

2015 年度 名古屋大学 前期 地学

問題 I 地球史

出題範囲	地球史/氷河地形
難易度	★★☆☆☆
所要時間	18 分
傾向と対策	地球史に対する正確な理解が試される問題である。問 1、問 3 は基礎的だが曖昧にされていることが多い。必ず正確に答えることができるようにしておこう。問 2 は相対年代と絶対年代についての説明問題であるが、それぞれ 100 字以内という比較的量の多い記述が求められている。記述の演習をきちんと積んでおこう。

解答

問 1 (a)オルドビス (b)デボン (c)石炭 (d)ジュラ (e)白亜 (f)シダ (g)裸子

問 2 相対年代：地層に残された示準化石や、地層の岩石に残された古地磁気の記録をほかの地層のものと比較すること、または地層の層序に注目することで、相対的に地層の新旧関係を推定する。(81 字)

絶対年代：ある放射性元素について、一定時間に放射性崩壊を起こす原子の割合は一定のため、岩石の形成時の含有量と現在残っている量(または生成した娘元素の量)の比を調べることで形成から経過した年代を推定する。(96 字)

問 3 (ア)アンモナイト (イ)恐竜 (ウ)隕石の衝突 (エ)太陽放射 (オ)植物

問 4 カール, モレーン

解説

問 1 難易度：★★☆☆☆

(a)~(e)はそれぞれ紀の名前を答える基本問題である。問われていない紀もすべて答えられるようにしておくこと。(f),(g)はその時代にどのような植物が最も繁栄していたかをわかっていれば解答できる。なお、繁栄していた時期と誕生した時期は一致していないので、注意すること。

(a)オルドビス

オルドビス紀の地層からは孢子化石が見つかっており、すでにコケ植物などが陸上に進出していたとされる。またオルドビス紀末には最初の大きな絶滅があったとされる。

(b)デボン (f)シダ

デボン紀には初期の両生類が登場し、陸上ではシダ植物が大型化をして繁栄していた。2 回目の大きな絶滅がデボン紀の末にはあったとされる。

(c)石炭

デボン紀から石炭紀にかけてシダ植物を主とする大型の陸上森林が発達し、その新しい生息域ではメガネウラなどの大きな昆虫類なども繁栄していた。活発な光合成により大気中の二酸化炭素は大量に分解され、その炭素を含有する植物が埋没して分解されず炭化し、いまでも石炭として地中に残っている。またこの炭素固定により大気中の二酸化炭素が減少したために寒冷化が進み、石炭紀末には氷河時代に突入した。

(d)ジュラ (e)白亜

中生代は比較的温暖な気候であり、陸上では恐竜を代表とするは虫類が大繁栄していた。ジュラ紀には現在の鳥類の祖先に近い種の始祖鳥が出現した。また同じくジュラ紀には被子植物も出現しており、これは白亜紀に発展してから現在に至るまで繁栄している。白亜紀末には 5 回目の大きな絶滅があったとされる。

(g)裸子

ソテツやイチョウに代表される裸子植物は中生代付近において大繁栄した。現在でもイチョウは中国や日本をはじめとして世界中にみられる樹木であり、生きた化石の 1 つである。

時代区分			年代(年前)	主な出来事
顕生代	新生代	第四紀		類人猿の出現
		新第三期	260万	
		古第三紀	2300万	
	中生代	白亜紀	6600万	哺乳類の発展
		ジュラ紀	1億4500	恐竜・アンモナイトなどの絶滅 被子植物の出現
		三疊紀 (トリアス期)	2億100万	恐竜・アンモナイトなどの繁栄
	古生代	ペルム紀 (二疊紀)	2億5200	三葉虫・フズリナなどの絶滅 両生類の繁栄
		石炭紀	2億9900万	
		デボン紀	3億5900万	は虫類の出現 シダ植物の繁栄
		シルル紀	4億1900万	植物が陸上に進出
		オルドビス期	4億4300万	
		カンブリア紀	4億8500	
			5億4100万	カンブリア紀の爆発
元カンブリア時代	原生代		多細胞生物の誕生 酸素の増加 生命の誕生	
	太古代 (始生代)	25億		
	冥王代	40億		
		46億		地球の誕生

