

理 科 (地)

(問 題)

2023年度

〈2023 R05170015 (理科 (地))〉

注 意 事 項

1. 試験開始の指示があるまで、問題冊子および解答用紙には手を触れないこと。
2. 問題は2～9ページに記載されている。試験中に問題冊子の印刷不鮮明、ページの落丁・乱丁及び解答用紙の汚損等に気付いた場合は、手を挙げて監督員に知らせること。
3. 解答はすべて、HBの黒鉛筆またはHBのシャープペンシルで記入すること。
4. 記述解答用紙記入上の注意
 - (1) 記述解答用紙の所定欄（2カ所）に、氏名および受験番号を正確に丁寧に記入すること。
 - (2) 所定欄以外に受験番号・氏名を記入した解答用紙は採点の対象外となる場合がある。
 - (3) 受験番号の記入にあたっては、次の数字見本にしたがい、読みやすいように、正確に丁寧に記入すること。

数 字 見 本	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

- (4) 受験番号は右詰めで記入し、余白が生じる場合でも受験番号の前に「0」を記入しないこと。

	万	千	百	十	一
(例) 3825番⇒		3	8	2	5

5. 解答はすべて所定の解答欄に記入すること。所定欄以外に何かを記入した解答用紙は採点の対象外となる場合がある。
6. 試験終了の指示が出たら、すぐに解答をやめ、筆記用具を置き解答用紙を裏返しにすること。
7. いかなる場合でも、解答用紙は必ず提出すること。
8. 試験終了後、問題冊子は持ち帰ること。

古くから地球には磁場があることが知られており、地球が帯びている磁気を地磁気とよぶ。地磁気は、強さと方向が地球史を通じて様々に変化してきた。地球の内部構造は、地表面から中心に向かい、岩石からなる地殻とマントル、および金属からなる核から構成される。核は、主に液体の鉄から構成される外核と、主に固体の鉄から構成される内核に区分される。外核は液体であることから流動しており、この外核の流動が地磁気を生み出している。電流のまわりには磁場ができることが知られており、地磁気は外核の流動により生じた電流により維持されていると^a考えられている。この考え方をダイナモ理論とよぶ。地球表層で観測される磁場の約90%は、棒磁石が形成する磁場によって表される双極子磁場に近似することができる。ここでは、地球の磁場は、磁北極と磁南極をもつ双極子磁場であるとして考える。地磁気の南北の極の位置は、地球の回転軸に対して不規則に摂動したり、徐々に変化したりすることが知られている。その原因は完全には明らかになっていない。また、この双極子磁場の極性は不規則な時間間隔で逆転することも知られている。地磁気の極性が安定している期間も様々で、数万年程度のこともあれば、数千万年間安定なこともある。過去6600万年間における地磁気の逆転の平均的な頻度は、100万年あたり2ないし3回程度である。一方、およそ1億年前には、4000万年間も地磁気の逆転がなく、極性が安定していた期間もある。

過去の地球の地磁気は、溶融した岩石（マグマ）が固結する過程で、鉄を含む鉱物とそのキュリー点^{注1}を下回る温度まで冷却された際に獲得する磁場や、鉱物や岩石片が水中などで沈積する際の磁性を帯びた粒子の配列方向として、種々の岩石に記録される。ここでは、地球上のある地点における地磁気の強さを全磁力（ \vec{H} ）とよび、このような岩石に記録されている磁気を残留磁気とよぶ。過去の地球において磁場が現在の磁場の極性と同一であった場合、その時代を正磁極期とよび、現在の磁場の極性と逆向きであった場合を逆磁極期とよぶ。地球表面における全磁力の水平分力（ \vec{H}_0 ）の地理的な真北からのずれの角度を偏角（ δ ）とよび、ある地点の岩石に記録されている偏角を計測することで過去の地球の磁場の極性を知ることができる。また、 \vec{H} と水平面のなす角（ θ ）を伏角とよび、赤道から高緯度地域に移動するにつれ、その角度が大きくなる。

