

# 地 学

第1問 宇宙に関する次の問い(問1～2)に答えよ。数値での解答には有効数字1桁で答え、計算の過程も示せ。

問1 昨年2月、アメリカのLIGO(ライゴ)実験チームは、史上初めてブラックホール連星の合体で生じた重力波を検出したと発表した。一般相対性理論によれば、重力は時空の歪みであり、時空のわずかな歪みが光速の波動として伝わる現象が重力波である。この発見に関する以下の問いに答えよ。なお、光速は  $3 \times 10^8$  m/s、1年は  $3 \times 10^7$  s、1天文単位は  $2 \times 10^{11}$  m とする。

- (1) 合体直前の重力波信号の振動から、連星の公転周期を0.01 sと見積もった。合体直前の2つのブラックホールは、光速に近い速度で公転している。ここでは、2つのブラックホールの質量が等しく、光速の0.4倍の速度で円軌道を公転しているとして、連星間の距離が何 km か求めよ。
- (2) さらに、ケプラーの法則が成り立つとして、この連星のそれぞれのブラックホールの質量を、太陽質量( $M_{\odot}$ )単位で求めよ。
- (3) 重元素の量が太陽と同程度である星の進化では、約  $20 M_{\odot}$  より重いブラックホールは作られないと考えられており、今回のブラックホール連星は重元素の量が少ない連星が進化したものである可能性が高い。この連星が形成された場所や誕生時の星の種族として考えられるものを、以下の語群から3つ以上の語を用いながら、2行程度で答えよ。

語群：球状星団、散開星団、ハロー、円盤部、種族I、種族II

- (4) 連星間の平均距離が  $a$  であるブラックホール連星の公転により重力波が放出されると、それに伴うエネルギー損失により、 $a$  は公転周期より長い時間スケールでゆっくりと減少する。その場合  $a$  は時刻  $t$  に対して以下の式に従う。

$$a(t) = (C - At)^{1/4}$$

ここで  $A$  は連星の質量で決まる定数であり、 $C$  は初期条件によって決まる定数である。また、 $C > 0$ 、 $A > 0$ 、 $t \leq C/A$  とし、 $a = 0$  で合体が起こるとする。ある時刻  $t_0$  で  $a = a_0$  だった連星が時刻  $t_m$  で合体する場合、合体までにかかる時間  $t_m - t_0$  を  $A$  と  $a_0$  で表せ。

- (5) 今回重力波が検出されたブラックホール連星は、誕生から合体まで重力波の放出のみでエネルギーを失うものとする。現在の宇宙の年齢を答え、さらに、誕生時の連星間距離の上限値  $a_{\max}$  を求めよ。なお、この連星においては  $A = 3 \times 10^{24} \text{ m}^4/\text{s}$  である。また、地学に登場する様々な長さスケールの中で、 $a_{\max}$  に近いものを1つ、例としてあげよ。

問 2 太陽系外の惑星(系外惑星)は 3000 個以上が知られているが、そのほとんどが恒星の前を横切る際の食を利用して見つかっている。その結果、地球に近い大きさを持ち、かつ生命の存在が期待される惑星も多数知られるようになった。系外惑星と生命存在可能性に関する次の問いに答えよ。なお、恒星の質量  $M$  と光度  $L$  の間には質量光度関係  $L = cM^4$  ( $c$  は定数) が成り立つとする。

- (1) 系外惑星を 3 つ持つある G 型の恒星の明るさを約 1 年間観測したところ、図 1 のように周期的にわずかに暗くなる様子が観測された。この恒星では、1 地球半径 ( $R_E$ ) の惑星による食で明るさが最大 0.01 % 減少するものとする。このとき、3 つの惑星それぞれについて半径が  $R_E$  の何倍であるかを求め、中心の恒星から近い順に並べよ。なお、全惑星は同一の公転面を持ち、われわれは公転面に平行な方向から観測しているものとする。
- (2) 惑星に生命が存在するためには、水が液体として存在することが重要と考えられている。惑星の温度は、恒星から受ける放射エネルギーと惑星の熱放射エネルギーの平衡で決まり、また惑星の熱放射はシュテファン・ボルツマンの法則に従うものとする。恒星の質量を  $M$ 、惑星のアルベド(反射率)を  $A$  としたときに、惑星の温度が水の凝固点(絶対温度  $T_{ice}$ ) に等しくなる軌道半径  $a_{ice}$  を、 $M$ 、 $c$ 、 $A$ 、 $T_{ice}$  およびシュテファン・ボルツマン定数  $\sigma$  を用いて表せ。なお、惑星は円軌道で公転しているものとする。

