

2016 年度 東京大学 前期 地学

地学問題 I 宇宙

出題範囲	恒星の進化/ハッブルの法則
難易度	★★☆☆☆
所要時間	20分
傾向と対策	計算も比較的やさしく分量も少ないので確実に得点しておきたい。問題の立式に時間がかかる場合は、概念図を書いてみると整理できて素早く解き進むことができる。問IIは見慣れない題材だったが内容自体は簡単な図形問題なので落ち着いて考えよう。東大では初見の題材が多く扱われるが、必ずもっている知識で対応できるはずだ。また、最新の研究や大学で習う発展した内容が背景にあることが多いので、日ごろから地学的なトピックに関心があるとさらによい。

解答

問 I (1) 星団の年齢は最も重い星の寿命に等しく、

$$T_1 = 2000 \text{ 万年} \times \frac{10M_{\odot}}{40M_{\odot}} = 500 \text{ 万年}$$

$$(2) N(20) = N_{10} \left(1 - \frac{10}{20}\right) = 0.5N_{10} = 60 \quad \therefore N_{10} = 120$$

この星団内で最も重い星の質量を $m_{max}M_{\odot}$ として

$$N(m_{max}) - N(20) = N_{10} \left(1 - \frac{10}{m_{max}}\right) - N_{10} \left(1 - \frac{10}{20}\right) = N_{10} \left(\frac{10}{20} - \frac{10}{m_{max}}\right) = 20$$

$$\text{よって, } m_{max} = \frac{2N_{10}}{N_{10} - 40} \times 10 = 30$$

(1)と同様にして

$$T_2 = 2000 \text{ 万年} \times \frac{10M_{\odot}}{30M_{\odot}} = 6.66 \dots \times 10^6 \text{ 年} = 670 \text{ 万年}$$

(3) $10M_{\odot} \sim 11M_{\odot}$ の恒星は2000 万年前以降、 $20M_{\odot} \sim 21M_{\odot}$ の恒星は1000 万年前以降に誕生時期が限られ、恒星が1000 万年に n 回の割合で生み出されるとすると $10M_{\odot} \sim 11M_{\odot}$ の恒星は $2n$ 回、 $20M_{\odot} \sim 21M_{\odot}$ の恒星は n 回生み出されていることになる。

1回に生み出される恒星の個数比は

$$N(11) = N_{10} \left(1 - \frac{10}{11}\right)$$

$$N(21) - N(20) = N_{10} \left(1 - \frac{10}{21}\right) - N_{10} \left(1 - \frac{10}{20}\right) = N_{10} \left(\frac{10}{20} - \frac{10}{21}\right)$$

$$N(11) : (N(21) - N(20)) = N_{10} \left(1 - \frac{10}{11}\right) : N_{10} \left(\frac{10}{20} - \frac{10}{21}\right) = 42 : 11$$

よって、

$$(10M_{\odot} \sim 11M_{\odot} \text{の恒星の数}) : (20M_{\odot} \sim 21M_{\odot} \text{の恒星の数}) = (42 \times 2) : 11 = 84 : 11$$

問 II (1) ハッブルの法則を用いて

$$T_0 = \frac{r}{v} = \frac{1}{H_0} = \frac{1}{6.0 \times 10^2 (\text{km/s})/\text{Mpc}} = 1.6 \times 10^9 \text{年} (= 16 \text{億年})$$

(2) 例[1] 地球で発見されている最古の岩石が40億年以上前の放射年代を示すように、岩石の放射年代を調べると(1)で求めた宇宙の年齢よりも古い値を示すものが存在すること。

例[2] 隕石の放射年代から導かれる太陽系の形成がおよそ46億年前であること。

例[3] 球状星団の恒星の年齢がおよそ100億年であること。

(3) 円の半径を r とおく。右図より、

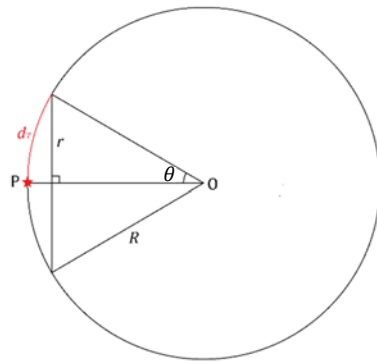
$$r = R \sin \theta = R \sin \left(2\pi \times \frac{d_T}{2\pi R} \right) = R \sin \left(\frac{d_T}{R} \right)$$

(4) 半径 r の円周上に等量のエネルギーが伝搬するので、

$$F = \frac{L}{2\pi r} = \frac{L}{2\pi R \sin \left(\frac{d_T}{R} \right)}$$

(5) $d_L = r = R \sin \left(\frac{d_T}{R} \right)$ $d_T = \frac{v}{H}$ であるから、

$$d_L = R \sin \left(\frac{v}{RH} \right)$$



解説

問 I

(1) 難易度：★★★★☆

星団の年齢 T_1 をとする。この星団では、 $M > 40M_{\odot}$ の星はすでに寿命を終えているので、 T_1 は $M = 40M_{\odot}$ の星の寿命に一致する。したがって、

$$T_1 = 2000 \text{万年} \times \frac{10M_{\odot}}{40M_{\odot}} = 500 \text{万年}$$

◆Check!!

「観察される最も重い星の質量が $M = 40M_{\odot}$ 」 \Rightarrow 「寿命の短い $M > 40M_{\odot}$ の星はすでに主系列を離れ、 $M = 40M_{\odot}$ の星が今ちょうど寿命を迎えようとしている」と読み換える。

(2) 難易度：★★★★☆

この星団に現在存在する恒星の質量の上限を、 $M = m_{\max}M_{\odot}$ とおく。

$$N(20) = N_{10} \left(1 - \frac{10}{20} \right) = 0.5N_{10} = 60 \quad \therefore N_{10} = 120$$

$20M_{\odot}$ から $m_{max}M_{\odot}$ までの間の質量の星の数は、 $10M_{\odot}$ から $m_{max}M_{\odot}$ までの間の質量の星の数と $10M_{\odot}$ から $20M_{\odot}$ までの間の質量の星の数の差なので、

$$N(m_{max}) - N(20) = N_{10} \left(1 - \frac{10}{m_{max}}\right) - N_{10} \left(1 - \frac{10}{20}\right) = N_{10} \left(\frac{10}{20} - \frac{10}{m_{max}}\right) = 20$$