左の表をよく覚えておくこと。

なお、解答はしなくてよいが(h)~(j)はそれぞれ

(h)魚 (i)両生 (j)は虫
である。

以上より解答をまとめると、

(a)オルドビス (b)デボン (c)石炭 (d)ジュラ (e)白亜
(f)シダ (g)裸子
となる。

問2 難易度：★★★★☆

相対年代は、地層累重の法則を利用して地層の層序から形成年代の関係を推定したものや、遠い地層と示準化石や古地磁気の記録から新旧関係を推定したものなど、地層どうしを比較することで新旧関係を考えた相対的な年代である。後者の相対年代決定に用いられる示準化石は、生存期間が限定されているほうが、地層が形成された時代が限定されるため、都合がよい。よって、以下の3つの特徴をもっている化石であるとよい。

- ①進化速度が速いこと。
- ②短期間に広い範囲に分布していたこと。
- ③個体数が多いこと。

以上の条件を満たしている示準化石として、アンモナイトや三葉虫などがある。

また相対年代は示準化石の代わりに古地磁気を用いることもある。地球の磁場は数万年～数十万年ごとに向きが入れ替わる。岩石中に含まれている鉱物はこの磁場の方向を保存する性質があるため、この残留磁気から年代を推定することができる。

絶対年代は放射性同位体の半減期を用いて推定される。半減期とは、放射性同位体が崩壊して安定な原子になるときに放射性同位体の量が半減するまでにかかる時間のことであり、この値は温度や圧力には影響されない。岩石の形成時に取り込まれた放射性同位体原子の数を N_0 、 t 年後の数を N 、半減期を T とすると以下の式が成り立つ。

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

したがって、 N_0 、 N 、 T がわかれば t を推定することができる。

N_0 は初期値ともいい、その値を推定する必要がある。例えば ^{14}C を用いた絶対年代測定法では、過去における大気中の ^{14}C の濃度は一定であったという仮定のもと N_0 を推定していたこともある。現在では福井県にある水月湖の年縞や、年輪から補正されて推定されている。水月湖では7年以上にわたり連続的に積み重なった縞模様が見られるため、年縞とその年縞に含まれる化石中の ^{14}C を比較することで ^{14}C 法の誤差の補正を行っている。

また、初期値を用いずに形成年代を推定することもできる。形成時期と初期値が同じ1つの岩石中で、親元素の含有量の違う2鉱物中のそれぞれの現在の量比がわかれば、含有量に対する量比の変化率で年代を決定することができる。この方法をアイソクロン法という。

このほかにも、放射性同位体量を調べないフィッシュントラック法(FT法)というものもある。これは ^{238}U などの放射性同位体が自発核分裂をする際に残す痕跡から放射年代を推定するものである。

なお、本問では放射性同位体を用いて測定した年代のことを絶対年代と呼称しているが、放射年代という語のほうがより適切である。

解答例

相対年代：地層に残された示準化石や、地層の岩石に残された古地磁気の記録をほかの地層のものと比較すること、または地層の層序に注目することで、相対的に地層の新旧関係を推定する。(81字)

絶対年代：ある放射性元素について、一定時間に放射性崩壊を起こす原子の割合は一定のため、岩石の形成時の含有量と現在残っている量(または生成した娘元素の量)の比を調べることで形成から経過した年代を推定する。(96字)

問 3 難易度：★★★★☆

(ア)アンモナイト

中生代に海に住んでいた古生物として代表的なものはアンモナイトである。別解として、海生は虫類なども考えられる。

(イ)恐竜

中生代に陸上に生息していた大型生物として代表的なものは恐竜である。

(ウ)隕石の衝突

中生代の大量絶滅の原因として有力視されているのは巨大な隕石の衝突である。隕石衝突の証拠として、世界中の白亜紀―古第三紀の境界層の多くから地球表層にはあまり存在しないイリジウムが検出されたことなどがある。