このような岩石に記録されている磁気を用いて過去の地球の地磁気を研究する分野を古地磁気学とよぶ。一方、現在の磁場を観測すると、残留磁気の影響により、本来観測されるべき磁場とは異なる磁場が観測されることがあり、このような現象を磁気異常とよぶ。地下からのマグマの噴出とその固結により新しい地殻が形成されている大洋中央海嶺^{注2}においてマグマが冷却されると、鉄に富む鉱物とその時点での地磁気の方向を獲得する。海洋調査船上から大洋中央海嶺付近の海洋地殻表面の地磁気を測定すると、正磁極期に形成された海洋地殻上では磁場が強化され、逆磁極期に形成された海洋地殻上では磁場が打ち消されるような効果がある。海嶺の伸長方向に対し鉛直な方向に沿って地磁気を測定すると、海嶺から離れるにつれて、磁場が強化されている範囲と打ち消されている範囲が繰り返し出現することが観測された。さらに、磁場の強弱のパターンは、大洋中央海嶺を挟んで対称に配列していることも観測された。後に、この強弱のパターンに対応する地点から海洋地殻を構成する岩石の採取が行われ、その放射年代と残留磁気の計測が行われたことにより、海洋地殻は大洋中央海嶺で生産され、大洋中央海嶺から遠ざかるように移動することによって大陸地殻を移動させていることが立証された。

注1 その温度以上では強磁性体の強磁性が失われ、常磁性体となる温度。

注2 大洋の中央部にあり周囲の深海底より高い山脈状の地形。活発なマグマの噴出とその固結により、海洋地殻が新たに生産される。

問1 下線部 a に関して、次の文章の **ア** から **ケ** に入る最も適切な語句、数値、または数式を記せ。ただし、**カ** については子午面または赤道面のいずれかの語句を、**キ**、**ク** については、東、西、南、北のいずれかの語句を記し、**ケ** については有効数字3桁で記せ。

真空中で十分に長い直線状の導線に電流を流すと、電流の周囲に磁場が発生する。電流 I_P が流れる導線から距離 r_P の点における磁場の強さ H_P は、 $H_P =$ **ア** で示される。ここで、真空中で十分に長い直線状の導線 α 、 β 、 γ が図1のように互いに平行に配列している場合を考える。それぞれの導線に、 I_A 、 I_B 、 I_C の電流が図1中で示す向きに流れている。ただし、 $I_A > I_B > I_C$ とする。このとき、原点に生じる磁場の向きは、原点から **イ** 象限方向となる。また、 x 方向の磁場の強さ (H_x) と y 方向の磁場の強さ (H_y) を I_A 、 I_B 、 I_C 、および a を用いて表すと、 H_x と H_y は、それぞれ $H_x =$ **ウ**、 $H_y =$ **エ** となる。

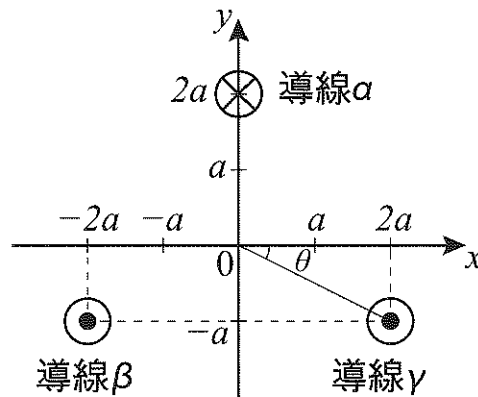


図1 直線電流の流れ。ただし、 \otimes は紙面手前側から裏側に向かう方向を、 \odot は紙面裏側から手前側に向かう方向を示す。

このような直線電流だけでなく、円形電流も磁場をつくる。地球の磁場は、外核に存在する溶融した鉄が環状に流動することにより、それが円形電流となり磁場が生じていると考えることができる。真空中で半径 r_q の円形の導線に電流 I_q を流したときの円の中心における磁場の強さ H_q は、 $H_q =$ **オ** で示される。ここで、地球が完全な球体で、地球内部および外部は真空であり、地球内部に円形の導線が存在すると仮定し、地球の中心からの円形導線の半径を r_c 、地球の半径を r_E 、円形導線に流れる電流を I_E とする (図2)。経度 0° 緯度 0° の地表面に接するように地球の直径に対して十分に長い直線導線を配置した場合、地球の中心に生ずる磁場を打ち消すためには、直線導線を **カ** 方向に配置し、**キ** から **ク** に電流を流す必要がある。地球の中心部での磁場の強さを $5.00 \times 10^2 \text{ A/m}$ 、外核に発生する円形電流の半径を $3.00 \times 10^6 \text{ m}$ 、地球の半径を $6.00 \times 10^6 \text{ m}$ 、 $\pi = 3.14$ としたとき、地球の磁場を打ち消すためにこの直線電流に流すべき電流は **ケ** A となる。