恒星周囲において、水が液体として存在可能な惑星の軌道半径の範囲(円環領域)をハビタブルゾーン(生命存在可能領域)と呼ぶが、軌道半径  $a_{ice}$  はその外縁を定義する。恒星は質量の増加とともに光度が大きく増加するため、ハビタブルゾーンも大きく広がる。一方で、恒星は質量が増加すると寿命が短くなってしまうため、生命誕生以前に恒星の寿命が尽きてしまうかもしれない。

(3) 恒星の寿命を、核融合の燃料となる水素がすべて消費されるまでの時間と考える。燃料となる水素の核融合開始時の量は恒星質量に比例し、その後単位時間あたりに消費される水素の量は光度に比例するものとする。1太陽質量の恒星の寿命を100億年とする。また、惑星は恒星と同時に形成し、生命が誕生するには惑星形成から最低3億年が必要なものとする。このとき、惑星に生命が誕生しうる最も重い恒星の質量を、太陽質量( $M_{\odot}$ )の単位で答えよ。

(4) ハビタブルゾーンの外側であっても生命は存在するかもしれない。太陽系のハビタブルゾーンは、地球軌道および火星軌道を含む狭い円環と考えられているが、その領域外にありながらも生命が存在しうると考えられている天体を、理由とともに1つあげよ。