よって、

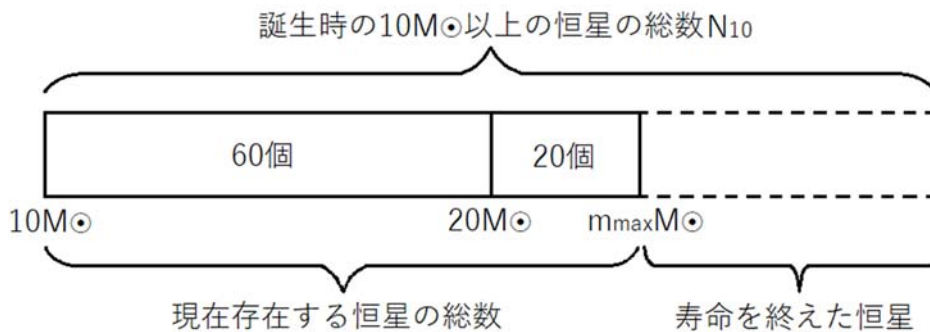
$$m_{max} = \frac{2N_{10}}{N_{10} - 40} \times 10 = 30$$

したがって、この星団には $M = 30M_{\odot}$ までの質量の星が存在し、(1)と同様、最大質量星の寿命は星団の年齢(T_2 とする)に一致するから、

$$T_2 = 2000 \text{ 万年} \times \frac{10M_{\odot}}{30M_{\odot}} = 6.66 \dots \times 10^6 \text{ 年} = \mathbf{670 \text{ 万年}}$$

◆Check!!

下図のような恒星の質量分布を思い浮かべればよい。与えられた式を用いて m_{max} を導出し、(1)と同様にして星団の年齢を求める。



(3) 難易度：★★★★☆

恒星の寿命(ここでは質量に反比例)による制約から、 $10M_{\odot} \sim 11M_{\odot}$ の恒星は今から2000万年前以降、 $20M_{\odot} \sim 21M_{\odot}$ の恒星は今から($2000 \text{ 万年} \times 10/20 =$)1000万年前以降に誕生時期が限られることがわかる。つまり、恒星が1000万年に n 回の割合で生み出されるとすると $10M_{\odot} \sim 11M_{\odot}$ の恒星は $2n$ 回、 $20M_{\odot} \sim 21M_{\odot}$ の恒星は n 回生み出されていることになる。 \dots (i)

1回の星形成で生み出される恒星の個数は

$$N(11) = N_{10} \left(1 - \frac{10}{11}\right)$$

$$N(21) - N(20) = N_{10} \left(1 - \frac{10}{21}\right) - N_{10} \left(1 - \frac{10}{20}\right) = N_{10} \left(\frac{10}{20} - \frac{10}{21}\right)$$

以上より、1回の星形成で生み出される恒星の個数比は

$$N(11) : (N(21) - N(20)) = \left(1 - \frac{10}{11}\right) : \left(\frac{10}{20} - \frac{10}{21}\right) = \frac{1}{11} : \frac{1}{42} = 42 : 11 \quad \dots \text{ (ii)}$$

(i), (ii)より,

$$(10M_{\odot} \sim 11M_{\odot} \text{の恒星の数}) : (20M_{\odot} \sim 21M_{\odot} \text{の恒星の数}) = (42 \times 2n) : (11 \times n) = \mathbf{84 : 11}$$

◆Column 本問の恒星の質量と寿命に関する近似について

本問では、大質量星の寿命を質量に反比例するとして扱うが、この近似はどれだけの妥当性をもつであろうか。一般に、恒星のエネルギー産生機構である核融合反応の燃料となる水素の量の初期値が質量に比例し、質量光度関係から単位時間当たりのエネルギー放出量が質量の3~4乗に比例するとして、以下の式により恒星の寿命 T は質量の 2~3 乗に反比例するといわれることが多い。

$$T \propto \frac{\text{恒星の質量}}{\text{恒星の明るさ}} \propto \frac{\text{恒星の質量}}{(\text{恒星の質量})^{3\sim 4}} \propto \frac{1}{(\text{恒星の質量})^{2\sim 3}} \quad (\alpha \text{ は比例を表す})$$

しかし、恒星の質量差による温度の違いにより核融合のシステムは異なり、一概には何乗に反比例するとは言えない。本問ではそうした細かな数値的な厳密さよりも内容の理解度と問題文の科学的読解力を問うことに主眼が置かれたのであろう。

問 II

(1) 難易度：★★★★☆

ハッブルの法則は、 $v = Hr$ (H はハッブル定数、 v は天体の後退速度、 r は天体までの距離)であるから、宇宙を1つの点から始まったとすると、宇宙の年齢 T が以下のように求まる。

$$T = \frac{r}{v} = \frac{1}{H}$$

これにハッブルが最初に求めたハッブル定数の値 $H_0 = 6.0 \times 10^2 (\text{km/s})/\text{Mpc}$ を代入して、 $H = H_0$ の場合の宇宙の年齢 T_0 を求めると、

$$\begin{aligned} T_0 = \frac{1}{H_0} &= \frac{1}{6.0 \times 10^2 (\text{km/s})/\text{Mpc}} = \frac{3.1 \times 10^{16} \times 10^6 \text{m}}{6.0 \times 10^2 \times 10^3 \text{m/s} \cdot (60 \times 60 \times 24 \times 365 \text{s/年})} = 1.638 \dots \times 10^9 \text{年} \\ &= \mathbf{1.6 \times 10^9 \text{年} (= 16 \text{億年})} \end{aligned}$$

◆Check!! ハッブルの法則

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。こうして後退速度は求まる。

次に色々な銀河までの距離と後退速度の関係について調べたところ、両者は比例していることがわかっていて、この比例定数を H (ハッブル定数)として、銀河までの距離を r とすると、 $v = Hr$ となる。このことをハッブルの法則という。ハッブル定数の具体的な数値は $70(\text{km/s})/\text{Mpc}$ 前後とされているが、正確な値はわかっていない。

もともと1つの点から始まった宇宙が一定の速度で膨張し続けているとすると、遠方の銀河との距離を後退速度で割ると、膨張が継続している時間が求まる。つまりは、

$$\frac{r}{v} = \frac{1}{H}$$

であり、 H の逆数が宇宙の膨張している時間つまり宇宙年齢である。仮に $H=70(\text{km/s})/\text{Mpc}$ として計算すると、 $1\text{pc}=3.09 \times 10^{13}\text{km}$ であるから、

$$\frac{1}{H} = \frac{3.09 \times 10^{13} \times 10^6 \text{km}}{70 \text{km/s}} = 4.41 \times 10^{17} \text{s} = \frac{4.41 \times 10^{17}}{3.2 \times 10^7} \text{年} = 138 \text{億年}$$

となる。

(2) 難易度：★★★★☆

解答例 1

地球で発見されている最古の岩石が40億年以上前の放射年代を示すように、岩石の放射年代を調べると(1)で求めた宇宙の年齢よりも古い値を示すものが存在すること。

解答例 2

隕石の放射年代から導かれる太陽系の形成がおよそ46億年前であること。

解答例 3

球状星団の恒星の年齢がおよそ100億年であること。

◆Check!!

