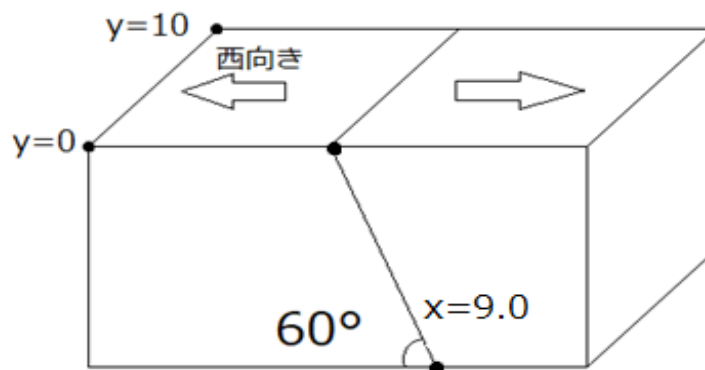
(3) 2 地点での到達時間の差が 0.0833 秒なので

$$\frac{\sqrt{(9.0 - 6.0)^2 + 3.0^2 + z_0^2}}{6.000} - \frac{\sqrt{(9.0 - 8.0)^2 + 3.0^2 + z_0^2}}{6.000} = 0.0833$$

これを整理すると z_0 が満たすべき方程式は $\sqrt{18 + z_0^2} - \sqrt{10 + z_0^2} = 0.4998$

ここで有効数字 2 桁であるから $0.4998 \approx 0.500$ として計算し、 $z_0^2 = 50.0625$ より $z_0 \approx 7.1$

- (4) 震源の深さと余震域をもとに推定できる断層面の走向傾斜から y 軸は断層面の西側にある。 y 軸上での東西方向の P 波初動を考える。震源の y 座標は 3.0 であることから、本震の断層運動が右横ずれであった場合は $y > 3.0$ で西向き、 $y < 3.0$ で東向きになる一方、左横ずれであった場合は $y > 3.0$ で東向き、 $y < 3.0$ で西向きになる。また、逆断層のとき全域で東向き、正断層のとき全域で西向きとなり、 y 軸上の観測点の条件を満たすのは正断層のみである。よって、(d)。



問 2 (1) ア：高温低圧 イ：低温高压

海溝からある一定の距離にある帯状の地域では、地下で岩石の部分溶融に伴いマグマが生じており、そのマグマを熱源として高温低圧型変成が起こる一方、そのマグマの固結の最終期にマグマ残液からペグマタイト鉱床が形成されるから。

- (2) 分化の初期には Ca に富む斜長石が結晶化し、分化が進むにつれて結晶化する斜長石に含まれる Na が増加する。分化の終期には K に富むカリ長石が結晶化する。
- (3) 活発化した火成活動により、約 1500 万年前に日本海が形成された。その火成活動に伴ってマグマから分離した金属元素を多く含む熱水が海底で噴出し、それが冷却されて金属鉱物が析出・沈殿し、黒鉱鉱床が形成された。
- (4) 海洋プレートの上には、プレートが海溝側へと移動していく過程で遠洋性の放散虫や海山で形成されたサンゴ礁などさまざまなものが堆積する。沈み込み帯で海洋プレート上の堆積物ははぎ取られ、大陸プレートに貼り付けられ付加体となる。このため堆積環境の違う岩石が同じ場所でみられる。
- (5) 溶脱しやすい元素：Ca, Na, K
日本は高温多雨ではなく、元素の溶脱が起こりにくいいため、大規模なボーキサイト鉱床は形成されない。

解説

問 1

(1) 難易度：★★★★☆

座標が与えられているので、通常の座標計算と同様に計算すればよい。点 (x_0, y_0, z_0) と点 $(x, 0, 0)$ の距離であるから

$$\sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - 0)^2 + (z_0 - 0)^2} = \sqrt{(x_0 - x)^2 + y_0^2 + z_0^2}$$