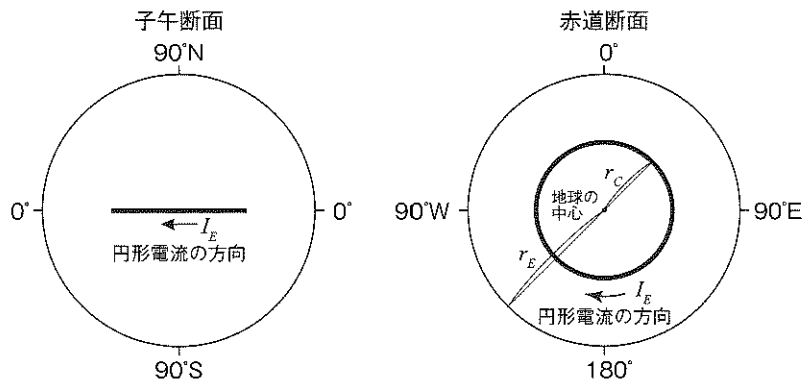


図2 地球内部を円形電流が流れると仮定し、その様子を示した模式図。

問2 地球表面のある地点において、現在の磁束密度を測定したところ、その水平成分は20784 nT (ナノテスラ)、鉛直成分は12000 nTであった。この地点における伏角の角度を求めよ。

問3 以下の図3は、現在の地球上の北半球で観測される地磁気の磁束密度の分布を示している。日本列島からみると、磁北極は北北東方向にあるが、東京都における現在の偏角はおよそ7°Wである。偏角が西向きとなる理由について図3からわかることを説明せよ。

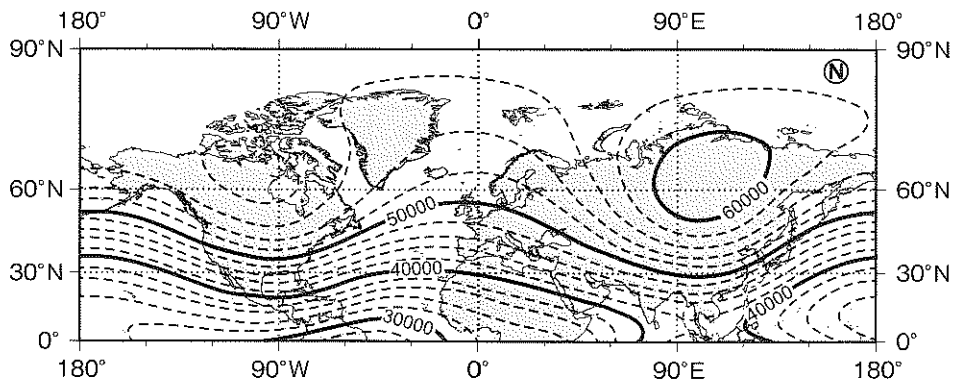


図3 現在の北半球で観測される磁束密度の分布。単位はnT (ナノテスラ)。Ⓝは磁北極の位置を示す。図は、Alken et al., 2021, *Earth, Planets and Space*, v. 73:49を改変。