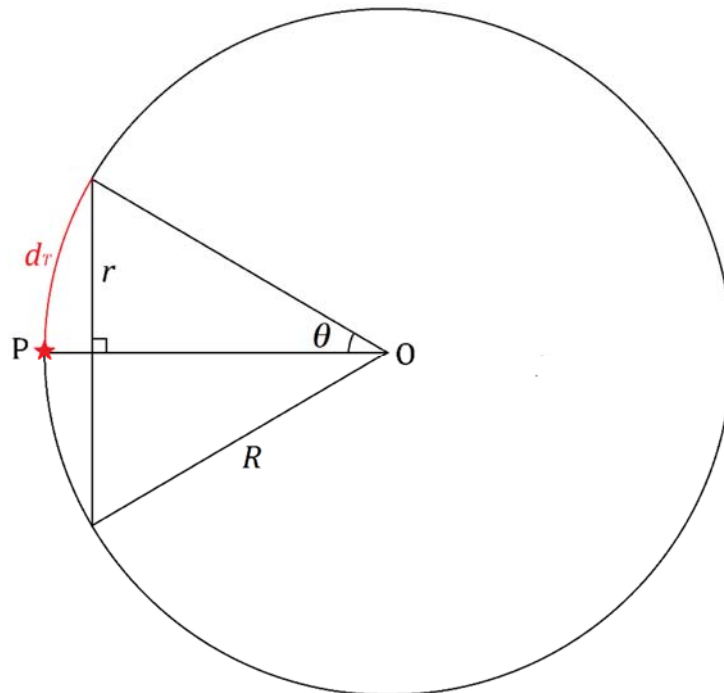
ハッブル定数の妥当性を調べたいのであるから、解答が問題と同じハッブルの法則を利用して調べた

年代になってはいけない。例えば、「3K 宇宙背景放射はおよそ 138 億年前の光である」としてしまうと、ハッブル定数が間違っていればこの値もずれてしまうので不適切である。放射年代(解答例 1・2)や恒星の進化段階(解答例 3)による年代推定など、異なる手法から導かれる結果を矛盾として提示すること。

(3) 難易度：★★★★☆

円の半径を r とおく。下の図より、

$$r = R \sin \theta = R \sin \left(2\pi \times \frac{d_T}{2\pi R} \right) = R \sin \left(\frac{d_T}{R} \right)$$



球面をなす 2 次元宇宙の断面図

(4) 難易度：★★★★☆

半径 r の円周上に等量のエネルギーが伝搬するので、

$$F = \frac{L}{2\pi r} = \frac{L}{2\pi R \sin \left(\frac{d_T}{R} \right)}$$

(5) 難易度：★★★★☆

(a)より

$$d_L = r = R \sin \left(\frac{d_T}{R} \right)$$

また、

$$d_T = \frac{v}{H}$$

であるから、

$$d_L = R \sin\left(\frac{v}{RH}\right)$$

◆Column 問 II (3)～(5)について

この問題の結果に従えば、実際にハッブルの法則がほぼ比例とみなせるということから宇宙は平坦だと結論付けてよいのだろうか。確かに平坦かもしれない。しかし、結果の式において $R \rightarrow \infty$ とした場合、 d_T は d_L にどこまでも近づくから、近傍では宇宙が大きいために平坦に見えるから、これだけでは証拠として不十分である(宇宙背景放射もハッブルの法則を満たすから宇宙の端まで平坦じゃないかと思えるかもしれないが宇宙背景放射は見える限界に過ぎず、宇宙の最も遠い端を見ているというわけではない。宇宙のどの場所でも半径 138 億光年が見えていて、少なくとも宇宙は半径 138 億光年よりは大きい)。

とはいうものの、宇宙は平坦であるとする説が現在最も有力のようだ。本問のように球形(曲率が正)に対応する宇宙を閉じた宇宙といい、宇宙の総エネルギーの初期値が負であった場合のシナリオで、膨張したのちやがて収縮に転じる。馬の鞍型(曲率が負)の曲面に対応する宇宙を開いた宇宙とよび、これは宇宙の総エネルギーが正であった場合で、宇宙は永遠に膨張をつづけ、低温で静かな希薄な空間となる。平面(曲率 0)に対応する宇宙を平坦な宇宙とよび、この場合はやがて膨張速度が 0 に収束する(これもやはり開いた宇宙に含む)。

平坦な宇宙が最も有力な説となっているのは、宇宙背景放射の観測による。宇宙背景放射のゆらぎの観測から、宇宙はおおよそ 4.6% の物質、24% のダークマター、71.4% のダークエネルギー(真空のエネルギー)からなるという研究結果が出た(NASA, 2013)。このように初期状態を見積もり、宇宙の進化を解明しようという試みが続けられている。

[参考文献]

国立科学博物館 HP

<https://www.kahaku.go.jp/exhibitions/vm/resource/tenmon/space/theory/theory05.html>

NASA HP

http://map.gsfc.nasa.gov/universe/uni_matter.html

(奥井晴香, 芝田力, 辻有恒, 西山学)

2016 年度 東京大学 前期 地学

地学問題 II 大気と海洋

出題範囲	地球のエネルギー収支/海水の運動
難易度	★★★★☆
所要時間	24 分
傾向と対策	問 I で扱われている題材自体は決して珍しいものではないが、(2)、(3)は正確な考察を求められる問題で戸惑うかもしれない。一方、問 II はオーソドックスな問題が多く、地衡流の理解があればこずる問題ではなかったのではないだろうか。このような問題は頻出のため、事前に解き慣れておきたい。時間配分に注意して難しい考察はあとに回し、基本的な問題をしっかりおさえよう。

