

大学入試 地学

— 記述論述問題集 —



大学入試地学研究会 編

はじめに

この問題集は、国公立大学の二次試験で、地学を選択される受験生のために製作したものです。マーク方式のセンター試験と違い、本格的な記述・論述問題が課される事を想定して、短期間で十分な実力が養成されるように、様々な工夫を凝らしております。

第一に、問題の質です。一つの問題で、関連するテーマを広く深く掘り下げる事を可能にする、学習効果の高い良問を集めております。問題の後に、解答とそこに至る根拠や導出過程を詳細に解説し、必要に応じて背景となる知識を【参考】として記載していますので、十分自習する事が可能です。

第二に、問題の量です。1ヶ月程度で全体を一通り終え、2回目は2週間、3回目以降は1週間以内で繰り返せる分量です。反復学習で、知識を定着させて下さい。

第三に、問題の配列です。地学は広範な分野を扱う学問ですが、最も効率的に全体像を把握し、体系的に修得できるような順番で、問題を並べました。

第四に、問題のレイアウトです。問題と解答・解説は完全にページを分けており、問題だけ取り出しての演習用にも、解答を突合せての復習用にも、使用し易くなっています。

教育課程の改変に伴い、恒星の明るさやシュテファン・ボルツマンの法則、潮汐・起潮力などが削減されましたが、個別試験では、問題文中に適切な説明を加え、出題される事が予想されますので、省かずに取り扱っています。是非挑戦して下さい。

志望大学の過去問研究とあわせ、教科書や参考書、インターネットを駆使して、この問題集に取り組んで頂ければ、きっと本番でも素晴らしい結果を得られることでしょう。

皆様のご健闘をお祈り致します。

2012 年 10 月 大学入試地学研究会

目次

第1章 地球物理 (P5～P27)

- 1-01 地球の形と大きさ、ジオイド
- 1-02 重力とプレートテクトニクス
- 1-03 火山活動とプレートテクトニクス
- 1-04 地震波と走時曲線
- 1-05 地震波と地球の内部構造
- 1-06 アイソスタシー

第2章 岩石・鉱物 (P28～P55)

- 2-01 造岩鉱物の化学組成と火成岩の組織
- 2-02 ケイ酸塩鉱物の化学組成
- 2-03 ケイ酸塩鉱物と火成岩
- 2-04 花崗岩の生成と性質
- 2-05 花崗岩、流紋岩の造岩鉱物
- 2-06 変成岩と変成作用
- 2-07 風化作用と続成作用
- 2-08 核燃料物質の地層処理と絶対年代の確定

第3章 地質・地誌 (P56～P83)

- 3-01 地球の表層と大気における物質の循環
- 3-02 地層の対比と堆積環境決定
- 3-03 日本列島の地質・地層構造①
- 3-04 日本列島の地質・地層構造②
- 3-05 日本列島の地質・地層構造③
- 3-06 地質構造の推定①
- 3-07 地質構造の推定②
- 3-08 地質構造の図示

第4章 大気・海洋 (P84～P121)

- 4-01 大気に関する基礎事項
- 4-02 大気の安定性と断熱減率
- 4-03 風に働く力と風速
- 4-04 大気の大循環①
- 4-05 大気の大循環②
- 4-06 大気の断熱変化と循環
- 4-07 太陽放射の基礎
- 4-08 太陽放射と惑星の大気
- 4-09 淡水と海水の温度変化
- 4-10 海水と海流
- 4-11 潮汐と起潮力①
- 4-12 潮汐と起潮力②

第5章 惑星・宇宙 (P122～P156)

- 5-01 ケプラーの法則と静止衛星の軌道
- 5-02 天球運動・惑星の視運動①
- 5-03 天球運動・惑星の視運動②
- 5-04 天球運動・地球と月の視運動
- 5-05 惑星と太陽の年周運動
- 5-06 星の明るさに関する基本問題
- 5-07 超新星の光度と星の一生
- 5-08 恒星の光度・距離と銀河系の構造
- 5-09 クェーサーの光度とハッブルの法則
- 5-10 連星の光度・質量・距離①
- 5-11 連星の光度・質量・距離②
- 5-12 主系列星の光度・質量・寿命

第 1 章 地球物理

1-01 地球の形と大きさ、ジオイド

1-02 重力とプレートテクトニクス

1-03 火山活動とプレートテクトニクス

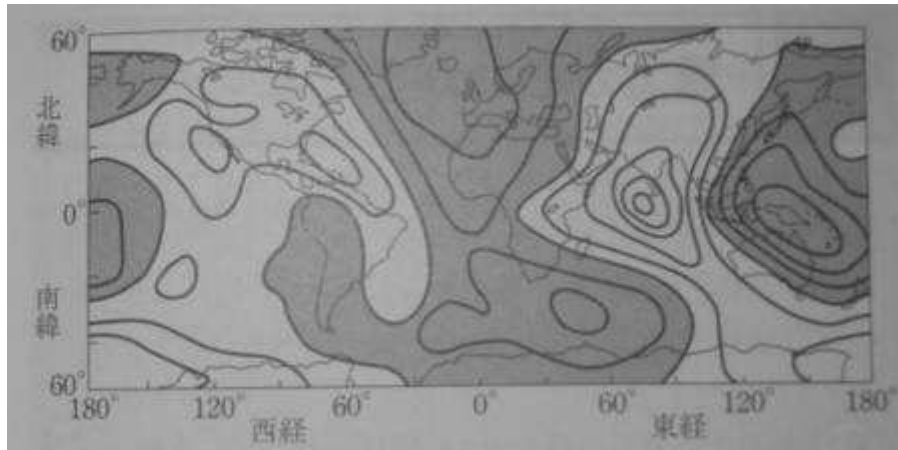
1-04 地震波と走時曲線

1-05 地震波と地球の内部構造

1-06 アイソスタシー

【問題 1-01】 地球の形と大きさ、ジオイド

平均海面に一致する面はジオイドと呼ばれているが、これには地球楕円体に対して、下図のような起伏がある。 この地球の形と大きさに関して、以下の問A～Dに答えよ。



人工衛星で求めたジオイドの高さ（等高線間隔 10m 濃い部分が正）

- 問A 地球の形に近似した極半径 30.0cm の地球儀では、赤道半径は極半径より、何 cm 長い。 扁平率は $1/300$ として、有効数字 1 桁で答えよ。
- 問B 地球の子午線の経度 1° の長さは平均いくらか。 有効数字 2 桁で答えよ。
また、その値が最も大きいのはどの地域か。
- 問C 図に示されているジオイドの起伏は主に何が原因となって生じているか。
- 問D 実際のジオイドには図に表れない細かい起伏がある。海洋底に孤立してそびえている海山上の海面では、ジオイドはどのようなになっているか。 50 字程度で説明せよ。
なお、海山ではアイソスタシーが成り立たない事が分かっている。

解答

問A 0.1cm

問B 110km, 極

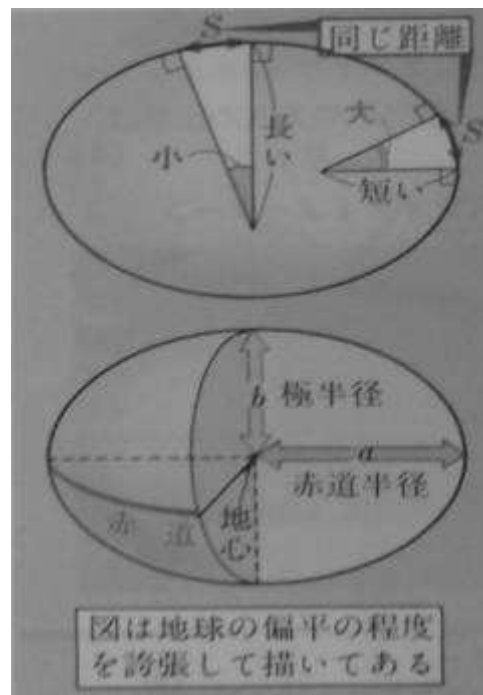
問C 地球内部を構成する物質の地域による密度の違い。

問D 海山の引力によって重力の方向が変化し、それに垂直なジオイドは海山上の海面を中心にして少し膨らんでいる。

解説

問A 地球の形は回転楕円体に近く、これを**地球楕円体**という。地球楕円体の扁平率は約 $1/300$ であり、赤道半径を a 、極半径を b とすると、 $(a - b)/a = 1/300$ となる。

この式で、 $b = 30.0 \text{ cm}$ とすると、 $a = 30.1 \text{ cm}$ となる。従って、極半径 30.0 cm の地球儀の赤道半径は 30.1 cm であり、両半径の差は **0.1cm** である。



地球楕円体

問B 地球の子午線1象限の長さは約 10000 km である。従って、その緯度 1° の長さは $10000 \text{ km} / 90 = \underline{110 \text{ km}}$ となる。地球楕円体では赤道半径が極半径より長い為、その子午線の緯度 1° の長さは極で最も大きく、赤道で最も小さい。

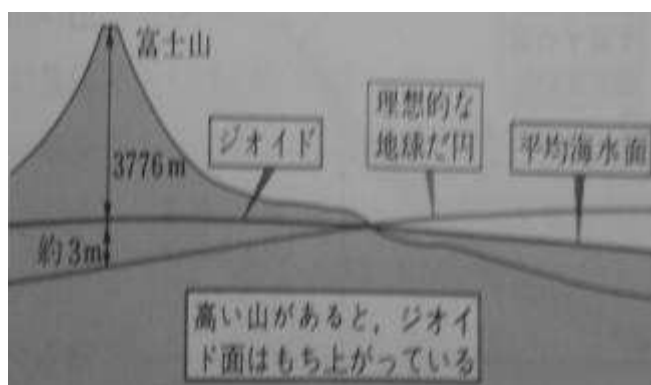
問 C 問題の図では、ジオイドは海洋で凸、大陸で凹となる傾向がある。地殻に関してはほぼアイソスタシーが成り立っているので、そのジオイドに及ぼす影響は小さく、ジオイドの凹凸は主にマントルを構成する物質の密度の差によって生じる。

問 D 海山ではアイソスタシーが成り立っていないので、この地域ではその質量に対応する分だけ他の地域よりも重力が大きく、これが原因となって、ジオイドが凸になっている。

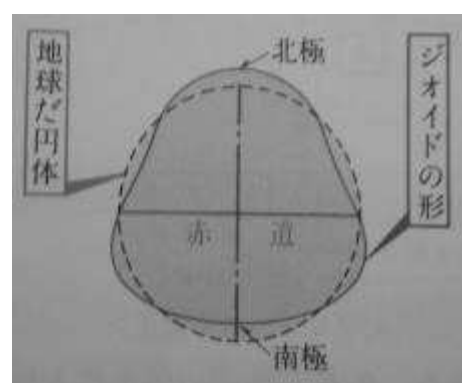
【参考】ジオイド

海洋の表面は、波や潮の干満などによって絶えず変動しているが、長い年月の平均をとると、各点で一定の高さを示す滑らかな面になる。これを**平均海面**といい、地球表面として採用されている。陸地については平均海面を延長して考える。海水面の低下がないものとして、陸地に海水を導いたときの平均海面が地球表面であると考え。こうして、地球全体を一続きの平均海面で覆った時にできる曲面が**ジオイド**である。山の高さなど、各地の高さはジオイド面からの高さで表される。

富士山などの高い山を考える。陸地の地下の物質の影響により重力が大きくなるので、山の下ジオイド面は高まる。富士山の場合で約3m持ち上がる。ジオイドの凹凸は実際の地形に比べるとはるかに小さく、地球全体で考えても、正負数十m程度にすぎない。人工衛星の軌道解析によると、地球が南北両半球で非対称の形になっていることが判明した。地球は洋ナシ形の形状をしていて、北極ではジオイドは地球楕円体に比べて13.5m飛び出していて、南極では24.1mへこんでいる。



ジオイドの凹凸と地球楕円体



ジオイドの形

ジオイドは重力の方向、つまり、鉛直線に垂直である。もし地下に重い物質が埋まっている場合、その物質の影響で重力の方向はわずかに傾き、ジオイドも変形される。

【問題 1-02】 重力とプレートテクトニクス

地球が一様な層構造を持つ回転楕円体であるとすれば、その表面の重力加速度（以下、これを重力という）は緯度の関数として表される。このような地球について重力と緯度の関係式を作成し、これから求められる各緯度の重力を標準重力とする。

起伏があり、しかも構成物質が一様といえないこの地球上の各地点で、その重力と標準重力とを比較するにあたっては、次の補正を考慮する必要がある。

1. 測定値に及ぼしている、その地点とジオイドとの高度差の影響を取り除く。
これを**高度補正**という。
2. 測定値に及ぼしている、その地域の地形の影響を取り除く。
これを**地形補正**という。
3. 山地では測定点とジオイドの間にある岩石の影響を、また、海上では水と岩石の密度差による影響を、それぞれ取り除く。これを**ブーゲー補正**という。

補正後の重力の値と標準重力の差を**重力異常**とよぶが、その表し方には2通りある。

重力異常値に高度補正をした後の値と、その地点の標準重力の差を**フリーエア異常**、また、上の3つの補正をした後の値と、その地点の標準重力の差を**ブーゲー異常**といい、目的に応じて使い分けている。

問A 標準重力が緯度によって異なる理由を簡潔に記せ。

問B 海洋では一般に、フリーエア異常および、ブーゲー異常はそれぞれ、正、負、または0に近い値のうち、いずれになるか。理由をつけて100～150字で答えよ。

問C 海嶺(中央海嶺)では、フリーエア異常は正負いずれにしても0に近い。これはこの地域で構成物質が他の地域とどのように異なる事を示しているか、100字程度で答えよ。

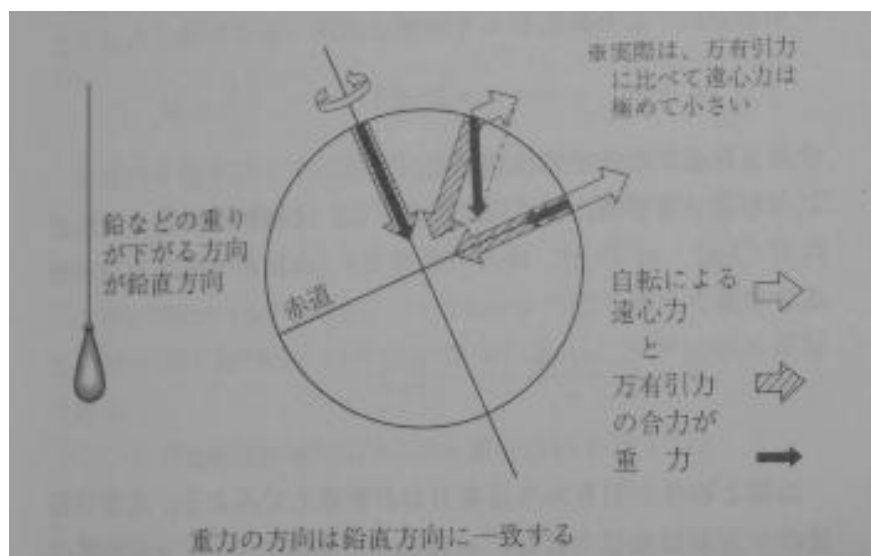
問D フリーエア異常の値は海溝では負の値を示すが、それに沿った大陸側の地域、例えば、日本列島では東北地方の一部で著しく正の値を示している。この原因について、100～150字で説明せよ。

解答

- 問A 地球は赤道半径が極半径より長い回転楕円体に近く、引力は極に近いほど大きい。また、自転の遠心力は回転半径の最も大きい赤道で大きく、極では0になる。この2つが原因となって、重力は極に近いほど大きくなる。
- 問B 海洋では、水の密度は大陸地殻より小さいが、密度の大きいマントルがジオイドに近く、アイソスタシーが成り立っていて、フリーエア異常はほぼ0である。しかし、ブーゲー補正によって、水を岩石に代えると密度の大きいマントルがジオイドに近いので、大陸より質量が大きくなり、ブーゲー異常は正になる。
- 問C 海嶺では、海盆よりも高まってはいるが、地球内部の温度が高く、リソスフェアも薄いために構成物質の密度が小さい。以上、2つの要因が打ち消しあって、内部を含めると海嶺と海盆を構成する物質の質量は等しくなる。
- 問D 海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込むのに伴い、海洋プレートは大陸プレートの重みで押し下げられている。海溝付近ではこれが原因となって、フリーエア異常が負になっている。一方、大陸プレートの海溝沿いの部分は海洋プレートによって押し上げられ、質量が大となって、フリーエア異常は正となっている。

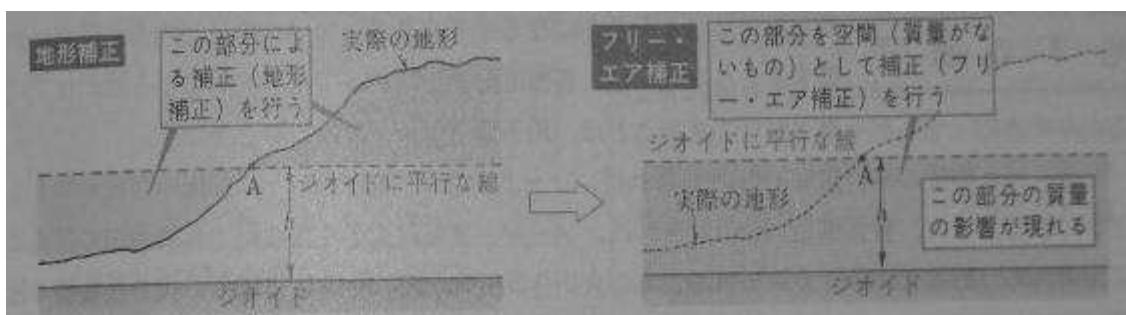
解説

問A 重力は地球の質量による引力と自転による遠心力の合力である。地球楕円体では赤道半径が極半径よりも長いので、地表にある物体に働く引力は赤道で最も小さく、極に近いほど大きい。また、自転による遠心力は自転軸からの距離に比例するので、赤道で最も大きく、極に小さいほど小さくなり、極では0になる。以上の2つの理由から、標準重力は緯度の関数であって、赤道で最も小さく、極で最も大きい。

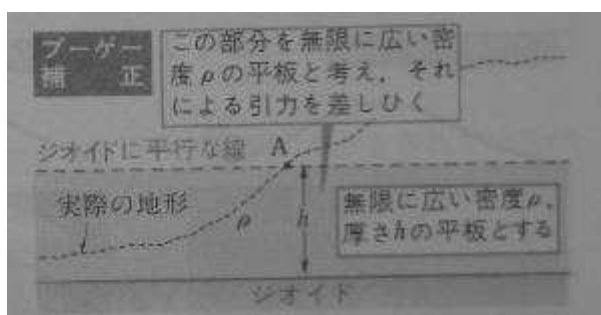


問B フリーエア異常は高度補正だけで（岩石の質量に変化がなく）他の地域と重力を比べるのだから、その地域で質量が大きければ正に、質量が小さければ負になる。山地では他の地域と比べて、山の質量が加わっているが、地殻が厚く、他の地域で密度の大きいマントルになっている部分も、密度の小さい地殻になっていて、この差し引きで、質量は平地と変わらない。従って、山地ではフリーエア異常は0に近い。海洋では上部に密度の小さい水があるが、大陸では地殻となっている深さの地球内部が、密度の大きなマントルになっていて、この差し引きで質量は大陸と等しく、フリーエア異常はほぼ0である。

ブーゲー補正までしてしまうと、その地域の山はなくなり、海水は大陸と同じ岩石に変わる。この後で比較する各地域の質量の大小は、地殻および上部マントルを構成する岩石の密度によって決まる。つまり、密度の大きい岩石によって構成されている地域ではブーゲー異常は正に、また、密度の小さい岩石によって構成されている地域ではブーゲー異常は負になる。山地では密度の小さい地殻がマントル内部に入り込んでいるので、ブーゲー異常は負になるが、海洋では密度の大きなマントルがジオイドの近くまで迫っているの、大陸よりも質量が大きく、ブーゲー異常は正になる。



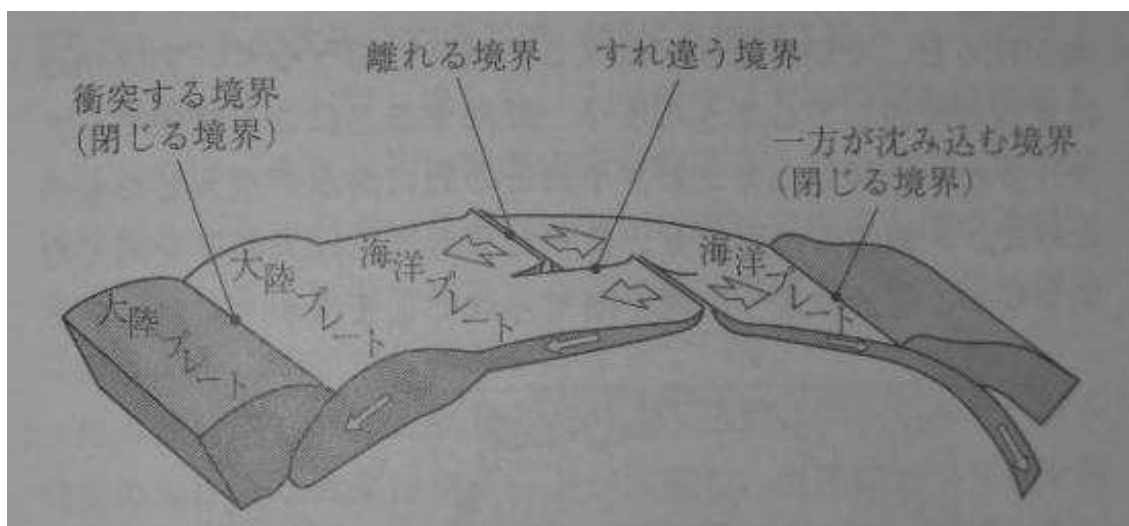
地形補正とフリーエア補正



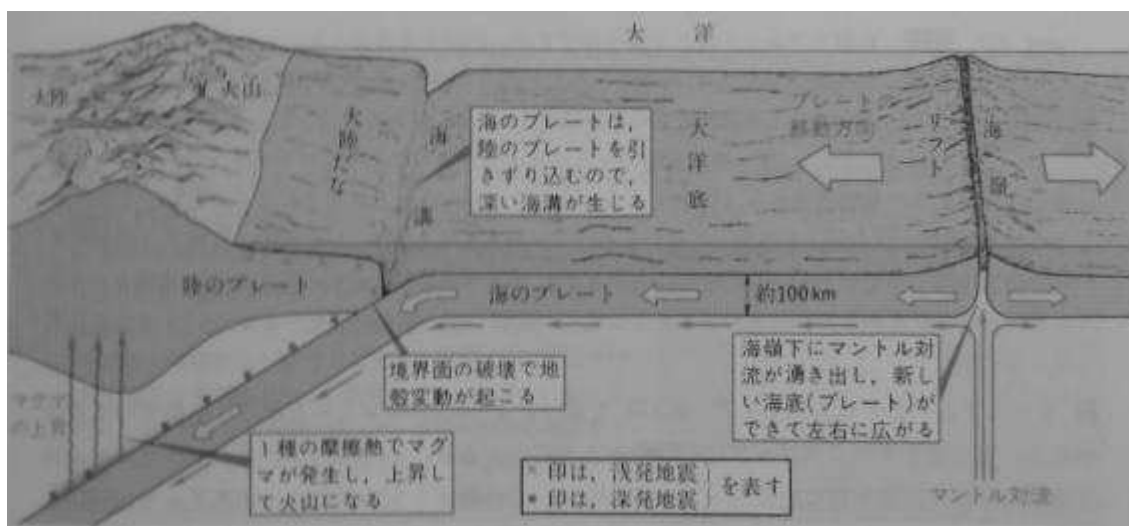
ブーゲー補正

問C 前項で説明した通り、海洋ではフリーエア異常は0に近い。海嶺は海底の大山脈であるから、もし構成物質が他の地域と変わらなければ、山脈を構成する岩石に相当する質量だけ質量が大きく、フリーエア異常は正になるはずである。この海嶺でフリーエア異常が他の海底と同様、ほぼ0となっているのは、海嶺を構成する岩石の密度が他の地域より小さいことを示している。ここでは、マントル内部から高温の物質が上昇し、リソスフェアが薄く、アセノスフェアも温度差から他の地域より密度が小さくなっていると考えられる。

問D 海溝でフリーエア異常が負の値を示すのは、ここで海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込むのに伴い、大陸プレートを押し上げ、その反作用として大陸プレートによって押し下げられ、これがこの地域の質量不足を引き起こしているからである。一方、海溝に沿った大陸側の地域で、フリーエア異常が正になっているのは、その下に沈みこむ海洋プレートによって、大陸プレートが押し上げられ、この地域が質量過剰になるからである。



プレートの境界



プレートテクトニクス

【問題 1-03】 火山活動とプレートテクトニクス

次の文を読み、問A～Dに答えよ。

世界の火山には、プレートの境界付近に位置するものと、プレート内部に位置するものがある。 後者の典型的な例はハワイ諸島の火山であるが、(ア) ハワイ島下のマントル深部には、プレートの動きに対して固定している (1) と呼ばれる高温の部分があると考えられている。

一方、前者はプレートが生成する海嶺部分に位置するものと、プレートが沈み込む部分に位置するものとに分けられる。日本の火山活動はプレートが沈み込む部分で生じているが、現在活動している火山は (2) と呼ばれる境界より太平洋側には分布していない。

(イ) 玄武岩質マグマを主として噴出する伊豆大島火山は、安山岩質マグマを主として噴出する浅間火山や桜島火山とは異なった形式の噴火を行う。

また、現在、(ウ)火山の噴火予知を可能にする為に様々な観測が行われ、その実現に努力が払われている。

問A (1) と (2) に適当な語句を入れよ。

問B 下線部(ア)はどのような事実から推定されているのか。 100～150 字程度で述べよ。

問C 下線部(イ)に関連して、伊豆大島火山と浅間火山・桜島火山との噴火の形式はどのように異なるか。それらの違いを生じる主な理由を挙げ、100～150 字程度で説明せよ。

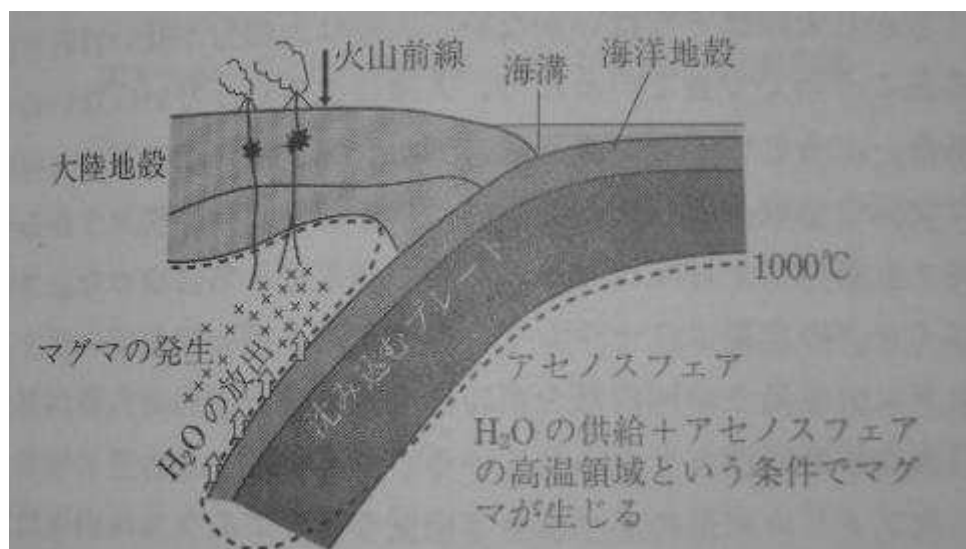
問D 下線部(ウ)に関連して、現在噴火予知を可能にする目的で、どのような観測が行われているか。 2 種類選び、それらが噴火の前兆としてどのような現象を利用しているのかを簡単に説明せよ。

解答

- 問A 1: ホットスポット 2: 火山前線
- 問B ハワイ島とそこから天皇海山にかけて点在する各海山との距離は、各海山を構成する火山岩の絶対年代にほぼ比例する。そして、各海山はハワイ島付近で生成して移動しているとして、ハワイ島からの距離とその絶対年代から求めた速度は、海底地殻の絶対年代から求めた太平洋プレート速度とほぼ一致するから。
- 問C 伊豆大島火山の噴火は流動性に富む溶岩の流出し主とし、比較的穏やかであるが、浅間火山・桜島火山の噴火は碎屑物の放出と塊状溶岩の流出を伴い、爆発的である。前者は玄武岩質マグマであるが、後者は粘性の高い安山岩質マグマであり、揮発性成分が脱出しにくく、マグマが流出しにくいのがその原因である。
- 問D 火山性地震の観測 : マグマの上昇に伴って、地殻の一部に破壊が起こる。
地殻変動の観測 : マグマが上昇すると、その圧力によって山体が隆起する。