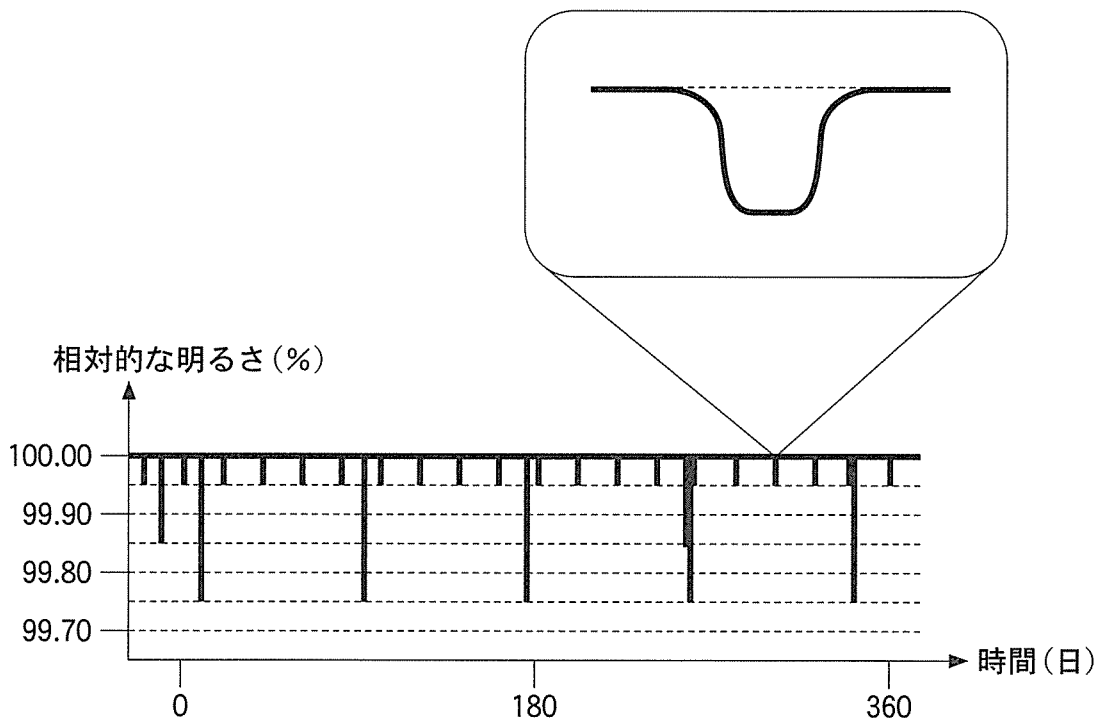


図1 あるG型の恒星の相対的な明るさの時間変化。一部の拡大図を右上に示す。

第2問 大気の熱収支および大気と海洋の相互作用に関する次の問い(問1～2)に答えよ。

問1 地球の気候の成り立ちや変動を理解する上で、地球のエネルギー収支を考えることは重要である。図2-1は、地球全体で年平均した単位表面積あたりのエネルギー収支を、大気の上端に入射する太陽からの短波放射エネルギーを100とした相対的な値(%)で表したものである。この図を参照して以下の問いに答えよ。ただし、数値を求める問題には有効数字2桁で答え、計算の過程も示すこと。なお、図中の相対値100に対応する熱輸送の大きさを  $340 \text{ W/m}^2$  とせよ。

- (1) 地球大気は地表面から上向きに射出された長波放射の大部分を吸収し、下向きに長波放射を射出することで地表を温めている。地球大気の持つこのはたらきを何というか。
- (2) 大気の上端および地表面でエネルギー収支がつりあっているとして、図中の空欄ア～ウにあてはまる数値を求めよ。また、これらの数値から、短波放射に対する地球のアルベド(反射率)を求めよ。
- (3) 短波放射と長波放射を合わせた放射によって、地球大気は冷却されている。これによって大気が失うエネルギーの大きさを  $\text{W/m}^2$  の単位で求めよ。
- (4) この冷却が大気の上端から下端まで一様に起こるとしたとき、大気の気温低下率は1日あたり何 $^{\circ}\text{C}$ か求めよ。ただし、地球大気の定圧比熱を  $1.0 \times 10^3 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 、地表面気圧を  $1.0 \times 10^3 \text{ hPa}$ 、重力加速度を  $10 \text{ m/s}^2$ 、1日を  $8.6 \times 10^4 \text{ s}$  とせよ。

(5) 地球大気では、この放射による冷却が、蒸発と熱伝導による地表面から大気への熱輸送とつりあうことで熱的平衡が成り立っている。地球全体の平均では年蒸発量と年降水量がつりあっていると仮定し、年降水量を  $1.0 \times 10^3 \text{ mm}$  とするとき、蒸発による熱輸送の大きさを大気上端へ入射する短波放射エネルギーに対する相対値(%)で求めよ。また、これは熱伝導による熱輸送の何倍か求めよ。ただし、単位質量の水を蒸発させるのに必要な熱量を  $2.5 \times 10^6 \text{ J/kg}$ 、水の密度を  $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、1年を  $3.2 \times 10^7 \text{ s}$  とせよ。