解答

問 I (1)

$$\frac{S_0 + F_a - F_s - H - E}{C_g} [\text{K}]$$

(2) 地面の受ける太陽放射が S_0 , $S_0 + \Delta S_0$ の時の平衡状態をそれぞれ考える。

平衡状態は(1)より

$$S_0 + F_a - F_s - H - E = 0$$

と表され、仮定(a), (b), (c)から得られる条件を上式に代入すれば

$$S_0 + F_a - \sigma T_s^4 - C_H(T_s - T_a) - C_E(T_s - T_a) = 0$$

・・・① (太陽放射が S_0 のとき)

$$(S_0 + \Delta S_0) + F_a - \sigma(T_s + \Delta T_s)^4 - C_H\{(T_s + \Delta T_s) - T_a\} - C_E\{(T_s + \Delta T_s) - T_a\} = 0$$

・・・② (太陽放射が $S_0 + \Delta S_0$ のとき)

の 2 式が得られる。仮定(d), (e)を用いて②を変形すると、 $|\Delta T_s| \ll T_s$ より $\left|\frac{\Delta T_s}{T_s}\right| \ll 1$ であるから、

$$(S_0 + \Delta S_0) + F_a - \sigma T_s^4 \left(1 + 4 \frac{\Delta T_s}{T_s}\right) - C_H\{(T_s + \Delta T_s) - T_a\} - C_E\{(T_s + \Delta T_s) - T_a\} = 0$$

・・・②'

と変形でき、②' - ①を行って整理すると

$$\Delta S_0 = (4\sigma T_s^3 + C_H + C_E)\Delta T_s$$

(3) 8 時 : (B) 15 時 : (A) 22 時 : (C)

理由 :

例[1] 雲がなく風の弱い晴天時を考えると、暖められた空気塊の上昇が十分に起こっている(A)が日中を、上昇が中高度までで止まっている(B)が朝を、空気塊が地面で冷却されている(C)が夜間を表すと考えられるから。

例[2] 雲がなく風の弱い晴天時を考えると、気温減率がほぼ乾燥断熱減率と等しい(A)は地面が長時間熱された日中を、低高度において地面に近いほど気温が下がる温度分布のみられる(C)は大気が地面に冷やされる夜間を表すと考えられるから。

- (4) 煙は高度 z_c で放出されたあと z_b まで広がるが、高度 $z_b z_a$ 間の逆転層より上空には入り込めず高度 z_b から z_c にかけて広がる。

- 問 II (1) 圧力傾度力とコリオリの力が釣り合うことが必要なので、流速は海面勾配に比例、緯度の正弦に反比例するから

$$0.31\text{m/s} \times \frac{0.85}{0.30} \times \frac{0.66}{0.56} = 1.035 \dots \text{m/s} \cong 1.0\text{m/s}$$

- (2) 西岸強化
 (3) 図より渦 E の内部は周囲より海面高度が低いことから、圧力傾度力は渦の内側へ向いており、力の釣り合いからコリオリの力は渦の外側へ向いている。渦は北半球の日本近海のものであるから、回転方向は反時計回りである。
 (4) 海面勾配が場所によらず一定なので、圧力傾度力およびコリオリの力も一定といえる。渦 E は反時計回りなので、北上する渦の東側の地衡流は緯度の増加によって流速が減少し、東側の海面は上昇していく。同様に考えると、西側の海面は下降していく。

解説

問 I

- (1) 難易度：★★★★☆

求める平均温度の 1 秒当たりの変化を $\Delta T_{\text{地面}}[\text{K}]$ とする。1 m^2 の地面が 1 秒間に実質受け取るエネルギーは、

$$(S_0 + F_a) - (F_s + H + E)[\text{J}]$$

したがって、1 m^3 の土壌で考えれば、土壌の平均の熱容量 $C_g[\text{J/K}]$ を用いて

$$\Delta T_{\text{地面}}[\text{K}] \times C_g[\text{J/K}] = (S_0 + F_a) - (F_s + H + E)[\text{J}]$$

と表せるから、

$$\Delta T_{\text{地面}} = \frac{S_0 + F_a - F_s - H - E}{C_g}[\text{K}]$$

上記の解答では問題文を「土壌の温度が 1 秒間で $\Delta T_{\text{地面}}[\text{K}]$ 変化する」と答えるべきものと解釈して解答しているが「土壌温度の 1 秒当たりの変化は $\Delta T_{\text{地面}}[\text{K/s}]$ で表せる」と解答することも可能である。この場合は、エネルギーを与えられたとおりに $[\text{W}]$ の単位で扱えば同様に解くことができる。

◆Check!!

土壌内での熱のやり取りが無視できるので、与えられた 1 m^2 で受け取るエネルギーと熱容量を用いるだけでよい。1 $[\text{W}] = 1[\text{J/s}]$ であることも大切。

- (2) 難易度：★★★★☆

地面の受ける太陽放射が S_0 , $S_0 + \Delta S_0$ の時の平衡状態をそれぞれ考える。

平衡状態とは(1)の $\Delta T_{\text{地面}} = 0$ の状態であるから、

$$S_0 + F_a - F_s - H - E = 0$$

となればよく、仮定(a), (b), (c)から得られる条件を上式に代入すれば

$$S_0 + F_a - \sigma T_s^4 - C_H(T_s - T_a) - C_E(T_s - T_a) = 0$$

・・・① (太陽放射が S_0 のとき)

$$(S_0 + \Delta S_0) + F_a - \sigma(T_s + \Delta T_s)^4 - C_H\{(T_s + \Delta T_s) - T_a\} - C_E\{(T_s + \Delta T_s) - T_a\} = 0$$

・・・② (太陽放射が $S_0 + \Delta S_0$ のとき)

の2式が得られる。仮定(d), (e)を用いて②を変形することを考えると、 $|\Delta T_s| \ll T_s$ より $\left|\frac{\Delta T_s}{T_s}\right| \ll 1$ であるから、

$$(T_s + \Delta T_s)^4 = T_s^4 \left(1 + \frac{\Delta T_s}{T_s}\right)^4 \cong T_s^4 \left(1 + 4 \frac{\Delta T_s}{T_s}\right)$$

となり、これを②に代入すると

$$(S_0 + \Delta S_0) + F_a - \sigma T_s^4 \left(1 + 4 \frac{\Delta T_s}{T_s}\right) - C_H\{(T_s + \Delta T_s) - T_a\} - C_E\{(T_s + \Delta T_s) - T_a\} = 0$$

・・・②'

と変形できる。ここで②' - ①を行えば

$$\Delta S_0 - 4\sigma T_s^3 \Delta T_s - C_H \Delta T_s - C_E \Delta T_s = 0$$

となって、整理すると答えは

$$\Delta S_0 = (4\sigma T_s^3 + C_H + C_E) \Delta T_s$$

◆Check!!