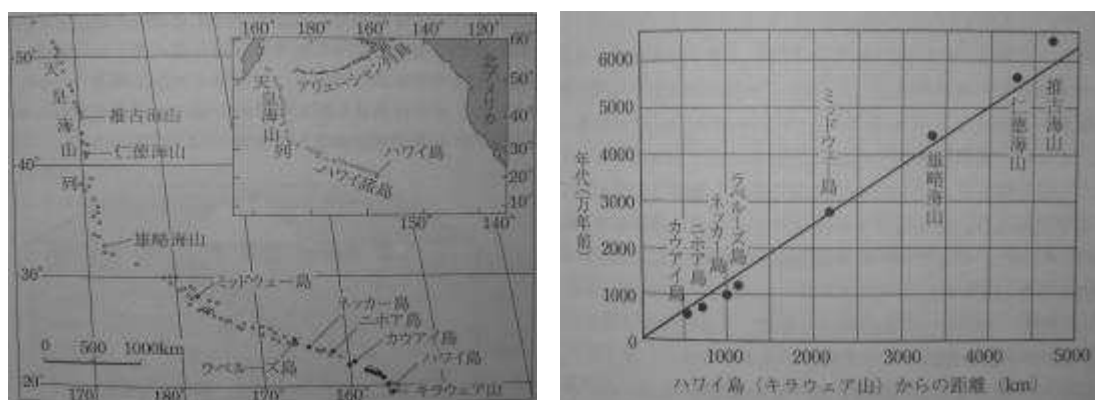
解説

問A プレートの下層(アセノスフェア)でマグマが発生している点を**ホットスポット**という。ホットスポットはプレートの動きに対して静止していると考えられている。日本列島のような島弧では海溝にほぼ平行となる一つの線に沿って、その大陸側に火山が配列している。この線を**火山前線**という。



沈み込み帯におけるマグマの発生と火山

問B 太平洋にはハワイ島から天皇海山列にかけて、点々と海山が配列しているが、下図のように、これらの海山列を構成する火山岩の絶対年代は、ハワイ島からの距離に比例している。これを海山がハワイ島付近で形成され、プレートに乗って動いたと考えれば、海山とハワイ島の距離と、海山を構成する火山岩の絶対年代とからプレートの移動速度を求められる。太平洋の海底は海嶺で形成されて移動しており、その速度は海嶺からの距離と構成する玄武岩の絶対年代とによって求められるが、それは海山によって求めた速度と一致している。このことから、ホットスポットは長い地質時代にわたって、その位置に変化がなかったことが分かる。



問C 玄武岩質マグマの火山と安山岩質マグマの火山とでは、マグマの粘性により噴火の形式が異なる。

問D 現在、浅間山、阿蘇山、三原山など活動の激しい火山には観測所が設置され、観測が続けられている。これらで噴火の予知に利用されているのは、地殻変動と地震である。マグマが地表近くに上昇すると、その圧力によって地表が隆起し、噴火が終わると元に戻る。また、マグマの上昇に伴って、地殻の一部が破壊され、それに伴って地震が起こる。



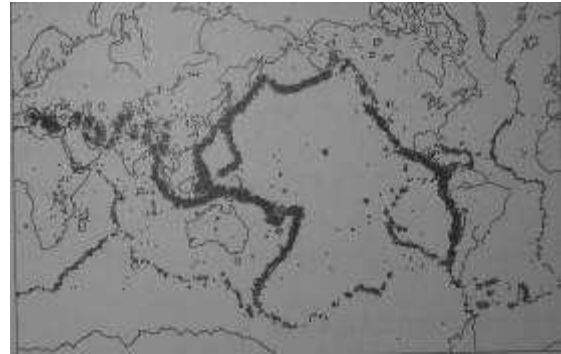
世界のプレート分布

【参考】活火山と震源地、プレートの関連性

活火山の分布も、地震の発生分布も、下図のように、太平洋を取り囲むように集中している。地下でマグマが生じる条件は、①高温の岩石が下方から上昇する事で、加わる圧力が減少し、岩石の融点が下る ②地下の岩石に水などの物質が供給され、それにより岩石の融点が下る事であり、①はプレートの離れる境界、②はプレートが沈み込む境界で見られ、プレートの動きと、地震の帯、火山の帯は重なり合う。

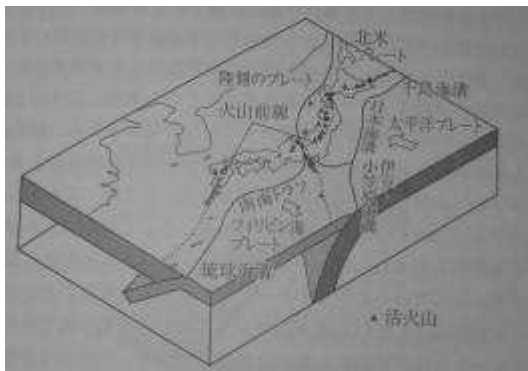


活火山の分布

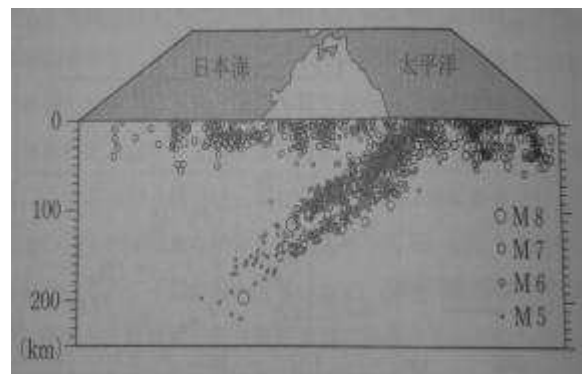


M5.0 以上の地震の発生分布

日本は全域がこの帯に含まれており、周辺で生じた地震の震源の深さを詳細に調べると、右下図のように、震源発生域は太平洋側では浅く、日本海や大陸に近づくにつれて深くなる事が明らかになった。これは、地表が海嶺や海溝で区切られたプレートで分割され、海嶺で誕生し、海溝で沈み込むという、プレートテクトニクスの基本原理が打ち立てられる契機につながった。



日本列島周辺のプレート

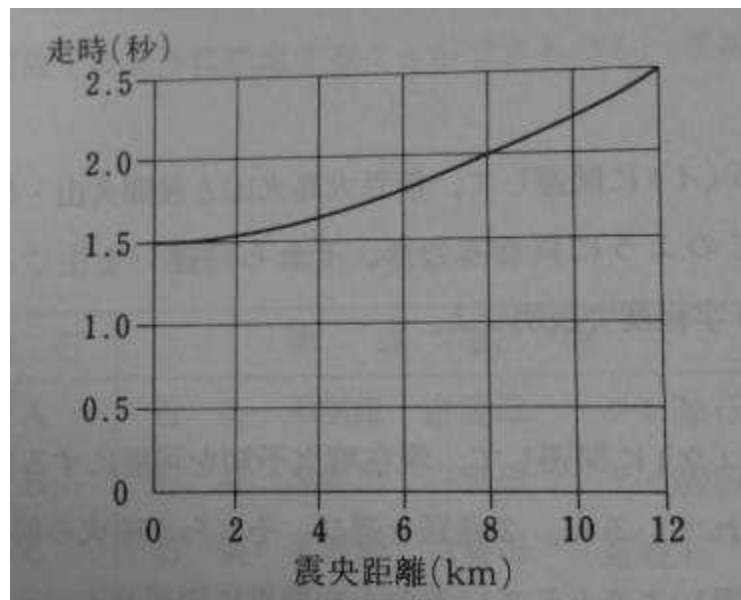


東北地方の震源分布

【問題 1-04】 地震波と走時曲線

次の文を読んで問A～Cに答えよ。

地震が起きたとき、各地での地震波の観測から、その地震が発生した場所を点として求める事ができる。この点を震源といい、震源の真上の地表の点を震央という。また、震源において地震が発生した時刻を震源時といい、地震波の到着した時と震源時との差を走時という。下図は震源の深さが h である地震についての P 波の走時曲線である。但し、地球内部での P 波の速度は一定であるとする。



- 問A 図の走時曲線から、地殻内部の P 波の速度 V_p と、震源の深さ h をそれぞれ有効数字一桁で求めよ。
- 問B 問Aで求められる P 波の速度 V_p が S 波の速度 V_s の 1.7 倍であるとき、震源が地表の点に位置する場合の P 波と S 波の走時曲線を書け。
- 問C 震源からの距離 D km に位置する点における P 波と S 波の到着時の差が t 秒である時、 V_p と V_s を用いて、 D と t の関係を表す式を求めよ。

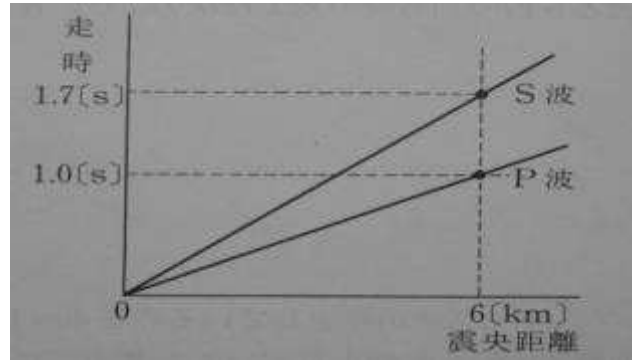
解答

問A 図より、以下の式が得られる。

$$h = 1.5 V_p \cdots \textcircled{1} \quad (h^2 + 12^2)^{1/2} = 2.5 V_p \cdots \textcircled{2} \quad (h^2 + 8^2)^2 = 2.0 V_p \cdots \textcircled{3}$$

$$\textcircled{2}, \textcircled{3} \text{より、} \underline{V_p \doteq 6 \text{ km/s}} \cdots \textcircled{4} \quad \textcircled{1} \text{に代入して } h = 1.5 \times 6 = \underline{9 \text{ km}}$$

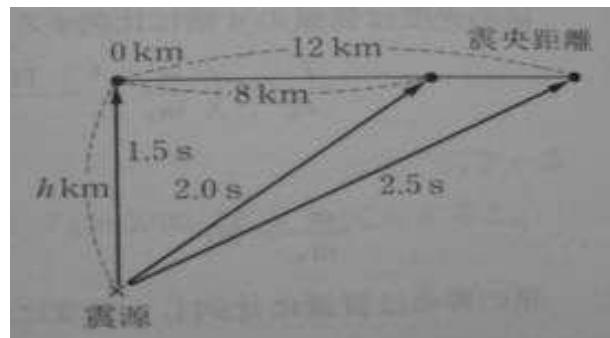
問B



問C $(D/V_s) - (D/V_p) = t$ $D\{(V_p - V_s) / V_p V_s\} = t$ より、 $\underline{D = \{V_p V_s / (V_p - V_s)\} \times t}$

解説

問A 図によると、震央距離 0 km、8 km、12 km の地点までの走時は、それぞれ 1.5 s、2.0 s、2.5 s である。



これによって、走時と震源距離の関係を図示したものが上図であり、三平方の定理により、

$$h = 1.5 V_p \cdots \textcircled{1} \quad (h^2 + 12^2)^{1/2} = 2.5 V_p \cdots \textcircled{2} \quad (h^2 + 8^2)^2 = 2.0 V_p \cdots \textcircled{3}$$

$$\textcircled{2}^2 - \textcircled{3}^2 \text{より、} 12^2 - 8^2 = 6.3 V_p^2 - 4.0 V_p^2 \quad 2.3 V_p^2 = 80 \quad V_p \doteq \underline{6 \text{ km/s}}$$

$$\textcircled{1} \text{に代入して } h = 1.5 \times 6 = \underline{9 \text{ km}} \quad \text{となる。}$$

問B 震源が地表にあるときには、震央距離は走時に比例し、震央距離 6 km の地点では、問AよりP波の走時は 1.0 s であり、また、その 1.7 倍であるS波の走時は 1.7 s になるので、解答の図となる。

問C 震源距離 D km の地点におけるP波とS波の到着時差 t は次のように表される。

$$(D/V_s) - (D/V_p) = t \quad D\{(V_p - V_s) / V_p V_s\} = t \quad \text{よって、} \underline{D = \{V_p V_s / (V_p - V_s)\} \times t}$$

【参考】地震波と走時曲線

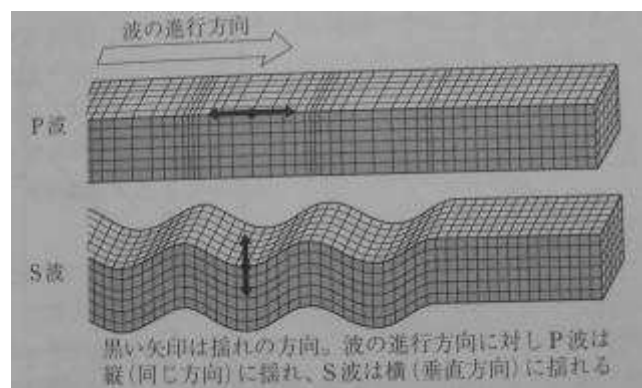
地殻を構成する岩盤に巨大な力が加わり続けると、ある時急激に岩盤が破壊され、ずれが生じる。これを**断層**といい、その際に**地震**を生じる。破壊が起きた地点を**震源**といい、その直上の地表を**震央**という。この破壊の際に、周辺の岩盤は激しく振動し、それが波として全方位に伝わる。これが**地震波**である。地震波はその性質によって、いくつかに分類される。代表的なものが**P波**と**S波**である。

P波 (Primary wave 最初の波): 縦波、圧縮と膨張が伝わる波。地殻中を $5\sim 6\text{km/s}$ で伝わる。

波長は短く、振幅は小さい。初期微動を起こす。

S波 (Secondary wave 2 番目の波): 横波、変形が伝わる波。地殻中を P 波より遅い $3\sim 3.5\text{km/s}$ で伝わる。

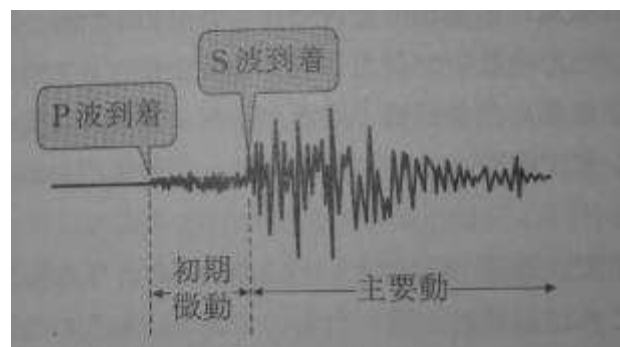
波長は長く、振幅も大きい。主要動を起こす。



P 波と S 波

P 波は S 波より早く伝わる為、観測地では P 波が先に到達し、小さな揺れを起こす。これが**初期微動**である。少し遅れて S 波が到着すると大きな揺れを起こす。これが**主要動**である。これ以外にも表面波と呼ばれる波もあり、更に遅れて到着し、地面を揺さぶる。これも主要動の一部である。

横軸に観測地点の震央からの距離、縦軸に揺れ始めの時間をとり、グラフにしたものが**走時曲線**である。この走時曲線を利用すると、地球の内部の構造を解析する事もできる。



初期微動と主要動

【問題 1-05】 地震波と地球の内部構造

地震波は、地球の内部構造を知る手がかりとして重要なものであって、その伝わり方は走時曲線で示される。次に示すいくつかの走時曲線に関して、以下の問いに答えよ。

問 A 大陸のある地域の地表で、人工地震を起こし、その P 波について走時曲線を震央からほぼ 200km までの範囲で作成したところ、図 1 のように、震央距離 120km の地点で折れたものになった。この理由を 100 字以内で説明せよ。

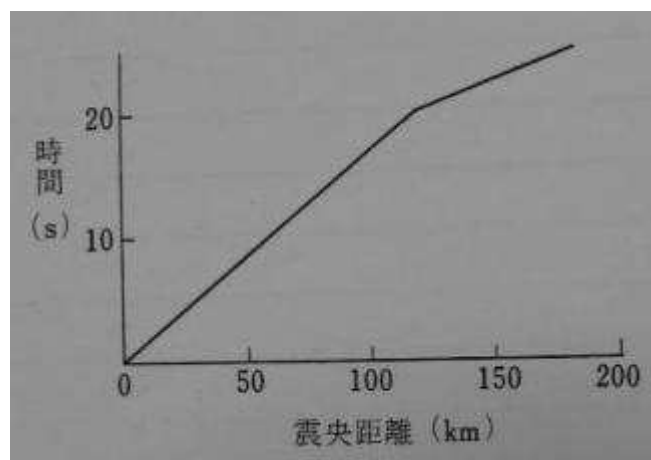


図 1

問 B 同様の実験を海洋底で行い、その走時曲線を作成した場合、折れる点の震央距離は図 1 とどのように異なると考えられるか。理由と共に 50 字以内で答えよ。

問 C 大陸の地下 30km 程度のところに震源を持つ地震について、震央に近い地域における観測によって走時曲線を作成した場合、それはどのようなものになると考えられるか。図 2 の A、B、C、D から該当するものを選び。但し、図中の 0 秒は、地表で最初に P 波を観測した時刻とする。

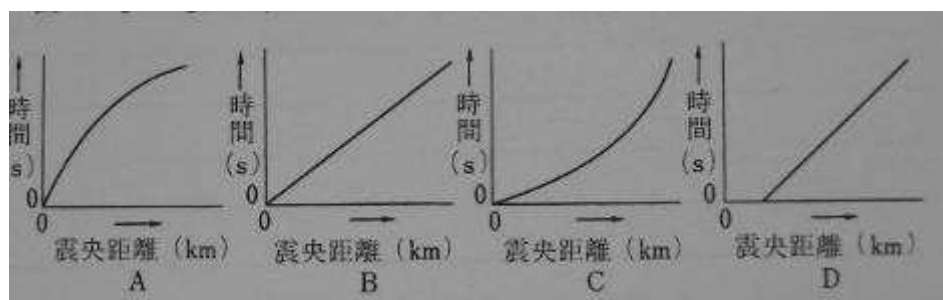


図 2

問D P波について、より広い地域を対象とする走時曲線を作成したところ、図3のようになった。この図では震央距離は角距離で表されている。2地点の角距離とは、2地点と地球の中心とをそれぞれ結ぶ線のなす角度の事である。
角距離 1° は地表の距離では何kmか。有効数字2桁の数で答えよ。

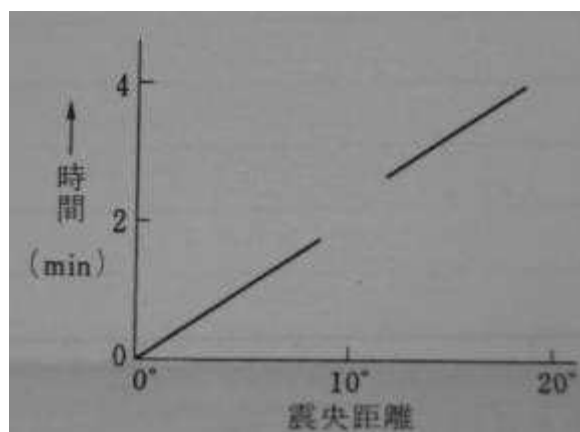


図3

問E 図3の走時曲線では、震央距離 10° 付近が空白になっている。その原因としてどのような事が考えられるか、説明せよ。

問F 地球全体である地震を観測して、P波に関する図4のような走時曲線が得られた。この図では、震央距離 $103^{\circ} \sim 143^{\circ}$ の地域が空白になっている。この原因としてどのような事が考えられるか。100字以内で説明せよ。

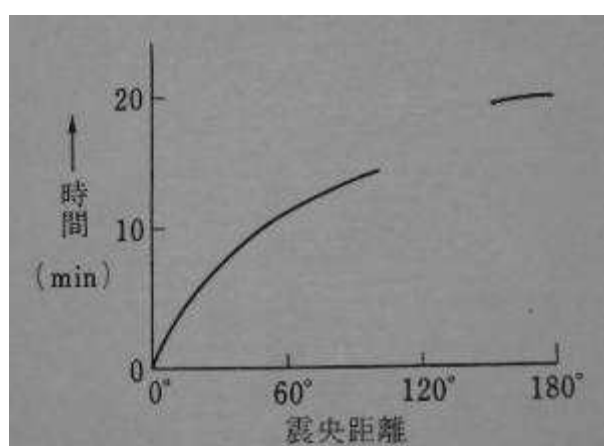


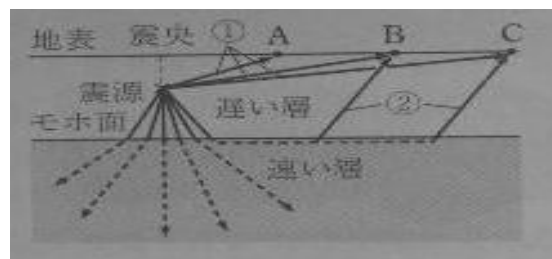
図4

解答

- 問A 各地点におけるP波には、地殻のみを経由する直接波と、モホ面で屈折してマントルを経由する屈折波とがある。 近距離には直接波が先に達するが、遠距離にはマントルを高速で伝わる屈折波が先に達する。
- 問B 海洋底では、大陸より地殻が薄いので、走時曲線の屈折する点は大陸よりも震央に近くなる。
- 問C C
- 問D 110km
- 問E 震央距離が遠いほど、そこに達する P 波はリソスフェアの下部を通るが、さらに深くなると P 波はアセノスフェアに達し、そこで屈折して、遠方に伝わるから。
- 問F 外殻は液体であって、マントルに比べてP波の速度が小さい。 このため、震央距離 103° 以遠に達するP波はグーテンベルグ面で屈折して、震央距離 $103^{\circ} \sim 143^{\circ}$ の地域よりも遠方に伝わってしまうから。

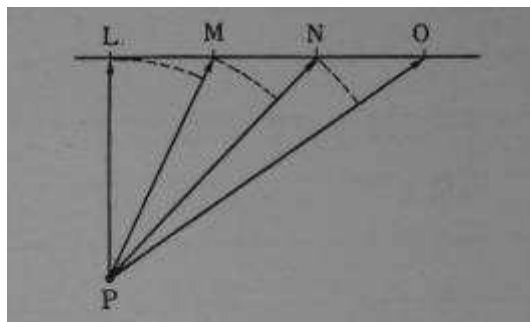
解説

問A 地震では下図のように、震源から地殻を伝わって各地に達する直接波があるが、震源から下方に向かってモホ面に達し、そこで屈折してマントル上部を伝わった後、再びモホ面で屈折して地表に出てくる屈折波もある。 モホ面で地震波が屈折するのは、その速度が地殻内よりマントル内の方が大きいからである。 震源に近いところには直接波が先に達するが、遠くなると屈折波が先に達する。 屈折波の場合、下図のように、震央距離が増加しただけマントルを伝わる距離が増加し、その距離をマントルで伝わる時間だけ走時が増加する。 問題の図1のグラフで、震央に近い部分は直接波が地殻を伝わる速さを示し、震央から離れた部分では屈折波がマントル上部を伝わる速さを示している。 両者を比較すると、後者の方が大きい。



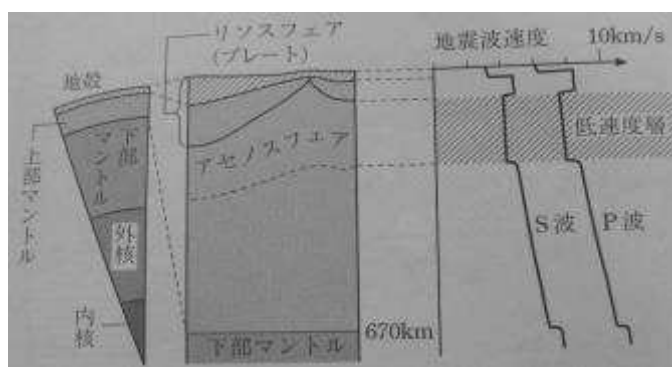
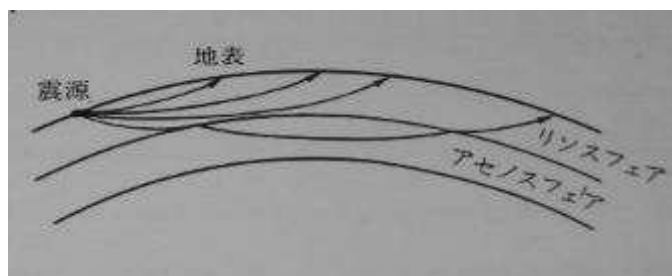
問B もし地殻がなかったとしたら、問題の図1のグラフは震央からマントルを伝わる速度を示すはずだし、地殻が薄ければ、屈折波が早く地表に戻るなので、グラフの屈折点は震央に近くなる。 海洋底では地殻が薄いので、グラフの屈折点は図1（大陸）より震央に近い。

問 C 今、震源を P、震央を L とし、L、M、N、O は同一直線上にあって、等間隔に並んでいる 4 点とする。下図から明らかなように、 $PM - PL < PN - PM < PO - PN$ であるから、地震波が M 点と L 点に達する時間の差よりも、N 点と M 点に達する時間の方が大きいので、震央距離が大きいほど走時の増加する割合が大きい。これをグラフで表すと、問題の図 2 の C がそれに該当する。走時曲線が直線となるのは、震源が地表にある場合である。



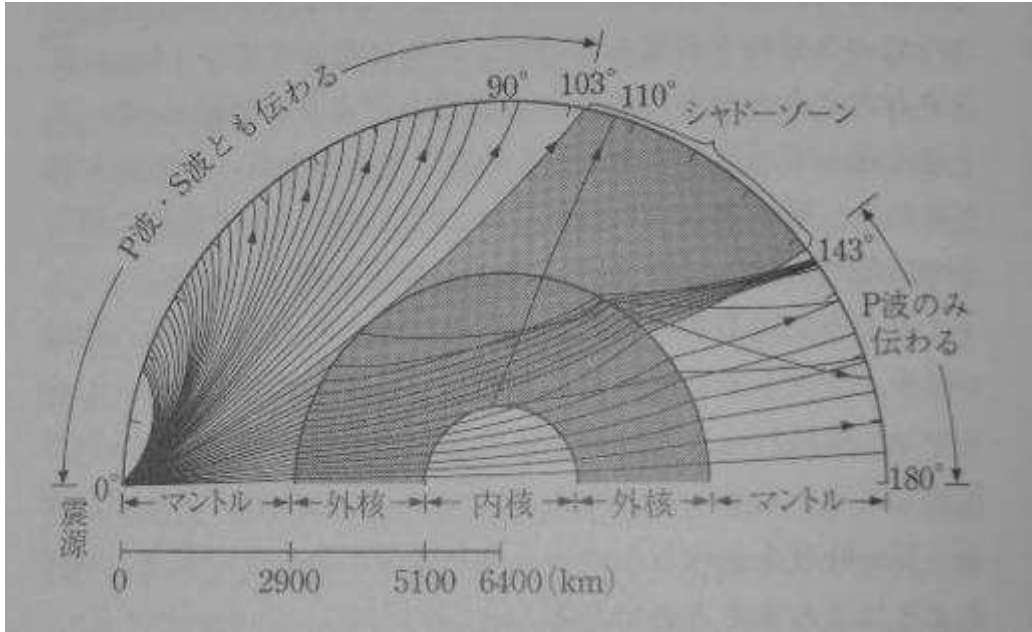
問 D 子午線の 1 象限（極から赤道まで）の長さは約 10000km であるから、子午線弧 1° の長さは $10000 / 90 \text{ km} \approx 111 \text{ km}$ になる。地球楕円体ではこの長さは一定ではなく、緯度が高いほど大きい。

問 E 震源から各地に伝わる地震波は、下図のように震央距離の大きい所ほど、深いところを通っている。しかし、ある深さに達すると、地震波は図のように屈折してアセノスフェアを通り、再び屈折して地表に出てくるので、ある震央距離の地域には地震波が届かない。問題の図 3 はこの事を示している。なお、リソスフェアとアセノスフェアの境界面は地表から 100km 前後のところにある。



アセノスフェアとリソスフェア

問 F 震央距離 103° までは、マントルを伝わる P、S 両波が達しているが、それより遠くに達する P 波は液体の外殻に入るときに屈折し、約 143° 以遠に達する。なお、S 波は 103° 以遠には伝わらない。



地球内部の地震波経路

【参考】地球の内部構造

1914 年、ドイツのグーテンベルグは、震源から中心角 103° 以遠で S 波が観測されないことから中心部に S 波を伝えない液状物質が存在すると考えた。それは深さ約 2900km にあり岩石でできたマントルと、液状の鉄でできた核(コア)の境界面で、グーテンベルグ不連続面という。さらに、 $103^\circ \sim 143^\circ$ の領域では S 波だけではなく、P 波も観測されない事が確認された。この領域は、シャドーゾーンと呼ばれる。

1936 年、デンマークのレーマンは、シャドーゾーン内の震源から 110° の地点に微弱な P 波が到達する事を確認した。深さ約 5100km に不連続面があれば、この現象が説明できると考えた。鉄が液体として存在する外核の部分が深さ 2900~5100km で、超高压のため固体鉄として存在する内核が 5100km 以深を占めている。この外核と内核の境界をレーマン不連続面という。

核の外側には、地球体積の 84%を占める、岩石でできたマントルが厚く覆う。マントルも、上部と下部では岩石の密度や性質が異なると考えられている。マントルの外側には、地球半径の 1%にも満たない地殻が覆っている。地殻の岩石はマントルより軽く、大陸においては下部地殻と上部地殻に分けられる。上部は軽い岩石でできている。このように密度の大きい順に重なった状態を密度成層という。これは地表を覆う海水や大気にも当てはまる。海水は岩石より軽く、大気は海水より軽く、上層に行くほど薄くなっていく。最も重い天然物質は核燃料に使用されるウラン (U) であるが、地表に存在する天然ウランは地球の中心部に沈み損ねた残存物質と考えられる。