(2) 難易度：★★★★☆

問題文には「地下の地震波速度構造は均質であるとする」とあるので、P 波到達時刻はそのまま観測点と震源の距離に対応すると考えられる。図 3-2 を見ると x 軸上の観測点については $x = 9.0$ を基準に左右対称に到達時間が分布しており、これより正確な時刻はわからないものの、 $x = 9.0$ において最も早く P 波が到達していると考えられる。冒頭の考えを適用すれば、これは(観測点はないが) x 軸上においては $x = 9.0$ の地点が最も震源に近いことを表すと考えてよい。よって、震源の x 座標は $x = 9.0$ である。

同様に y 軸についても考えると、 y 軸上の観測点については図 3-2 より $y = 3.0$ を基準に左右対称に到達時刻が分布しており、これより y 軸上においては $y = 3.0$ の地点が最も震源に近いと考えられる。

(1) では x 軸上の観測点と震源の距離を考えたが、この距離の表現を見れば、距離が最小になるのは観測点の x

が $x = x_0$ を満たすときであることがわかるだろう。y 軸に関しても同様に考えれば、震源と最も距離の近い軸上の地点の座標から地面上で最も震源に近い点、すなわち震央の位置 $(x_0, y_0, 0)$ が求められることがわかる。

よって、解答としては x_0 については (h)、 y_0 については (b) を選ぶことができる。

(3) 難易度：★★★★☆

(1) で考えた震源からの距離の式に (2) の値を代入すると震源からの距離を z_0 の式で表せる。また P 波速度が与えられていることから、震源からの距離を P 波速度で割ることで P 波の到達までにかかる時間がわかる。さらに、地震の震源が共通であることから、あたえられた 2 観測点での P 波の到達した時刻をもとに 2 観測点間での P 波の到達までにかかった時間の差を求められる。以上のことを式で表すと

$$\frac{\sqrt{(9.0 - 6.0)^2 + 3.0^2 + z_0^2}}{6.000} - \frac{\sqrt{(9.0 - 8.0)^2 + 3.0^2 + z_0^2}}{6.000} = 43.6749 - 43.5916 = 0.0833$$

これを整理すると

$$\sqrt{18 + z_0^2} - \sqrt{10 + z_0^2} = 0.4998$$

で、この式が z_0 の満たすべき方程式である。

このあと計算に移ることになるが、すぐに計算に移るのはよいやり方ではない。求められている解答は有効数字 2 桁で、0.4998 で計算する必要はない。有効数字 3 桁で計算しようとするすると四捨五入により

$$\sqrt{18 + z_0^2} - \sqrt{10 + z_0^2} = 0.4998 \approx 0.500$$

となって、計算がしやすくなる。あとは移項して平方根を外していけば

$$z_0^2 = 50.0625$$

という結果が得られるだろう。平方根の値はあたえられていないためあてずっぽうでやっていくしかないが、 $7^2 = 49$ に近いことから考えていけば容易に $z_0 \approx 7.1$ の解答にたどり着けるはずだ。

解答では $0.4998 \approx 0.500$ の近似を行ったことを明記することが大切である。

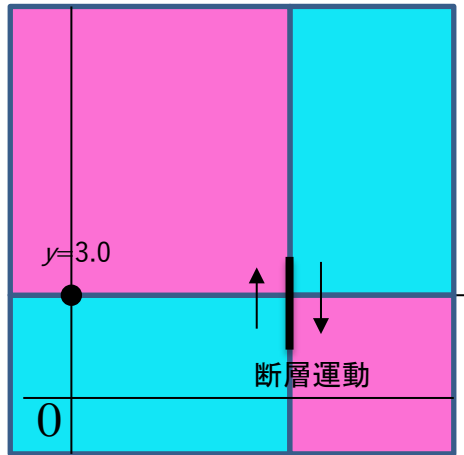
(4) 難易度：★★★★☆

解答で最も強調しなければならないのは、条件に適合する押し引き分布となるのは正断層のときのみであるということだ。そのため、各選択肢において y 軸で観測されるべき P 波初動の分布を考え、問題の条件に合致するものを探る過程を解答としたい。