問4 以下の図4は、現在の地球上で観測される地磁気の伏角の分布を示している。解答用紙の図中の磁南極の位置にⓄ印を記入せよ。

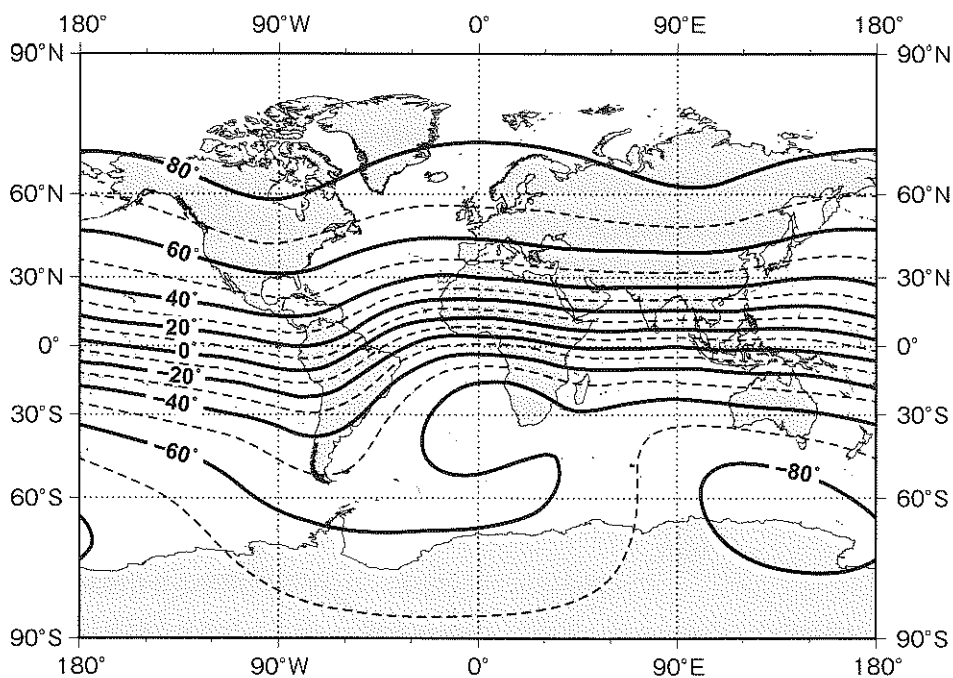


図4 現在の地球上で観測される伏角の分布。図は Alken et al., 2021, *Earth, Planets and Space*, v.73:49を改変。

問5 下線部bに関して、次の文章を読み、地質時代のカラブリアン^{注3}/チバニアン^{注4}境界付近では、地球の磁場にどのような変化があったか述べよ。

注3 180～77.4万年前まで期間を示す地質年代名

注4 77.4～12.9万年前までの期間を示す地質年代名

注5 258～1.17万年前までの期間を示す地質年代名

注6 258万年前～現在までの期間を示す地質年代名

チバニアンの下限付近では、地球の磁場に大きな変化があったことが知られている。実際に千葉県の北緯約35.3°東経約140.1°に露出する地層において調査したところ、伏角に図5のような変化があった。

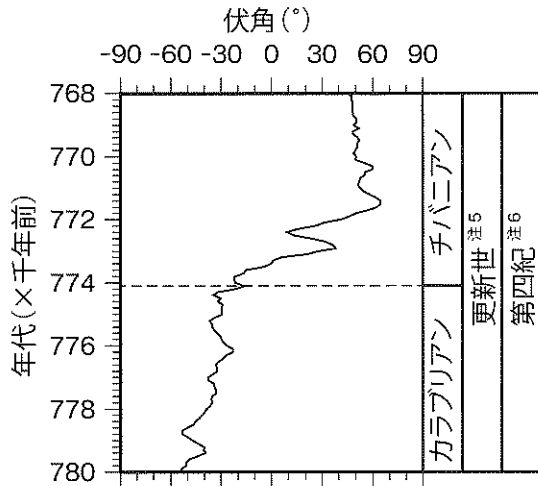


図5 カラブリアン/チバニアン境界付近の年代の地層に記録された磁気の変化。データは Haneda et al., 2020, *Progress in Earth and Planetary Science*, v.7:44. から引用。