【問題 1-06】 アイソスタシー

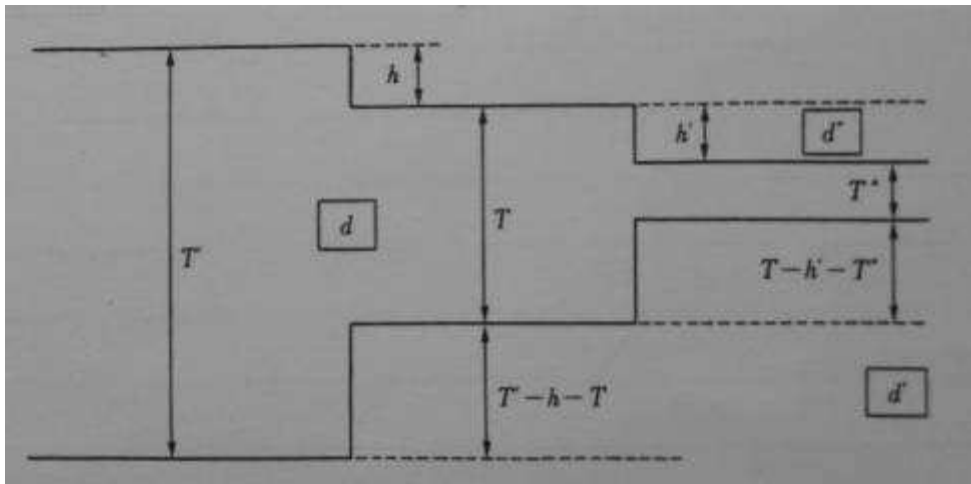
地殻の重みがマントルの浮力と釣り合っている状態をアイソスタシーという。
アイソスタシーに関して、次の問A、Bに答えよ。

問A 図のように、海拔0mの平地における地殻の厚さが T であって、地殻、マントル、海水の密度がそれぞれ、 d 、 d' 、 d'' で、いずれも一定であるとする、アイソスタシーが成り立つ場合、次の地域の地殻の厚さは、それぞれ、いくらになるか。

答えを求める経過も記せ。

a) 海拔 h の高原における地殻の厚さ T'

b) 深さ h' の海盆における地殻の厚さ T''



問B 地球上にはアイソスタシーが明らかに成り立たない地域がある。これに該当する地域を2つ挙げ、それぞれについて、アイソスタシーが成り立っていない理由を60字以内で説明せよ。

解答

問 A a) 海拔 h の高原における地殻の厚さ T に関して、次の等式が成り立つ。

$$T'd = Td + (T' - h - T)d'' \quad \text{この式を解いて、}$$

$$\underline{T' = T + hd'' / (d'' - d)} \quad \text{となる。}$$

b) 深さ h' の海盆における地殻の厚さ T' に関して、次の等式が成り立つ。

$$Td = h'd'' + T'd + (T - h' - T')d' \quad \text{この式を解いて、}$$

$$\underline{T' = T - h'(d' - d'') / (d' - d)} \quad \text{となる。}$$

問 B ①火山：

面積が小さいので、プレートはその重さに対応する変形をしない。アイソスタシーはより広範な地域に対して成立するものである。

②スカンジナビア半島：

氷河時代に発達した氷河の重みで沈み込んでいた地殻が、氷が消失した現在も、まだ十分に回復していないから。

解説

問 A 地殻の重みを求めるには、(単位面積当たりの)地殻の厚みと密度を掛け合わせればよい。マントルや海水についても同様である。アイソスタシーが成り立つ時には、ある深さの面上では質量が一定であるから、解答のような等式が成り立つ。

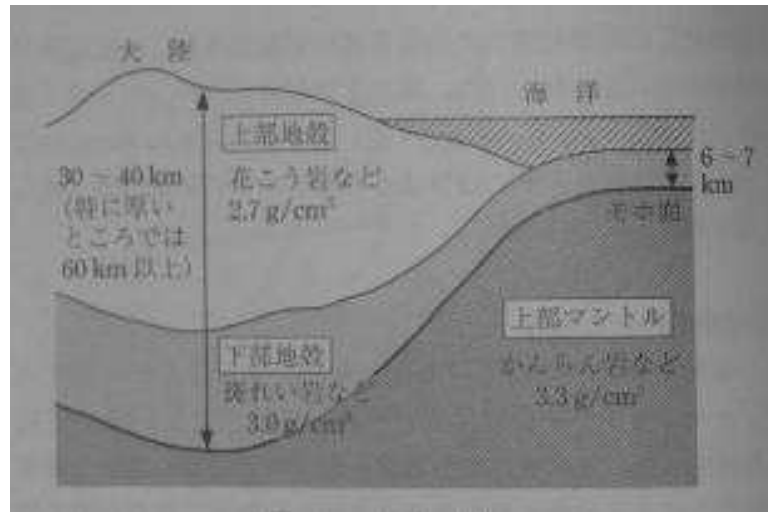
問 B アイソスタシーが成り立っている地域では質量が一定であるから、フリーエア異常は0である。また、アイソスタシーが成り立たない地域ではフリーエア異常に偏りが見られる。海溝付近ではフリーエア異常が著しく負であることが知られている。これは海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込む事によって大陸を押し上げ、同時に海洋プレートが大陸プレートによって押し下げられている事によると考えられている。

火山では一般にフリーエア異常が正である。これは、プレートの抵抗によって火山体が支えられており、その分だけ質量が大きいことによると考えられている。但し、火山を含む広い地域についてはアイソスタシーが成り立っている。

氷河時代に厚い氷に覆われていた地域は、その質量によって地殻がマントル内に沈み込んでいたが、それが溶け去った現在も完全には浮き上がっておらず、隆起が続いている。この地域でも、アイソスタシーは成り立っていない。

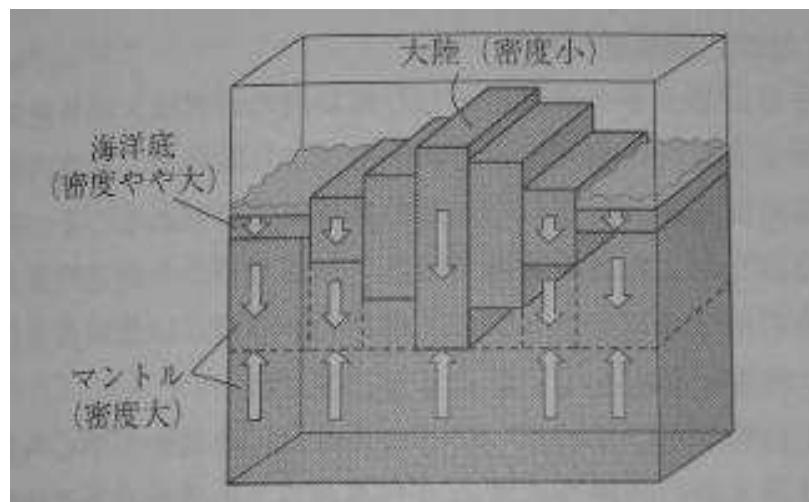
【参考】地殻の構造とアイソスタシーの概念

上部マントルはマグマに含まれるゼノリスにより、カンラン岩などで構成される事が分かっている。地表に近い順から、花崗岩、班レイ岩、カンラン岩と密度が大きくなっていく。これは、重い岩石の上に、軽い岩石が浮かんでいるようにも見える。



地殻の構造

様々なサイズの氷を水に浮かべた時、氷の水面から上の体積と水面下の体積を比較すると、どの氷も上下の比率が一定である。同様に、地殻もマントルの上に浮かんでバランスをとり、厚い部分が出っ張って大陸となる。この考え方をアイソスタシーという。



アイソスタシーの概念図

アイソスタシーが地殻とマントルの間で成り立っているのであれば、地殻に重石を乗せれば沈み込み、取り除けば隆起するはずである。この実例がスカンジナビア半島で観測されている。この地域は氷期が終わる一万年前まで、厚さ 3km の氷が覆っていたが、氷期が終わって氷が解けた事で重石が除かれ、現在最大 300m ほど隆起し、現在も継続している。

第2章 岩石・鉱物

2-01 造岩鉱物の化学組成と火成岩の組織

2-02 ケイ酸塩鉱物の化学組成

2-03 ケイ酸塩鉱物と火成岩

2-04 花崗岩の生成と性質

2-05 花崗岩、流紋岩の造岩鉱物

2-06 変成岩と変成作用

2-07 風化作用と続成作用

2-08 核燃料物質の地層処理と絶対年代の確定

【問題 2-01】 造岩鉱物の化学組成と火成岩の組織

火成岩の主要造岩鉱物に関して、次の問A～Cについて答えよ。

問A 主要構成元素のうち、有色鉱物に限って含まれるものを2つ挙げよ。

問B 同一の火山岩を構成する斜長石の化学組成は、石基と班晶とでどのように異なるか。
また、その理由を簡潔に説明せよ。

問C 花崗岩を構成する石英と流紋岩の班晶の石英とでは、その外形にどのような違いがあるか。 その原因を含めて、80～120字で説明せよ。

解答

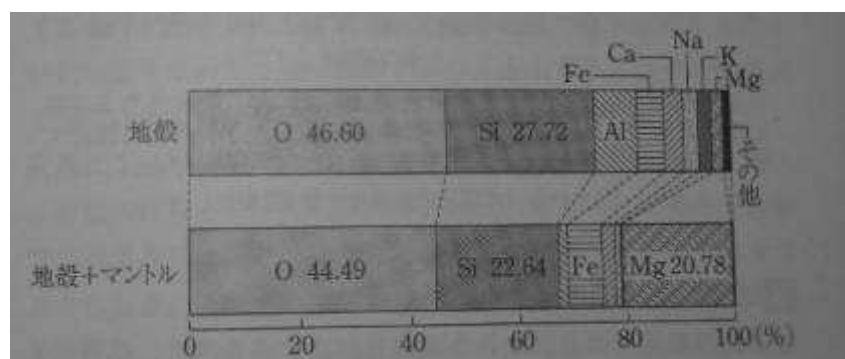
問 A Fe、 Mg

問 B 斜長石は固溶体で、マグマから早期に晶出するほど、Ca に富んでいる。一つの火山岩の中では、班晶は石基より早期に晶出しているので、班晶の斜長石は石基を構成する斜長石よりも Ca を多く含んでいる。

問 C 花崗岩では、石英は他の鉱物より遅れて晶出するので、すでに晶出した鉱物によって本来の結晶の形成を妨げられて不規則な形になるが、流紋岩の班晶は、液体の中で晶出するので、結晶が成長しやすく、自形となることが多い。

解説

問 A 火成岩を構成する主な元素は、O、Si、Al、Fe、Ca、Na、K、Mg の 8 種類であるが、この中で、無色鉱物に含まれていない、有色鉱物にのみ含まれているのは、Fe と Mg である。



地殻・マントルの元素存在比率

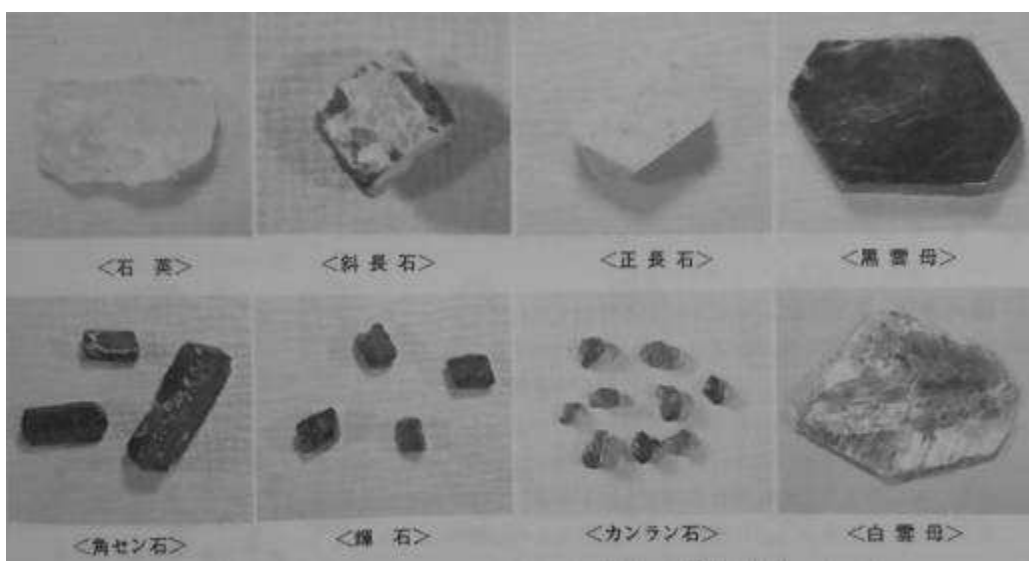
問 B 斜長石は、主に $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ と $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ を成分として含む固溶体であるが、高温のマグマから晶出するものほど $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ に成分が近く、低温のマグマから晶出するものほど $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ に成分が近い。同一の火成岩の中では、班晶は石基よりも高温の段階で晶出するので、石基を構成する斜長石よりも、 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ に近い。斜長石に限らず、石英を除く他の造岩鉱物も、石基と班晶の成分が異なっている。

問 C 花崗岩ができる時、石英は他の鉱物に遅れて、既に晶出している鉱物の間を埋めるような形で晶出するので、不規則な形となって、結晶面が見られない。このような状態を他形という。一方、流紋岩の班晶の石英は、マグマの大部分が液体の段階で晶出するので、結晶が自由に成長していて、石英本来の結晶面が見られる事が多い。このような状態を自形という。

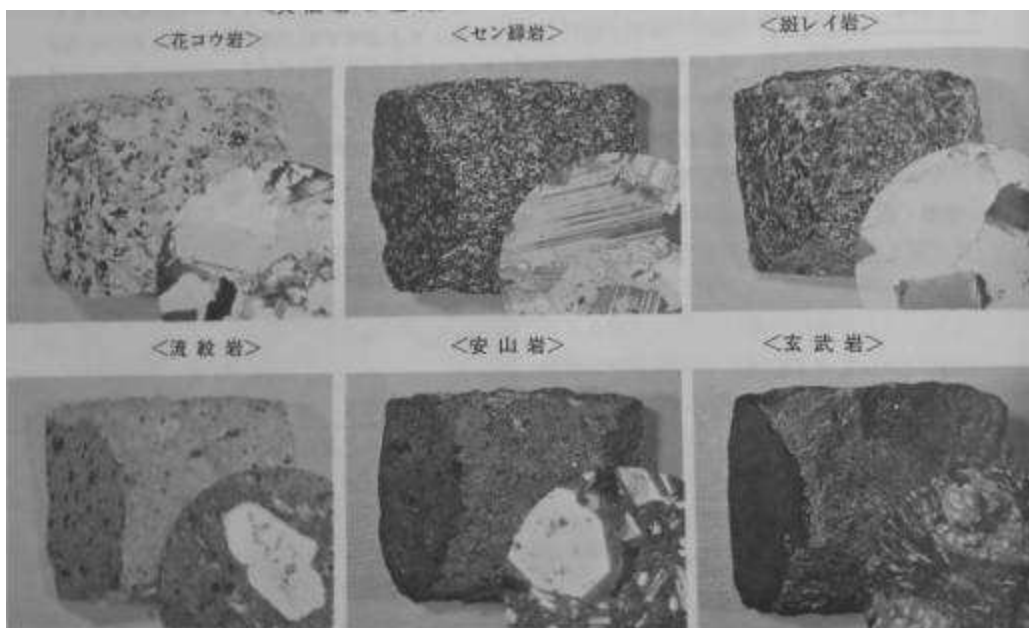
【参考】造岩鉱物

岩石を砕いて細かい粒状にすると、それぞれの粒が物理的にも化学的にも均一な性質を持つようになる。このような粒を**鉱物**という。岩石は鉱物の集合体である。単一の鉱物からなる岩石もあるが、通常、数種類の鉱物からできている。岩石を作っている鉱物を**造岩鉱物**という。主な造岩鉱物は以下である。

① 石英 ②斜長石 ③正長石(カリ長石) ④黒雲母 ⑤角閃石 ⑥輝石 ⑦カンラン石 ⑧白雲母
⑨方解石 ⑩緑泥石 ⑪磁鉄鉱 ⑫ザクロ石 ⑬燐灰石 ⑭赤鉄鉱 ⑮キン青石 ⑯紅柱石 ⑰ケイ線石
この中で、火成岩の主な造岩鉱物は①～⑦で、それ以外は堆積岩や変成岩に含まれる。



主な造岩鉱物



主な火山岩

【問題 2-02】 ケイ酸塩鉱物の化学組成

次の文を読み、以下の問A～Eに答えよ。

斜長石の組成式は $(\text{Ca}, \text{Na}) (\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$ である。この鉱物では原子数で $\text{Ca} : \text{Na} : \text{Al} : \text{Si}$ はいずれも一定ではないが、 $(\text{Ca} + \text{Na}) : (\text{Al} + \text{Si}) : \text{O}$ は $1 : 4 : 8$ であって、結晶構造はほぼ一定である。このことから、斜長石はソウ長石とカイ長石を端成分とする固溶体であると言われている。

Fe と **Mg** を含む同一のケイ酸塩鉱物の標本 2 個を化学分析して、その結果を酸化物の重量百分率で表したところ、下表のようになった。また、鉱物を構成する元素の原子量は次の通りである。 $\text{O} : 16.0$ $\text{Si} : 28.0$ $\text{Mg} : 24.0$ $\text{Fe} : 56.0$

酸化物	標本(1)	標本(2)
SiO₂	33.6	38.5
MgO	17.9	38.5
FeO	48.4	23.0
合計	99.9	100.0

分析表

問A カイ長石の組成式を記せ。なお、ソウ長石の組成式は $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ である。

問B 1 個の火山岩の標本を構成する班晶と石基とで、斜長石の化学組成にはどのような違いがあるか。

問C 分析表の鉱物の組成式を、上の文の斜長石と同じ形式で示せ。また、それを求めた過程も併せて記せ。

問D ケイ酸塩鉱物は SiO_4 (Si-O) 四面体の規則正しい配列によって構成されている。分析表の鉱物では、 SiO_4 四面体はどのように配列しているか。簡単に答えよ。

問E 分析表の鉱物が晶出しているマグマがゆっくり冷却するとき、この鉱物はマグマの成分の SiO_2 と反応して、これとは結晶構造の異なる鉱物ができる。この時の反応式を示せ。

解答

問 A $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

問 B 班晶の斜長石は石基のそれに比べて Ca に富む

問 C $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ (解答の導出過程は解説を参照)

問 D SiO_4 四面体が独立して配列し、Fe、Mg と結合している。

問 E $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4 + \text{SiO}_2 \rightarrow 2(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$

解説

問 A ソウ長石とカイ長石を端成分とする斜長石とソウ長石の化学組成がそれぞれ、 $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$ および、 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ として与えられていることから、カイ長石の化学組成は、 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ と推定できる。

問 B 玄武岩質マグマが冷却するとき、初期には Ca に富むカイ長石に近い斜長石が晶出し、温度が下るにつれて Na に富むソウ長石に近い斜長石が晶出する。班晶はマグマ溜まりで晶出し、石基の結晶はそのままマグマが噴出または貫入し、マグマの温度が低くなってから晶出する。従って、班晶の斜長石は石基の斜長石に比べて Ca に富んでいる。

問 C 原子量からこの鉱物を構成する酸化物の式量を求めると、 $\text{SiO}_2 = 60.0$ 、 $\text{MgO} = 40.0$ 、 $\text{FeO} = 72.0$ であるから、鉱物(1)および(2)を構成する酸化物のモル比は次のように求められる。

鉱物(1) $\text{SiO}_2 : \text{MgO} : \text{FeO} = 33.6/60.0 : 17.9/40.0 : 48.4/72.0 = 0.56 : 0.45 : 0.67 = 1.0 : 0.8 : 1.2$

鉱物(2) $\text{SiO}_2 : \text{MgO} : \text{FeO} = 38.5/60.0 : 38.5/40.0 : 23.0/72.0 = 0.64 : 0.96 : 0.32 = 1.0 : 1.5 : 0.5$

いずれの場合も、 $(\text{MgO} + \text{FeO}) : \text{SiO}_2 = 2 : 1$ であり、鉱物の組成式は $(\text{MgO}, \text{FeO})_2\text{SiO}_2$ となり、書き換えると、 $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ となる。これはカンラン石である。

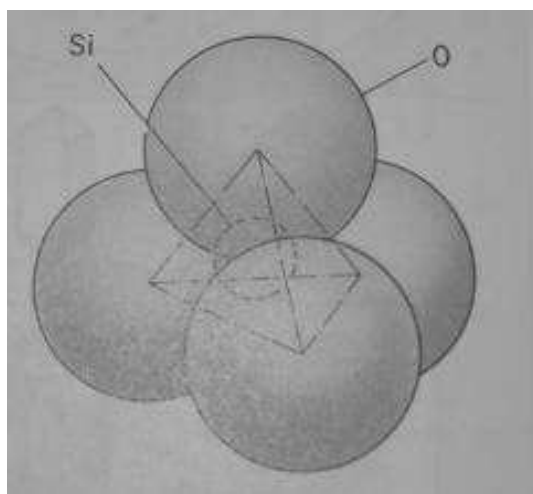
問 D カンラン石の組成式が $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ と表される事は、この結晶では SiO_4 四面体が独立して金属元素と結合している事を示している。

問 E マグマが冷却すると、マグマ内のカンラン石はマグマに含まれる SiO_2 と反応して輝石を生じる。

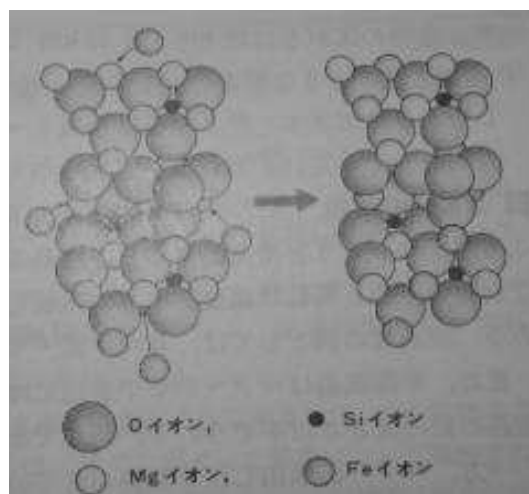
これを反応式で示すと、 $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4 + \text{SiO}_2 \rightarrow 2(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$ と表される。

輝石の組成が $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$ となっているのは、この結晶では SiO_4 四面体が隣り合った四面体と O 原子を共有して単一の鎖を形成している事を示している。

【参考】ケイ酸塩鉱物と固溶体

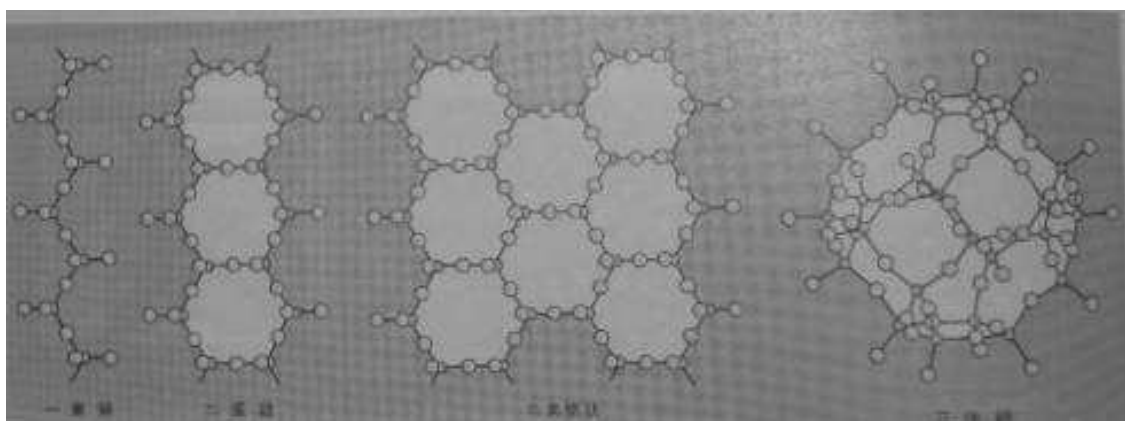


ケイ酸塩の結晶構造



カンラン石の内部構造

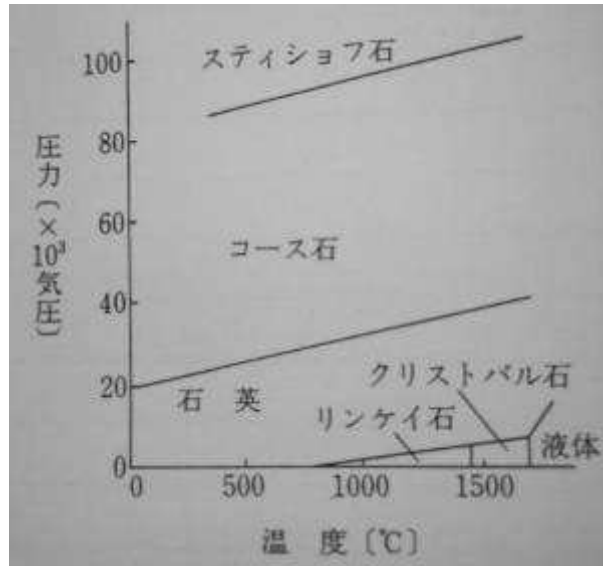
造岩鉱物の大部分は SiO_4 の正四面体(左上図)を主体とする**ケイ酸塩鉱物**である。 SiO_4 正四面体が単独に存在して、その周囲に金属元素が配置されているカンラン石(左上図)や、 SiO_4 正四面体が一重の鎖状になったもの、二重の鎖状になったもの、六角の網状になったもの、立体的に網状になったものというように分類されている。(下図) 石英は常に一定の化学式 SiO_2 で表される化学組成を持つが、カンラン石は鉄カンラン石(Fe_2SiO_4)とマグネシウムカンラン石(Mg_2SiO_4)の2つの成分鉱物が混じってできている。このような鉱物を**固溶体**という。 Fe 原子と Mg 原子のイオン半径はほぼ等しいので、結晶構造の中で入れ替わりやすいので、固溶体を生成する。 斜長石や輝石、カクセン石、黒雲母など、石英以外のケイ酸塩鉱物は、すべて固溶体である。



ケイ酸塩鉱物の構造

【問題 2-03】 ケイ酸塩鉱物と火成岩

下図は、各種のシリカ（ SiO_2 を化学組成とする鉱物）が、それぞれ、安定に存在できる温度と圧力の範囲を示したものである。 参考にしつつ、次の問 A～D に答えよ。



- 問 A コース石とステイショフ石は火成岩から産出する事がほとんど無い。 この理由を図によって、150～200 字で説明せよ。
- 問 B リンケイ石を産出する岩石名を一つ挙げ、リンケイ石がそこで形成される理由を、100～150 字で説明せよ。
- 問 C 石英は $\text{Si}\cdot\text{O}(\text{SiO}_4)$ 四面体によって構成されているが、化学組成は SiO_2 である。その理由を簡潔に説明せよ。
- 問 D 図に示された鉱物のうち、最も密度の大きなものの名称を書け。

解答

- 問 A コース石が 800°C のマグマの中で晶出したとすると、その圧力は図から約 3×10^4 気圧である。この圧力は深さ約 100km のものであって、アセノスフェアの上部に該当する。アセノスフェアで火成岩が形成される事はないので、コース石が火成岩から産出する事はない。コース石よりはるかに高圧下で安定的なスティショフ石となると、さらにマグマの中で晶出する可能性は小さい。
- 問 B 安山岩 (理由) リンケイ石が安定して存在できるのは 1000°C 前後で、圧力が非常に低いところである。また、シリカ鉱物を含むのは酸性岩か中性岩であるが、酸性岩は比較的低温で形成される。従って、リンケイ石は地表、またはその付近で形成する安山岩の中に産出する可能性が高いと考えられる。
- 問 C 石英の結晶では SiO_4 四面体の O 原子は全て 2 個の Si 原子によって共有されているので、1 個の Si 原子と結合している O 原子は実質的に 2 個になる。従って、石英の化学組成は SiO_2 になる。
- 問 D スティショフ石

解説

問 A 問題の図は、マグマからコース石が 800°C で晶出するとすれば、その圧力は約 3×10^4 気圧でなければならないことを示している。地球を構成する物質の密度を 3.0g/cm^3 と仮定すると、地球内部では、内部に向かって約 300 気圧/ km の割合で圧力が増加する。従って、 800°C のマグマからコース石が晶出するとしたら、その深さは 3×10^4 気圧 / 300 気圧/ km = 100km となる。

この深さはアセノスフェアの上部であって、ここで火成岩が形成される事は考えにくい。コース石よりさらに高圧下で安定なスティショフ石は、マグマから晶出する可能性はさらに小さい。現在、コース石が発見されているのは隕石孔だけである。ここでは隕石の衝突によって瞬間的に高圧な環境が生じ、このときに石英から転移によってコース石が生成したと考えられている。