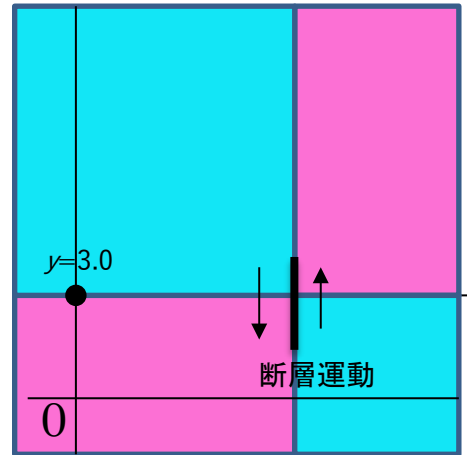
初めに確認する必要があるのが y 軸と地震を引き起こした断層との位置関係である。(4) の問題文であたえられている余震域の分布は地震を引き起こした断層の走向と傾斜に対応すると考えられるから、(2) で考えた震源の水平方向での位置と (3) で出した震源の深さから計算すると、 $z = 0$ (地表) の時の断層面は $z_0 - 0 = (x - x_0) \tan 60^\circ$ より概ね $x = 5$ (正確には $x = 5.3434 \dots$) の直線上に現れると考えられる。以上の考察より、y 軸は断層面より西側にある。

続いて各選択肢の地震が起こったときの、y 軸上で観測されるべき P 波初動を考える。まず (a) と (b) の横ずれ断層について考える。P 波初動の押し引き分布は断層面および震源を通り断層の移動方向に垂直な平面によって

区切られるから、震源の y 座標が $y = 3.0$ であることを考えると、震源を通り断層の移動方向に垂直な平面が y 軸と交わる $y = 3.0$ 地点を境界に南北で P 波初動の東西方向は切り替わるはずである。すなわち、P 波初動の東西方向は右横ずれであった場合 $y > 3.0$ で西向き、 $y < 3.0$ で東向きになり、左横ずれであった場合 $y > 3.0$ で東向き、 $y < 3.0$ で西向きになるはずで、これは問題の条件にそぐわない。よって、これらは間違いである。



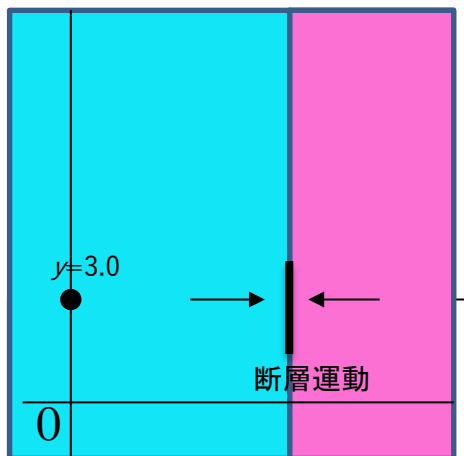
右横ずれ断層のときの押し引き



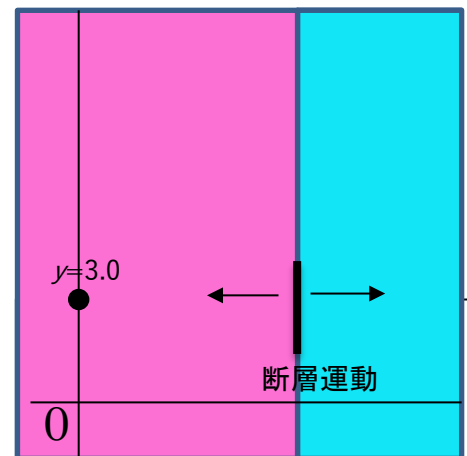
左横ずれ断層のときの押し引き

(赤色が「押し」領域、青色が「引き」領域。以下同様。)