(エ)太陽放射 (オ)植物

隕石衝突によって生じたちりが太陽放射の入射を遮ると、太陽放射を用いて光合成をし、エネルギーを生成している植物や植物プランクトンの多くが生存できず絶滅した。植物や植物プランクトンは食物連鎖の土台を成しているため、この絶滅により生態系のバランスが崩れ、植物以外の生物も多くが絶滅した。

以上より解答をまとめると、

(ア)アンモナイト (イ)恐竜 (ウ)隕石の衝突 (エ)太陽放射 (オ)植物

となる。

問 4 難易度：★★★★☆

カール、モレーンなどの氷河地形や氷成堆積物などを例に挙げればよい。

カールとは代表的な氷河地形であり、山頂付近に形成される氷河の侵食作用によってできたえぐれた谷である。氷河地形にはカール以外にも、侵食作用によって形成される、底の幅が広い谷である U 字谷などもある。この U 字谷が沈水するとフィヨルド地形となる。代表的なフィヨルド地形はノルウェーなどで見ることができる。

モレーンは氷河の堆積作用によって形成された氷成堆積物がつくった土手のような地形であり、不ぞろいな大きさの角張った岩片が多いことが特徴である。氷成堆積物は氷河に巻き込まれた岩片などの^{さいせつぶつ}砕屑物が、氷河の衰退によってその場にとどめられることなく堆積したものである。淘汰がされていないため大きさは不ぞろいであり、通常の堆積物と区別することができる。

また、氷河に巻き込まれた岩片などの砕屑物が氷河の移動に伴って移動する際に岩盤に線状の傷を残す。この擦り傷のことを擦痕といい、これもまた過去の氷河の存在を示唆する重要な証拠である。

解答例

カール、モレーン

(坂井郁哉, 奥井晴香, 仁木創太, 辻有恒)

2015 年度 名古屋大学 前期 地学

問題 II アイソスタシー

出題範囲	アイソスタシー
難易度	★★★☆☆
所要時間	24 分
傾向と対策	雪による影響をさまざまな観点から考えた問題である。いずれも典型的な問題であり、基本的な知識のみで解けるものの、いずれも計算が少々複雑であるため、丁寧に問題を解くことが必要である。問 3 のアイソスタシーについての出題は典型的な出題である。確実に解けるようにしておこう。

解答

- 問 1 (1) ・雪氷や雲が太陽光を一部反射するから。
 ・大気が太陽光エネルギーを一部吸収するから。
- (2) 1 時間あたりに雪氷の融解に使われる太陽光のエネルギーは

$$1.4 \times 10^3 \times \frac{10}{100} \times 3600 = 5.04 \times 10^5 \text{ J/m}^2$$

0°C の雪氷 1kg の融解に必要なエネルギーが $3.0 \times 10^5 \text{ J}$ なので、単位面積あたりに融解する雪氷は

$$\frac{5.04 \times 10^5}{3.0 \times 10^5} = 1.68 \text{ kg/m}^2$$

したがって、1 時間あたりに減少する雪氷の厚さは

$$\frac{1.68}{1000} = 1.68 \times 10^{-3} \text{ m} \approx 1.7 \text{ mm}$$

問 2 地球上に存在する雪氷の体積は

$$4.34 \times 10^7 \text{ km}^3 = 4.34 \times 10^{16} \text{ m}^3$$

海洋の表面積は

$$4 \times 3.14 \times (6.4 \times 10^6)^2 \times \frac{70}{100} \approx 3.60 \times 10^{14} \text{ m}^2$$

問題文より海水の密度も雪氷(固体)の密度も同じなので、雪氷が融解したときに体積は変化しない。

したがって、海面の上昇量は

$$\frac{4.34 \times 10^{16}}{3.60 \times 10^{14}} = 1.20 \dots \times 10^2 \approx 1.2 \times 10^2 \text{ m}$$

問 3 融解前にアイソスタシーが成り立っているので、均衡面の単位面積上にある質量はどこでも等しい。

大陸地殻の底を含む面を均衡面とすると、均衡面の単位面積上にある質量は、

$$(3 \times 10^3 \times 1000 + 30 \times 10^3 \times 2800) \text{ kg}$$

均衡面を固定して考えて、すべての雪氷が融解すると海面が 120m 上昇するので、均衡面の単位面積上にある質量は $(120 \times 1000)\text{kg}$ だけ増える。