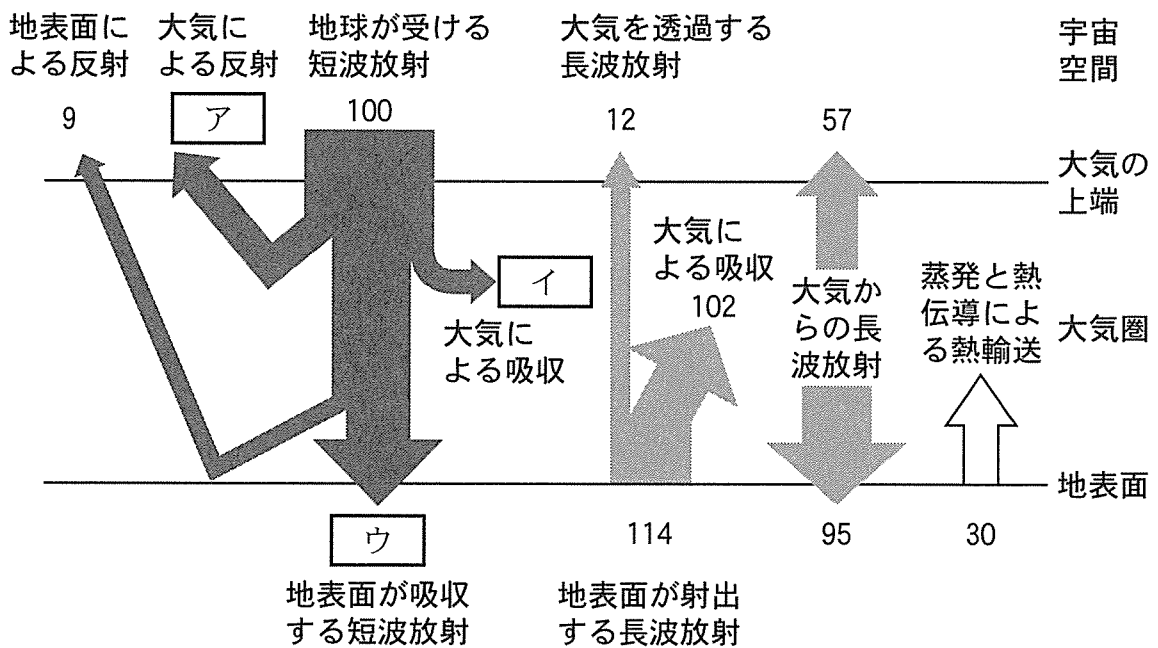


図2—1 地球全体で年平均したエネルギー収支の模式図。地球大気の上端へ入射する短波放射エネルギーを100とした相対値(%)で表す。

問 2 熱帯低気圧と海洋の関係について以下の問いに答えよ。数値を求める問題には有効数字 2 桁で答え、計算の過程も示すこと。なお、重力加速度  $g$  は  $10 \text{ m/s}^2$  とする。

- (1) 図 2—2 の熱帯低気圧の発生場所の分布をみると、熱帯低気圧は緯度 30 度より高緯度側と赤道付近であまり発生していないことがわかる。この理由を、高緯度側と赤道付近についてそれぞれ 1 行程度で述べよ。
- (2) 台風の強風で発達した風浪のうち、波長の長い波は、台風が低緯度の海洋上にあるうちから、うねりとして日本沿岸に到達し、海岸の侵食などの被害を生ずる。ここで、海洋表面の波の伝わる速さ  $V \text{ m/s}$  は波の波長  $\lambda \text{ m}$  と重力加速度  $g \text{ m/s}^2$  を用いて  $V = 0.40 \lambda^a g^\beta$  と与えられる。実数の定数  $a$  と  $\beta$  を単位の整合性を考慮して求め、 $\lambda = 2.5 \times 10^2 \text{ m}$  のときの  $V$  を求めよ。
- (3) 低緯度から北西に進んだ台風が進行方向を北東に変える場所では、その移動速度が遅くなり一時的にほとんど停滞する。ここで、海洋上に停滞している台風を考え、風は目を中心とする回転方向にだけ吹いていると仮定する。このとき、台風の風により海洋にはどのような流れと水温の変化が生じ、その結果として台風の強さはどうなると考えられるか、3 行程度で述べよ。
- (4) 台風の接近により、海面気圧が平常時の  $1013 \text{ hPa}$  から  $950 \text{ hPa}$  へ低下したとする。このとき、海面の水位は平常時に比べ何  $\text{m}$  上昇するか求めよ。ここで、海面気圧の低下分は、水位の上昇による海水の重さの増加と相殺し、海底での圧力は平常時から変化しないと仮定せよ。また、海水の密度は  $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  とする。

- (5) 南東方向に開いた湾に台風が南西側から近づくとき、湾口と湾奥では海面気圧の低下が同じでも、台風の風のために水位に違いが生ずる。このとき、湾内では、湾口から湾奥に向かって働く力と、湾奥から湾口に向かって働く力の2つの力がほぼつりあう。これらの力がどのようなものか説明し、湾口と湾奥のどちらで水位が高くなるかについて、2行以内で述べよ。