次に(c)の逆断層について上記と同様に考えると、 y 軸は全体が引きの領域に入っているため P 波初動は全域で東向きとなって同じく問題の条件を満たさない。一方で、(d)の正断層について考えると y 軸は全域が押しの領域に入っており、これより P 波初動は全域で西向きとなって問題の条件を満たす。



逆断層のときの押し引き

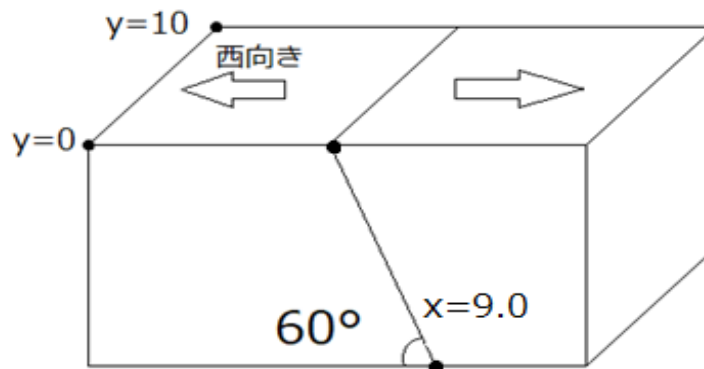


正断層のときの押し引き

よって答えは(d)となり、以上の考えをまとめれば解答となる。

解答例

震源の深さと余震域をもとに推定できる断層面の走向傾斜から y 軸は断層面の西側にある。 y 軸上での東西方向の P 波初動を考える。震源の y 座標は 3.0 であることから、本震の断層運動が右横ずれであった場合は $y > 3.0$ で西向き、 $y < 3.0$ で東向きになる一方、左横ずれであった場合は $y > 3.0$ で東向き、 $y < 3.0$ で西向きになる。また、逆断層のとき全域で東向き、正断層のとき全域で西向きとなり、 y 軸上の観測点の条件を満たすのは正断層のみである。よって、(d)。