したがって、融解したあとの南極大陸でのアイソスタシーの成立から導かれる式は、大陸地殻の下に入り込んだマンツルの厚さを $x[\text{km}]$ とすると、

$$30 \times 10^3 \times 2800 + x \times 10^3 \times 3300 = 120 \times 1000 + 3 \times 10^3 \times 1000 + 30 \times 10^3 \times 2800$$

$$x = \frac{3120}{3300} \approx 945.4 \times 10^{-3}$$

南極大陸の地表面は 945.4m 隆起したが、海面もまた 120m 上昇しているので、標高の上昇量は、

$$945.4 - 120 = 825.4 \approx 8.3 \times 10^2 \text{m}$$

解説

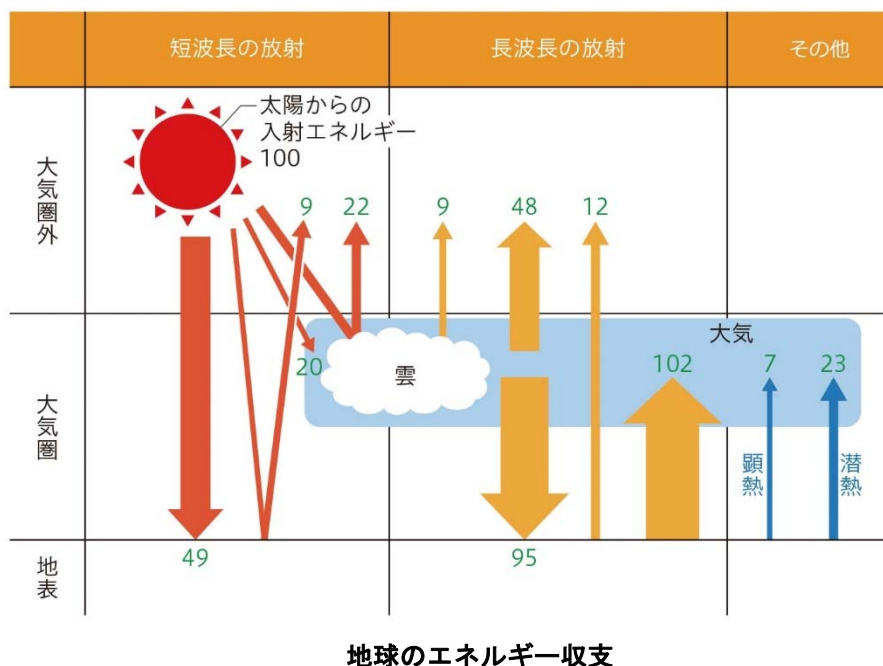
問 1

(1) 難易度：★★★★☆

太陽定数とは、地球大気表面の単位面積に単位時間に垂直に入射するエネルギーの量のことである。大気表面までたどり着いた太陽光のエネルギーはそのまますべてが地表に吸収されるわけではなく、そのおよそ半分は大気や雲に吸収・反射・散乱、また地表に反射される。特に雪氷などの白い地表では反射の割合が大きいので、吸収される太陽光エネルギーはさらに小さくなる。

そのうえ、太陽定数は垂直に入射するエネルギーのことを考えているので、仮に散乱や反射がなかったとしても太陽光が垂直に入射する地点、つまり太陽の南中高度が 90 度である地点でない限りは、地表に入射する太陽光のエネルギーは太陽定数よりも小さくなる。

以下の図のように、入射した太陽光エネルギーの行方は地球のエネルギー収支とあわせて覚えておくこと。



解答例

- ・雪氷や雲が太陽光を一部反射するから。
- ・大気が太陽光エネルギーを一部吸収するから。

(2) 難易度：★★★★☆

1 時間あたりに雪氷の融解に使われる太陽光のエネルギーは、太陽定数のちょうど 10% のエネルギーが使われているため、

$$1.4 \times 10^3 \times \frac{10}{100} \times 3600 = 5.04 \times 10^5 \text{ J/m}^2$$