「平衡状態」が(1)の $\Delta T_{\text{地面}} = 0$ を表していることに気づき、問題文に従って2つの平衡状態を式に表す。

近似については、 $(T_s + \Delta T_s)^4 = T_s^4 \left(1 + \frac{\Delta T_s}{T_s}\right)^4$ と変形すると、 $|\Delta T_s| \ll T_s$ であることから $\left|\frac{\Delta T_s}{T_s}\right| \ll 1$ であり $(1+x)^4$ の形となっているので(e)の近似が利用できる。

(3) 難易度：★★★★☆

図2-1を見てまず目につくのは(B)・(C)の飛び出した部分だろう。よく見ると(A)にも曲がっている部分があるのがわかる。この構造はどのような状況なら発生するか、というのがこの問題で問われていることだ。

乾燥断熱減率に従って温度変化する空気塊が上昇するときを考えてみる。この時、(A)においては地面にある空気が常に周囲より温度が高い状態のまま上昇を続けるが、(B)においては地面から上昇する空気は z_b までしか上れず、これより上はより高い温度の空気が存在している。また(C)においては地面からすぐ上の高度までしか上昇できず、すぐにより高い温度の空気とぶつかることになる。

挙げられた3つの時間帯の中で大気の加熱が行われるのは15時のみといってよく、暖かい空気が下にあるほど15時からの経過時間は短いと考えられる。(A)の状態が「暖かい空気の領域が地面まで達している状態」であることに注意すれば15時が(A)になり、そのあとの順番は(A)→(C)→(B)である。これらから解答は下のよう

なる。

8 時 : (B) 15 時 : (A) 22 時 : (C)

理由 :

解答例 1

雲がなく風の弱い晴天時を考えると、暖められた空気塊の上昇が十分に起こっている(A)が日中を、上昇が中高度までで止まっている(B)が朝を、空気塊が地面で冷却されている(C)が夜間を表すと考えられるから。

解答例 2

雲がなく風の弱い晴天時を考えると、気温減率がほぼ乾燥断熱減率と等しい(A)は地面が長時間熱された日中を、低高度において地面に近いほど気温が下がる温度分布のみられる(C)は大気が地面に冷やされる夜間を表すと考えられるから。

◆Check!!

(C)で大気が地面に冷却されていることがわかると、導入の文章と結びつけて考えられる。(C)が夜間と分かれば、同様の気温分布が残っている(B)が8時、空気の上昇が進んだ(A)が15時と推測できる。
図 2-1 のグラフの横軸が「気温差」になっている（原点の温度との差）ことに注意する。

(4) 難易度 : ★★★★★

問題より、放出された煙は周囲の空気と同じ温度であり、 z_c の付近では気温減率が乾燥断熱減率に等しくなっているため、煙は何かをきっかけに上昇を始めるとその状態を維持する。しかし、 z_b まで到達すると周囲の気温減率は乾燥断熱減率より小さくなり、乾燥断熱減率に従って気温が変化していた煙を含む空気塊は周りより冷たくなって、上昇が止まる。そして、この空気塊は z_b を超えない範囲で広がっていくので、高度 z_c から z_b にかけて広がることになる。よって、解答は以下のとおりになる。

解答例

煙は高度 z_c で放出されたあと z_b まで広がるが、高度 $z_b z_a$ 間の逆転層より上空には入り込めず高度 z_b から z_c にかけて広がる。

◆Column 逆転層

雲がない晴天時の夜間には、強い放射冷却が起こって地面がひどく冷やされる。このような場合に、冷えた地面が低空の大気を冷やすことによって、高空に行くほど気温が高くなる部分が大気中にできる。これが逆転層とよばれるもので、大気の鉛直方向の移動を妨げてしまうため、濃霧が発生して長く留まったり、大気汚染物質が停滞して健康被害が発生したりするなど、日常生活に影響を及ぼすこともある。

問 II

(1) 難易度 : ★★★★★

圧力傾度力とコリオリの力（転向力）がつり合うことが必要である。A, B での圧力傾度力の比は二地点の海面の勾配の比に等しく、コリオリの力が流速と緯度の正弦に比例することから、A, B における地衡流の速さをそれぞれ v_A [m/s], v_B [m/s] とし、A, B の緯度をそれぞれ φ_A, φ_B とすると

$$\frac{v_B [\text{m/s}] \sin \varphi_B}{v_A [\text{m/s}] \sin \varphi_A} = \frac{0.85 \text{cm/km}}{0.30 \text{cm/km}}$$

よって、

$$v_B = \frac{0.85 \text{cm/km} \times v_A \sin \varphi_A}{0.30 \text{cm/km} \times \sin \varphi_B}$$

$$= \frac{0.85 \text{cm/km} \times 0.31 \text{m/s} \times 0.66}{0.30 \text{cm/km} \times 0.56} = 1.035 \dots \text{m/s} \cong \mathbf{1.0 \text{m/s}}$$