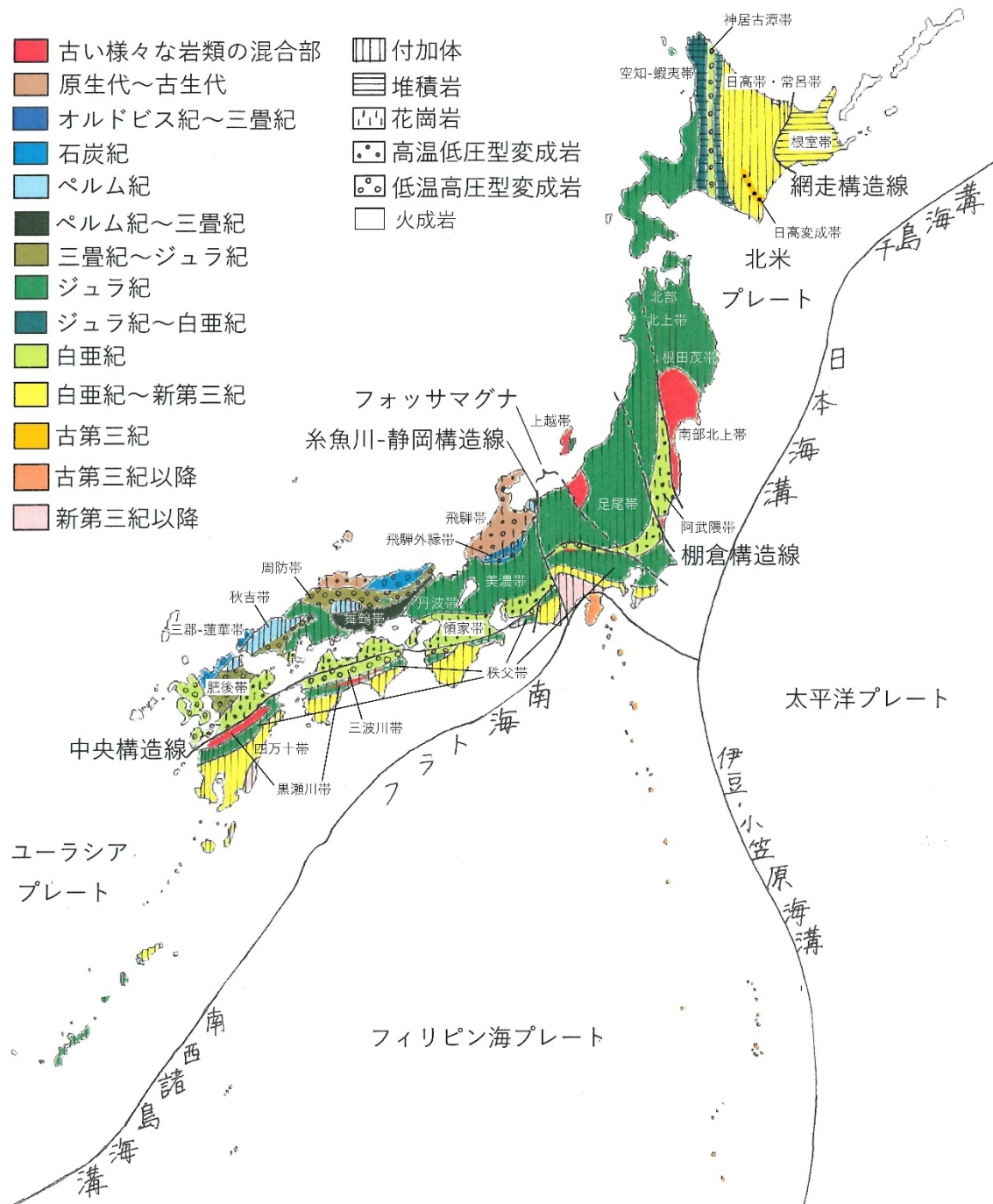


問 2

(1) 難易度：★★★★☆

変成帯の型の名称は頻繁に聞かれるトピックである。ぜひ覚えておいてほしい。日本では広域変成帯が高温低圧型と低温高圧型で対になっていて、本州四国九州地域では中央構造線の日本海側に高温低圧型の領家変成帯、太平洋側に低温高圧型の三波川変成帯がみられるほか、日本海に近い地域では中国～近畿地方に高温低圧型の飛騨帯、中国地方に低温高圧型の三郡帯がみられる。また北海道地域では、北海道を南北に走る石狩山地・日高山脈より東の地域に高温低圧型の日高変成帯が分布し、西に低温高圧型の神居古潭変成帯が分布している。日本海・太平洋との位置関係が本州四国九州地域と反対になっていることに注意が必要である。

よって、解答は、ア：高温低圧 イ：低温高圧 である。



日本の地質構造

高温低圧型変成作用はマグマの熱によって地殻の岩石が変成する作用である。変成の原因となるマグマは、海溝やトラフで沈み込んだ海洋プレートが供給する水によってマントル物質の融点が低下し部分溶融することによってつくられ、海溝やトラフに沿って帯状に分布する。これらが生成後に固まることで高温低圧型の変成帯には多くの花こう岩が分布している。花こう岩が固結する際、凝固しやすい成分から順に凝固していくと最後に凝固しにくい成分と脱出しなかった揮発性成分が残るため、十分な空間が確保される。この空間でゆっくりとマグマが冷やされるために結晶の純度が高くなって結晶自体も大きく成長し、希元素などの希少な元素が濃集した部分がで

きる。これがペグマタイト鉱床であり、花こう岩の多い高温低圧型変成帯に多くみられる。

以上のことをまとめれば解答となる。

解答例

海溝からある一定の距離にある帯状の地域では、地下で岩石の部分溶融に伴いマグマが生じており、そのマグマを熱源として高温低圧型変成が起こる一方、そのマグマの固結の最終期にマグマ残液からペグマタイト鉱床が形成されるから。