0°C の雪氷 1kg の融解に必要なエネルギーが $3.0 \times 10^5 \text{ J}$ なので、太陽光を受け取る雪氷の面積を $S[\text{m}^2]$ とすると、融解する雪氷の質量は

$$\frac{5.04 \times 10^5 \times S}{3.0 \times 10^5} = (1.68 \times S) \text{ kg}$$

さて、雪氷の密度は 1000 kg/m^3 なので、融解した雪氷の体積は

$$\frac{1.68 \times S}{1000} = (1.68 \times 10^{-3} \times S) \text{ m}^3$$

雪氷の面積を $S[\text{m}^2]$ としているので、融解して減少する雪氷の厚さは

$$\frac{1.68 \times 10^{-3} \times S}{S} = 1.68 \times 10^{-3} \text{ m} \approx \mathbf{1.7 \text{ mm}}$$

問 2 難易度：★★★★☆

表 1 より、地球上に存在する雪氷の体積は

$$4.34 \times 10^7 \text{ km}^3 = 4.34 \times 10^{16} \text{ m}^3$$

である。

地球は半径 6400 km の球形で、全表面積に占める海洋の比率は海面上昇によらず 70% とするので、海洋の表面積は

$$4 \times 3.14 \times (6.4 \times 10^6)^2 \times \frac{70}{100} \approx 3.60 \times 10^{14} \text{ m}^2$$

問題文より海水の密度も雪氷(固体)の密度も同じであるので、雪氷が融解したときに体積は変化しない。

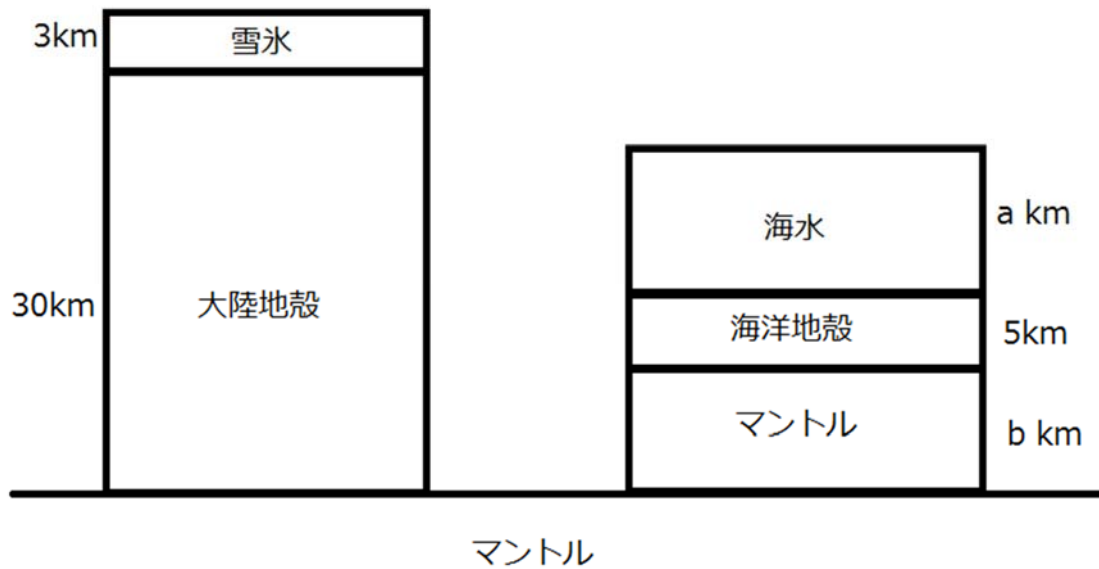
したがって、雪氷がすべて融解すると同じ体積の水が海洋に流入することになるので、海面の上昇量は

$$\frac{4.34 \times 10^{16}}{3.60 \times 10^{14}} = 1.20 \dots \times 10^2 \approx \mathbf{1.2 \times 10^2 \text{ m}}$$

問 3 難易度：★★★★☆

融解前の状態でアイソスタシーが成立しているので、大陸地殻の底を均衡面とし、海水の厚さを $a[\text{km}]$ 、マンツルの厚さを $b[\text{km}]$ とすると以下の関係式が成り立っている。

$$3 \times 10^3 \times 1000 + 30 \times 10^3 \times 2800 = a \times 10^3 \times 1000 + 5 \times 10^3 \times 3000 + b \times 10^3 \times 3300$$