導入文をしっかりと読むことがポイントとなっている。

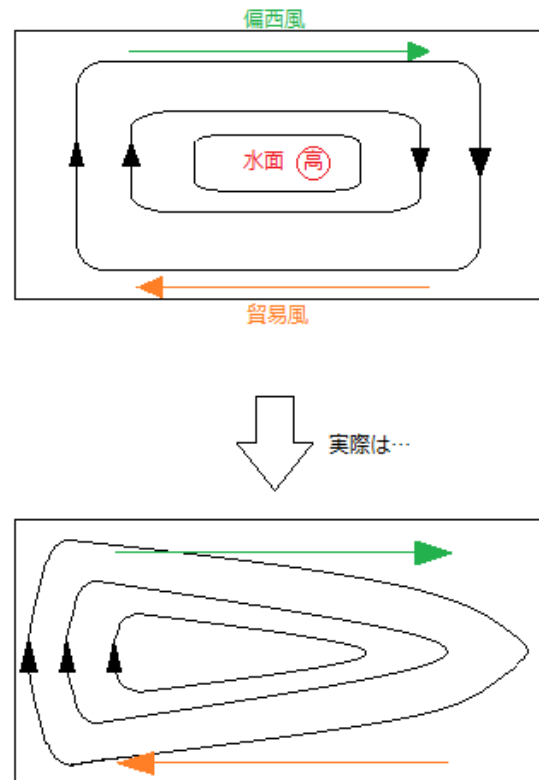
(2) 難易度：★★★★☆

西岸強化

◆Check!! 西岸強化

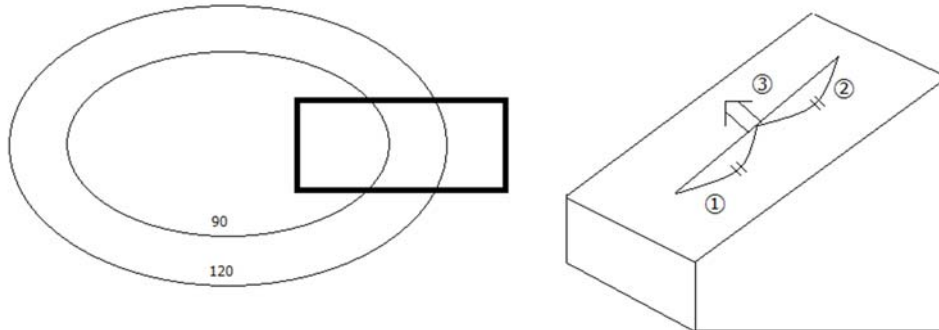
転向力が一様なら海流の分布は右図上のようなになるが、実際には転向力は一様ではない。転向力の大きさ f は、風速を v 、空気の密度を ρ 、地球の自転角速度を ω 、緯度を ϕ とすると $f = 2\rho\omega v \sin \phi$ で表されるので ϕ が 90° に近いほど、つまりは高緯度であるほど転向力 f の値は大きくなる。すると、高緯度の東向きの海流は低緯度の西向きの海流よりも転向力の影響が大きくなり、高緯度の流れは進行方向に対して右に曲げられ、南向きの流れの域が増える。これによって環流の中心は西側にずれ、西側を流れる北向きの海流は狭い領域を一気に流れるため、大洋の西岸の北向きの流れは強くなる。これが西岸強化である。

代表的な例としては黒潮やメキシコ湾流がある。



(3) 難易度：★★★★☆

取り上げられているのは渦であるが、遠心力を考えなくてよいとされている以上、普通の地衡流の問題として扱える。



渦の一部を取り出す

渦の一部を取り出したのが上図である。流れの方向を決めるにあたっては、圧力傾度力（図中①）の方向を調べ、遠心力がないために①と釣り合う強さのコリオリの力（図中②）がちょうど反対の方向にはたらく必要があることから、問題が北半球であることを考慮して、②が都合のよい方向にはたらく流れの方向（図中③）を決定する。この考え方は頻出なので①から③へ順にたどっていく考えの流れがすぐにわかるようにしておきたい。また、南半球では流れの方向を決める際、向きが反対になることも確認しておこう。

最後に、この問題では③の方向を渦にあてはめればよいから、答えは反時計回りである。

解答例

図より渦 E の内部は周囲より海面高度が低いことから、圧力傾度力は渦の内側へ向いており、力のつり合いからコリオリの力は渦の外側へ向いている。渦は北半球の日本近海のものであるから、回転方向は反時計回りである。

(4) 難易度：★★★★☆

単位体積当たりにはたらくコリオリの力 f は、流速 v と緯度 φ の正弦 $\sin \varphi$ に比例し

$$f \propto v \sin \varphi$$

と表される（ \propto は比例を表す記号）ので、コリオリの力が一定の状態では緯度が変化すると

$$v \propto \frac{1}{\sin \varphi}$$

となり、緯度 φ が 90 度に近づき $\sin \varphi$ が大きくなるほど流速 v が小さくなることがわかる（赤道ではコリオリの力が存在しないため考えない）。渦は反時計回りで流れは東側で北上、西側で南下していることから、解答は以下のとおりである。

解答例

海面勾配が場所によらず一定なので、圧力傾度力およびコリオリの力も一定といえる。渦 E は反時計回りなので、北上する渦の東側の地衡流は緯度の増加によって流速が減少し、東側の海面は上昇していく。同様に考えると、西側の海面は下降していく。

◆Check!!

コリオリの力は流速および緯度の正弦に比例して変化する。これを問題で扱う際は単位体積当たりにはたらくコリオリの力を f 、流速を v 、緯度を φ として

$$f \propto v \sin \varphi$$

とあらわすと使いやすくなる。

(諸星暁之, 奥井晴香, 仁木創太, 西山学)

2016 年度 東京大学 前期 地学

地学問題III 固体地球, 地質・地史

出題範囲	地球の内部構造/地表の変化/地質図・地質断面図
難易度	★★★★☆
所要時間	23分
傾向と対策	問Ⅰは記述・計算ともに比較的やさしいので確実に得点したい。問Ⅱは深海堆積物や宇宙線、古地磁気などの細かい知識が問われている。自分の知識で対応できない問題は、切り捨てて他の問題に時間を割こう。とはいえ細かい知識もあるに越したことはないので、普段から教科書の隅まできちんと読むことが大切である。放射年代・アイソスタシーの計算は確実にできるようにしておこう。

解答

問Ⅰ (1) 時間の経過とともに海洋底の温度が下がることで、リソスフェアの密度が上昇し、同時にリソスフェアの下面に冷えて流動性を失ったアセノスフェアが付着してリソスフェアの厚さが増加するため。

- (2) (a) 堆積物がある場合のリソスフェアの下面と深さの等しい面において、その面に加わる圧力がどこでも等しくなる。リソスフェアの厚さは一定だから、堆積物がない場合の、この等深面より上のアセノスフェアの厚さは $D + d - d_0$ となる。リソスフェアの厚さを d_L 、密度を ρ_L とすると、次の式が成り立つ。

$$\rho_A(D + d - d_0) + \rho_L d_L + \rho_W d_0 = \rho_L d_L + \rho_S D + \rho_W d$$