問6 下線部cに関して、次の文章を読み、北アメリカ大陸とヨーロッパ大陸との関係にどのような時代変遷があったかを述べよ。

北アメリカの岩石とヨーロッパの岩石を用いて、残留磁気を測定したところ、それぞれの大陸の岩石が示す各時代における磁北極の位置が図6に示す地点であることがわかった。

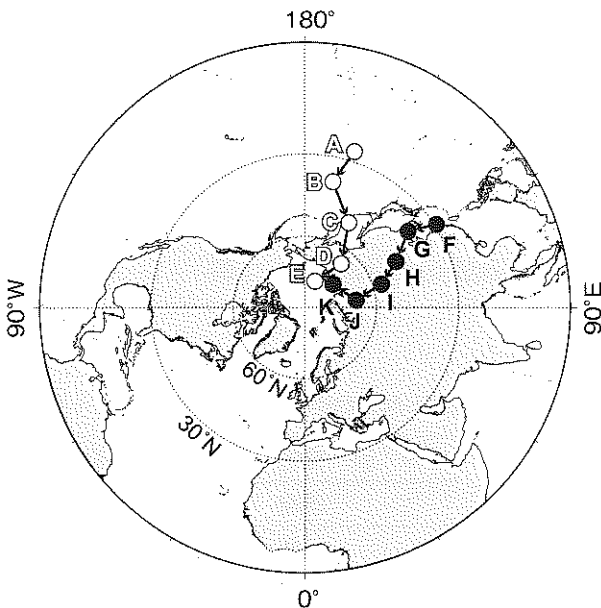


図6 北アメリカ大陸およびヨーロッパ大陸の岩石に記録された磁気から示された、各大陸の岩石が示す磁北極の位置の時系列変動。黒丸および白抜丸は、それぞれ、北アメリカ大陸から得られたデータおよびヨーロッパ大陸から得られたデータを示す。アルファベットは以下の年代を示す、A：約4.4～3.2億年前、B：約3.2～3.0億年前、C：約3.0～2.5億年前、D：約2.5～2.0億年前、E：約1.5～0.7億年前、F：約4.4～3.6億年前、G：約3.2～3.0億年前、H：約3.0～2.5億年前、I：約2.5～2.4億年前、J：約2.4～2.0億年前、K：約2.0～1.5億年前。図は McElhinny, 1973, *Palaeomagnetism and plate tectonics*, Cambridge University Press を改変。

問7 下線部 **d** に関して、**図7** に、実際に測定された大洋中央海嶺からの距離とその放射年代との関係を示す。海洋底の拡大速度の変化に関して、この図から読み取れることを述べよ。

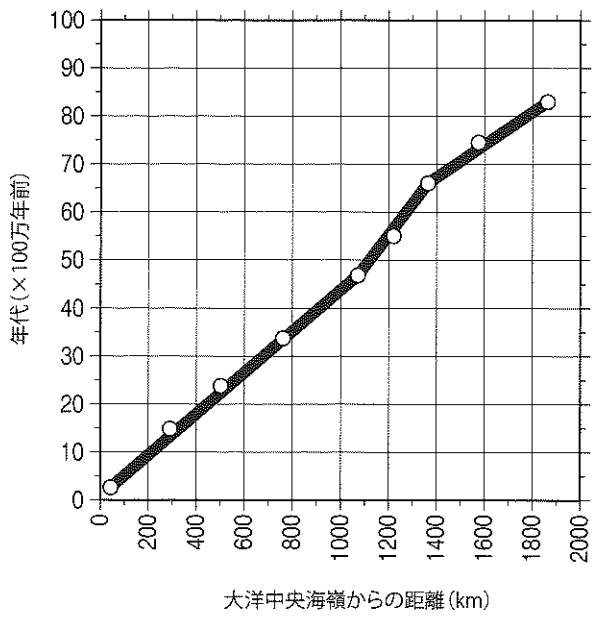


図7 大洋中央海嶺からの距離（横軸）と年代（縦軸）の関係。折れ線は平均的傾向を示す。データは Cande and Kent, 1992, *Journal of Geophysical Research*, v.97, p.13917-13951 から引用。