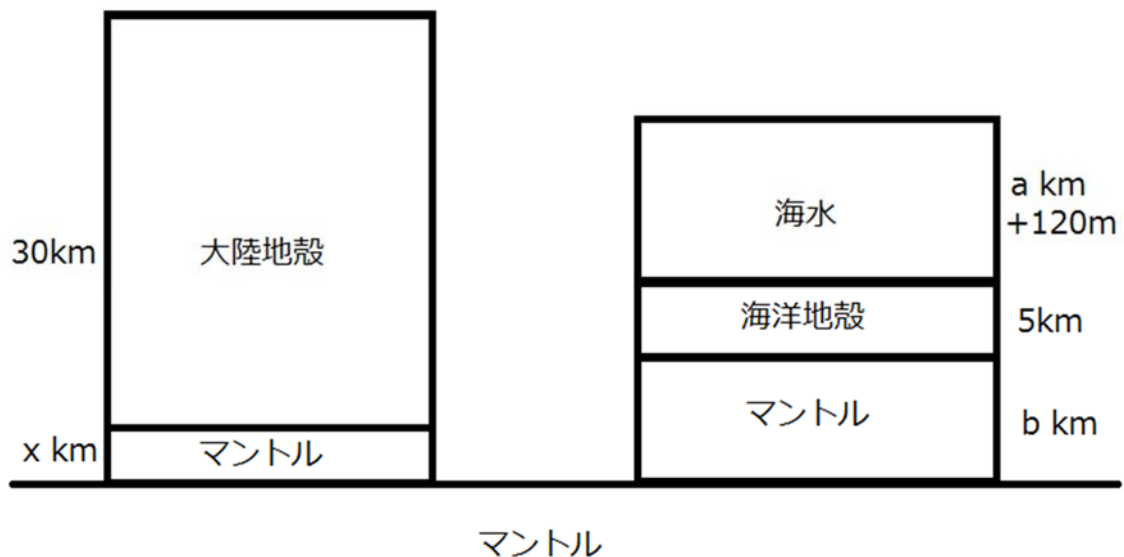


融解前のアイソスタシー

次に融解後について考える。海洋地殻から b [km]の面を均衡面として固定する。

大陸地殻の下に入り込んでいるマントルの厚さを x [km]とすると、融解前と同様にアイソスタシーが成立しているため、以下の関係式が成り立っている。

$$30 \times 10^3 \times 2800 + x \times 10^3 \times 3300 = (a \times 10^3 + 120) \times 1000 + 5 \times 10^3 \times 3000 + b \times 10^3 \times 3300$$



融解後のアイソスタシー

融解後のアイソスタシーの式の右辺に、融解前のアイソスタシーの式を代入すると a, b が消えて以下のような式になる。

$$30 \times 10^3 \times 2800 + x \times 10^3 \times 3300 = 120 \times 1000 + 3 \times 10^3 \times 1000 + 30 \times 10^3 \times 2800$$

これを整理すると

$$x \times 10^3 \times 3300 = 120 \times 1000 + 3 \times 10^3 \times 1000$$

$$x = \frac{3120}{3300} \doteq 945.4 \times 10^{-3}$$

したがって、南極大陸の地表面は 945.4m 隆起した。

雪氷の融解によって海面もまた 120m 上昇しているので、標高の上昇量は

$$945.4 - 120 = 825.4 \doteq \mathbf{8.3 \times 10^2 m}$$

(坂井郁哉, 奥井晴香, 仁木創太, 辻有恒)

2015 年度 名古屋大学 前期 地学

問題Ⅲ 宇宙

出題範囲	恒星の進化/スペクトル型・HR 図/星間雲
難易度	★★★☆☆
所要時間	18 分
傾向と対策	この問題のテーマは恒星の進化である。恒星の質量の違いで恒星の進化がどのように変わるかを理解するのは、恒星の進化を勉強するうえで重要である。この問題で問われているような、恒星の進化と HR 図上での動きの対応を把握しておくことも重要である。