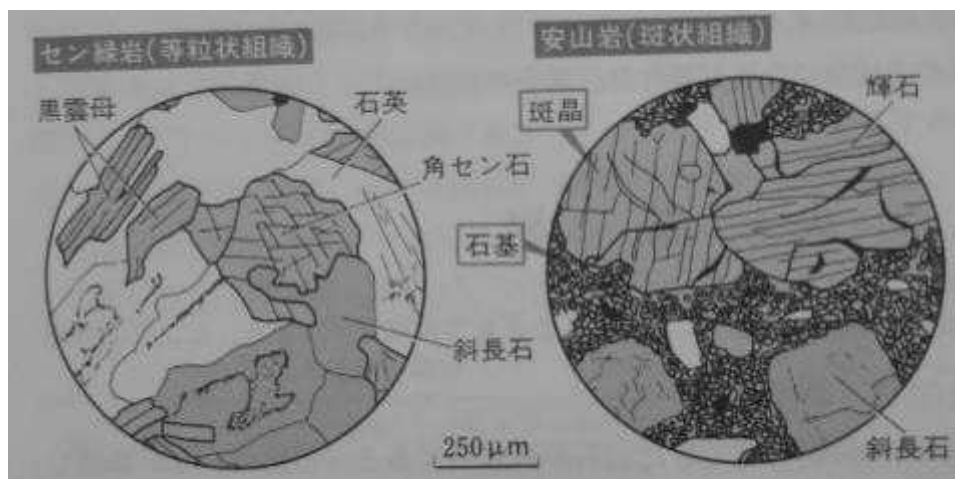
問 B 図によると、リンケイ石が形成されるのは 1000°C 前後の低圧なところである。これはリンケイ石が地表、または極めて浅い部分でマグマから晶出することを示している。花崗岩は深成岩であって、地殻の深い部分で形成されるので、この中にリンケイ石が含まれていることは考えにくい。また、流紋岩は地表、またはその付近で形成されるが、酸性岩が形成されるのは比較的低温であるから、この中にリンケイ石が含まれている可能性も低い。結局、リンケイ石を含んでいるのは、低圧下（地表、または地表付近）で、しかも比較的高温下で形成される岩石であると考えられる。リンケイ石はこの条件を満たす安山岩や、地殻にある空洞で晶出したものが多い。

問 C ケイ酸塩は SiO_4 四面体によって構成されており、この中で 1 個の Si 原子は 4 個の O 原子と結合している。しかし、石英の中では SiO_4 四面体は立体網状に結合しており、全ての O 原子は隣り合う 2 個の Si 原子と結びついていて、実質的に Si 原子と結合している O 原子はその半分である。つまり石英では実質的に 2 個の O 原子が 1 個の Si 原子と結合しており、その化学式は SiO_2 になる。

問 D 幾つかの鉱物が他形関係にあるとき、温度を一定とすると、高压下で安定なものほど密度が大きい。従って、図の SiO_2 を成分とする他形ではスティショフ石の密度が最大である。

【参考】火成岩の組織

マグマが冷却すると、熔融液の中から鉱物の結晶が現れる。地下深くゆっくり冷えて固まると、個々の結晶がほぼ等しい大きさの粒子になる。このような岩石を**深成岩**といい、その組織を**等粒状組織**という。深成岩の例としては、**花崗岩・セン緑岩・斑レイ岩**などがある。半深成岩はマグマがやや急激に冷却固結してできたので、成分鉱物は結晶の粒の大きさが不揃いで、**斑状**である。**石英斑岩・ヒン岩・輝緑岩**などが該当する。一方、マグマが噴出したり、地表近くで冷え固まると、鉱物の結晶が十分成長できず、非結晶質になってしまう。マグマが地表に出る前に、**マグマ溜まり**で一時的に結晶が成長するので、結晶部分である**斑晶**と非結晶部分である**石基**が混在した**斑状組織**をつくる。斑状組織をもつ岩石を**火山岩**といい、**流紋岩・安山岩・玄武岩**などがある。

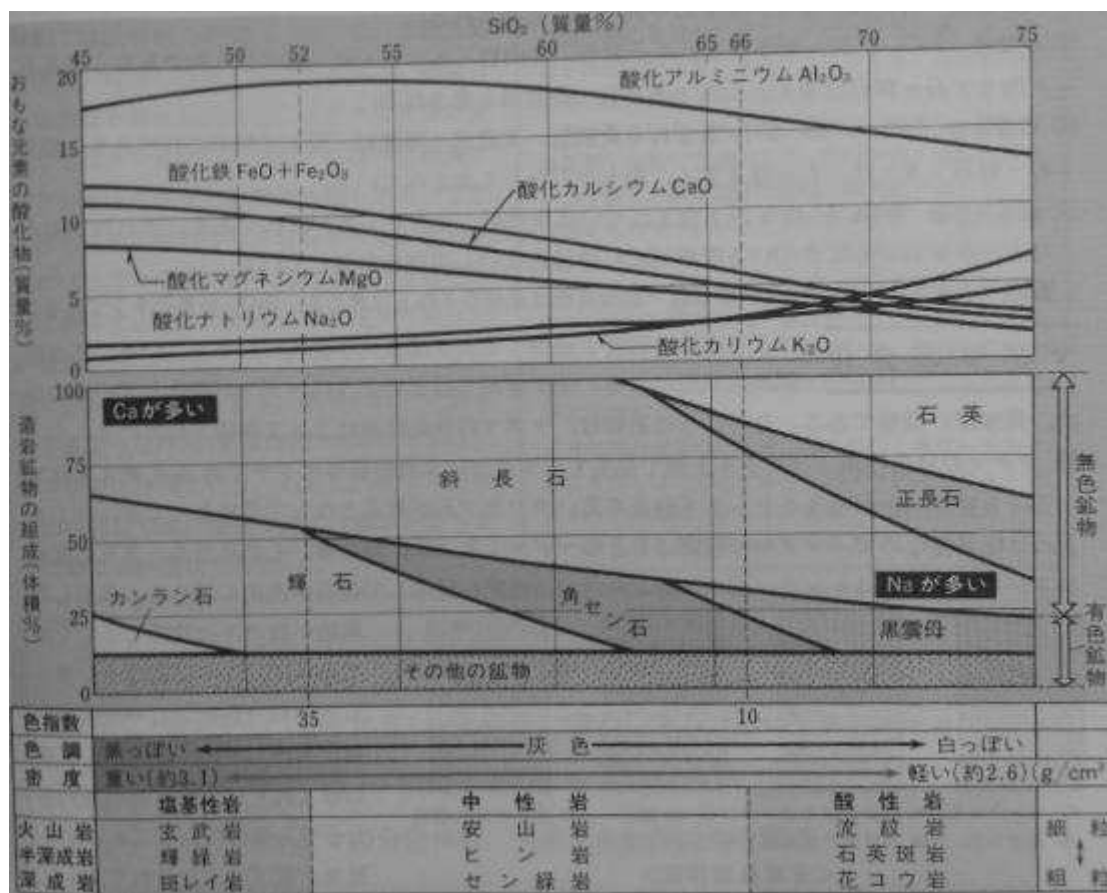


火成岩の組織

【参考】火成岩の化学組成

火成岩を作っている造岩鉱物は、ほとんどがケイ酸塩鉱物であり、化学分析すると SiO_2 が最も多い。他に、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}$ 等の成分も含まれており、 SiO_2 との重量百分率の関係は下図のようになる。 $\text{FeO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{CaO}$ は有色鉱物に、 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}$ は無色鉱物に含まれる。

- 1) 酸性岩： SiO_2 が 66%以上含まれる火成岩。 流紋岩・石英斑岩・花崗岩が該当し、石英・正長石・斜長石が多く、黒雲母や角閃石も含まれる。
- 2) 中性岩： SiO_2 が 52~66%含まれる火成岩。 安山岩・ヒン岩・セシ緑岩が該当し、斜長石・角閃石・輝石が多く、石英・正長石・黒雲母も含まれる。
- 3) 塩基性岩： SiO_2 が 45~52%含まれる火成岩。 玄武岩・輝緑岩・斑レイ岩が該当し、斜長石・輝石・カンラン石が多く、角閃石も含まれる。
- 4) 超塩基性岩： SiO_2 が 45%以下の火成岩。 カンラン岩が該当し、カンラン石からできている深成岩で、暗緑色、黒緑色を呈している。

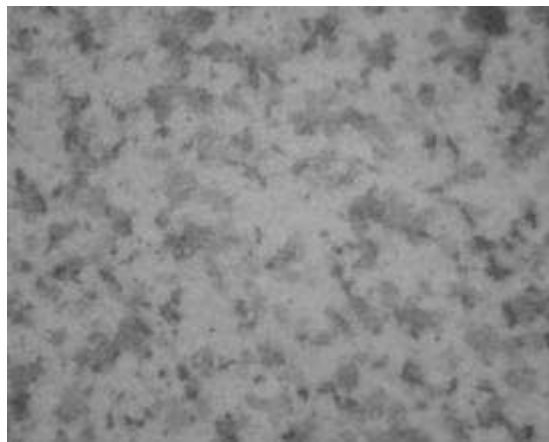


火成岩の化学組成（有色鉱物の体積%を色指数という）

【問題 2-04】 花崗岩の生成と性質

花崗岩は大陸地殻に最も多い岩石である。 この岩石に関して、次の問A～Cに答えよ。

- 問A 様々な成分の火成岩ができる原因として、マントルで発生するマグマの分化が考えられている。 しかし、マグマの分化によって、我々の周囲にこれほど多くの花崗岩が存在する事を説明できない。 多くの花崗岩の成因についてどのような事が考えられるか、60～80 字で説明せよ。
- 問B 流紋岩を構成する石英には結晶面が見られることが多い。 しかし、花崗岩を構成する石英にはこれがほとんど見られない。 この理由を 60～80 字で説明せよ。
- 問C 花崗岩を構成する有色鉱物は主に黒雲母である。 黒雲母は薄片状に割れやすい事が知られている。 この性質とケイ酸塩としての黒雲母の結晶構造との関係を 50 字程度で説明せよ。



花崗岩

解答

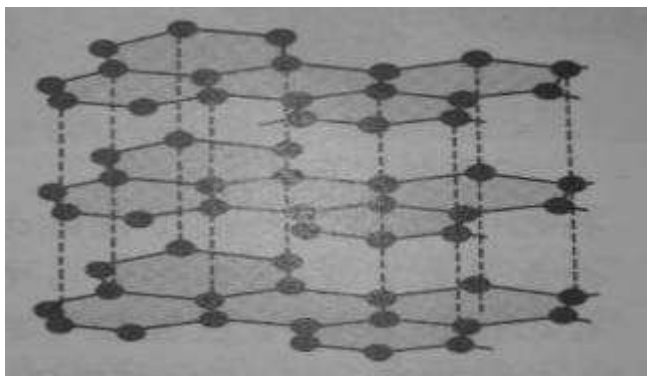
- 問A 造山運動に伴って、直接発生する花崗岩質マグマから形成されたり、砂岩など SiO_2 に富む岩石から変成作用によって形成されると考えられている。
- 問B 流紋岩の班晶は液体の中で自由に結晶が成長したものであるが、花崗岩の石英は他の鉱物の隙間で晶出したので、結晶の自由な成長が妨げられたから。
- 問C 黒雲母の結晶では $\text{Si}\cdot\text{O}$ 四面体が平板上に結合しているが、上下に重なるこの平板間の結合が弱いから。

解説

問A マントルを構成するカンラン岩質の岩石の部分融解によって発生する本源マグマは玄武岩質であるから、この分化によって生じる火成岩の大部分は玄武岩であって、生じる花崗岩はわずかである。従って、大陸を構成する花崗岩のほとんどはマグマの分化以外の過程によって生じたものである。一つの過程として、地殻の下部またはマントルで直接、花崗岩質マグマが発生し、これによって生じるという考え方がある。もう一つは、砂岩やチャートなど SiO_2 に富む堆積岩が地球内部で変成作用を受け、これに地球内部から上昇する水の運ぶ物質が加わって、花崗岩になるとする考え方がある。これは**花崗岩化作用**と呼ばれている。

問B 花崗岩質マグマの大部分が液体の時に石英が析出する場合は、その結晶は自由に晶出するので本来の結晶面が生じる。流紋岩の班晶の石英がこれである。一方、多くの結晶が析出し、液体が少なくなってから晶出する石英は、他の結晶に妨げられて本来の結晶面ができない。花崗岩の石英がこれである。

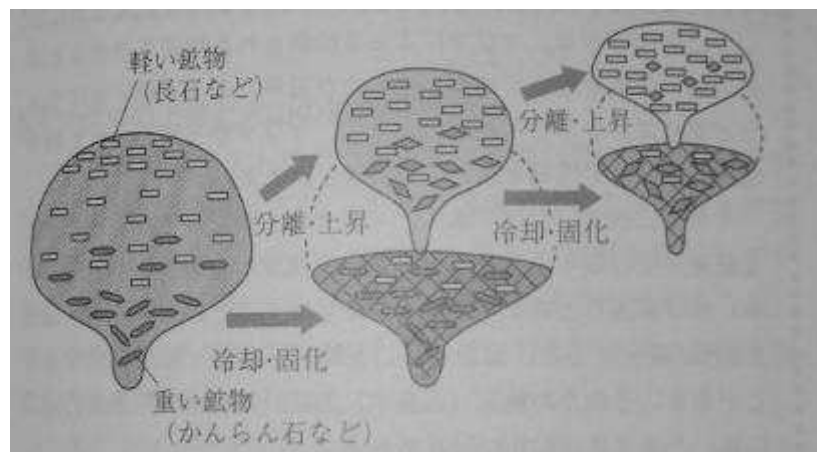
問C 黒雲母は $\text{Si}\cdot\text{O}$ 四面体が平板状に結合する事によって形成される。この平板間では、隣り合った $\text{Si}\cdot\text{O}$ 四面体は O 原子を共有する事によって固く結合しているが、上下に重なる平板間では、四面体が O 原子を共有していないので結合が弱い。黒雲母が薄く剥がれるのはこの為である。



黒雲母の内部構造

【参考】 マグマの結晶分化作用と花崗岩化作用

マントル上部で生じるマグマは、玄武岩質のマグマであると考えられている。 液状のマグマが冷却すると、まず融点の高いカンラン石が結晶となって晶出してくる。 カンラン石は塩基性なので、マグマの残液は以前より SiO_2 の割合が大きくなる。 更に温度が下るとカンラン石の一部とマグマの残液が反応して輝石が晶出する。 晶出した鉱物は液の下に沈降するため、カンラン石→輝石→角閃石→黒雲母の順に晶出する。 一方で、斜め長石は別の系列で分化し、高温ほど Ca に富み、温度が低下するにつれて Na に富む斜長石が多くなる。 この2つの反応系列が合体して、正長石、白雲母、石英などを晶出する。 このような結晶反応を**結晶分化作用**という。



結晶分化作用

しかし、全ての火成岩が、玄武岩質マグマの分化作用で形成されたとは考えられない点がある。 底盤をつくる深成岩の 95%は花崗岩であるのがその一例である。 玄武岩質マグマが地殻内部を移動する時、通り道にある物質を溶かし込んで、マグマの成分が変化し、花崗岩をつくるような花崗岩質マグマが形成されるとする説がある。 あるいは、砂岩などの堆積岩が熱の作用によって変成してできた変成岩であるとする説もある。 後者の作用を特に、**花崗岩化作用**という。

【問題 2-05】 花崗岩、流紋岩の造岩鉱物

花崗岩と流紋岩に関して、以下の問A～Gに答えよ。

- 問A 玄武岩などに比べると、花崗岩と流紋岩には Na_2O と K_2O が多く含まれている。
これらの成分はそれぞれ、花崗岩や流紋岩の中でどの鉱物を構成しているか、該当するものを全て挙げよ。 解答は、 CaO ：方解石 のように記せ。
- 問B 流紋岩には流状構造（流理）が見られることが多い。これが生じる原因を簡潔に説明せよ。
- 問C 流紋岩の班晶と花崗岩を構成する石英の外形にはどのような違いがあるか、その原因とともに簡潔に答えよ。
- 問D 日本列島に分布する花崗岩や流紋岩にはどの地質年代に形成されたものが多いか。紀で示せ。
- 問E 花崗岩の産状として、最も多いのは何か。次の中から一つ選べ。
岩脈 岩床 餅盤 底盤(バリソス) 溶岩
- 問F 花崗岩や流紋岩の風化生成物の一部が溶脱された後に、最も多く残留する金属酸化物の化学式を示せ。
- 問G 花崗岩や流紋岩の風化生成物が流される河床に見られる砂粒として、最も多い鉱物名を記せ。

解答

- 問A Na_2O : 斜長石 K_2O : カリ長石、黒雲母
- 問B 流紋岩を形成するマグマは粘性が大きく、混ざり合わないので、均質化しない状態で流れるから。
- 問C 花崗岩を構成する石英は他の鉱物より遅く晶出するため、結晶の成長が妨げられて、他形を示すが、流紋岩の班晶の石英は、液体の中で晶出し、自形を示すことが多い。
- 問D 白亜紀
- 問E 底盤（バリソス）
- 問F Al_2O_3
- 問G 石英

解答

問A 酸性岩は塩基性岩に比べて、 SiO_2 の他、 K_2O と Na_2O を多く含んでいる。 Na_2O は主に斜長石に含まれており、 K_2O はカリ長石や黒雲母に含まれている。

問B 流紋岩質のマグマは粘性が大きく、粘土のような状態であって、その成分が均質化しにくい。このようなマグマが流れる事によって、流紋岩の流状構造ができる。

問C 班晶は液体の中で晶出するので、自由に結晶が成長し、自形を示すようになる。しかし、花崗岩の石英は、他の鉱物に遅れて晶出しており、結晶の自由な成長が妨げられて、他形となったのである。花崗岩の中でも、黒雲母は半自形を持つことが多い。

問D 日本列島の酸性岩類の多くは白亜紀に生成されたものである。

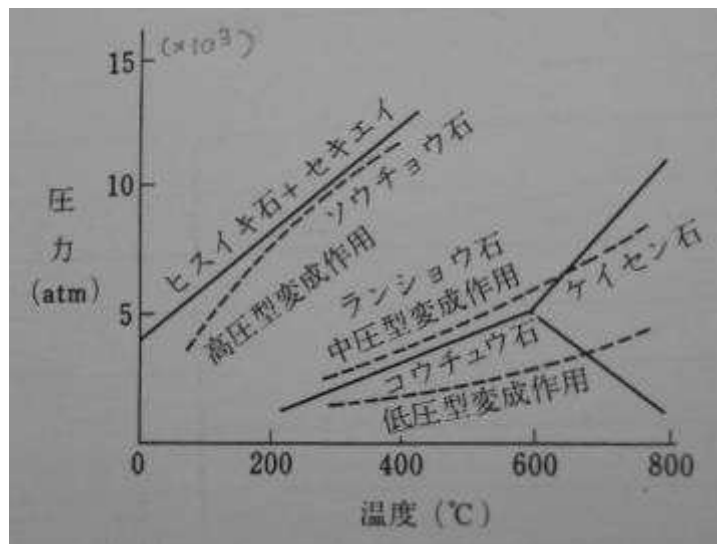
問E 花崗岩のほとんどは底盤(バリソス)を形成している。

問F 花崗岩を構成する金属酸化物の中で、最も水に溶けにくいのは酸化アルミニウム(Al_2O_3)で、これは他の成分が溶脱された後に残留し、ボーキサイトなどの風化残留鉱床をつくる。

問G 花崗岩を構成する鉱物のうち、最も風化しにくいのは石英であり、花崗岩の風化生成物が流れるときに砂粒として集まる。

【問題 2-06】 変成岩と変成作用

地球内部では深さを増すほど高圧になると同時に高温になる。深さに応じて圧力を増す割合は地域差が少ないが、高温になる割合は地域によって著しく異なっている。つまり、ある地域では地下深所でも比較的低温であるが、ある地域では浅いところでもかなり高温である。従って、同じ泥質岩が広域変成作用を受けるにしても、それによって形成される鉱物は地域によって著しく異なる。このことから変成作用を高圧型、中圧型、低圧型の3つに分けている。これら3つの型の変成作用を起こす平均的な温度・圧力とそこで生じる鉱物とを図示すると、下図のようになる。



高圧型の変成作用では、ソウチョウ石 ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) がヒスイキ石+石英になる事があり、中圧型の変成作用では、 Al_2SiO_5 を主成分とする鉱物はランショウ石またはケイセン石に、低圧型の変成作用では、同じ成分の鉱物はコウチュウ石またはケイセン石になる。この図を参考にして、次の問AからGに答えよ。

- 問A ヒスイキ石の化学式を示せ。
- 問B ヒスイキ石は化学的に何という塩に属するか。 また、ヒスイキ石の結晶構造はどのようなになっているか。
- 問C ケイセン石を含む代表的な岩石の名称を示せ。
- 問D ヒスイキ石+石英 を含む代表的な岩石の名称を示せ。
- 問E 広域変成岩の分布地域を変成帯という。 3つの型の変成帯のうち、花崗岩のバソリス（底盤）と共存することが多いのはどれか。 また、日本列島で中央構造線の近くにあるその変成帯の名称を示せ。
- 問F 図によると約 8000 気圧、200℃で起こるのは、高圧型の変成作用である。 ここの深さは約何 km か。 但し、地表の温度を 0℃とせよ。 また、この地域の地下増温率(地温勾配)の特徴について、どのような事がいえるか。 但し、地殻の密度は 2.8g/cm³ とする。
- 問G 図に示された Al_2SiO_5 を主成分とする鉱物のうち、ホルンフェルスにはほとんど含まれることのないものを1つ選べ。

解答

問 A $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$

問 B ケイ酸塩

単一の鎖状に結合した SiO_4 四面体と金属の結合によって構成される。

問 C 片麻岩 問 D 結晶片岩 問 E 低圧型 領家変成帯

問 F 岩石の密度を 2.8g/cm^3 とすると、地下の圧力は約 280atm/km の割合で増大し、 8000atm に対応する深さは、 $8000/280 \div \underline{29\text{ km}}$ である。

地下 29km の温度が 200°C とすると、地表の温度を 0°C として、

$200^\circ\text{C}/29\text{km} \div \underline{7^\circ\text{C/km}}$ である。

この値は、地表付近の地下増温率の平均値 30°C/km に比べて非常に小さい。

問 G ランショウ石

解説

問 A 高圧下ではソウチョウ石 ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) は、ヒスイキ石 + 石英 (SiO_2) に変わる。従って、 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 = \text{ヒスイキ石} + \text{SiO}_2$ であるから、ヒスイキ石の化学式は $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ となる。

問 B ヒスイキ石を含めて、輝石類はカンラン石やカクセン石などと共にケイ酸塩である。ケイ酸塩の結晶は、全て SiO_4 四面体によって構成されているが、輝石類は単一の鎖状に結合した SiO_4 四面体と金属によって構成されている。

問 C 図から分かるように、ケイセン石は高温 (600°C 以上) で安定であるから、ケイセン石を含む岩石は、深さの割に高温な環境で形成されたものである。このような岩石は変成岩では低圧型のもので、代表的なものが、片麻岩である。

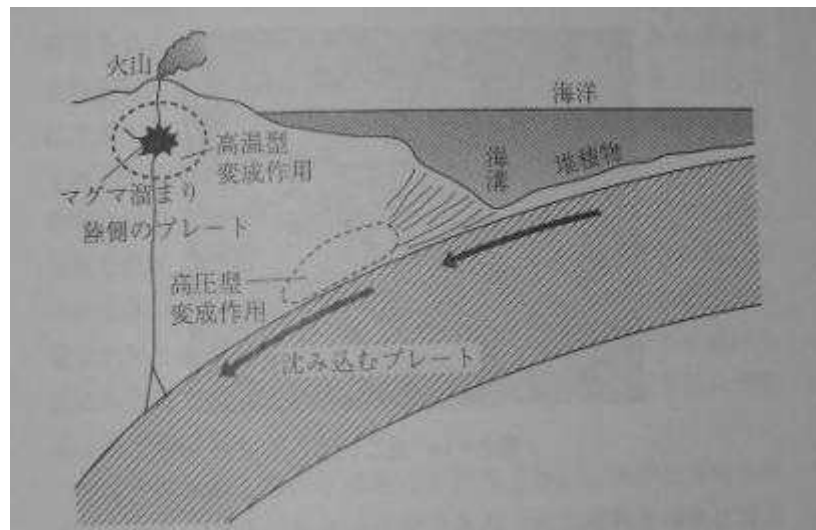
問 D 図から分かるように、ヒスイキ石は低温かつ高圧な環境で安定である。従って、これを含む岩石は高圧型の岩石であって、代表的なものが結晶片岩である。

問 E マグマは高温であるから、花崗岩が貫入している変成帯は深さの割に高温で形成されたものである。このような変成帯は深さの割に高温な低圧型であり、これを構成する主な変成岩は片麻岩である。中央構造線の近くにあるこのような変成帯は領家変成帯である。

問 G ホルンフェルスは、接触変成岩で、マグマの貫入によって生じ、広域変成岩と比べると、地表近く、低圧化で形成される。マグマに近い部分を除き、低温・低圧下で安定的な鉱物が多く含まれる。

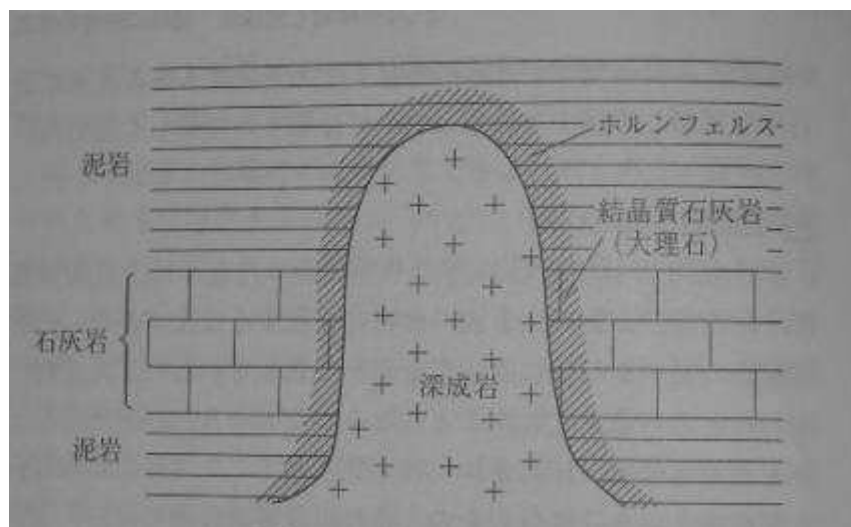
【参考】広域変成作用と接触変成作用

プレートが衝突したり、沈み込んだりする境界付近では、地表付近の岩石が地下深く引きずり込まれ、そこでは圧力が増す為に高压条件下で安定な鉱物ができる。地下に引き込まれた岩石は、強い力でつぶされ、引き伸ばされる為、結晶が成長する方向が決まってしまう。結果、鉱物が一方向に伸びたり、きちんと配列して縞模様になって見えたり、薄く剥げる片状組織を示す変成岩が生じる。また、マグマの活発な場所では、圧力に加え、熱による影響も強く表れた変成作用を受ける。このような変成岩はプレートの境界に沿った広い範囲で見られるので、**広域変成岩**という。



広域変成岩の生成

マグマが地下で滞留したり、岩盤を割って上昇すると、マグマに接触した周囲の岩石が、その熱にさらされ、元素の移動が促進され、鉱物の再結晶が進んで、大粒の鉱物に成長したり、高温で安定な鉱物ができたり、マグマ中の元素と周囲の岩石の元素が化学反応して新たな鉱物を生じたりする。このような特徴を持つ岩石を**接触変成岩**という。



接触変成岩の生成

【問題 2-07】 風化作用と続成作用

砂岩は大陸周辺の海底で生成される事が多く、主に大陸から河川によって運び出される碎屑物によって構成されている。しかし、その化学組成は、大陸地殻を構成する主な物質である花崗岩と比べると、著しく異なっている。その様子を酸化物の重量比で示すと、下表のようになる。表を参考にして、問A～Cに答えよ。

問A 砂岩には花崗岩に比べて SiO_2 が多く含まれている。それは砂岩に何という鉱物、もしくはどのような岩石片が多く含まれる事によるのか。それらを記した上で、砂岩にそれらが含まれた過程を簡潔に説明せよ。

問B 砂岩には花崗岩に比べて、 CaO も多く含まれている。それは砂岩に何という鉱物が多く含まれている事によるのか。その鉱物名を示した上で、砂岩にその鉱物が含まれる過程を簡潔に説明せよ。

問C 砂岩には構成物質として、長石を多く含むものと、これを全く含まないものがある。この原因を 100～150 字で説明せよ。

酸化物名	花崗岩	砂岩
SiO_2	70.2	78.9
TiO_2	0.4	0.3
Al_2O_3	14.5	4.8
Fe_2O_3	1.6	1.1
FeO	1.8	0.3
MnO	0.1	0.0
MgO	0.9	1.2
Na_2O	3.5	0.5
K_2O	4.1	1.3
CaO	2.0	5.5
H_2O	0.8	1.6
P_2O_5	0.2	0.0
CO_2	0.0	5.0

単位は%

解答

問A 石英および SiO_2 を主成分とする岩石片

過程： これらは物理的・化学的に安定で、風化によって水に溶けた成分、及び粘土鉱物になった物質と分離して堆積した。

問B 方解石

過程： 続成作用の過程で、海水や地下水の運ぶ Ca イオンが、 CaCO_3 を化学組成とする方解石として粒子間で晶出した。

問C 侵食と運搬が急速に進むと、風化作用が働く期間が短いので、比較的風化し易い長石も、風化しにくい石英と共に砂粒になって堆積するが、侵食と運搬が緩やかに進むと、長期間の風化作用によって、長石は分解して一部は水に溶け、一部は粘土鉱物になって、石英だけが砂粒となって堆積するから。

解説

問A 鉱物では石英、岩石では SiO_2 を主成分とするチャートなどは風化しにくい。一方、有色鉱物や長石類は、化学的風化によって、一部は水に溶け、一部は粘土鉱物になる。従って、地表が風化して生じる砂粒の多くは、石英とチャートなど SiO_2 を主成分とする岩石片である。従って、砂岩には花崗岩よりも多くの SiO_2 が含まれている。