II

固体地球の温度と圧力に関する次の文章を読んで、問1～問7に答えよ。

地殻は固体地球の表層部を構成する(図1)。地殻の厚さは、地球上の場所により異なる。しかし最も厚い場合でも、地表から地殻最深部までの距離は約60kmである。地殻は岩石から構成され、岩石には、様々な元素が含まれている。岩石は結晶の集合体であり、岩石の状態は温度・圧力により固体と液体の間で変化する。地殻内の温度は、太陽放射エネルギーの影響を受けない地下数10m以深になると、深さとともに高くなっていく。地殻における圧力は、岩石が存在することにより発生している。地殻が主に岩石から構成されることと、岩石は静止しているとみなせることから、この圧力を静岩圧とよぶ。水圧の導出法を参考にすると、静岩圧を数式で表すことができる。地表からみて深度 h mの距離に底面のある岩石柱(図2)が、岩石柱の底面に対して与える圧力 P Paは、岩石柱の底面積を S m²、岩石柱の総重量を m kg、重力加速度を g m/s²とした場合、**ア**Paと表すことができる。岩石の密度が ρ kg/m³である場合、**ア**は ρ を使用して**イ**と書き換えることができる。地殻は密度の異なる複数の種類の岩石から構成され、地殻全体として層状構造をもつ(表1)。各々の岩石の存在深度が分かると、 $P =$ **イ**の式をもとに、地殻内の深度ごとの静岩圧を算出することができる。

温度や圧力の変化に応じた地殻の岩石の状態変化の例として、溶融がある。溶融により発生した液体が集まり、岩石から分離するとマグマになる。マグマには、上述の静岩圧がかかっている。マグマの温度や、マグマにかかる圧力の変化は、マグマの状態も変化させる。その変化の一つに、マグマの発泡がある。発泡とはマグマ中に気体が出現する現象であり、揮発性成分の溶解度の変化が要因となっている。発泡を考える上で最も重要な成分は、マグマに溶解している量の多いH₂Oである。マグマに占める気体の体積比が大きいまま、マグマが地表に噴出し、冷却され固結すると、軽石という空隙の体積比の高い岩石を発生させる。気体を含むマグマが地表に噴出せず地下にとどまった場合、マグマが冷却し固結するまでに十分な時間があり、気体はマグマから抜け出る。そのため地下にとどまったマグマから生成した岩石には、空隙の多いものはない。

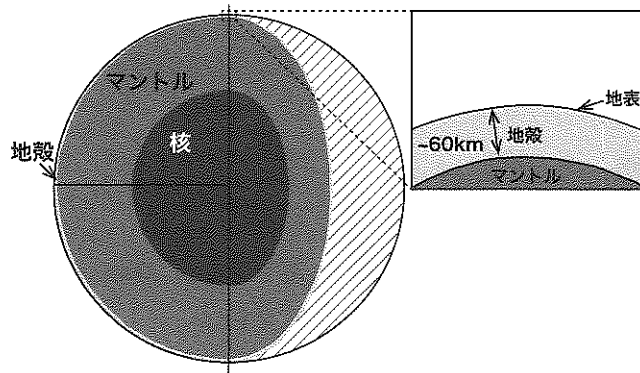


図1 固体地球の層状構造。

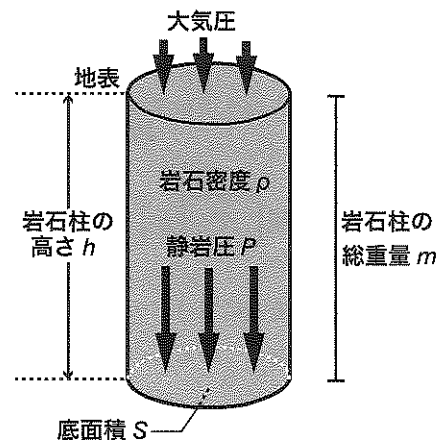


図2 静岩圧発生の様式図。

表1 地殻を構成する岩石の密度の例。

分布深度	岩石名	密度 (kg/m ³)
浅部	A	2600
中間部	B	2750
深部	C	2900

問1 下線部 a と関連し、地殻を構成する元素の質量%の大小関係を図3に示す。また図3のAからEの元素の説明を以下に示す。AからEに該当する最も適切な元素名を元素記号で示せ。

元素A：この元素には同素体が存在し、複数の同素体が地球の気圏も構成している。

元素B：価電子4個を持つ典型元素である。単体は灰白色～灰黒色で金属に似た光沢を持っており、半導体として集積回路（IC）や太陽電池に利用される。

元素C：典型元素で金属元素でもある。工業的製造にあたり、まずは地殻から採取したボーキサイトから、この元素の純粋な酸化物を作成する。さらに、この酸化物を融解塩電解する。