(2) 難易度：★★★★☆

長石はカリ長石 KAlSi_3O_8 、曹長石 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 、灰長石 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ の 3 種の鉱物の固溶体であり、結晶化する温度は各成分の含まれる割合によって決まる。このうち分化の最初期の最も温度が高い時期に結晶化するのは灰長石成分を多く含んだ Ca に富む斜長石で、温度が下がるにつれて曹長石成分の多い Na に富む斜長石が結晶化し始める。さらに温度の下がる分化の終期には、最も結晶化する温度の低いカリ長石が結晶化する。これによって長石の化学組成は分化の進度によって連続的に推移していく。このことをまとめたものが解答例である。

解答例

分化の初期には Ca に富む斜長石が結晶化し、分化が進むにつれて結晶化する斜長石に含まれる Na が増加する。分化の終期には K に富むカリ長石が結晶化する。

(3) 難易度：★★★★☆

下線の引かれている黒鉱鉱床とは、金属元素を多く溶かし込んだ熱水が海底で噴出して冷却され、溶けきれなくなった金属鉱物が硫黄などと結びつくことで析出・沈殿し、採掘される鉱床のことである。おもに黒鉱を構成する鉱物は亜鉛の原料となる閃亜鉛鉱 ZnS 、鉛の原料となる方鉛鉱 PbS 、銅の原料となる黄銅鉱 CuFeS_2 のほか、黄鉄鉱 FeS_2 や重晶石 BaSO_4 などで、黒鉱鉱床は日本の金属生産を支えた鉱床であった。

黒鉱鉱床の形成には上記のように金属元素を多く含む熱水が不可欠で、その供給源となるのがマグマから分離した熱水である。約 1500 万年前頃に、ユーラシア大陸沿岸にあった日本列島のもととなる地域が分離して日本海が形成されたことに伴い、現在日本海がある地域で火成活動が活発化した。これによって多くのマグマがつくられ、それに伴って金属元素を多く含む熱水がつくられたことで、日本海拡大の変動が起こった領域に近い、東北地方の日本海沿岸部に広く黒鉱鉱床が形成された。図に示された鉱山もそのうちの 1 つである。

解答では、1500 万年前に日本海の形成が起こりその際にできたマグマから分離した熱水の噴出によって黒鉱鉱床が形成された流れを簡潔に説明すればよい。

解答例

活発化した火成活動により、約 1500 万年前に日本海が形成された。その火成活動に伴ってマグマから分離した金属元素を多く含む熱水が海底で噴出し、それが冷却されて金属鉱物が析出・沈殿し、黒鉱鉱床が形成された。

(4) 難易度：★★★★☆

海洋プレートは海嶺で形成されたのちに収束境界(おもに海溝)に向かって移動していく。その過程でさまざまな環境下を通り、深海底では放散虫の死骸や風で輸送された陸源の粒子、やや浅い海では有孔虫などのプランクトンの死骸などが堆積するほか、移動する間にホットスポットなどを通過することで海山ができ、そこが十分に温暖であればサンゴ礁が形成されることもある。

海洋プレート上のそれらの堆積物は海洋プレートの上に乗ったまま海溝へと移動していくが、冷え固まった海洋プレートより密度が小さく沈み込みにくいため、海溝で引きはがされて沈み込まれる側の大陸プレートの縁に貼り付けられる。これが付加体とよばれる地質構造で、形成過程からわかるように、さまざまな環境下で形成された岩石が一緒に大陸プレートに貼り付けられ、本来は大きく距離を隔てて形成された岩石が 1 カ所にまとめられた構造をしている。このため、堆積環境が大きく異なるはずの岩石がほぼ同じ場所でみられるのである。

解答では、付加体で広範囲の岩石が 1 カ所に集中するしくみを説明すればよい。

解答例

海洋プレートの上には、プレートが海溝側へと移動していく過程で遠洋性の放散虫や海山で形成されたサンゴ礁などさまざまなものが堆積する。沈み込み帯で海洋プレート上の堆積物ははぎ取られ、大陸プレートに貼り付けられ付加体となる。このため堆積環境の違う岩石が同じ場所でみられる。