解答

問 1 (ア)星間物質 (イ)分子雲 (ウ)主系列星 (エ)赤色巨星 (オ)超新星爆発

問 2 A : 1 B : 15 C : 1 D : -1

問 3 移動の方向 : 右上

理由 : 恒星が主系列星から赤色巨星へと進化する過程で、水素の核融合反応が加速され、エネルギーの放出が増加するので光度は上昇し、絶対等級は小さくなる一方、恒星の外層は膨張し、表面温度は低下するから。

問 4 恒星内部の核融合や超新星爆発により水素より重い元素が合成されるので、恒星が超新星爆発を起こしたときにまき散らされたガスとともにその恒星の材料となった星間物質を比べると前者のほうが水素より重い元素が多く含まれるから。

解説

問 1 難易度 : ★★★★★

(ア)星間物質 (イ)分子雲 (ウ)主系列星 (エ)赤色巨星 (オ)超新星爆発

宇宙空間には星間ガス(おもに水素)や宇宙塵(ケイ酸塩鉱物・石墨・氷など)といった星間物質が存在する。

星間物質の濃い部分が重力によって収縮して分子雲となり、さらに収縮して原始星となる。原始星を取り巻く星間ガスがなくなると、T タウリ型星となり、さらに収縮して、水素の核融合が始まると、主系列星となる。

恒星は一生の大半を主系列星として過ごす。現在の太陽も主系列星である。

太陽程度の質量をもつ主系列星の内部では水素核融合反応が進むにつれてヘリウムが増加し、中心部にヘリウム核が生じる。ヘリウム核の形成が進むと、主系列星は膨張し表面温度は低下する。この状態を赤色巨星とよぶ。赤色巨星中心部のヘリウム核は重力によって収縮し、温度が上がる。すると、ヘリウムの核融合が始まり、炭素や酸素が生じる。ヘリウム核融合が始まると、さらに膨張を続ける。最後には外層のガスを放出し、そのガスは惑星状星雲となり、中心に高温で小さい白色矮星が残る。これが太陽質量程度の恒星の一生の終わりである。

太陽の 8 倍以上の質量の主系列星は、赤色超巨星となり、核融合反応の材料が次第に重い元素へと移り変わり

核の中心に一定量の鉄が生成されると超新星爆発を引き起こす。外層を吹き飛ばすと同時に収縮して、ブラックホール（太陽質量の 30 倍以上の主系列星の場合）や中性子星（太陽質量の 30 倍以下の主系列星の場合）となる。

選択語句の中にある微惑星、マグマオーシャンという語句は惑星形成に関する用語であり、この問題とのかかわりは薄い。

問 2 難易度：★★★★☆

恒星の質量を分子雲の密度で割り、分子雲の体積は、

$$\frac{2 \times 10^{30} \text{ kg}}{5 \times 10^{-16} \text{ kg/m}^3} = 4 \times 10^{45} \text{ m}^3$$

である。

分子雲が一様な球形である場合、分子雲の半径を r とすると、

$$\frac{4}{3} \pi r^3 = 4 \times 10^{45} \text{ m}^3$$

$$r = 1 \times 10^{15} \text{ m}$$

よって、 $A = 1, B = 15$ である。

光速は $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ であり、1 光年 $= 3.0 \times 10^8 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 = 9.5 \times 10^{15} \text{ m}$ である。

よって、 $r = 1 \times 10^{15} \text{ m} = 1 \times 10^{-1}$ 光年であり、 $C = 1, D = -1$ である。

以上より解答をまとめると、 $A : 1 \quad B : 15 \quad C : 1 \quad D : -1$ となる。

問 3 難易度：★★★★☆

主系列星の中心部で水素の核融合反応が進むとヘリウム核ができ、水素核融合反応はヘリウム核の外側で起こるようになる。核融合を起こさないヘリウム核は重力収縮し、それにより生じるエネルギーでヘリウム核の外側では水素核融合反応が加速される。このため、水素核融合反応によるエネルギーの放出は増加し、恒星の光度は上昇する（絶対等級は小さくなる）。また、恒星の外層は膨張し、表面温度は低下する。このような恒星のことを赤色巨星という（問題図中の右上に伸びる領域にあたる）。よって、主系列星から赤色巨星へと進化すると、絶対等級が小さくなり、表面温度が低下する。この恒星の進化は HR 図上で右上方向への移動で表すことができる。