元素D：遷移元素である。工業的製造にあたり、この元素を含有する酸化物にコークスと石灰石を加えた上で、加熱し還元する。

元素E：アルカリ土類金属元素である。この元素を含む塩類の水溶液は、橙赤の炎色反応を示す。

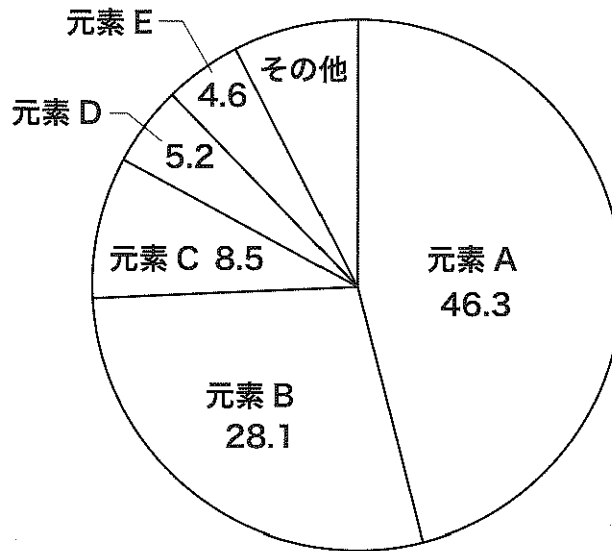


図3 地殻（大陸部）を構成する元素の比率（質量%）。

問2 文中の空欄 **ア** と **イ** に入る数式を、文中の記号を使用して記せ。

問3 静岩圧が地表における大気圧の値と同じになるような深度（m）を有効数字2桁で求めよ。静岩圧は表1の岩石Aにより発生しているものとする。大気圧を $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ とする。また重力加速度を 9.8 m/s^2 とする。

問4 表1に示すように、地殻の最浅部に岩石Aからなる層が、それよりも深い地殻の中間部に岩石Bからなる層が存在する。岩石Bからなる層内の地点Xは地表からみて深度37 kmにあり、地点Xの静岩圧は $9.8 \times 10^8 \text{ Pa}$ である。この時、地表から地点Xまでを占めている、岩石Aからなる層と岩石Bからなる層の各々の厚み（km）を有効数字2桁で求めよ。重力加速度を 9.8 m/s^2 とする。

問5 下線部 b と関連し、完全な固体であった岩石が溶融し始めるために、温度や圧力はどのように変化すれば良いか。温度一定と圧力一定のそれぞれの場合について答えよ。ただし溶融の開始する温度は、圧力の上昇とともに高くなるものとする。

問6 下線部cと関連し、マグマの発泡を図4に描いた。以下の(i)と(ii)の問いに答えよ。

- (i) 発泡により元のマグマの質量の2.00%が、マグマ中に存在するH₂Oの気体になったものとする。マグマ1.00Lから発生する気体の体積(L)を有効数字3桁で求めよ。気体発生時の圧力を 1.00×10^8 Pa、温度は807℃とする。気体発生前のマグマの密度を 2.20×10^3 g/Lとし、気体発生後の密度変化はないものとする。またマグマからの気体の離脱はないものとする。ここでは気体定数Rを 8.31×10^3 Pa·L/(K·mol)、H₂Oを理想気体として扱って良いものとし、H₂Oの分子量を18.0とする。
- (ii) (i)の状況で、気体を含むマグマ全体における気体部分の体積比(%)を有効数字3桁で求めよ。

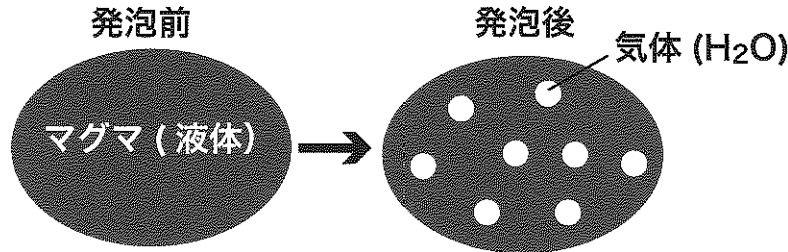


図4 マグマ発泡の模式図。

問7 問6と関連し、マグマに含まれる実在気体の理想気体からのずれの程度の温度や圧力による変化を考えたい。次の文章の空欄アからカにあてはまる最も適切な語句を答えよ。