したがって、

$$d_0 = d + \frac{\rho_A - \rho_S}{\rho_A - \rho_W} D$$

- (b) 堆積物が積もらなかった場合の水深 d_0 と観測値 d の差 $d_0 - d$ は、数値を代入して、

$$\begin{aligned} d_0 - d &= \frac{3.3 \times 10^3 - 2.0 \times 10^3}{3.3 \times 10^3 - 1.0 \times 10^3} \times 370 \\ &\approx 209 \\ &= 2.1 \times 10^2 [\text{m}] \end{aligned}$$

堆積物がない場合、水深は堆積物がある実際の場合よりも深くなることがわかる。

問Ⅱ (1) 乾燥地帯や火山から風によって運ばれ、海流によって拡散される。

- (2) C

理由：有孔虫の遺骸などからなる石灰質堆積物は、炭酸塩補償深度よりも浅い海域に堆積するので、海嶺やホットスポットによる火山列島があり浅い海域である C が答えである。

- (3) 求める年代を t とすると

$$\begin{aligned} \frac{1}{1000} &= \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5700}} \\ \log_{10} 1000 &= \frac{t}{5700} \log_{10} 2 \end{aligned}$$

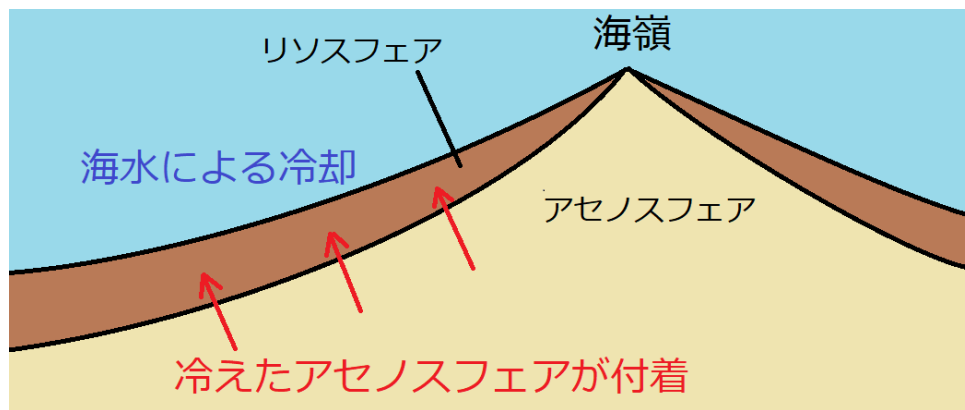
$$t = 5700 \times \frac{3}{0.3}$$

$$= 5.7 \times 10^4 \text{ 年前}$$

- (4) 地球大気へ届く宇宙線は太陽や地球の磁場によってその一部が遮られているが、太陽や地球の磁場の変化により宇宙線を遮る割合が変化するため。
- (5) 粘土に含まれる磁性のある鉱物の古地磁気と既知の古地磁気とを比較する。

解説**問 I****(1) 難易度：★★★★☆**

海洋底ではアイソスタシーが成立しているため、地殻熱流量の多い海嶺から離れ、海水に冷やされることで、密度が大きくなり海洋底が沈み、水深が深くなる。また、冷やされたアセノスフェアがリソスフェアに付着し厚さが増加するが、アセノスフェアが流動性を失うと密度が大きくなるため、アイソスタシーにより水深が深くなる。



海洋プレートの拡大

解答例

時間の経過とともに海洋底の温度が下がることで、リソスフェアの密度が上昇し、同時にリソスフェアの下面に冷えて流動性を失ったアセノスフェアが付着してリソスフェアの厚さが増加するため。

(2)**(a) 難易度：★★★★☆**

堆積物がない場合、リソスフェアの底面は堆積物がある場合よりも浅くなるはずである。堆積物がある場合のリソスフェアの底面と深さの等しい面において、その面に加わる圧力がどこでも等しくなる。リソスフェアの厚さは一定だから、この等深面より上のアセノスフェアの厚さは

$$D + d - d_0$$

となる(図を参照)。リソスフェアの厚さを d_L 、密度を ρ_L とすると、(密度)×(厚さ)の和が等しいことから、次の式が成り立つ。

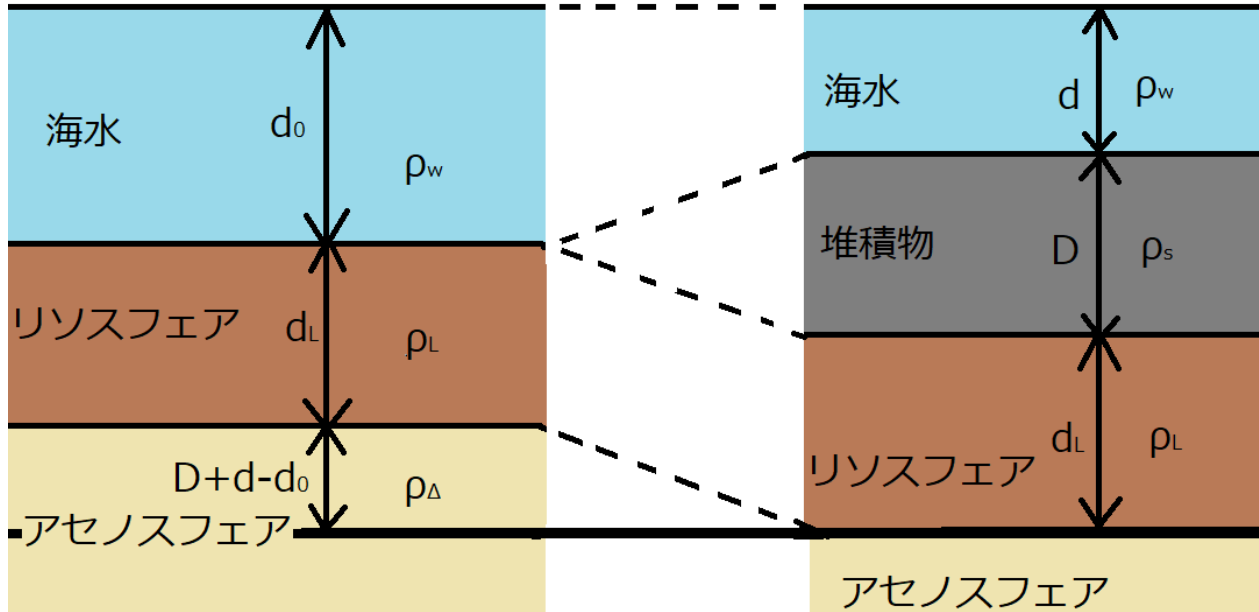
$$\rho_A(D + d - d_0) + \rho_L d_L + \rho_W d_0 = \rho_L d_L + \rho_S D + \rho_W d$$