(5) 難易度：★★★★☆

土壌についての珍しい出題である。溶脱とは、極度の乾燥による地下水の上昇や降雨によって土壌に水が加えられた際に、水に溶けやすい元素が水に溶け込んで水とともに土壌から抜けていく作用のことである。溶脱のしやすさは水への溶けやすさに対応するため、灰長石に含まれる陽イオンの中で水によく溶けるものを挙げていけばよいことになる。灰長石の組成は $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ で表されるが、このうちSiは酸素と結びついてケイ酸となっておりとても安定しているため、溶脱にはアルカリ性の水が供給されるような特殊な環境が必要で、アルカリ塩類の溶け込んだ水によって溶脱する。

そこで「長石」とよばれる一連の鉱物について考えてみる。一般に「長石」とよばれる鉱物は、カリ長石 KAlSi_3O_8 、曹長石 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 、灰長石 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ の 3 種類の鉱物の固溶体で、地学でよく言われるアルカリ長石、斜長石とはそれぞれ、アルカリ長石はカリ長石－曹長石をメインとした長石、斜長石は曹長石－灰長石をメインとした長石の系列の名前である。天然に産出する長石は、たとえ灰長石に分類されている長石でも、これらの 3 つの鉱物の成分が含まれている。その観点から問題文を見ると、灰長石のCaに加えてカリ長石のK、曹長石のNaなど水に溶けやすい元素といえるものが入っていることがわかる。これらは上記のSiに比べて容易に溶脱されるため、解答としてはこの 3 つの元素を挙げるのがよいであろう。

ボーキサイトは岩石の風化によってつくられるが、岩石の風化が活発になるのは多雨な場所(雨が多いほど上述の溶脱がよく起こって風化が進む)および高温の場所(高い温度のため化学反応が早く進行し風化が進む)である。大規模なボーキサイト鉱床は熱帯地域に位置している。日本は比較的温暖な気候をもち雨も多いが、それ

ら熱帯地域に比べると雨量、気温ともに大規模な鉱床を形成するには不十分となる。そのため日本では大規模なボーキサイト鉱床は形成されないのである。このことをまとめれば解答となる。

溶脱しやすい元素：Ca, Na, K

解答例

日本は高温多雨ではなく、元素の溶脱が起こりにくいため、大規模なボーキサイト鉱床は形成されない。

別解

上の本解答ではケイ酸の安定性からSiは溶脱しないものと考え、長石が固溶体であるという点から解答を導き出した。一方、ケイ酸が安定であるために溶けだしにくいとはいえ、ボーキサイトの段階でSiが抜けていることを考えるとSiの溶脱を考えるのも不自然ではない。今回あつかわれた鉱床はボーキサイト鉱床で、おもに含まれるのはギブス石 $\text{Al}(\text{OH})_3$ であるから、もととなる灰長石 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ と組成を見比べてみると、Ca, Siがなくなっていることがわかる。また、灰長石は同じ斜長石系列の曹長石 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ と固溶体を形成することが一般的である（(2)参照）から、灰長石と問題にあるがNaが入っていることは認めてよいと考えられる。アルカリ金属元素はイオン化傾向からわかるように水に溶けやすく、溶脱も容易に起こるので、少なくともCa, Naに関してはこの考察は適切であろう。Siについても本解答の解説に書いたように条件によっては溶けるので、解答とすることは不可能ではない。以上より、もし灰長石とボーキサイトの組成から考えていった場合にはCa, Na, Siという解答も可能であるといえる。

ただし、この問で結局問われているのは「アルミニウム以外で溶脱する主要な3つの元素」である。これに鑑みるとSiを解答するのは危険であるようにも思われる。このようにいろいろに考えられるような問題にもし試験当日に直面した場合は、書けることを書いて次の問題に移ってしまうのが適当であろう。土壌の問題が問われるのはとても珍しいが、この問をきっかけに確認しておくといだろう。

（諸星暁之，奥井晴香，坂井郁哉，辻有恒）