理想気体とは、分子自身のアが0で、イ力がないと仮定された気体である。実在気体においては、気体全体に占める分子自身のアの比率は、温度一定の場合、圧力の増加と共にウなる。一方、イ力の影響は、圧力一定の場合、温度がエいほど無視できるが、それは分子のオが激しくなるからである。またイ力は、分子量が大きいほど、あるいはカが大きいほど強くなる。一般に、常温常圧下の気体は理想気体とみなすことができる。マグマ中の気体は、それよりも高温高圧下にある。

[以下余白]

受験番号	万	千	百	十	一
氏名					

(注意) 所定の欄以外に番号・氏名を書いてはならない。

	a	b	c	d	e	f	g
採点欄							

受験番号	万	千	百	十	一
氏名					

(注意) 所定の欄以外に番号・氏名を書いてはならない。

注 意

1. 受験番号(算用数字)・氏名は指示に従ってただちに所定欄に記入し、それ以外に記入してはならない。
2. 解答はすべて下の解答欄に記入すること。欄外の余白には何も記入しないこと。欄外に何かを記入した解答用紙は無効となる場合がある。
3. 解答はHBの黒鉛筆またはHBのシャープペンシルで書くこと。
4. 試験終了時にこの解答用紙を裏返して机の上に置き、指示を待つこと。
5. 計算器は一切使用してはならない。

理 科 (地) (解 答 用 紙)

I

問1	ア	イ	ウ	エ	オ
----	---	---	---	---	---

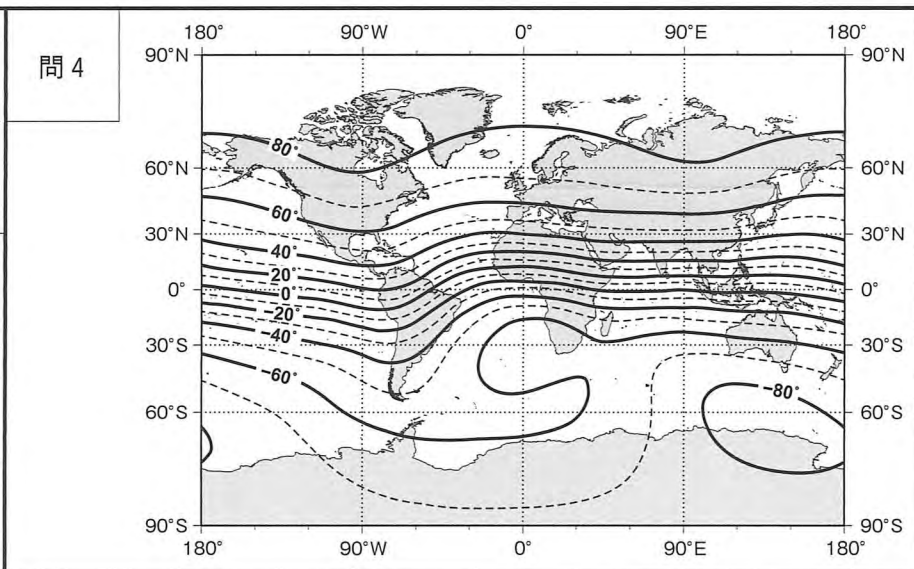
a

問1	カ	キ	ク	ケ	A
----	---	---	---	---	---

b

問2	
----	--

問3	
問5	



c

問6	
問7	

d

II

問1	元素A	元素B	元素C	元素D	元素E
----	-----	-----	-----	-----	-----

e

問2	ア	イ	問3	m
----	---	---	----	---

問4	岩石A km	岩石B km
----	-----------	-----------

問5	
----	--

問6	(i) L	(ii) %
----	----------	-----------

f

問7	ア	イ	ウ	エ
----	---	---	---	---

問7	オ	カ
----	---	---

g