問B 岩石に含まれる Ca を含む鉱物は風化によって分解し、 Ca イオンは水に溶けて海に運ばれる。これが続成作用の時、方解石 (CaCO_3) として砂粒の間に晶出して岩石を固化する。なお、続成作用に際しては、水によって海に運び込まれる SiO_2 も石英として晶出する。

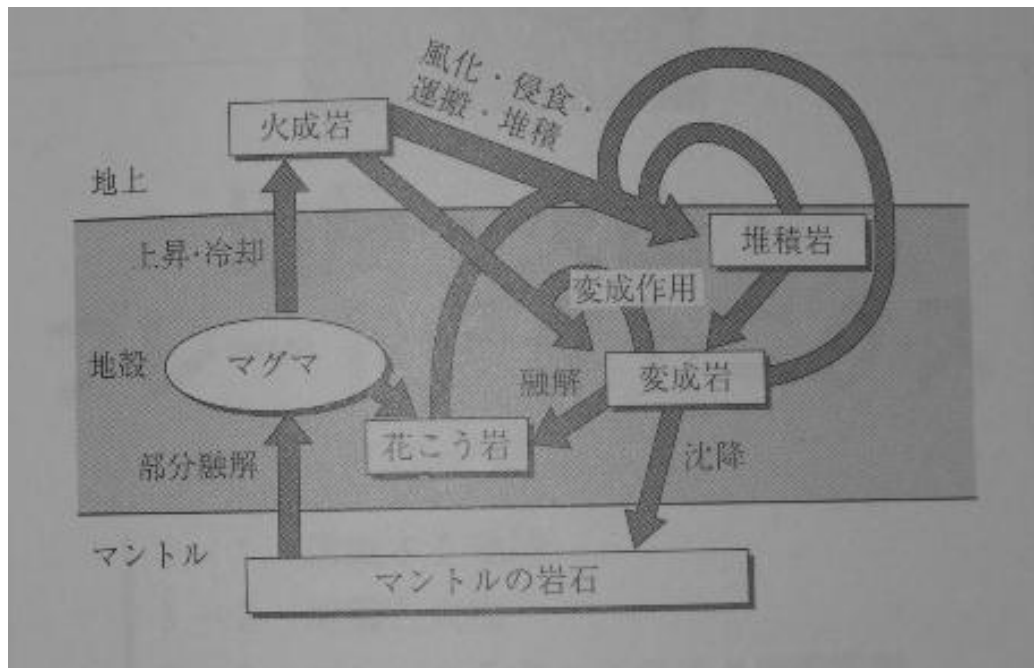
問C 造山帯の山地では侵食が激しいので、風化作用の働く時間が短く、風化しやすい鉱物まで砂粒の状態で砂岩を構成するようになる。しかし、楕状地のような起伏の緩やかな地域では侵食が緩やかで、風化作用の働く時間が長いので、石英を除く鉱物の多くは分解して水に溶けたり、粘土鉱物になったりして、主に石英、及びこれとほぼ同じ成分の岩石だけが砂粒となって砂岩になる。従って、砂岩はその堆積環境を示すものとして重要である。

【参考】岩石の循環

地球上の火成岩は上部マントルのカンラン岩が部分融解して生じたマグマからできている。マグマが浮力で上昇し、地表付近で冷却されて火成岩になる。マグマの成分や冷却のされ方で様々な火成岩が生成し、地殻の大半を占める。地表に露出した岩石は、日光や風雨にさらされ風化し、礫や砂や泥、イオン成分、粘土などに分解され、水や風に運ばれて別々に堆積し、堆積岩になる。その中には、海水から沈積した鉱物や生物の遺骸も含まれるが、こうした沈殿物の元になる海水中のイオンは、岩石から水に溶け出した様々な成分の蓄積である。

地表の岩石が、地下に運び込まれると、高圧を受けて変成岩になり、マグマに長時間さらされると、熱により変成作用を受ける。解けてマグマとなり、花崗岩に生まれ変わる場合もある。マントルから地殻・地表へとマグマが上昇し、地殻からマントルへはプレートの沈み込みによって戻される。

いずれの場合も、岩石の成分が移動して別の岩石になるという点で、岩石の輪廻を表している。



岩石の循環

【問題 2-08】 核燃料物質の地層処理と絶対年代の確定

以下の、問 A、B に答えよ。

問 A 次の文中の（ ）に入る年数を答えよ。

アフリカ、ガボン共和国のオクロー地区にある天然原子炉の遺跡の研究は、放射性廃棄物の処理法に重要な示唆を与える。天然原子炉とは、過去に自律的な核分裂反応が起こっていたことが同位体比からわかるウラン鉱床のことである。天然原子炉の知られている唯一の場所は、ガボンのオートオゴウェ州オクローにある 3 つの鉱床で、数十万年にわたって、平均で 100 kW 相当の出力の反応が起きていた。

ピッチブレンド(U_3O_8) を燃料とし、水(H_2O) を減速材とする原子炉は、ウランの同位体で核分裂を起こす ^{235}U が一定数以上なければ運転できない。現在のウラン鉱石中のウランの大部分は ^{238}U で、燃料になる ^{235}U が 0.7% しか含まれないので、ピッチブレンドと水をどのように配置しても連鎖反応は起こらない。しかし、 ^{235}U の半減期は約 7 億年で短く、 ^{238}U の半減期は約 45 億年と長いので、時間の経過につれて存在比が変わっていく。今から（ ）年前には ^{235}U が約 3% あったので、ピッチブレンドと水の原子炉が実現されていた。

問 B 次の文中の空欄に入れるのに最も適切な語句を、語群 a ～ e から選べ。

但し、同じ語句を何度も使用してよい。

原子炉の中で、核燃料物質が分裂してできる核種は多種多様であり、不安定な放射性同位元素も多く、それらが生物の居住圏に拡散すると危険である。放射性廃棄物を安全な場所に隔離する技術について考える。先の東日本大震災に伴う福島原発事故の後処理と並んで、使用済核燃料の処理も緊急かつ重大な課題である。

隔離に際し、まず揮発や流出のおそれがないように固体にしておく。つまり人工の岩石をつくる。(1)のように単一の鉱物でできている岩石の化学組成は比較的単純になってしまうので、一種類の結晶だけでは廃棄物に含まれる多様な核種を取り込むことはできない。天然における(2)や(3)などのように、数種の鉱物の組合せからなる人工の岩石をうまく作って全ての放射性核種を結晶中に固定する研究が行われている。一方、(4)のような非晶質の固体には原子の配列に周期性がないので、様々な元素が混ざって存在する事ができる。多くの核種を単一のガラス固体中に入れることは可能である。安山岩や(5)などでしばしば見られるように、結晶とガラスの両方を含む固体化も研究されている。

固体化に適当な容器に入れ、それを安定な地層深く埋める事が考えられている。例えば、北アメリカ、ヨーロッパの盾状地の(6)の岩体中への処分などである。しかし、岩盤が安定していても地下水が流れてくると、化学的にかなり強い容器でも長い期間には溶解してしまう。固化体の性状も水に成分が溶け出しにくいようにしておかなければならない。また、容器を収納した区域の周囲の水の流れを止めることも肝要である。

語群	a: 石灰岩	b: 花崗岩	c: 斑レイ岩
	d: 黒耀岩	e: 流紋岩	

解答

問 A 17 億年 (解答の導出過程は解説を参照)

問 B 1 : a 2 : b 3 : c (2、3は順不同)
4 : d 5 : e 6 : b

解説

問 A t 年前に ^{235}U が全体の 3%であったとすると、その時 ^{238}U は 97%であった。現在、 ^{235}U が全体の 0.7%であるから、 ^{238}U は 99.3%である。 T 年前の ^{238}U の量を N とすると、当時の ^{235}U の量は $3N/97$ であり、現在の ^{238}U の量を N' とすると、 ^{235}U の量は $0.7N'/99.3$ である。

^{238}U の半減期は約 45 億年、 ^{235}U の半減期は 7 億年であるから

$$N' = N(1/2)^{\{t/(4.5 \times 10^9)\}} \quad \cdots \quad \text{①}$$

$$0.7N'/99.3 = (3N/97) \times (1/2)^{\{t/(7 \times 10^8)\}} \quad \cdots \quad \text{②}$$

$$\text{①} \div \text{②} \text{より、} \quad 0.7/99.3 = 3/97 \times (1/2)^{\{t/(7 \times 10^8)\} - \{t/(4.5 \times 10^9)\}}]$$

$$(1/2)^{\{t/(7 \times 10^8)\} - \{t/(4.5 \times 10^9)\}}] \doteq 1/4 = (1/2)^2$$

$$\text{従って、} \{t/(7 \times 10^8)\} - \{t/(4.5 \times 10^9)\} = 2 \quad t \doteq 1.7 \times 10^9 \quad \underline{17} \text{ 億年}$$

問 B 石灰石は CaCO_3 が大半で、化学組成が単純であり、多様な核種を取り込めない。選択肢の中で、非晶質の固体は黒耀石である。安山岩や流紋岩などの火山岩は結晶とガラス成分を両方含む。楯状地は古く先カンブリア時代に成立した安定地塊で、古生代以後の堆積岩類をほとんど載せていない地域。選択肢の中では花崗岩を含んでいる。

【参考】放射線の崩壊と半減期

^{238}U や ^{226}Ra などの不安定な原子核が、自発的に別の原子核に変わる時、大きなエネルギーをもった放射線を出す。この現象を**放射性崩壊**といい、自発的に放射線を出す能力を**放射能**という。放射性崩壊には **α 崩壊**、 **β 崩壊**、 **γ 崩壊**の3種類がある。

α 崩壊： 原子核が He の原子核である α 粒子を放出して別の原子核に変わる現象。原子番号が2、質量数が4だけ減少する。この時放出する放射線を **α 線**という。

β 崩壊： 原子核中の中性子 n が陽子 p と電子 e に変化し、その電子が放出される現象。原子番号が1だけ増加し、質量数は変わらない。この時放出される放射線を **β 線**といい、大きなエネルギーを持つ電子である。

γ 崩壊： 原子核には原子同様、量子力学が適用され、とびとびのエネルギー準位が存在する。原子核がエネルギーの高い励起状態から、低い基底状態に落ちる時、そのエネルギー差に等しい **γ 線**を放出する。 γ 線はX線より波長の短い電磁波で、崩壊による原子番号や質量数の変化はない。

一般的に、原子核が崩壊するかどうかは、その原子核特有の確率で決まる。 P 個の同種の原子核がある時、一つの原子核が単位時間内に崩壊する確率を λ とすると、崩壊速度(単位時間崩壊数) I は

$$I = -dP/dt = \lambda P \cdots \textcircled{1} \quad (\text{崩壊速度が正の時、原子核数は減少するので、マイナスがつく})$$

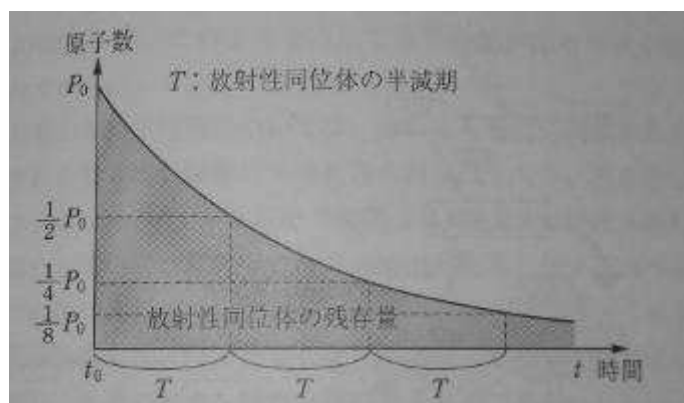
$$\int (1/P)(dP/dt)dt = -\int \lambda dt \quad \log P = -\lambda t + C \quad (C \text{ は積分定数})$$

初期条件 $t=0$ の時、 $P=P_0$ であるから、 $C=\log P_0$ よって、 $P=P_0 e^{(-\lambda t)} \cdots \textcircled{2}$ となる。

残っている原子核数が始めの半分になる時間 T を、その原子核の**半減期**という。②式より

$$(1/2)P_0 = P_0 e^{(-\lambda T)} \quad e^{(-\lambda T)} = 1/2 \quad \text{となるから、時刻 } t \text{ において残っている原子核数 } P \text{ は}$$

$$P = P_0 \{e^{(-\lambda t)}\}^{(t/T)} = \underline{P_0 (1/2)^{(t/T)}} \quad \text{と表される。}$$



放射性同位体の崩壊曲線

【参考】オクローの天然原子炉

天然原子炉では、ウランに富んだ鉱床に地下水が染み込んで、水が中性子減速材として機能することで核分裂反応が起こる。核分裂反応による熱で地下水が沸騰して無くなると反応が減速して停止する。鉱床の温度が冷えて、短命の核分裂生成物が崩壊したあと、地下水が染み込むと、また同じサイクルを繰り返す。このような核分裂反応は、核連鎖反応ができなくなるまで数十万年にわたって続いた。

ウランの核分裂では、5 種類のキセノンガスの同位体が生成される。ガボンでは 5 種類すべての同位体が天然原子炉の痕跡から発見されている。鉱床のキセノンガスの同位体比を調べることで、20 億年たった現在でも核分裂サイクルの周期を知ることができる。計算ではおよそ 30 分活動したあと 2 時間 30 分休止するサイクルだった。

天然原子炉が臨界に達することができた理由は、天然原子炉があった当時、天然ウランの核分裂性同位体 ^{235}U の濃度が 3%と、現在の原子炉とほぼ変わらなかったからである（残りの 97%は核分裂性物質ではない ^{238}U ）。 ^{235}U の半減期は ^{238}U より短く、より早く崩壊してしまうので、天然ウランの現在の ^{235}U の比は 0.72%に低下していて、地球上ではもはや天然原子炉は存在しえない。

オクロー以外では天然原子炉は見つかっていない。ほかのウラン鉱床も核分裂反応を起こすのに十分なウランが含まれていたものの、ウランと水と、核反応を起こすための物理的な条件とがそろっていたのはオクローのユニークな点だったと思われる。

オクローの天然原子炉が 20 億年より前の時点で反応を開始しなかった理由は、おそらく大気中の酸素濃度の上昇が関連している。ウランは地球の岩石中に自然に存在していて、核分裂物質の ^{235}U の濃度は臨界に達する前は常に 3%以上だったはずである。しかし、ウランは酸素存在下でしか水に溶けない。大気中の酸素レベルが上昇するにしたがって、ウランが地下水に溶けて運ばれて、ウランが十分に濃縮された鉱床を形成したと考えられる。大気環境がもし変化していなければ、そのような濃縮はおそらく起こり得なかった。

第3章 地質・地誌

3-01 地球の表層と大気における物質の循環

3-02 地層の対比と堆積環境決定

3-03 日本列島の地質・地層構造①

3-04 日本列島の地質・地層構造②

3-05 日本列島の地質・地層構造③

3-06 地質構造の推定①

3-07 地質構造の推定②

3-08 地質構造の図示

【問題 3-01】 地球の表層と大気における物質の循環

地球の大気中には、酸素分子として存在する酸素が 23 重量%ある。酸素分子は、地球ができた時の大気中には存在せず、地球に生命が誕生してから光合成によって作り出されたものである。酸素と同時に作られた有機物中の炭素は、そのほとんどが堆積物や堆積岩の中に含まれて地中にある。簡単の為に、生物のつくる有機物の化学組成を $(\text{CH}_2\text{O})_n$ で表し、光合成を $n\text{CO}_2 + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O})_n + n\text{O}_2$ という式で表すとする。

以下の問A～Eに答えよ。但し、1気圧は 1cm^2 あたり 1kg の重量が掛かっているときの圧力に等しいとする。炭素、酸素の原子量は、それぞれ 12、16 とする。また、地球の半径は $6.4 \times 10^6\text{m}$ とする。

問A 現在の大気中の酸素の総量は何 kg か。有効数字 2 桁で答えよ。

問B 問Aで求めた酸素の量に見合う地中にある有機物中の炭素の総量は何 kg か。有効数字 2 桁で答えよ。

問C 実際に地中にある有機物の炭素の総量は、問Bで求めたものより多く、 $1 \times 10^{19}\text{kg}$ 程度と見積もられている。この炭素の量に見合う酸素原子が光合成によって生じたはずであるが、その大部分は現在の大気中にはないことになる。どのようにして大気中から取り去られたと考えられるか。30 字以内で述べよ。（なお、石灰岩などの主成分である CaCO_3 等の炭酸塩中の炭素はこの問題に関係なく、考慮する必要はない。）

問D 大気中の酸素量の増大は、生物の生きる環境に変化をもたらした。生物にとって有害な紫外線が地表に達しなくなって、生物が陸上に住める条件が整ったのも、このような変化である。なぜ、紫外線が地表に達しなくなったのか。30 字以内で述べよ。

問E 実際に生物が水中から出て陸上に進出したのはいつの事か。

解答

- 問 A $1.2 \times 10^{18} \text{ kg}$ (解答の導出過程は解説を参照)
問 B $4.5 \times 10^{17} \text{ kg}$ (解答の導出過程は解説を参照)
問 C 物質の循環に伴い、赤鉄鉱などとして岩石の成分となった。
問 D 紫外線によって、大気中の O_2 から成層圏にオゾン層ができたから。
問 E 古生代 シルル紀

解説

問 A 気圧は大気の質量によって生じるから、大気の質量は気圧によって求められる。地球の半径は $6.4 \times 10^8 \text{ cm}$ で、大気では酸素分子が 23 重量% を占めるとして、その量は次のように求められる。

$$1.0 \text{ kg} \times \frac{4}{3} \times 3.14 \times (6.4 \times 10^8)^2 \times 0.23 = \underline{1.2 \times 10^{18} \text{ kg}}$$

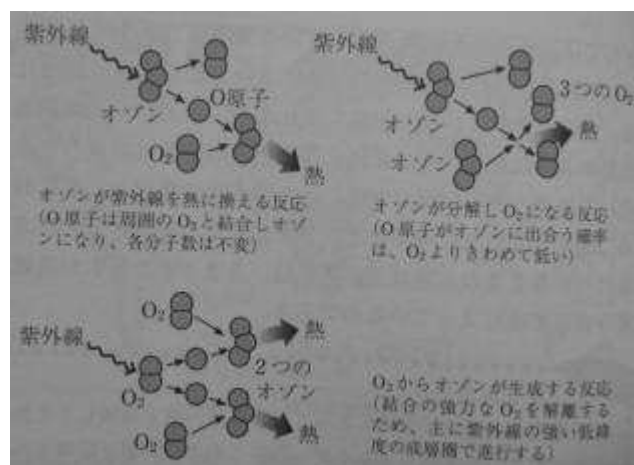
地球の表面積

問 B 問題文によると、1 モルの CO_2 と H_2O とから、1 モルの O_2 と 1 モルの CH_2O が形成され、 CH_2O のほとんどが地中にあるから、その炭素の量は以下のように求められる。

$$1.2 \times 10^{18} \text{ kg} \times (12/32) = \underline{4.5 \times 10^{17} \text{ kg}}$$

問 C 地表の酸素は金属と結合する事によって、地殻の構成物質となった。よく知られている例は、水中における赤鉄鉱(Fe_2O_3)の形成であるが、これによって地表にある O_2 の多くが吸収された。

問 D 大気中の酸素は、太陽から放射される紫外線的作用によって、オゾン(O_3)を形成し、このオゾンが紫外線を吸収するので、紫外線はほとんど地表に達しない。オゾン層があるのは成層圏である。



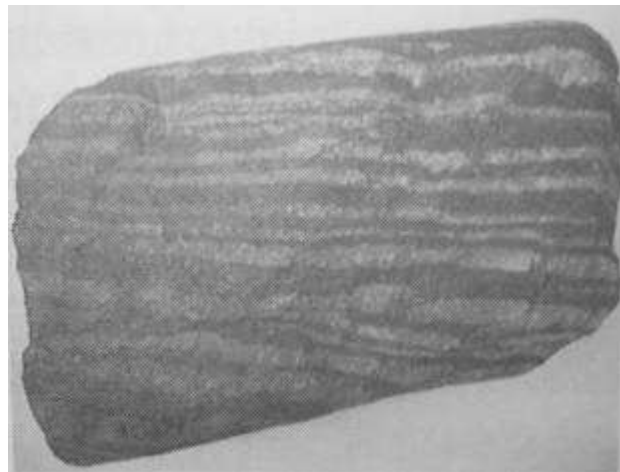
オゾンの生成と分解

問 E 陸上に植物が出現したのはシルル紀である。植物に続いて動物も陸上に出現した。最初の陸上植物はシダ植物のプシロフィトンである。

【参考】生命の誕生と陸上への進出

地球上に最初の生命が誕生したのは 40 億～38 億年前と推定されている。最初の生物は海水中で誕生し、地球史の大半を海中で過ごしたことは間違いないが、当時の地球が大気中にも海水中にも酸素がない状況であったことから化学合成バクテリアのような原核生物であったと考えられる。

地球上に最初に酸素をもたらしたのは、**シアノバクテリア(ラン細菌)**という光合成を行うバクテリアであった。シアノバクテリアの出現時期を知る手がかりが**縞状鉄鉱層**である。縞状鉄鉱層は赤鉄鉱(Fe_2O_3)や磁鉄鉱(Fe_3O_4)などの酸化鉄でできた層と、それ以外の砂泥の層が繰り返す地層で、20 億年以上前の海の地層から採掘される。酸素がなかった初期の海水中では、鉄はイオンとして存在していたが、シアノバクテリアの登場で酸素が供給されるようになり、これが鉄イオンと結びついて、酸化鉄の大規模な沈殿が繰り返された。これが縞状鉄鉱層である。



縞状鉄鉱層

先カンブリア時代と古生代の境界は約 5.5 億年前とされているが、この時期を境に生物の化石が産出されるようになった。この時期、化石の数だけでなく、種類も飛躍的に増えていて、生物が爆発的に進化した。これを**カンブリア爆発**という。カンブリア紀以降の生物は石灰質の固い甲殻を持ち、海水中では容易に分解せず、積み重なって、礁という地形を形成した。シルル紀にかけては**サンゴ礁**が形成され、海水中の二酸化炭素濃度を押し下げ、それを補う為に、大気中の二酸化炭素が大量に海に溶け込んだ。

カンブリア紀中期には生物の軟組織である有機物が分解されずに地層中に埋没したが、分解に消費されるはずだった酸素が余って蓄積された為に、大気中の酸素濃度が上昇し、その一部が上空に**オゾン層**を形成した。これにより、生物にとって有害な紫外線が上空で吸収されることで、生物が陸上で生活する事が可能になった。シルル紀には、緑藻類から進化したコケ植物やシダ植物が陸上に出現した。次第に水辺から離れて生息範囲を広げ、やがて**シダ植物**が森林を形成するようになった。

【問題 3-02】 地層の対比と堆積環境決定

次の文を読んで、問A～Dに答えよ。

ある地層から(1)化石が産出すれば、その地層の相対年代が決定され、他の地層の相対年代が決定され、他の地域に分布する地層との新旧の比較、つまり (2) が可能である。地層の (2) は (3) によっても行われる。典型的な (3) として、(4) によって構成された地層がある。

化石の中にはそれを産出する地層の堆積環境を示すものがある。このような化石は (5) 化石と呼ばれている。

問A 上の文の (1) ～ (5) のそれぞれに適切な語句を答えよ。但し、同一の数字には同一の語句が入る。

問B (1) 化石として役立つ為の最も重要な条件を2つ挙げよ。

問C (5) 化石として役立つ化石の例を一つ挙げ、それが示す堆積環境を、100 字程度で説明せよ。

問D 一般的には、(5) 化石 とされているものでも、それを含む地層の堆積環境を示さず、その目的に利用できない場合がある。具体例を挙げて、その理由を 100 字以内で説明せよ。

解答

問A 1：示準 2：対比 3：かぎ層 4：凝灰岩 5：示相

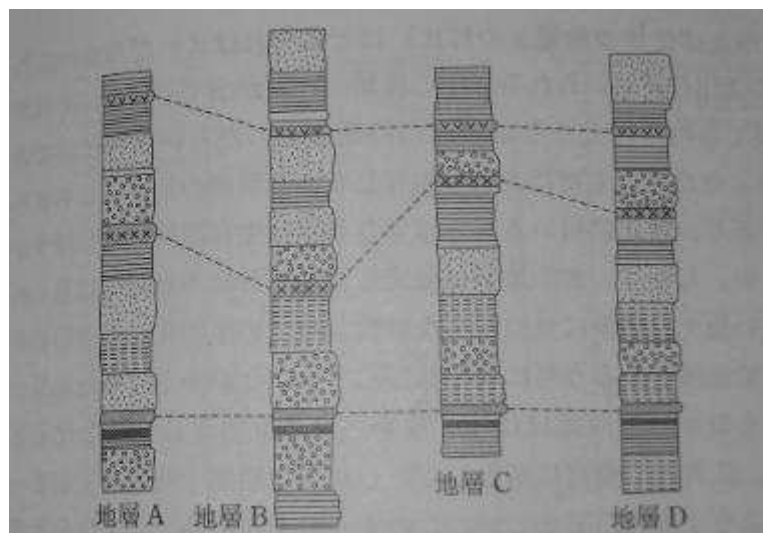
問B 種の生存期間が短い事。 種の分布範囲が広い事。

問C 造礁サンゴ： 造礁サンゴは水の澄んだ熱帯の浅い海底でのみ、岩石に付着して生存し、死後も移動しにくい。従って、これによって構成される石灰岩層は熱帯で水の澄んだ浅い海底で形成された事がわかる。

問D 造礁サンゴの礫を含む地層： 造礁サンゴの礫は元の地層が形成された地域から移動した後にこれが侵食されて生じる。従って、この礫を含む地層の堆積環境は造礁サンゴの生息する地域とは無関係である。

解説

問A・B 異なった地域に分布する地層の新旧を決定する作業を**地層の対比**という。地層の対比で利用されるのは**示準化石**と**かぎ層**である。示準化石として必要な条件は、種の生存期間が短い（進化が速い）事と、広い範囲に分布する事である。（これに数が多い事を加える事もある）かぎ層として必要な条件は、その地層が短期間に、広い範囲に分布し、上下の地層と明瞭に区別できる事などである。凝灰岩層はかぎ層としてよく利用される。火山灰は風によって運ばれて広範囲に拡散し、一つの火山から噴出する火山灰でも、時代とともにその性質が変化するからである。



かぎ層による地質の対比

地層が形成された地域の環境を示す化石を、**示相化石**という。造礁サンゴは低緯度地方で、透明度の高い浅い海にのみ生息し、死後も岩石に付着したまま移動しないので、示相化石として重視されている。日本列島の古生界には石灰岩が多いが、これも低緯度地方の海で形成されたサンゴ礁が、プレートの移動に伴って現在の位置に運ばれたものと考えられている。

化石を含む地層が侵食され、その礫が運搬されて地層を形成した場合、その礫に含まれている化石は、その礫によって構成される地層の形成年代や環境とは無関係である。化石の利用にあたっては、化石の二次的な堆積に注意する必要がある。

問 C サンゴ虫は褐虫藻という植物と共生しており、この植物は日光を必要とするので、水の澄んだ浅い海にのみ生存できる。造礁サンゴの生息する特定な環境がこれである。また、サンゴ礁ではサンゴは海底の岩石に付着しており、さらにサンゴ同士が付着しあっているため、死後も移動しにくい。以上が、造礁サンゴが典型的な示相化石である理由である。

問 D サンゴ礁によって構成される石灰岩が日本列島に多く見られるのは、これらが熱帯から移動してきたからである。つまり、この造礁サンゴの化石は、生息した環境とは全く違ったところに分布しており、この礫が海に運ばれて地層を形成しても、その化石を示相化石とみなす事はできない。

【参考】堆積物と堆積岩

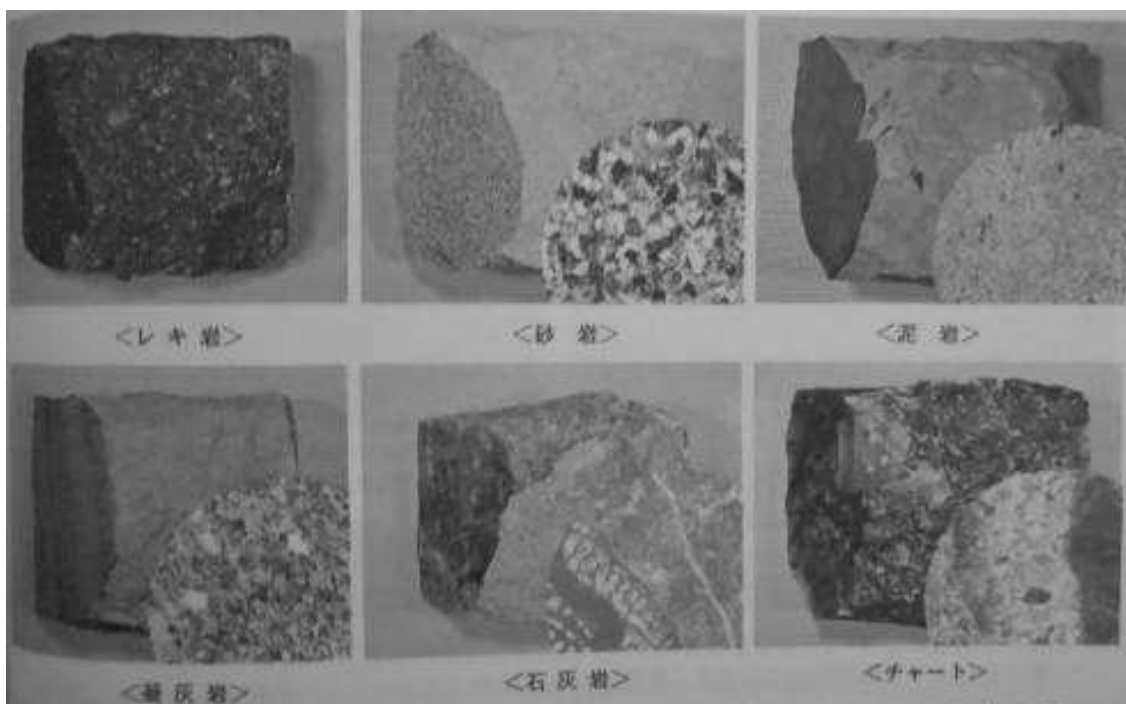
地表では温度差や水・氷の作用で風化・浸食の作用が絶えず行われ、風化された岩石や土壌が、水や風に運ばれ、別の場所に堆積する。最も大規模に堆積が起こるのは海底であり、岩石片や砂、泥だけでなく、生物の遺骸や水溶物が沈殿する。堆積物はその場所によって様々な性質を示し、分析する事によって、堆積環境を復元したり、当時の水陸の分布や気候の変動を把握する事ができる。