$$\rho_A d_0 - \rho_W d_0 = \rho_A d - \rho_W d + \rho_A D - \rho_S D$$

$$(\rho_A - \rho_W)d_0 = (\rho_A - \rho_W)d + (\rho_A - \rho_S)D$$

$$d_0 = d + \frac{\rho_A - \rho_S}{\rho_A - \rho_W} D$$

なお、この問題では、どちらの場合にも同じ厚さのリソスフェアがあり、式の両辺に $\rho_L d_L$ が出てくるので、この部分は省略しても構わない。



アイソスタシー

(b) 難易度：★★★★☆

堆積物が積もらなかった場合の水深 d_0 と観測値 d の差 $d_0 - d$ は、(a)より

$$d_0 - d = \frac{\rho_A - \rho_S}{\rho_A - \rho_W} D$$

この式に $D = 370[\text{m}]$, $\rho_W = 1.0 \times 10^3[\text{kg}/\text{m}^3]$, $\rho_S = 2.0 \times 10^3[\text{kg}/\text{m}^3]$, $\rho_A = 3.3 \times 10^3[\text{kg}/\text{m}^3]$ を代入して、

$$\begin{aligned} d_0 - d &= \frac{3.3 \times 10^3 - 2.0 \times 10^3}{3.3 \times 10^3 - 1.0 \times 10^3} \times 370 \\ &= \frac{1.3}{2.3} \times 370 \\ &\approx 209 \\ &= 2.1 \times 10^2[\text{m}] \end{aligned}$$

堆積物がない場合、水深は堆積物がある実際の場合よりも深くなるのがわかる。

問II

(1) 難易度：★★★★☆

遠洋性粘土とは、河川や沿岸流などによって運搬された碎屑性堆積物とは異なり、風や海流によって運搬された非常に細粒の堆積物である。少量だが広範囲に定常的に堆積する。

解答例

乾燥地帯や火山から風によって運ばれ、海流によって拡散される。

(2) 難易度：★★★★☆

問題文より、太平洋では水深が 1500m を超えると炭酸カルシウムが海水に溶解するとあるので、海嶺やホットスポットによる火山列島、沈み込み帯による島弧があり、浅い海域である C が石灰質堆積物である。問題文に答えのヒントが書いてあることが多いので、よく読むようにしましょう。

解答に書く必要はないが、ここでは珪質堆積物、遠洋性粘土の分布についても記しておく。まず珪質堆積物であるが、珪質堆積物は珪藻軟泥と放射虫軟泥に大別される。珪藻軟泥は、年海水温度が 10°C の等温線より高緯度側に分布する。これは、本来珪藻は高緯度地域に限らず広く分布するのだが、低温により分解されにくく、高緯度域にのみ堆積するためである。一方放射虫軟泥は、湧昇流により生物生産量が大きい赤道域東部に分布する。したがって、珪質堆積物は B。

残った遠洋性粘土は、石灰質堆積物も珪質堆積物も堆積しにくい海域に堆積するため、A となる。

石灰質堆積物：C

理由：

解答例

有孔虫の遺骸などからなる石灰質堆積物は、炭酸塩補償深度よりも浅い海域に堆積するので、海嶺やホットスポットによる火山列島があり浅い海域である C が答えである。

(3) 難易度：★★★★☆

^{14}C 濃度が測定限界よりも低いと、年代を求めることができなくなる。 ^{14}C 濃度が測定限界と同じ現在の大気中の 1000 分の 1 であれば、そこから得られる年代が、求めることができる最も古い年代である。したがって、濃度が現在の 1000 分の 1 の場合の年代を求めればよい。ここでは

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{1000}$$

として、求める年代を t とすると、

$$\frac{1}{1000} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5700}}$$

$$\log_{10} 1000 = \frac{t}{5700} \log_{10} 2$$

$$3 = \frac{t}{5700} \times 0.3$$

$$t = 5700 \times \frac{3}{0.3}$$

$$= 57000$$

$$= 5.7 \times 10^4 \text{ 年前}$$

◆Check!! 放射性同位体と半減期

放射性同位体が崩壊して安定な原子になるとき、放射性同位体の量が半減するまでにかかる時間を半減期という。この値は温度や圧力には影響されない。初めの放射性同位体の量を N_0 、 t 年後の量を N 、半減期を T とすると以下の式で表される。

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$

(4) 難易度：★★★★☆

宇宙線とは、太陽から飛来するものもあるが、ほとんどが太陽系外の銀河系から飛来する陽子だと考えられている。陽子は帯電しているため、太陽や地球の磁場によって進路を曲げられ、地球大気に入射するのはその一部となる。太陽の磁場は11年周期をはじめいくつかの周期で太陽活動に伴い変動しているため、地球大気に入射する宇宙線の割合は変化する。また、地磁気の逆転時等に地磁気が乱れることもあり、それによって地球大気への宇宙線の入射量は変化する。

解答例

地球大気へ届く宇宙線は太陽や地球の磁場によってその一部が遮られているが、太陽や地球の磁場の変化により宇宙線を遮る割合が変化するから。

(5) 難易度：★★★★☆

遠洋性粘土は、それに含まれる磁性鉱物が保存した古地磁気と、堆積当時の地磁気の向きが一致するように堆積するから、既知の古地磁気と比較することで、遠洋性粘土の堆積した年代を求めることができる。ウラン・鉛法やカリウム・アルゴン法などの親核種と娘核種の比を用いる方法は、試料が固結し外部との同位体の出入りがなくなった年代を求めるものであるため、堆積年代を求めるときに使うことはできない。

解答例

粘土に含まれる磁性のある鉱物の古地磁気と既知の古地磁気とを比較する。

(芝田力, 辻有恒, 西山学, 諸星暁之)