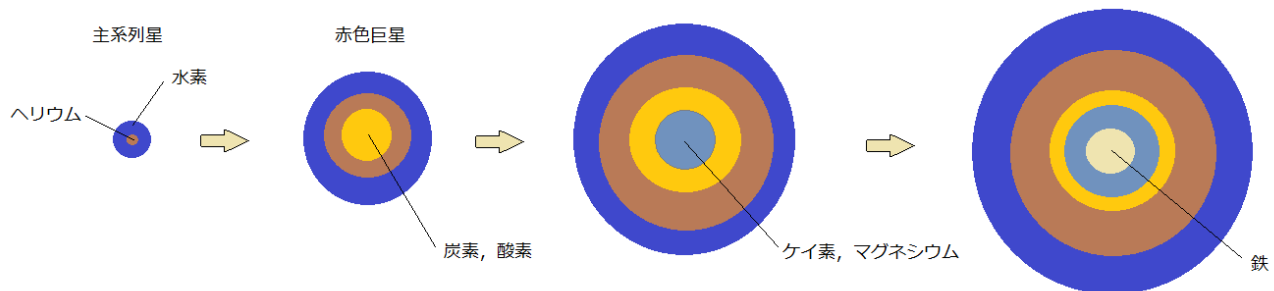
解答例

移動の方向：右上

理由：恒星が主系列星から赤色巨星へと進化する過程で、水素の核融合反応が加速され、エネルギーの放出が増加するので光度は上昇し、絶対等級は小さくなる一方、恒星の外層は膨張し、表面温度は低下するから。

問4 難易度：★★★★☆

高温、高圧の恒星の内部では水素の核融合反応によりヘリウムが合成される。恒星が十分な質量をもっている場合、水素を使い切ったあともヘリウムの核融合が起こり、炭素や酸素といったより重い元素が恒星の中心部で合成される。最終的に恒星内部のヘリウム核融合反応では質量数が 56(鉄など)までの原子核が合成される。質量数が 56 の鉄原子核は最も安定な原子核の 1 つである。以下の図のように核融合反応の進行に伴って恒星の内部構造は変化していく(図の各層の厚さの比は実際のものとは異なる)。



超新星爆発の際には鉄より重い元素が合成され、恒星内部の核融合や超新星爆発で合成された元素が宇宙空間にまき散らされる。

よって、超新星爆発でまき散らされたガスと恒星の材料となった星間物質を比べると、前者のほうが水素より重い元素が多く含まれる。

解答例

恒星内部の核融合や超新星爆発により水素より重い元素が合成されるので、恒星が超新星爆発を起こしたときにまき散らされたガスとともにその恒星の材料となった星間物質を比べると前者の方が水素より重い元素が多く含まれるから。

◆Column 最も安定な原子核

核融合反応では、融合した原子核の質量の一部はエネルギーに変換される。アインシュタインの特殊相対性理論 $E = mc^2$ (E : 放出されるエネルギー, m : 核融合反応前後の質量差, c : 光速) にもとづき、放出されるエネルギーは核融合反応前後の質量差に比例する。核融合反応後の核子 1 個あたりの質量が反応前の質量より少ないときは $E > 0$ (発熱反応)、核融合反応後の質量が反応前の質量より多いときは $E < 0$ (吸熱反応) である。恒星内部のヘリウム核融合(アルファ反応)において、質量数 56 の原子核($^{56}_{26}\text{Fe}$ など)は核子 1 個あたりの質量が最も小さく、これ以上質量をエネルギーに変換することができない。このことは、質量数 56 の原子核が最も安定であるということを意味している。よってこれ以上ヘリウム核融合(アルファ反応)は起こらず、恒星内部の核融合反応では質量数 56 の原子核まで合成される。質量数が 56 より大きい原子核は超新星爆発や中性子星合体により合成される。

(仁木創太, 奥井晴香, 坂井郁哉, 辻有恒)