海水の運動によって運搬され、海底に堆積した物質が**海底堆積物**で、その地層を**海成層**という。海岸付近や大陸棚に堆積したものを沿岸性の堆積物といい、陸地から運ばれた砂や泥から成っている。風的作用で運搬され、堆積したものを**風成堆積物**といい、その地層を**風成層**という。日本には火山灰が偏西風に乗って運ばれた、関東ローム層などの風成層が多い。

砂が堆積し、固まって砂岩になるように、堆積物は年月の経過とともに、その場所における温度や圧力などの条件で石化し、**堆積岩**になる。この働きを**続成作用**という。堆積物の隙間に入った水分が堆積物中の成分を溶解させたり化学変化を行ったりして、堆積物を変質させ固化させる。この固化は隙間に沈殿した石英(SiO_2)や方解石(CaCO_3)が互いに堆積物の粒子を粘着させる事による。

続成作用によって石化した堆積岩には、その堆積物の起源によって、**碎屑岩・火山碎屑岩・生物岩・化学岩**の4種類に分類される。

- 1) 碎屑岩 : 礫岩・砂岩・泥岩・粘板岩
- 2) 火山碎屑岩 : 凝灰岩・凝灰角礫岩・緑色凝灰岩・集塊岩
- 3) 生物岩 : サンゴ石灰岩・紡錘虫石灰岩・放散虫チャート・珪藻土
- 4) 化学岩 : 石灰岩・苦灰岩・チャート・塩岩・石膏



様々な堆積岩

【問題 3-03】 日本列島の地質・地層構造①

問A 日本列島で、次の a) ～ d) を構成する主な地層の堆積した年代を、それぞれ、(年代) に列挙した中から選んで答えよ。 但し、c) については2つ答えよ。

- a) 関東平野、大阪平野などに見られる台地
- b) 東京、大阪など大都市の発達する海岸低地
- c) 中部山岳や秩父、多摩地方などの火山を除く高い山地
- d) 房総半島、三浦半島や紀伊半島南部など、あまり高くない山地

(年代)	先カンブリア時代	古生代前半	古生代後半	中生代
	第三紀	更新世	完新世	

問B 地層の上下は堆積作用の起こった時期の前後関係を意味している。 形成後の逆転がない限り、下層ほど古く、上層ほど新しい。 これを**地層累重の法則**という。 この事を考慮して、海岸低地とこれを見下ろす台地を構成する地層の上下関係を 120 字程度で説明せよ。

解答

問A a)：更新世 b)：完新世 c)：古生代後半、中生代 d)：第三紀

問B 台地を構成する地層の一部が侵食された後、その侵食面の上に海岸低地を構成する地層が堆積したが、この時の海面は台地面より低かったため、海岸低地の表面は低い。しかし、地層については、新しい地層が古い地層の上に重なっており、地層累重の法則が成り立っている。

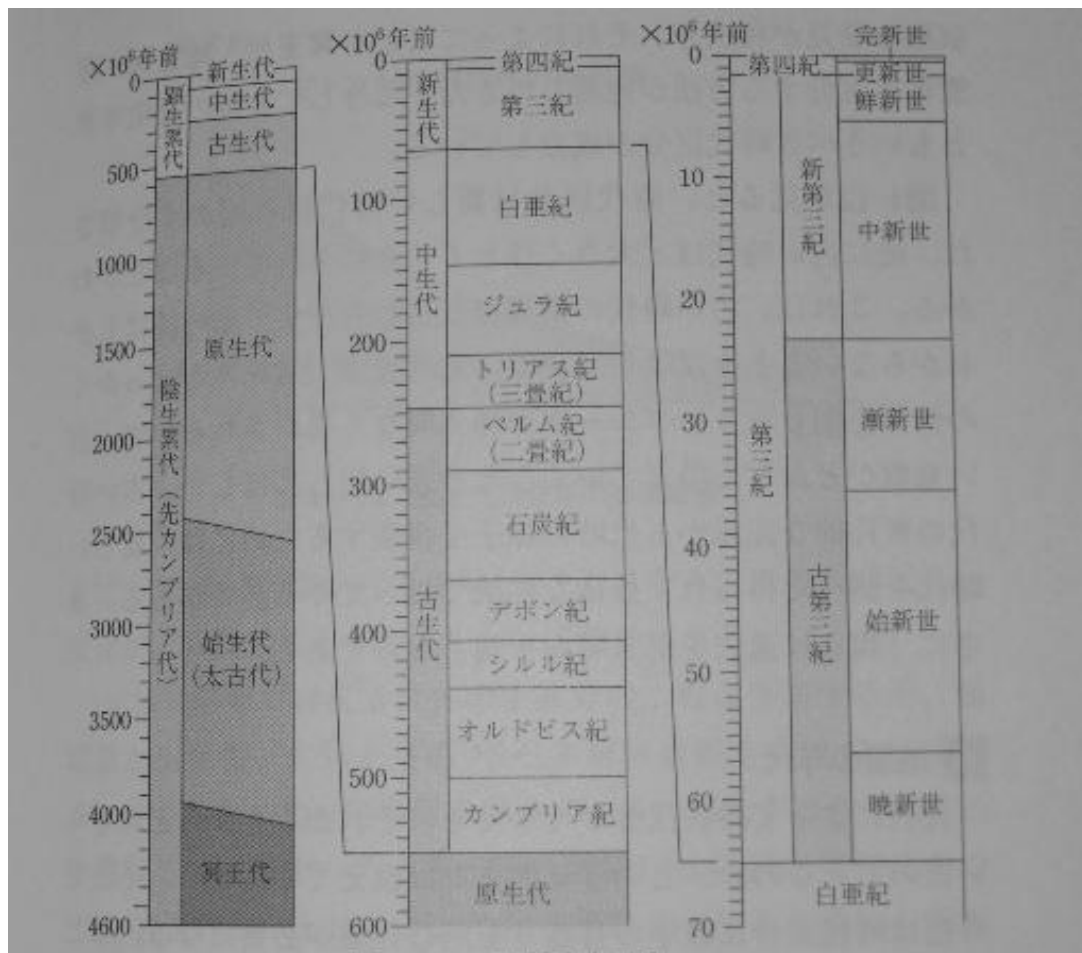
解説

問A a) 更新世は氷河時代と言われているが、この間氷期は高温の為、その時期には海面が上昇して日本列島内部に海が侵入し、ここで地層が形成された。この地層はその後の海面下降に伴って侵食されたが、一部は段丘として残っている。これが各地に残っている台地である。 b) 完新世には気温が上昇し、約 6000 年前にそれがピークに達した。その海面侵食に伴って、氷期の侵食によって生じた台地の谷間に海が侵入し、ここに地層が形成された。海岸低地はこれによって形成されたものである。 c) 日本列島では、火山を除く高い山地は中生界と古生界によって形成されている。これらは秩父中・古生層と呼ばれる事がある。 d) 房総半島、三浦半島をはじめ、紀伊半島や秋田県などの山地は第三系によって構成されている。秋田県はグリーンタフ地域として知られ、ここには含油層や黒鉱などが見られる。以上から、日本列島では高い山地には古い地層が、また、海岸低地やこれに接する台地には新しい地層が見られる特徴がある。

問B 海岸低地は完新統（完新世の地層を完新統という）によって構成されているが、台地は更新統によって構成されている。つまり、高いところほど、古い地層が分布していて、地層累重の法則に反するように見える。この原因については次のように考えられる。更新世は氷河時代であるが、間氷期には海面が高く、この時期現在の台地の表面が海底だった。しかし、氷期になると海面が下って侵食が進み、谷が生じた。完新世になると、再び気温が上昇して海進が起こり、氷期に生じた谷に海が入り込んで堆積が起こった。海岸低地はこの時の海底である。つまり、更新統の侵食面の上に不整合で完新統が重なっているが、完新世の海面が更新世の海面より低かったため、完新統の表面が更新統の表面より低くなる。しかし、更新統の侵食面の上に完新統が重なっていることから、地層累重の法則は成り立っている。

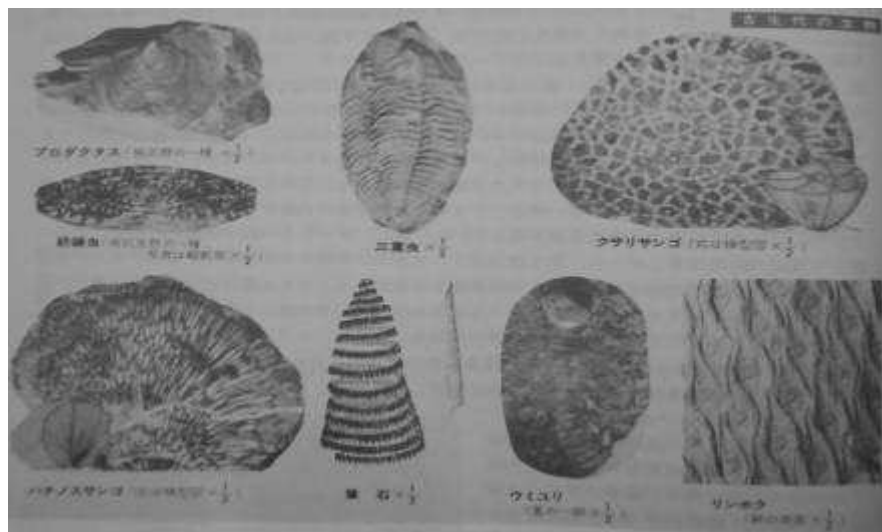
【参考】地質時代区分

世界中の地層を対比すると、地層の順序が見えてくる。様々な生物の出現と絶滅を調べると、多くの生物種が同時に絶滅する時間面がいくつも存在する。これを時代区分の境界にすると、絶滅と絶滅の間の時代は、その期間に生息した生物によって特徴付けられる。こうして生物を基準として古い時代から現代までの時代区分が出来上がる。これを**地質時代区分**という。

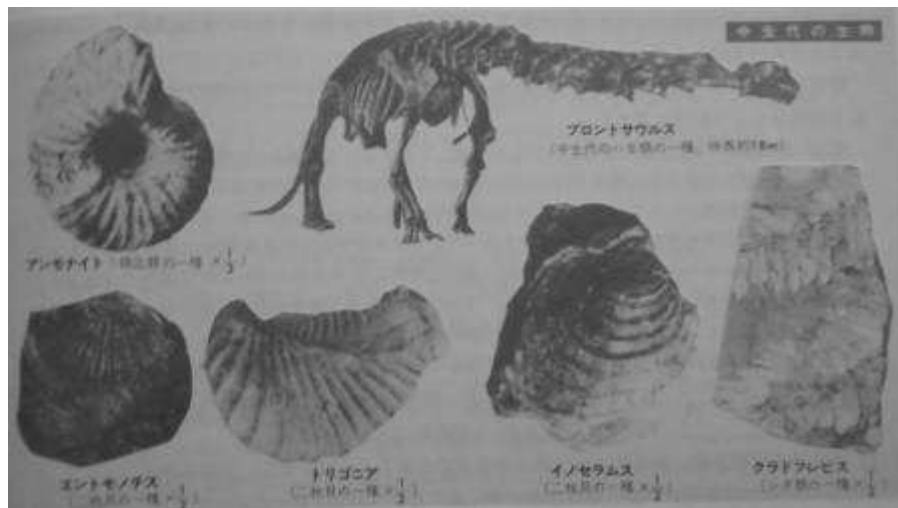


地質時代区分

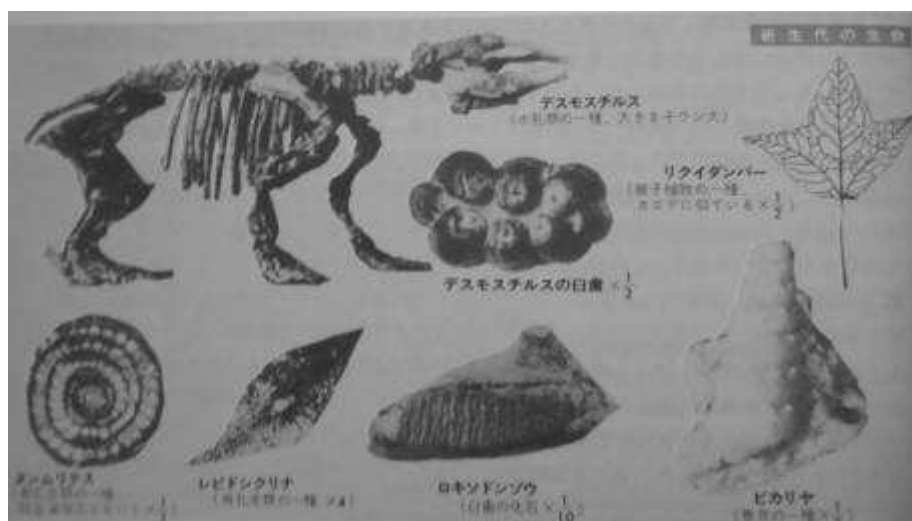
時代区分は、生物の変遷に基づいて行われるので、化石の出る時代を大きく、**古生代・中生代・新生代**に分け、さらにそれぞれを**紀**という単位に、紀はさらにいくつかの**世**に分けられている。地質時代の名称は、地質時代区分が最初に成立したヨーロッパでの模式地や地層の特徴が使用されている。古生代よりは、化石がほとんど見つからないことから、**先カンブリア代**とひとくくりになされていたが、近年では新たな化石や生物の間接的な痕跡の発見が相次ぎ、ここを**冥王代・始生代・原生代**と区分する方法が定着した。



古生代の生物



中生代の生物



新生代の生物

【問題 3-04】 日本列島の地質・地層構造②

次の文を読み、問いに答えよ。

教科書などにある日本列島の地図を見ると、(1) と呼ばれる断層を境にして、日本列島の地質構造が東西で大きく異なっている。

東北列島には新第三紀の地質が厚く、この中の (2) と呼ばれる火山岩や火山性堆積物に伴って、金属 (3) 物の集合体である (4) と呼ばれる鉱石が分布する。

西南日本は (5) と呼ばれる断層によって内帯と外帯とに分けられている。内帯の (5) に近い地域、例えば木曽山脈は (6) 変成帯と呼ばれており、ここには片麻岩が分布する。この変成帯には (7) 紀に貫入した (8) 岩が多い。

外帯には主に結晶片岩によって構成される (9) 変成帯や厚い古生界、中生界などがある。これらの地層には、北に傾斜する面を境にして、北側の地層と南側のより新しい地層が接するいわゆる (10) 断層が多い。

問A 文中の (1) ～ (10) に該当する適切な語句を答えよ。

問B 結晶片岩と片麻岩とは、肉眼で見たとき、どのように異なっているか。
60 字程度で説明せよ。

問C 教科書にある日本列島の地質図にはホルンフェルスが記載されていない。
この理由を 30 字程度で説明せよ。

問D 外帯で、古生界、中生界、新生界はどのように配列しているか。
40 字程度で説明せよ。

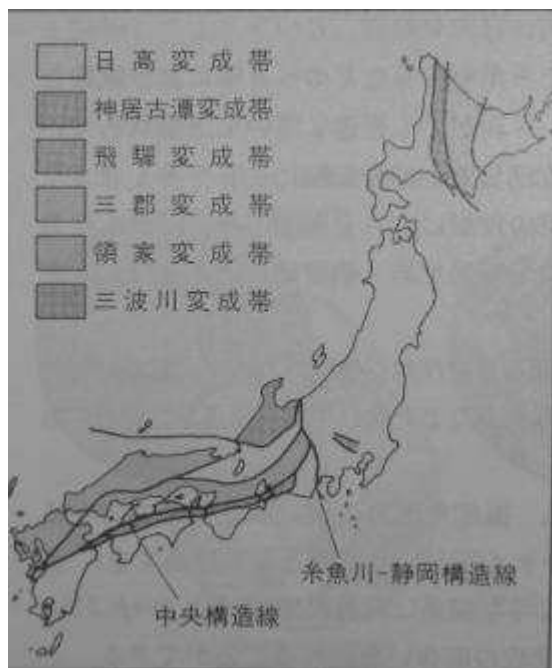
解答

- 問A 1：糸魚川・静岡構造線 2：グリーントフ 3：硫化 4：黒鉱
5：中央構造線 6：領家 7：白亜 8：花崗
9：三波川 10：衝上（逆）
- 問B 結晶片岩は片理が著しく、構成する鉱物は非常に細粒であるが、片麻岩は片理が顕著ではなく、構成する鉱物は粗粒である。
- 問C 接触変成作用の起こる地域は幅が狭いから。
- 問D 三波川変成帯から南に向かい、古生界、中生界、新生界の順に帯状に並列している。

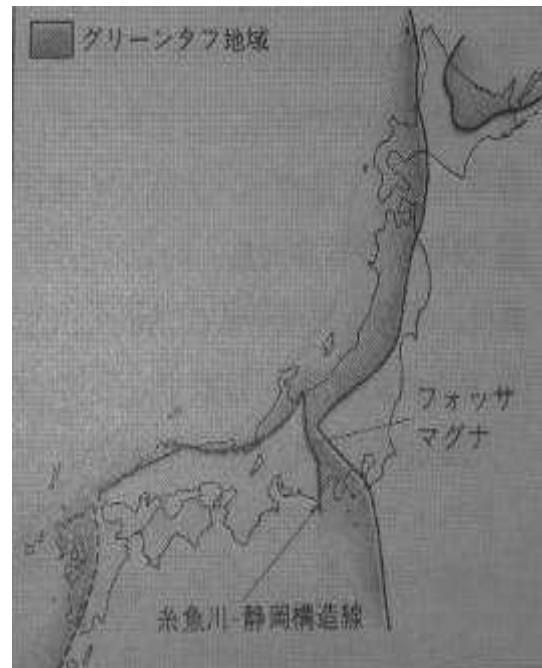
解説

問A 東北日本には厚い新第三紀の地質が分布しているが、この中にはグリーントフという海底で形成された火山性の地層、岩石が含まれている。グリーントフは金属硫化物を主体とする黒鉱鉱床を伴っていて、これは海底に噴出した熱水から沈殿したものである。

片麻岩によって構成される領家変成帯には多量の花崗岩が貫入しており、これらは白亜紀のものである。外帯には三波川変成帯の南側に厚い古生界と中生界があり、これらには南方から移動するプレートの沈み込みによって生じた衝上断層が見られる。



日本の変成帯

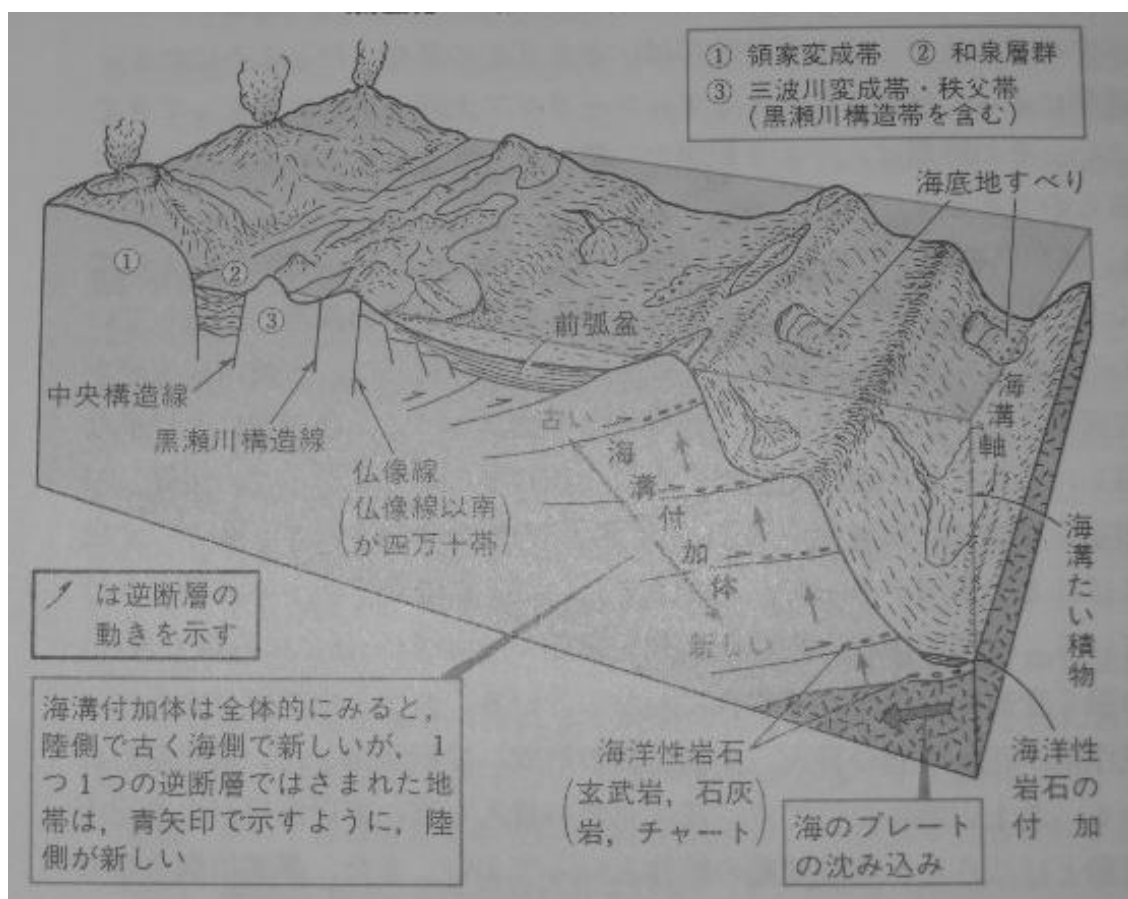


グリーントフ地域

問 B 造山帯の内部では**広域変成作用**が起こる。 広域変成岩には偏圧によって生じた片理があるのが普通である。 結晶片理と片麻岩は代表的な広域変成岩である。 結晶片理は低温・高圧下で生じ片理が著しいが、構成する結晶は小さく肉眼で個々の鉱物を見分けにくい。 一方、片麻岩は高温・低圧下で生じ、片理が結晶片岩に比べて目立たないが、構成する結晶が大きく、花崗岩に似ている事がある。

問 C ホルンフェルスは**接触変成作用**によって、泥質岩から生じる事が多い。 接触変成作用の及ぶ範囲は貫入岩体の大きさによって異なるが、広域変成作用に比べるとはるかに狭く、教科書にあるような地質図には表れない。

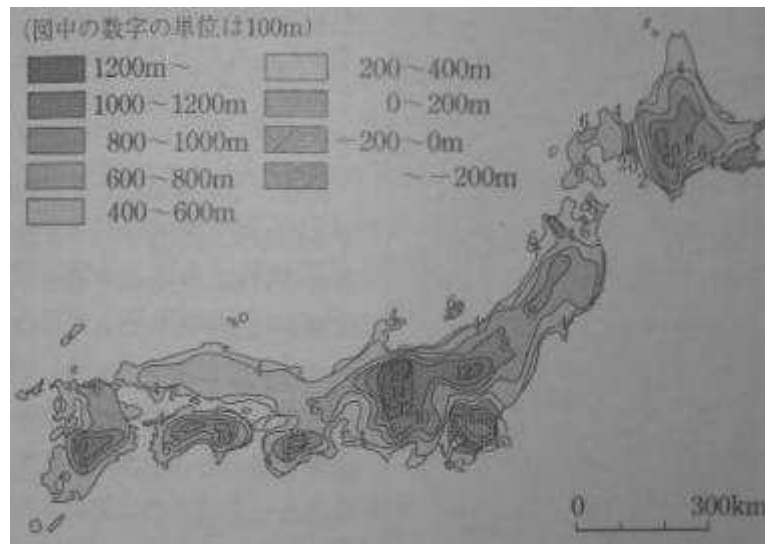
問 D 外帯には中央構造線から南に向かって、三波川変成帯、古生界、中生界、新生界の順に帯状に平行に配列している。



白亜紀における西南日本の堆積状態

【問題 3-05】 日本列島の地質・地層構造③

下図は、日本列島の第四紀における上下の変位量を示したものである。実線は隆起、破線は沈降の等値線であり、数値は 100m 単位である。この図に関して、問 A～D に答えよ。



- 問 A 第四紀とは、過去の何年間を指すのか。有効数字 1 桁の数で答えよ。
- 問 B 近畿、四国、九州にかけて見られる隆起量の多い地域と、その北側の地域の境界の地質構造を簡潔に説明せよ。
- 問 C 関東平野は沈降量の大きい地域である。この地域の地質構造はどのようになっているか。30 字程度で説明せよ。
- 問 D 図を元に、現在の日本列島の地形と第四紀の地殻変動の関係を 60 字程度で説明せよ。
- 問 E 東京、大阪、名古屋など、大都市の近くは海岸低地に形成されているが、このような海岸低地は他の地域にも多い。海岸低地に接して台地が見られることが多く、大都市は台地の上まで発達していることが多い。また、各地の大陸棚には河川の跡が多く残されている。これら各地形が形成された歴史を 150～200 字で説明せよ。

解答

問A 2×10^6 年間

問B 南側は外帯、北側は内帯と呼ばれ、中央構造線がその境界にある。

問C 沈降に伴って堆積した厚い第四系によって構成されている。

問D 高い山地は第四紀の隆起量が大きい地域であり、低地は第四紀に沈降した地域か、または変動量の小さかった地域である。

問E 第四紀の間氷期には現在よりも海面が高く、これによって内陸にまで地層が形成された。この一部が浸食された後に現在残っているのが台地である。また、氷期には海面が下降して大陸棚が海面上に現れ、この表面に河川による浸食が起こった。この跡が現在、海底に残っている。後氷期には気温が上昇して、海進が起こり、これによって形成された地層が現在の海岸低地を形成している。

解説

問A 第四紀は最近の約 **200 万年**であって、この間に生じた地殻変動は現在も続いていて、その影響は現在の地形に明瞭に現れている。現在の高い山地はこの期間に隆起したものであるし、低地にはこの期間に沈降したところが多い。

問B 近畿、四国、九州にかけての隆起の著しい地域は、西南日本の外帯と呼ばれる地域である。この地域と、この北側にある内帯の境界は、中央構造線である。

問C 関東平野の地域が第四紀に大きく沈降したにも関わらず、現在平野になっているのは、この期間に周囲の山地から大量の物質が運ばれて、厚い地層が形成された事を示している。

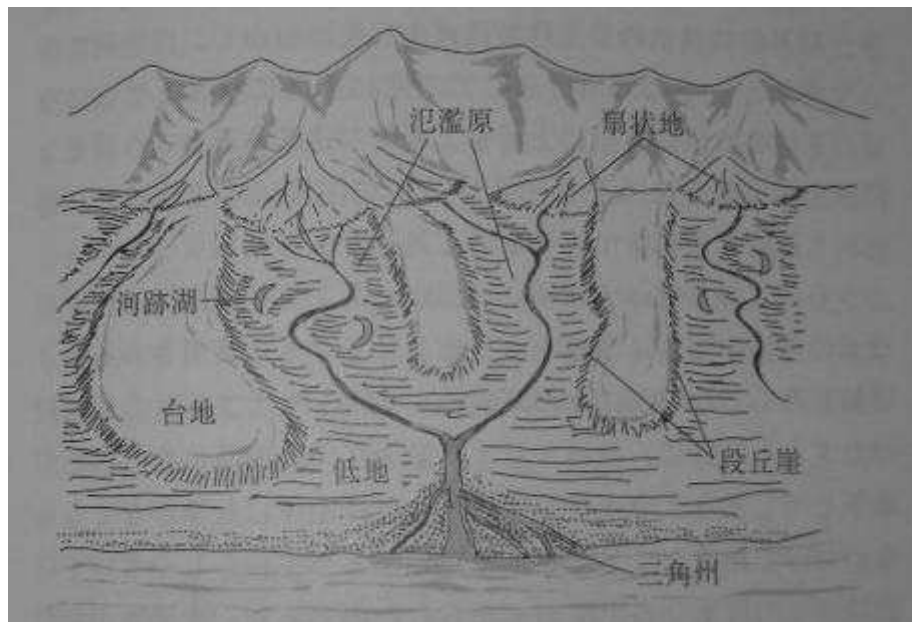
問D 中部山岳をはじめ、日本列島の主な山地はいずれも第四紀に著しく隆起した地域である。一方、関東平野や濃尾平野などの低地は第四紀に沈降したか、またはほとんど隆起しなかった地域である。つまり、現在の地形は第四紀の地殻変動を反映したものであるという事ができる。