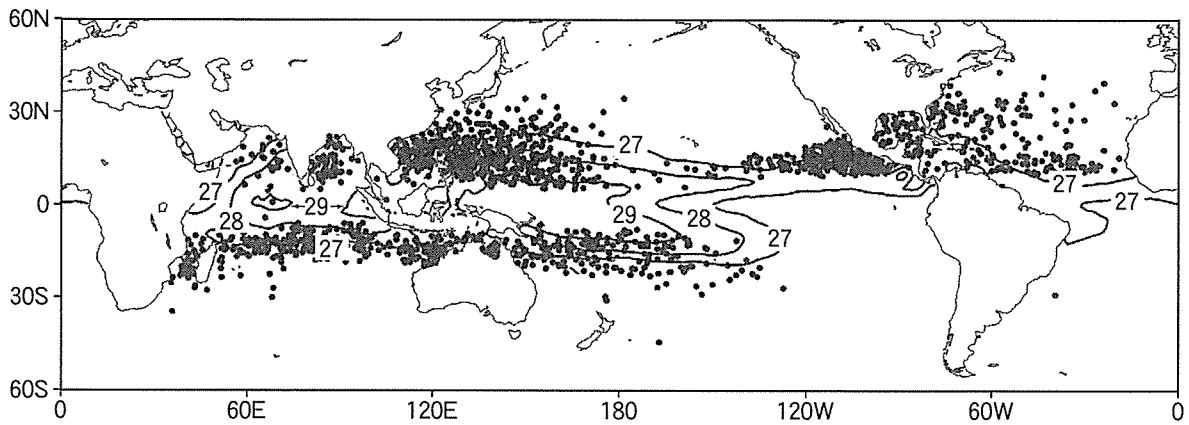


図2—2 1986年～2005年の熱帯低気圧の発生位置(黒丸)と年平均の海面水温の等値線(27℃以上を1℃ごとに描いてある)。



第3問 地震と地質に関する次の問い(問1～2)に答えよ。数値を求める問題では、計算の過程も示すこと。

問1 東西方向に100 km離れて並んでいる2つの観測点(西側を観測点1, 東側を観測点2と名づける)で, 南北, 東西, 上下のそれぞれの動きを記録する地震計を設置していたところ, 隕石衝突の地震波形記録が取得された。この記録を用いて隕石衝突地点と衝突時刻の特定を行う。それぞれの観測点でP波, S波は, 図3—1中に記してある時刻に観測された。水平面上の位置を特定するため, 観測点1を原点とし, 真東および真北方向に $x$ 軸,  $y$ 軸を定義する。また, 観測点1から見た衝突地点の方位を特定するため, 真東を基準とした衝突地点の方位角 $\theta$ ( $-180^\circ < \theta \leq 180^\circ$ )を, 図3—1のように反時計回り方向を正方向として定義する。さらに, 地表面に射影した隕石の到来方位を特定するため, 衝突地点方位を基準とした到来方位の方位角 $\varphi$ ( $-180^\circ < \varphi \leq 180^\circ$ )を, 同じく反時計回り方向を正方向として定義する。なお, この地域の地表面は水平であり, 地下はP波速度6.4 km/s, S波速度4.0 km/sの均質構造を持ち, 隕石の飛来により大気中に生ずる衝撃波の影響は無視できるものとする。

- (1) 隕石衝突地点から観測点1および観測点2までの距離を, 有効数字2桁で求めよ。
- (2) 隕石衝突地点の座標( $x_0, y_0$ )を, 有効数字2桁で求めよ。また, 隕石衝突時刻を, 1秒の精度で求めよ。複数の可能性がある場合は, すべての可能性を列挙せよ。

衝突地点をさらに絞り込むため, 衝突地点ごとに地震波形の特徴がどう変化するかについて考察する。例として, 到達時刻の解析により, 衝突地点が(i)  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  もしくは(ii)  $-90^\circ < \theta < 0^\circ$  のどちらかの領域にあると特定できた場合を考え, (i)および(ii)のそれぞれの場合で観測点1における波形の特徴がどのように変わるかを考える。

- (3) (i)  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  の領域に  $\phi = 0^\circ$  の方位から衝突した場合，観測点 1 における東西成分と南北成分の初動の向きは以下の(a)~(d)のどの組み合わせになるか，答えよ。

	(a)	(b)	(c)	(d)
東西成分	東向き	西向き	東向き	西向き
南北成分	南向き	南向き	北向き	北向き

- (4) 観測点 1 の東西成分と南北成分の初動の向きは，隕石の衝突地点の方位角  $\theta$  だけでなく，隕石の到来方位角  $\phi$  によっても変化する。衝突地点が (i)  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  の領域にある場合，初動の向きは(3)の(a)~(d)のどの組み合わせになるかを， $\phi$  の値の範囲ごとに答えよ。
- (5) 隕石の到来方位角  $\phi$  に関する情報がないとき，衝突地点が(i)  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  と(ii)  $-90^\circ < \theta < 0^\circ$  のどちらの領域にあるかを，地震波形からどのように特定できるか，2 行程度で答えよ。