問 E 第四紀はその期間が短く、この時代に形成された地形には気候変動に伴う海面変動の影響が大きく現れている。 間氷期は気温が上昇して、氷河が後退し、海水が増加して海面が上昇した。 現在各地にある平野はそのときに海面下に没し、堆積盆地となって地層が形成された。 これに続く氷期には氷河が拡大し、海水が減少して海面が下降し、間氷期に形成された地層の一部は浸食され、浸食を免れた地層は海岸段丘になった。 これが現在各地に見られる台地である。

氷期の海面下降が進むと、大陸棚も陸化し、そこを流れる河川によって谷が形成された。この谷は現在も海面下に残っている。 後氷期には再び海進が起こり、氷期に形成された内陸の谷にまで海が侵入して、そこに地層が形成された。 この地層は最近の海退によって海面上に現れ、現在の海岸低地となっている。 つまり、台地の表面は間氷期の海底を、大陸棚の河川の跡は氷期の海面下降を、そして海岸低地は後氷期の海進時の海底を示すものである。

【参考】河川がつくる陸上の堆積地形

地表に露出した岩石は風化を受け、礫や砂、泥といった岩石の屑となり、水の流れによって下方へ運ばれる。 山間部に降った大量の雨は山を崩して大量の土石を含んで流れ(土石流)、川が山地から平地に出たところで堆積して扇状地をつくる。 河川は蛇行しながら氾濫を繰り返し、流域の凸部を削り、凹部を埋め立て、平坦な土地を作り出す。 平野などの陸上の平坦面は、このように河川の氾濫によって形成されたものである。



【問題 3-06】 地質構造の推定①

ある地域に地層 A、地層 B、及び、岩体 C、岩体 D がある。これらの地層および岩体に関する次の記載をもとにして、問 A～D に答えよ。但し、この地域に断層は無いものとする。解答には、結論とともに判断の根拠を 50 字以内で示せ。

地層 A: この地域で海岸段丘を形成する砂層である。段丘面は原型がはっきり残っている。

地層 B: この地域に広く分布する泥岩層であり、この中にはアンモナイトやトリゴニア(三角貝)の化石が含まれている。

岩体 C: 花崗岩の底盤(バリソス)であり、海岸の崖に露出している。

岩体 D: 地層 B と岩体 C の間にあり、黒みがかった緻密な岩石で、ケイセン石、コウチュウ石、黒雲母などが含まれている。この岩体は地層 B に漸移している。

問 A 岩体 C および D に含まれる黒雲母はどちらが古いか。

問 B 地層 B のアンモナイトと岩体 D のコウチュウ石とはどちらが古いか。

問 C 地層 A と岩体 C は接しているが、両者の関係はどうなっていると考えられるか。

問 D 地層 A は地層 B とともに接しているが、両者の関係はどうなっていると考えられるか。

解答

問A 同じ年代

岩体Dは岩体Cのマグマの貫入によって形成されており、両者の年代は等しいから。

問B 地層Bのアンモナイト

岩体Dは地層Bにマグマが貫入して形成されたものであり、地層Bより新しいから。

問C 地層Aは岩体Cの上に不整合に重なる。

段丘を形成する地層Aは第四系で、岩体Cは貫入した深成岩体であり、古いから。

問D 地層Aは地層Bの上に不整合に重なる。

段丘を形成する地層Aは第四系で、地層Bはその化石から中生界と考えられるから。

解説

地層Aはその表面が残っている段丘を形成している地層であるから、第四系である。

地層Bはアンモナイト、トリゴニアという中生代の代表的な化石を含んでいるので、中生界である。

岩体Dはケイセン石、コウチュウ石など変成岩に特有の鉱物を含み、地層Bの泥岩に漸移しており、花崗岩体に接しているから、ホルンフェルスである。

問A 岩体Cの貫入によって岩体Dは形成されているから、岩体Cと岩体Dの形成は同時であり、それらを構成する鉱物も同時に形成されている。

問B 地層Bに花崗岩Cが貫入して岩体Dが形成されたので、岩体Dは地層Bより新しく、岩体Dを構成する変成鉱物も地層Bより新しい。

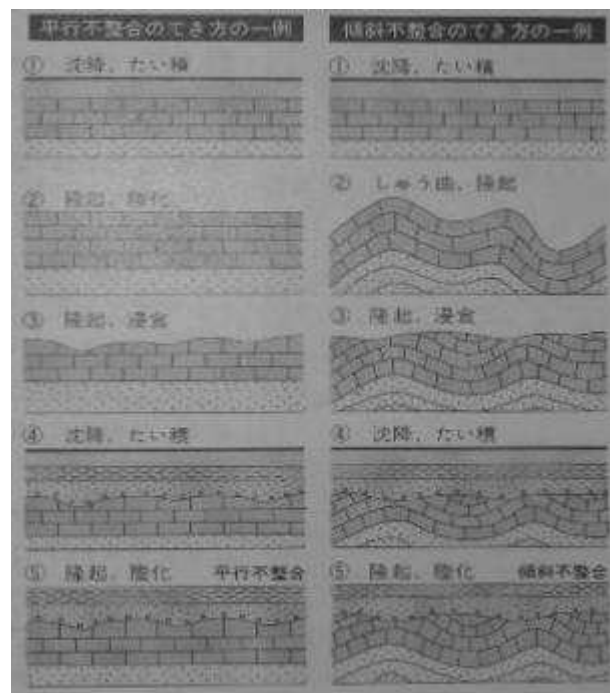
問C 底盤が形成されてから露出するまでにはかなりの時間を要するので、この花崗岩体は新しくても第三紀のものと考えてよい。一方、段丘を形成する地層は第四系であるから、花崗岩体よりもはるかに新しく、地層Aは岩体Cの上に不整合に重なっていると考えられる。

問D 地層Aは第四系で、地層Bは中生界である。従って、両者の形成には時間的な隔たりがあり、地層Aは地層Bの上に不整合に重なっている。

【参考】地層の構造

堆積物はそれ自身の性質に関わらず、ほぼ水平に堆積するため、堆積作用が進むにつれて、堆積の順に縞状の構造ができる。この縞目を**層理**と言い、それを示す堆積岩を**地層**という。地層の最小単位を単層といい、1枚の地層として区分できるものをいう。厚さは数mmから数mのものまでである。泥粒の変化や不純物の含まれ方などによって、地層の中に幾つもの縞目が見られることがある。1枚の単層の厚さが数mm以下のものを**葉層(ラミナ)**という。葉層の集まった細かい縞目を**葉理**という。葉層は互いに平行であることもあるが、交わっているものもある。これを**斜交葉理(クロスラミナ)**といい、水成層の場合は流水が、風成層の場合は風が激しい動きを見せたときにでき、流れや風の方向を推定したり、地層の上下を判別するのに利用される。

自然の状態では、堆積岩は地層をなして存在するが、下位のものほど古く、上位のものほど新しい。これを**地層累重の法則**といい、堆積岩やそれに含まれる化石の新旧を決定する基礎になっている。但し、地殻変動によって層理が逆転している事もあり、地層の変形が大きい場合は、変形以前の地層の上下を確認する必要がある。幾つかの地層が平行に重なり合っているとき、これを**整合**といい、安定的な環境の下で堆積が連続して行われたことを示している。しかし、中には上下の重なり合う地層の間に不連続な面が見られる場合がある。これは地層が形成される間に堆積の中絶があった事を示しており、**不整合**といい、境界面を**不整合面**という。不整合な地層が海成層同士の場合、下の地層が堆積してから地殻変動が起こり、地層が海面上に出て浸食を受け、その後海底に沈下して上の地層が堆積したものである。つまり、**不整合面の凹凸は、下の地層が陸上で浸食を受けた証拠**である。



様々な不整合

【問題 3-07】 地質構造の推定②

次の文を読んで以下の問A～Gに答えよ。

ある地域に分布するA層、B層およびC岩体について、次の事が分かっている。

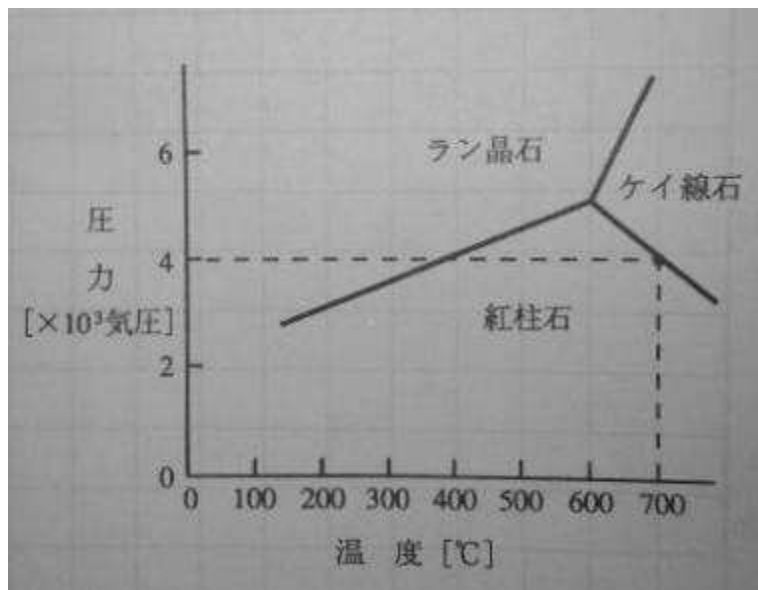
A層：主に泥岩によって構成される三畳系であって、C岩体と接している。

B層：主に砂岩によって構成されており、ビカリヤやデスモスチルスの化石を産出する。

C岩体：大きな花崗岩であって、絶対年代 8×10^7 年であることが分かっている。

この地域には他の地層や岩体はなく、また、A層、B層、C岩体の間に断層はない。

問A A層のC岩体に近い部分は泥岩ではなく、そのD点ではケイ線石と紅柱石が共存していた。これらの鉱物が 700°C で晶出したとすると、その時D点は地表から何 km のところにあったか。地殻の平均密度を 2.8g/cm^3 として計算し、根拠も記せ。なお、 Al_2SiO_5 を化学組成とする3つの鉱物の安定な条件は下図の通りである。



問 B D 点でケイ線石と紅柱石が晶出した原因について、100 字以内で説明せよ。

問 C A 層の D 点の部分の岩石は何と呼ばれるか。

問 D C 岩体の絶対年代の決定に利用された有色鉱物は何か。

問 E A 層と B 層とはどのように接しているか。 根拠とともに 100 字程度で答えよ。

問 F B 層と C 岩体が接しているとすれば、両者の関係はどのようなになっているか。
根拠とともに 100 字程度で答えよ。

問 G C 岩体形成の年代を紀で答えよ。

解答

問 A 14km (解答の導出過程は、解説を参照)

問 B 接触変成作用による。 A 層は三畳系、C 岩体は白亜系であり、C 岩体は A 層より新しく、両者の関係は断層ではないので C 岩体は A 層への貫入岩体である。 よって、A 層は接触変成作用を受けていると考えられる。

問 C ホルンフェルス

問 D 黒雲母

問 E B 層は第三系で A 層は三畳系であり、両層は堆積時が離れており、しかも断層ではないので、B 層は A 層の上に不整合で重なる。

問 F B 層は第三系で C 岩体は白亜系であり、B 層は C 岩体より新しい。 しかも断層ではないので、B 層と C 岩体の関係は不整合である。

問 G 白亜紀

解説

問 A 図から 700℃における圧力は 4000atm である。 地殻の密度を 2.8g/cm³ とすると、深さ 1km ごとに圧力が約 280atm 増加する。 よって、4000atm になる深さは $4000/280 \div 14\text{km}$ である。

問 B A 層は三畳系であり、C 岩体は絶対年代 8×10^7 年より白亜系である。 地層と深成岩体が断層以外の関係で、深成岩体の方が新しいとき、深成岩体が地層に貫入している。 よって、A 層は C 岩体による接触変成作用を受けており、C 岩体の近くにあるケイ線石や紅柱石は再結晶作用によって生じたものと考えられる。

問 C 泥岩が接触変成作用を受けるときホルンフェルスが形成される。 ホルンフェルス内の高温の部分にはケイ線石、貫入岩体から離れたところに紅柱石を生じる。

問 D 花崗岩の絶対年代は K-Ar 法によって決められる。 この時に利用される有色鉱物は黒雲母である。

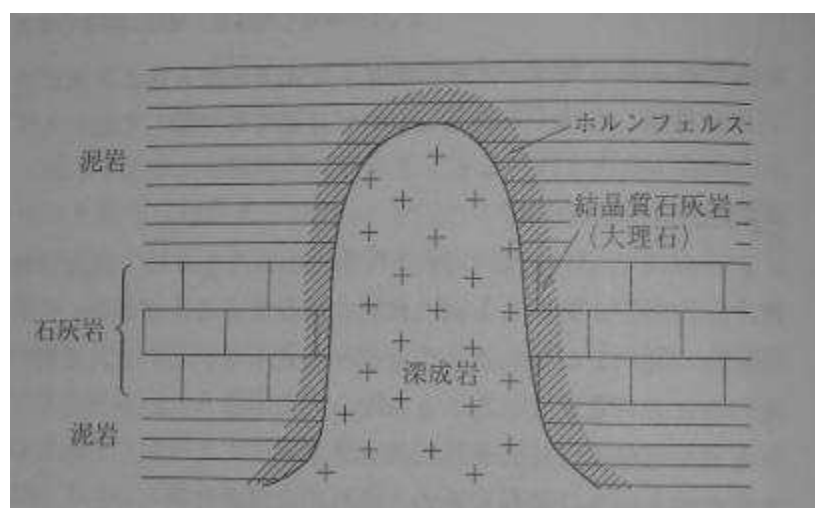
問 E 二つの地層が断層以外によって接しているとき、両者が連続して堆積している場合は整合であるし、両者の堆積している時期が離れている場合は不整合である。 A 層は三畳系であるが、B 層は化石のデスモスチルスやピカリヤを含むことから第三系であり、A 層と B 層とは時期的に大きな隔たりがある。 従って、B 層は A 層に不整合に重なっている。

問 F 地層と花崗岩体が断層以外で接している場合、地層の方が新しければ不整合であるが、花崗岩体の方が新しければ貫入である。 深成岩は地殻内部で形成されるから、整合で地層と接する事はない。 B 層は新第三系であるが、C 岩体の絶対年代 8×10^7 から白亜系である。 よって B 層が C 岩体の上に不整合に重なっている。

問 G 中性代は約 2.5×10^8 年前から 6.5×10^7 年前までの間である。 従って、 8×10^7 年前は、中生代の末期、**白亜紀**である。

【参考】火成岩と堆積岩の新旧関係

火成岩が堆積岩やその他の岩石と接する場合の関係にはいろいろあるが、代表的な一つに**貫入関係**がある。 堆積岩や火成岩が以前から存在しているところにマグマが貫入して冷却固結し、新しい火成岩ができた場合の古い岩石と新しい火成岩の関係である。 この場合、堆積岩が火成岩に貫かれているところが観察されたり、接触変成を受けているのが確認されたりする。 また、火成岩中に周囲の堆積岩の破片(捕獲岩もしくはゼノリスという)を含んでいることでも、識別できる。 貫入している火成岩は貫入されている堆積岩より新しく、変成を与えている火成岩は変成されている堆積岩より新しい。



火成岩の貫入による変成作用

もう一つ代表的なのが、**整合・不整合の関係**である。 火成岩の上に堆積岩が重なっている場合、火成岩と堆積岩の関係は不整合である場合が多い。 火成岩が深成岩であれば、明らかに不整合である。 火成岩が安山岩のような場合だと、不整合の事も整合の事もある。 例えば、海底に溶岩が流れたときは、溶岩とその上に重なる堆積岩との間に時間的な間隙がなく、整合である。 火成岩の上に堆積岩が重なっている場合、整合・不整合に関わらず、堆積岩の方が火成岩より新しい。

【問題 3-08】 地質構造の図示【難】

ある地質調査を行った結果、地層、岩体および、断層について次の事が分かった。

地層 A： 砂岩層で、走向 E-W、傾斜 45° S、トリゴニア、イノセラムスなどを産する。

地層 B： 泥岩層で、南北方向の軸を持つ背斜構造をしている。

三葉虫やスピリファーの化石を産する。

地層 C： 主に砂岩によって構成されており、走向 N-S、傾斜 30° W。

ビカリヤを産するが、かつてデスモスチルスの歯が発見された事がある。

地層 D： ほぼ水平な火山灰層で、この中から石器が発見された。

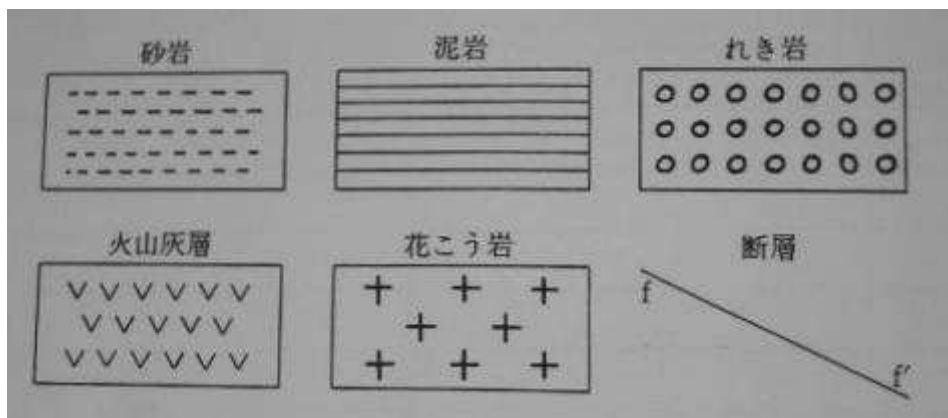
岩体 E： 花崗岩の底盤(バリソス)で、地層 A、B、C と接している。

絶対年代は 5×10^7 年である事が分かった。

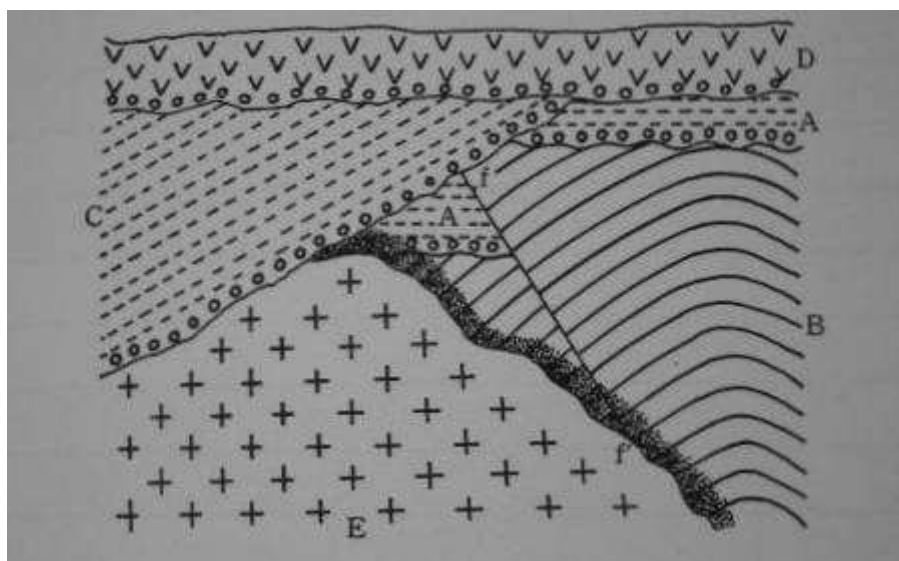
断層 f-f'： 走向 N-S、傾斜 60° E、地層 A の堆積と岩体 E の貫入の間に形成された事が分かっている。 また、この地域に他の断層はない。

以上の地層、岩体、断層の相互関係が分かるように、東を右側、西を左側として、東西方向の垂直断面図を描け。 図では、礫があると考えられる部分、および接触変成岩となっていると考えられる部分にはそれを示し、地層、断層の傾斜角は、上記の説明文とできるだけ矛盾がないように描け。

地層、岩体、断層には、それぞれ次の記号を使用せよ。



解答



解説

図示に当たって、注意すべき事項を列举する。

地層 A： 走向が E-W で、断面図の方向と一致している。従って、断面図では地層 A は水平になる。トリゴニア、イノセラムスなどを産出するから、中生界後期の地層である。断層 f-f' の前に形成されているので、地層 A は断層 f-f' によって切断されている。

地層 B： 三葉虫を産出するから古生界である。背斜構造の軸は N-S で、断面図に垂直だから、断面図には背斜構造がそのまま表れる。地層 A と地層 B の間には時間的な隔たりがあり、地層 A の方が新しいので、地層 A は不整合面を隔てて、地層 B の上に重なっている。断層 f-f' は地層 A の後で形成されているので、地層 B もこの断層 f-f' によって切断されている。

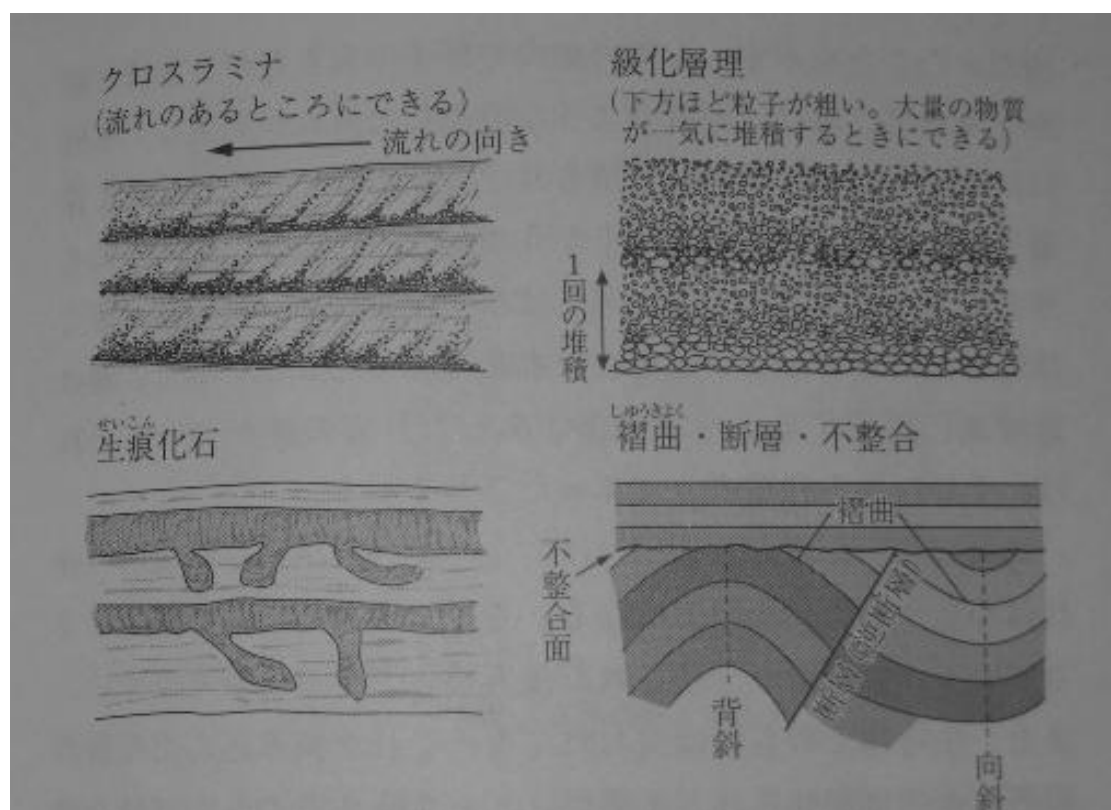
地層 C： ビカリヤ、デスモスチルスを産出するから、新第三系であって、中生界 A との間は不整合面である。この地層は断層 f-f' より新しいので、ここで断層が切れている。走向は N-S で断面図に垂直であるから、この地層の傾斜 30° W はそのまま断面図に表れる。

地層 D： 石器を産出するから第四系で、この断面図では最も新しく、この地域の地層の最上部に不整合で重なっている。

岩体 E： 絶対年代 5×10^7 年であって、地層 A および地層 B よりも新しいので、これらの地層に貫入している。従って、地層 A および地層 B は岩体 E によって、接触変成作用を受けている。新第三系の地層 C は岩体 E の貫入後に堆積しているので、地層 C と岩体 E の間是不整合である。 岩体 E は断層 f-f' より新しいので、ここで断層が切れている。

断層 f-f'： 走向 N-S で断面図に垂直であるから、傾斜 60° E はそのまま断面図に表れる。 この断層は地層 A の堆積と岩体 E の貫入の間に形成されているから、地層 A と地層 B はこの断層 f-f' によって切断されているが、岩体 E とこれより更に新しい地層 C によって切断されている。

【参考】地層に含まれる様々な情報



第4章 大気・海洋

4-01 大気に関する基礎事項

4-02 大気の安定性と断熱減率

4-03 風に働く力と風速

4-04 大気の大循環①

4-05 大気の大循環②

4-06 大気の断熱変化と循環

4-07 太陽放射の基礎

4-08 太陽放射と惑星の大気

4-09 淡水と海水の温度変化

4-10 海水と海流

4-11 潮汐と起潮力①

4-12 潮汐と起潮力②

【問題 4-01】 大気に関する基礎事項

次の現象 A～D の原因について、それぞれ、60～100 字で説明せよ。

現象 A： 中緯度地域の上空では、冬になると偏西風が強くなる。

現象 B： 晴天の日の午後には洗濯物が乾きやすい。

現象 C： 成層圏にはほとんど雲がない。

現象 D： 空気塊が上昇するとその気温は下る。しかし、空気塊の中で水蒸気の凝結が起こる時には温度が下りにくい。

解答

- 現象 A 冬には低緯度地方と高緯度地方の気温の差が大きく、空気の密度は低緯度で小さく、高緯度で大きい。さらに、転向力の影響で中緯度の圏界面付近では高緯度側への気圧傾度が大きく、偏西風が強くなる。
- 現象 B 晴天の日の午後には地表付近の気温が上昇し、大気の飽和水蒸気圧が大きくなる。これによって、飽和水蒸気圧に反比例して湿度が下り、水分の蒸発が激しくなって、洗濯物が乾きやすくなる。
- 現象 C 成層圏には太陽の紫外線によって形成されたオゾン層があり、これが紫外線を吸収して上空ほど気温が高い。これは大気の絶対安定を意味し、上昇気流が起こりにくい。これによって、成層圏ではほとんど雲が発生しない。
- 現象 D 上空の気圧が低いので、上昇気流は断熱膨張によって温度が下る。しかし、水蒸気の凝結が起こると、これによって放出される潜熱のエネルギーを大気が吸収し、温度が下りにくくなる。

解説

現象 A 冬になると、高緯度地方は太陽光の入射がないので低温になるが、低緯度地方の気温の変化は小さい。低温の空気は収縮して密度が大きい、高温の空気は膨張して密度が小さいので、地上の空気を一定と仮定すると、上空の気圧は低緯度で高く、高緯度で低い。これを 500hPa の等高線図で示したものが下図である。転向力がなければ、低緯度から高緯度への風によって、この気圧差は解消するが、転向力があることによって偏西風が生じ、この気圧差が保たれる。この大きい気圧傾度によって冬の中緯度では圏界面付近に中心を持つ強い偏西風がある。この中心部をジェット気流という。



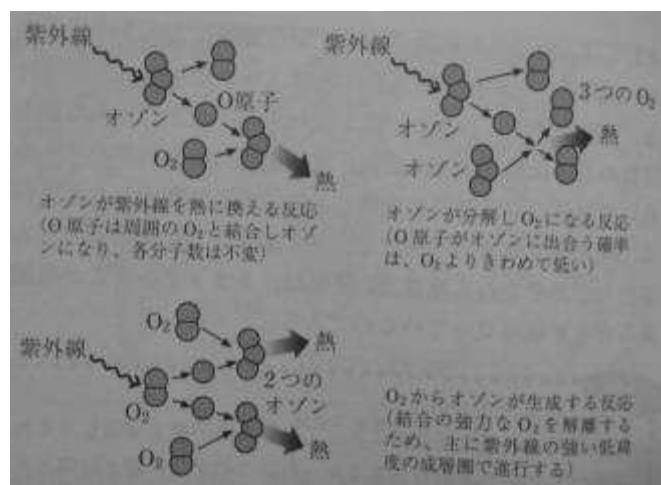
現象 B 湿度は次の式によって求められる。湿度 = (水蒸気圧 / 飽和水蒸気圧) × 100% 飽和水蒸気圧は気温が高いほど大きいので、水上気圧を一定と仮定すると、気温が上昇するほど湿度は低くなり、気温が下降すると湿度が高くなる。晴天の午後、気温が上昇すると湿度が低くなり、水の蒸発が活発化する。