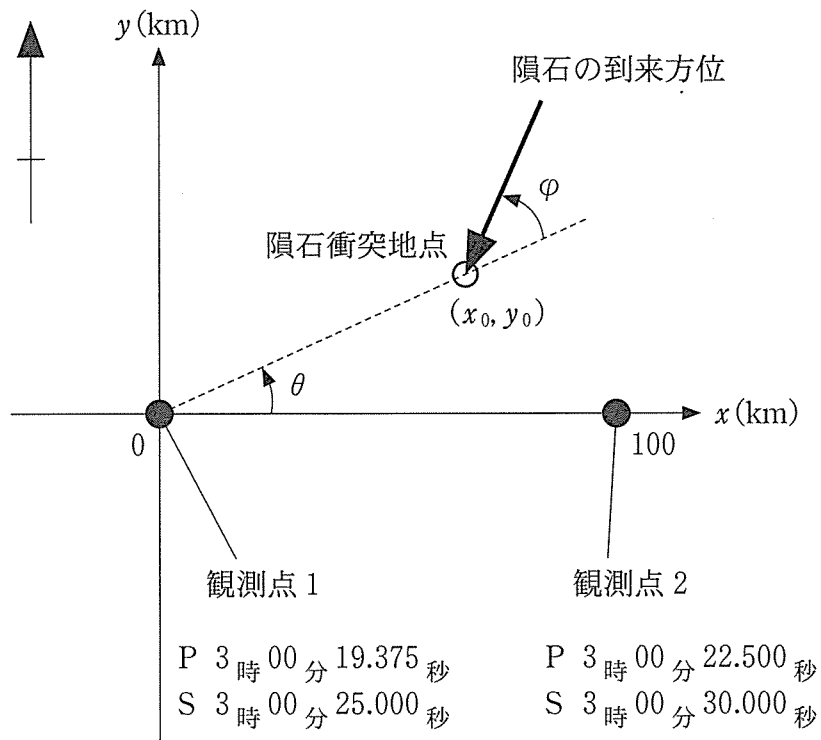


図 3—1 座標および方位角の定義。各観測点における P 波、S 波の到達時刻も合わせて記す。

問 2 図 3—2 は、ボーリング(地下掘削)によって明らかにされた、ある地熱地帯の地質柱状図および温度分布図である。上部には、主に泥岩からなる新第三紀の堆積岩、下部には、 $\text{SiO}_2$  が 70 % 程度の深成岩である **ア** 岩が定置している。深成岩に含まれる黒雲母や長石に **イ** 年代法を適用したところ、100 万年以下の年代が得られた。堆積岩体において、 $\text{Al}_2\text{SiO}_4$  を成分とし多形を持つ変成鉱物 **ウ** および **エ** が深部から浅部に順に見いだされた。これは、現在の温度分布から期待される変成鉱物の形成(再結晶)と整合的である。したがって、堆積岩が深成岩からの熱により **オ** 変成作用を受け、その作用が現在も続いていると考えられる。

本地域の深度 3000 m より浅部の温度構造は水の沸騰曲線に近いのに対して、3000 m より深部では、深度と共に直線的に増加する温度構造となっている。堆積岩体中には多くの亀裂が生じており、その一部を充填する形で石英が晶出しているのに対し、深成岩体中にはこれらの構造はみられない。上記の事実は、浅部域では活発な熱水(蒸気を含む)対流が生じているのに対して、深部域では熱水活動が起きていないことを示す。

- (1) ア～オにあてはまる語を答えよ。
- (2) ボーリングで得られた深成岩試料の薄片を偏光顕微鏡で観察した。顕微鏡の開放(平行)ニコルおよび直交ニコルで観察したときの下線部の 2 つの鉱物の相違点を、それぞれのニコルの場合で 1 つずつあげよ。
- (3) 3000 m より深部での地殻熱流量( $\text{W}/\text{m}^2$ )を有効数字 2 桁で求めよ。また、その値は平均的な大陸の地殻熱流量と比べて高いか低いのか、その原因とともに答えよ。ここで、深成岩の熱伝導率を  $2.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  とする。
- (4) 本地域では微小地震が頻発しているが、その地震は深度 3100 m より深部では観測されない。高温下では、地震発生が抑制されるのかもしれない。この仮説にもとづき、標準的な内陸地震発生の下限深度を有効数字 2 桁で推定せよ。その際、本地熱地域における地震下限深度での温度、内陸の地温勾配  $30 \text{ K}/\text{km}$  および地表温度  $20^\circ\text{C}$  を用いること。

(5) 本地域に類似した温度構造は、海嶺直下にも存在すると考えられる。その理由を、海嶺における海洋地殻の生成と関連づけて4行程度で説明せよ。その際、以下の語すべてを用いること。

語群：マントル物質，玄武岩質マグマ，海水

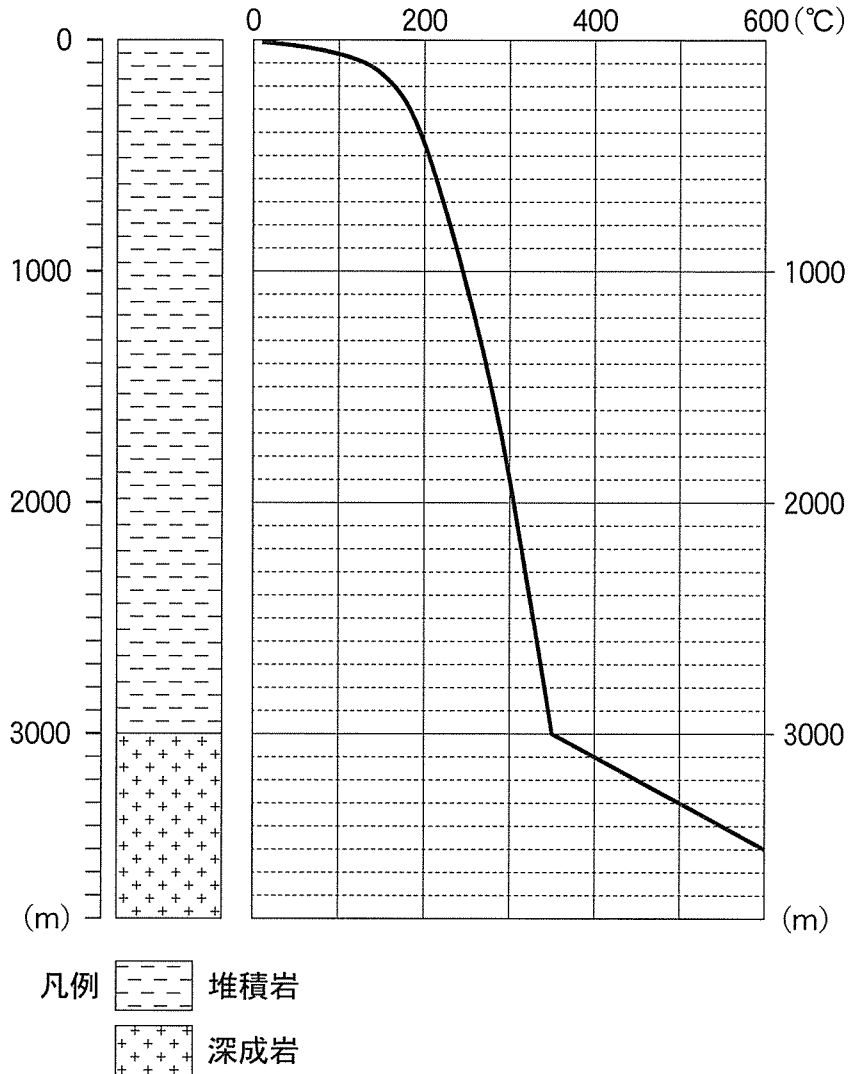


図3—2 地質柱状図(左)および温度分布図(右)。縦軸は深度を示す。

## 問題訂正

冊子名	理科		
科目名	地学		
82	ページ	第 3	問
<u>問題訂正</u>			
(誤) 5 行目			
$Al_2SiO_4$			
(正) 5 行目			
$Al_2SiO_5$			