現象 C 成層圏では太陽放射の紫外線によって、オゾン層が形成されている。

オゾンが紫外線を吸収すると、次の反応が起こる。 $O_3 \rightarrow O_2 + O$

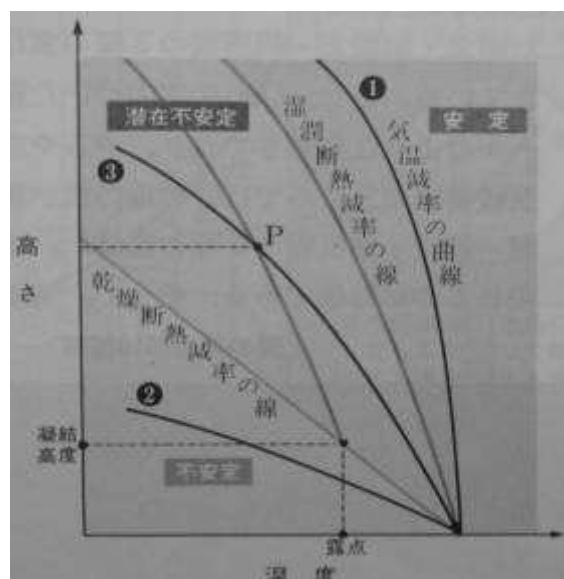
これによって生じた O 原子は、次のように反応して、この際に発熱する $O_2 + O \rightarrow O_3$

以上より、成層圏では上空ほど高温であって、大気は絶対安定となっている。雲は主に上昇気流によって生じるので、絶対安定で、上昇気流の起こりにくい成層圏では雲がほとんど生じない。



現象 D 上空では気圧が低いので、上昇する空気塊は高度を増すほど体積が増大する。体積の増大する空気塊の温度は下降するので、上昇する空気塊は、熱が加わらない限り温度は下降する。乾燥した空気塊はこれによって、100m 毎に約 1℃の割合で気温が下がるが、これを**乾燥断熱減率**という。

水蒸気で飽和した空気塊では、温度が下降すると水蒸気が凝結し、約 600cal/g の割合で潜熱が放出される。この場合には、上昇する空気塊の気温下降の割合は小さくなる。これを**湿潤断熱減率**という。



【問題 4-02】 大気の安定性と断熱減率

次の文を読んで以下の問A～Cに答えよ

乾燥した空気塊が断熱的に上昇するとき、1km ごとに約 10K の割合で温度が下がる。この割合を（ 1 ）率という。しかし、比較的暖かく、水蒸気で飽和している空気塊が上昇する場合、1km ごとに約 4 K 程度しか温度が下らない。この割合を（ 2 ）率という。

気温減率が（ 1 ）率よりも大きい状態を大気は（ 3 ）であるといい、気温減率が（ 1 ）率より小さく、（ 2 ）率よりも大きい状態を大気は（ 4 ）であるという。また、気温減率が（ 2 ）率より小さい状態を大気は（ 5 ）であるという。

問 A 文中の（ 1 ）～（ 5 ）にそれぞれ適切な語句を答えよ。

問 B （ 1 ）率が（ 2 ）率よりも大きい理由を説明せよ。

問 C 夏の強い日差しのもとでは積乱雲が発生する事がある。この時の大気の状態と、大気がそのような原因を 150～200 字で説明せよ。

解答

問 A 1 : 乾燥断熱減 2 : 湿潤断熱減 3 : 絶対不安定
4 : 条件付き不安定 5 : 絶対安定

問 B 水蒸気の凝結に伴って、潜熱が放出されるから。

問 C 太陽放射の電磁波では可視光線が最も強いが、大気は可視光線に対しては透明に近く、対流圏に入射した夏の強い太陽エネルギーの多くは地表に達し、そこで吸収される。地表が高温になると、そのエネルギーは地表に近い大気層で多く吸収されるので、対流圏の気温減率は大きくなり、対流圏の大気は著しい絶対不安定の状態になる。これが原因となって激しい上昇気流が起こって、積乱雲が発生する。

解説

問 A・B 水蒸気で飽和した空気塊が上昇するときには、温度の降下に従って、凝結が起こり、水蒸気に蓄えられていた潜熱が放出されるので、温度の下降が抑えられる。 湿潤断熱減率が小さいのは、この潜熱の放出と吸収が関与しているためである。

問 C 対流圏に入射する太陽放射は、主に可視光線であるが、大気は可視光線に対してほとんど透明であって、直接吸収する太陽エネルギーは少ない。 従って、対流圏に入射する日射は主に地表で吸収される。地表が高温になると、これによって大気は暖められるが、この時、地表に近い大気ほど、多くのエネルギーを吸収して温度が上昇し、気温減率が大きくなって、大気は絶対不安定となる。

こうして不安定となった大気圏では上昇気流が起こるが、この空気塊の温度が下り、飽和状態になると、凝結が始まり、空気塊は雲を生じながら上昇を続ける。 対流圏上部では気温減率が地表付近よりも小さいが、上昇する空気塊の温度は湿潤断熱減率で下るので、空気塊は上昇しやすく、圏界面の近くまで上昇する事が多い。 この上昇気流に伴って、鉛直方向に大きく成長するのが積乱雲である。 積乱雲の発達には、雷雨を伴うことが多い。

【参考】大気の安定性・不安定性

空気塊が上昇する過程を観察すると、周囲の大気よりもわずかでも軽ければ、浮力を得て上昇する。その際、周囲の大気と等しい圧力を保ちながら上昇するので、上昇に従い、周囲の気圧も下ってくると空気塊も自らの圧力を下げて膨張する。空気塊には外部から熱エネルギーが供与された訳ではないので、このような膨張の仕方を**断熱膨張**という。空気塊が断熱膨張すると、周囲の大気を押し込む為のエネルギーが使われるが、外部から熱が得られない以上、自らの熱を消費せざるをえず、断熱膨張に際しては気温が低下する。反対に、空気塊を断熱状態で圧縮すると、気温が上昇する。これを**断熱圧縮**という。

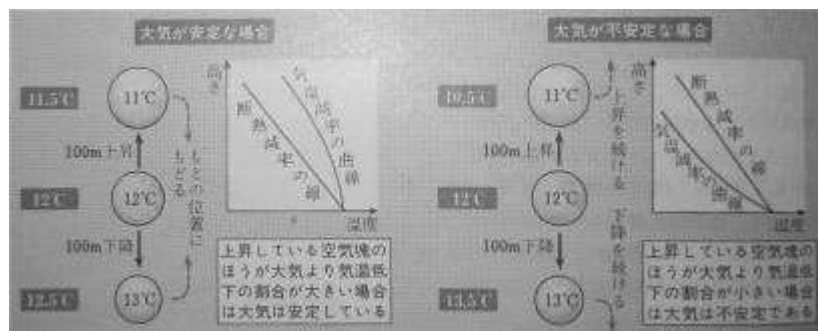
断熱変化による気温の変化の割合を**断熱減率**という。断熱減率には、空気塊が水蒸気で飽和しているか不飽和かで2通りに分かれる。水蒸気が不飽和の場合、上昇している空気塊の温度は100m上昇する毎に、約1℃低下する。下降している空気塊も100m毎に約1℃上昇する。このような気温変化の割合を**乾燥断熱減率**という。上昇している空気塊が水蒸気で飽和している場合、水蒸気が凝結する際に**凝結熱**を放出して空気塊を暖めるので、断熱減率は、乾燥断熱減率に比べて小さくなる。この時の断熱減率を**湿潤断熱減率**という。

気温減率(高さによる気温低下の割合)より、空気塊の断熱減率が大きい時、空気塊の密度は大気の密度より大きくなり、下降して元の位置に戻る。このような大気の状態を**安定**という。気温減率より空気塊の断熱減率が小さい時、空気塊が強制的に上昇させられると、空気塊は大気より軽くなって上昇を続ける。逆に、空気塊が下降させられた場合、周囲の大気の温度より低いので重くなって下降を続ける。このような大気の状態を**不安定**という。断熱減率には、乾燥断熱減率と湿潤断熱減率があり、前者の方が後者より大きいので、安定度には3つのパターンがある。

- 1) **絶対安定** : 気温減率が湿潤断熱減率より小さい時、大気は安定となる。
- 2) **絶対不安定** : 気温減率が乾燥断熱減率より大きい時、大気は不安定で、空気塊が強制的に上昇させられると、上昇を続け、露点に達するまでは乾燥断熱減率で、その先は湿潤断熱減率で温度が低下する。
- 3) **条件付不安定** : 気温減率が乾燥断熱減率より小さく、湿潤断熱減率より大きい時、大気は安定であるが、空気塊が強制的に上昇させられて湿潤断熱減率が気温減率に等しくなると、そこからは不安定化し、空気塊は上昇を続ける。



断熱減率と安定度

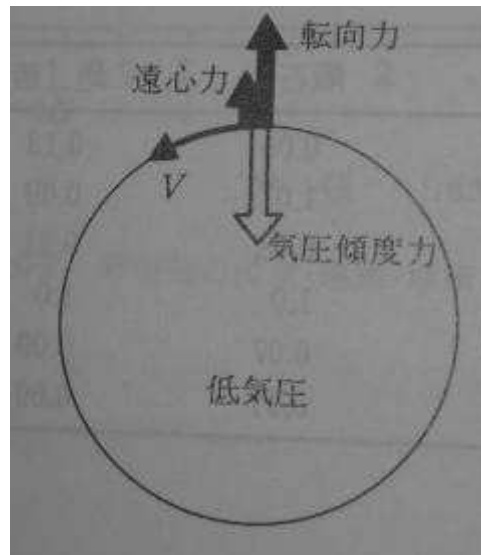


大気の安定・不安定

【問題 4-03】 風に働く力と風速

次の文を読み、問A～Dに答えよ。 解答に至る過程も記せ。

北半球では、低気圧の中心の周りを空気は反時計回りに回転する。 下図にはある空気塊に注目して、それが低気圧の中心の周りを、半径 r の円を描いて反時計回りに回転している状態が示されている。 この時、空気塊には、外側に遠心力も働く。 この状態において、空気塊に働く、気圧傾度力、転向力、遠心力の3つが釣り合っている。 この空気塊の質量を1、それに働く気圧傾度力の大きさを F とする。 空気塊の速度を V とすると、空気塊に働く転向力の大きさは kV (k は正の定数)、遠心力の大きさは V^2/r である。



- 問A この空気塊に働く遠心力を無視して、地衡風の速度を求めよ。
- 問B 遠心力も考慮して、風の速度を求めよ。 この速度と、問Aで求めた地衡風の速度では、どちらの方が大きいのか。
- 問C 高気圧の周りを、質量1の空気塊が、半径 r の円を描いて、時計回りに回転しているとする。 気圧傾度力、転向力、遠心力が釣り合っている状態を考える。 この状態での風の速度と、遠心力を無視した地衡風の速度ではどちらが大きいのか。
- 問D 問Cで遠心力を考慮して求められた風の速度 V と気圧傾度力 F の関係において、 F には最大値が存在する。 その大きさと、その時の V を求めよ。

解答

問A $V = F / k$

問B $V = [\{ (kr)^2 + 4Fr \}^{(1/2)} - kr] / 2$

地衡風の風速は低気圧の周りの風速より大きい。

問C 高気圧の周りの風速は、地衡風より大きい。

問D F の最大値： $(k^2 \times r) / 4$ 風速： $kr / 2$

(解答の導出過程については、解説を参照)

解説

問A 地衡風では、気圧傾度力と転向力が釣り合っていて、風は等圧線に平行に吹く。

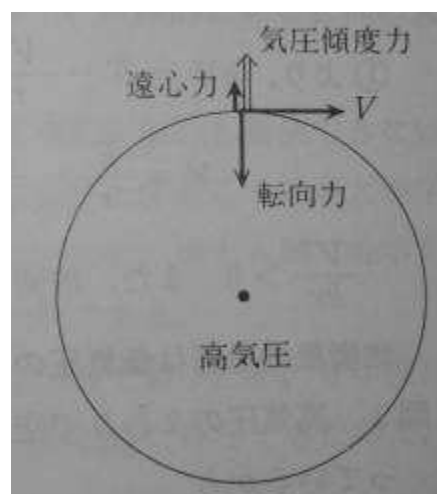
よって、 $F = kV$ $V = F / k$ となる。

問B 図に示されているように、低気圧の周りでは、空気塊に働く気圧傾度力は、転向力と遠心力の合力に釣り合っている。 よって、 $F = kV + V^2 / r$ …① が成立する。 ①を変形して

$V^2 + krV - Fr = 0$ $V > 0$ であるから、 $V = [\{ (kr)^2 + 4Fr \}^{(1/2)} - kr] / 2$ これが求める風速である。

①より、 $kV = F - V^2 / r$ $V = F / k - V^2 / kr$ となる。 $V^2 / kr > 0$ であり、地衡風では $V = F/r$ であるから、気圧傾度を一定とすれば、地衡風の風速は低気圧の周りの風速より大きい。

問C 高気圧のまわりで空気塊に働く転向力は、下図のように、気圧傾度力と遠心力の合力と釣り合っている。 よって、 $kV = F + V^2 / r$ …② $V = F / k + V^2 / kr$ $V^2 / kr > 0$ であり、地衡風の風速は F/k であるから、気圧傾度を一定とすれば、高気圧の周りの風速は地衡風よりも大きい。



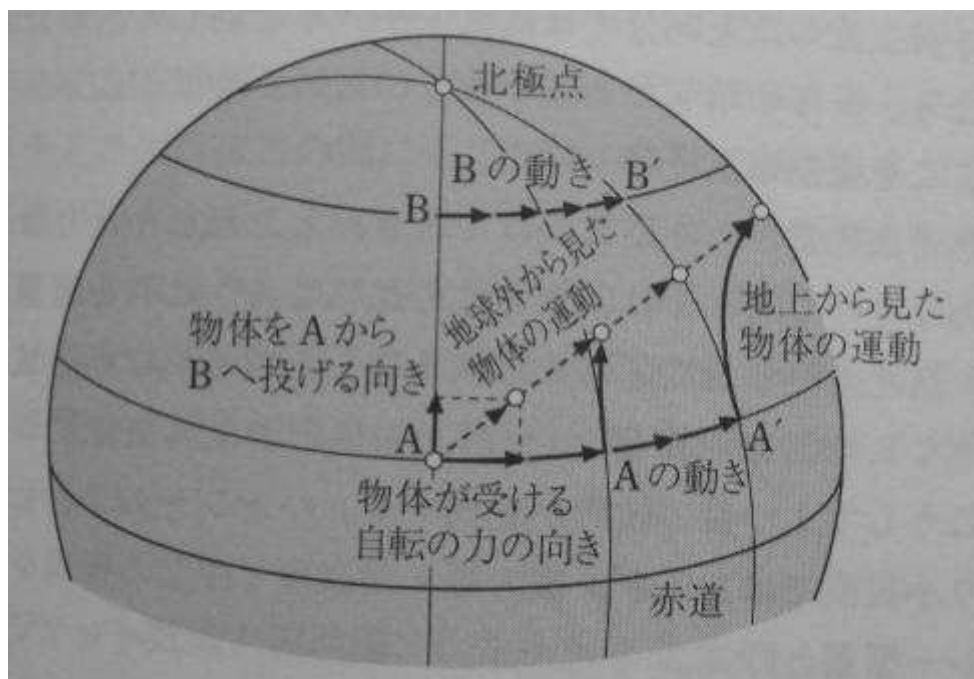
問D ②より、 $F = -V^2 / r + kV = -[V - (kr/2)]^2 - (kr)^2 / 4] = (kr)^2 / 4 - [V - (kr/2)]^2$

$r > 0$ であるから、 F の値は $V = (kr/2)$ の時最大となり、最大値は $(kr)^2 / 4$ である。

【参考】空気塊に働く力

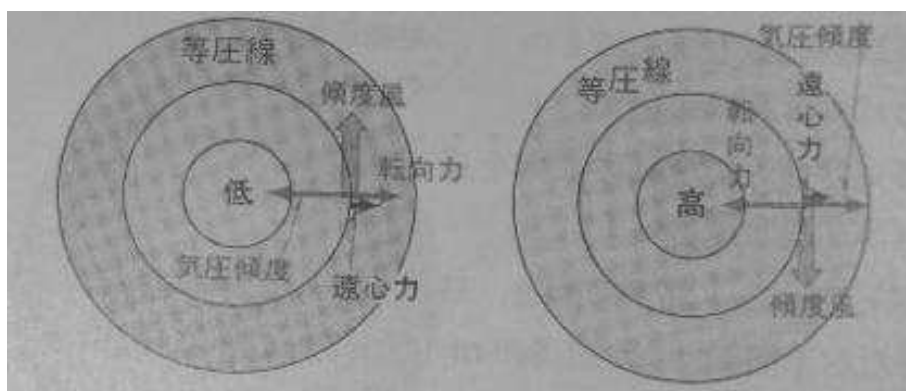
空気塊は暖められると膨張し、軽くなって上昇する。上昇気流の上端では余分な空気が周囲に流出し、下端では空気が薄くなって**低気圧**となり、空気が流れ込む。逆に空気が冷却されると収縮し、重くなって下降する。下降気流の下端では空気が圧縮されて**高気圧**になり、空気が周囲に押し出される。大気の温まり方に差があると、気圧差が生じ、高気圧側から低気圧側へと風が吹く。気圧の差が大きいほど、その間の大気を押し流そうとする力が強く働く。これが**気圧傾度力**である。

大気の流れには、地球の自転が影響している。大気は回転運動する地球上で運動すると、北半球では、進行方向に対して右側にそれるように動く。これを、直角右向きに力を受けたと解釈し、その力を**転向力（コリオリの力）**と呼ぶ。下図において、同じ子午線上にある2点 A、B において、低緯度 A から高緯度 B に向けて物体を投げると、物体の速度には A における自転速度が加わる。地面も物体と同じ自転速度で動いていれば、物体の自転方向の運動は相殺されるが、高緯度側にある B は A より自転速度が遅い為、物体は B よりも東側に逸れて到達する事になる。これを自転する地上から見ると、物体は A を離れて B に向かうが、まるで、進行方向右側に力が働いたように、B の東側にそれていく。これがコリオリの力であり、北半球では進行方向右向き、南半球では左向きに働く。また、自転速度の差が大きくなる高緯度ほど、強く働く。



コリオリの力（転向力）

大気や海流に働く力は、**気圧傾度力**（海洋では**圧力傾度力**）と**転向力**である。気圧傾度に釣り合う流れは、高圧部を右に見て、等圧線に沿って流れる。この流れを**地衡風**（海洋では**地衡流**）という。等圧線が直線ではなく、曲線である場合、その曲率に応じて**遠心力**が働くようになる。そのため、遠心力を考慮した釣り合いを考える必要がある。



傾度風の力の釣り合い

気圧傾度力、転向力、遠心力の3つの力が釣り合った状態で吹いている風を**傾度風**（海洋では**傾度流**）という。低気圧や高気圧の中心付近の等圧線はほぼ円形で、曲率が高いので、傾度風の釣り合いを考える必要があるが、半径数百キロより外側では曲率は十分小さく、遠心力は無視できるので、地衡風になる。

【問題 4-04】 大気の大循環①

次の文を読み、以下の問A～Dに答えよ。

低緯度地方では太陽からの受熱量が放熱量より大きいが、高緯度地方ではこの逆である。しかし、大気と海水の流れによってエネルギー収支は保たれている。

低緯度地方では、地表付近の大気が赤道に向かい、上空の大気がこの逆に流れる傾向がある。これを**ハドレー循環**と呼ぶ。一方、中緯度地方では、地表に低気圧や高気圧もあるが、上空には蛇行しながら地球を一周する偏西風がある。これを**フェレル循環**という。

問A 単位面積について考えるとき、春分の日赤道に入射する太陽エネルギーは、地球全体の平均の何倍になるか。

問B 上に述べたように、大気の大循環の様子は、低緯度と中緯度とで著しく異なっている。この原因を100字以内で説明せよ。

問C 大気は低緯度地方でどのようにしてエネルギーを吸収し、これをどのようにして中緯度地方に運んでいるのか。130字以内で説明せよ。

問D 偏西風の状態は季節によって変化する。これが最も強くなるのはいつか。その理由と共に60～80字で答えよ。

解答

問A 地球の半径を r 、太陽定数を I とする。

赤道の単位面積に入射する太陽エネルギーの平均値は $2\pi I / 2\pi r = I / r$

地球表面の単位面積に入射する太陽エネルギーの平均値は $\pi r^2 \times I / 4\pi r^2 = I / 4$

よって、求める比は $(I / r) / (I / 4) = \underline{4 / r}$ となる

問B 低緯度では転向力が極めて小さいので、太陽放射による子午面内の対流が起こりやすいが、中緯度では転向力が大きく、子午面内の対流が妨げられて、偏西風と渦とが大循環の中心になる。

問C 偏東風は赤道に向かうと海面から蒸発する水蒸気を吸収するが、これには多量の潜熱が含まれている。また、太陽放射の吸熱、地表からの赤外線吸収、地表からの熱伝導によってもエネルギーを得ている。これが熱帯収束帯で上昇し、上空を亜熱帯に向けてエネルギーを運ぶ。

問D 冬には低緯度から高緯度への気温傾度が最も大きく、これによって上空では南北方向の気圧傾度が最も大きくなって、偏西風が最も大きくなる。

解説

問A 太陽定数を I 、地球の半径を r とすると、地球に入射する太陽エネルギーの合計は $\pi r^2 \times I$ 地球の表面積は $4\pi r^2$ であるから、地球の単位面積当たりに入射するエネルギーが求められる。一方、赤道で単位長を幅とした帯状の地域に入射する太陽エネルギーは $2rI$ であり、帯状地帯の面積は $2\pi r$ であるから、赤道で単位面積当たりに入射する太陽エネルギーが求められる。

問B 緯度を θ とすると、各地の転向力は $\sin \theta$ に比例する。従って、低緯度地方では風に働く転向力が小さいので、大気の温度に応じて子午線方向へ対流が起こる。貿易風がこれであり、この対流をハドレー循環という。しかし、中緯度から転向力が大きくなるので、南北方向の気温傾度による気圧傾度が生じる時、偏西風となり、この蛇行とこれに伴い生じる低・高気圧によって、エネルギーが低緯度から高緯度に運ばれる。これをフェレル循環という。

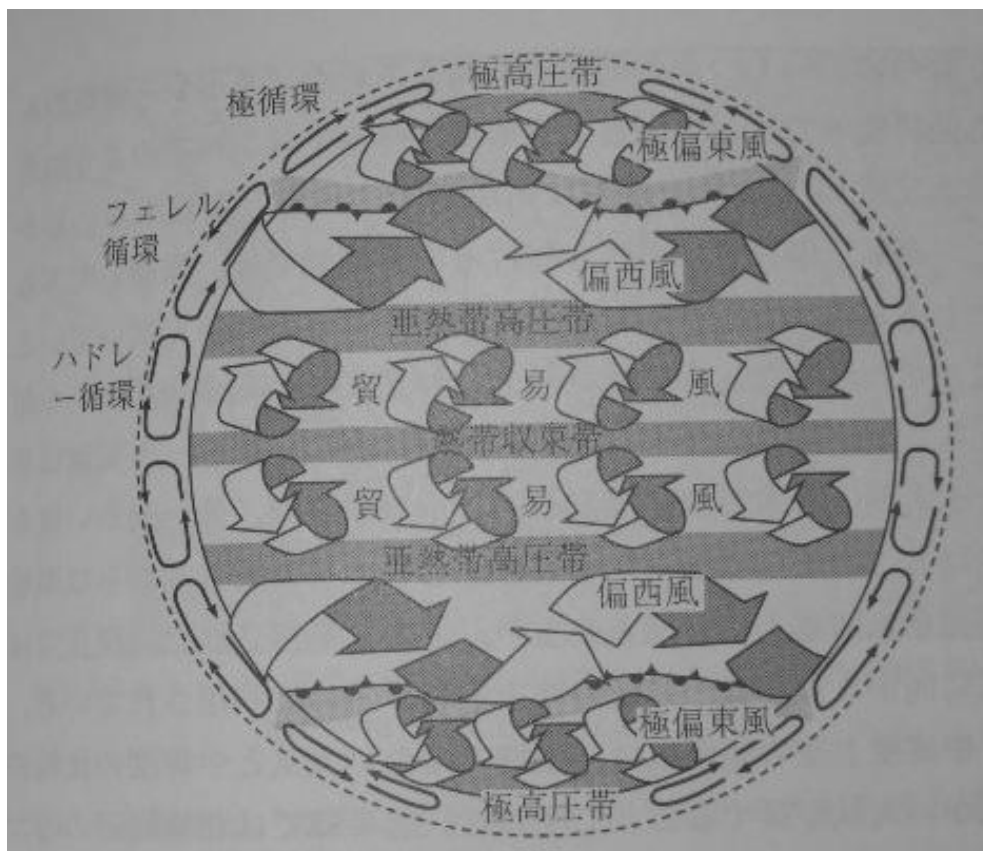
問C 低緯度地方では太陽放射で海面が温められ、多量の潜熱を含んで水が蒸発する。大気を持つエネルギーはこれが最大で、他に太陽放射の吸熱、地表からの赤外線吸収、熱伝導などによって暖められる。大気はこうしてエネルギーを吸収しつつ赤道に向かい、潜熱によって暖められ上昇し、その後中緯度にむかってエネルギーを運ぶ。

問D 冬になると、高緯度地方の気温は低くなるが、低緯度地方の気温はあまり変わらない。このため、子午線方向の気温傾度が大きくなって、上空では子午線方向の気圧傾度が大きくなる。中緯度地方では、転向力が大きいので、子午線方向の気圧傾度によって、いつも偏西風が吹いているが、冬に気圧傾度が大きくなると、特に強いジェット気流になる。

【参考】大気の大循環

赤道付近で温められた大気は、上昇気流となり、対流圏と成層圏の境界面(圏界面)に達すると、南北に流れ出す。(成層圏の大気の方が高温で軽い為、上昇気流は成層圏に入り込めない) 北半球では北に向かって流れ出すが、転向力を受けて右側に逸れだし、北緯 20~30° 付近で、ほぼ真東に向かって吹くようになる。この風には南向きの転向力が働くが、南からは大気が押し寄せてくる為、南下できず、やがて大気が密になって重くなり、下降気流となる。この下降気流の地上部分では高気圧が年中居座り、晴天で少雨なため、砂漠が広がる。ここを**亜熱帯高圧帯**という。ここから赤道に向けて吹き出した風にも転向力が加わり、右に逸れて東よりの風になる。これが**貿易風**である。南北の亜熱帯高圧帯から吹き出した貿易風は赤道域で収束し(**熱帯収束帯**)、最前の上昇気流につながる。これが**ハドレー循環**である。

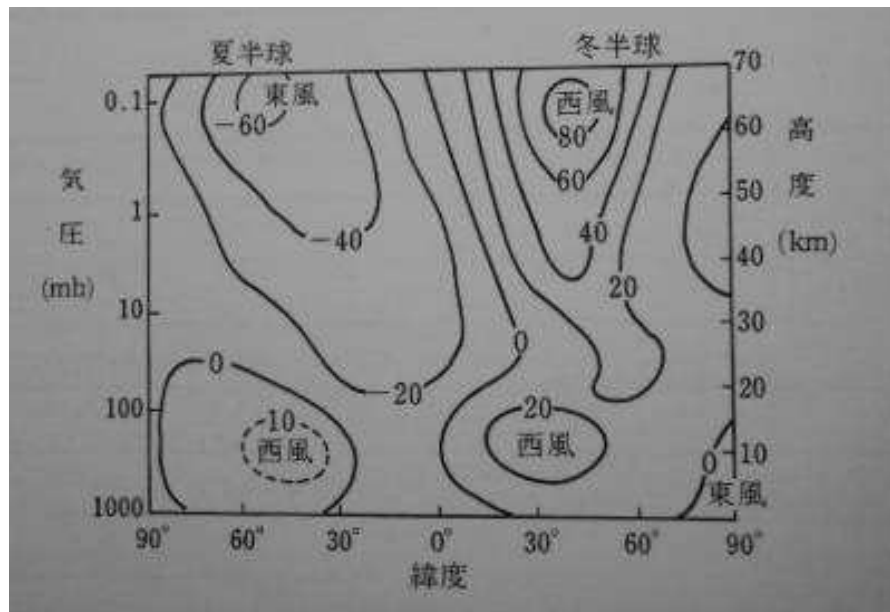
一方、高緯度側には両極の周辺で冷やされた空気が下降気流となって始まる**極循環**が存在する。下降気流でできた極高圧帯から吹き出る冷たい風は、亜熱帯高圧帯から高緯度に向けて吹き出した暖かい風(転向力を受けて西よりの風となるため、**偏西風**という)とぶつかり、帯状の上昇気流である前線をつくって極循環を形成する。さらに、これら二つの循環によって回される弱い循環も存在し、これを**フェレル循環**という。以上、まとめて、下図のような大気の大循環が生じる。



大気の大循環

【問題 4-05】 大気の大循環②

地球大気の大循環では、下図のように偏西風と偏東風が目立っている。図には子午面を通り抜ける偏西風と偏東風が、季節、緯度、高度に応じてどのように変化するかが示されている。図で正の数は偏西風を、負の数は偏東風のそれぞれ速度を m/s で示している。大気の大循環に関して、以下の問 A～E に答えよ。



問 A 図で偏西風および偏東風の速度が最も大きいのは大気圏のどの部分か。次の a ～ e から該当するものを選び、その記号を答えよ。

a 対流圏 b 成層圏 c 中間圏 d 熱圏 e 外気圏

問 B 高度 10km の上空では、中緯度で偏西風が強い。この原因を 100～150 字で説明せよ。

問 C 夏半球の中緯度の高度 60～70km 上空では偏東風が強い。この原因を 100～150 字で説明せよ。

問 D 夏半球では、上部に偏東風、下部に偏西風がある。高度によるこの風向の逆転は何によるものかを 100 字程度で説明せよ。

問 E 低緯度地方では偏西風、偏東風ともに弱く、子午線方向の循環が著しい。この地域の大気の大循環と、中緯度地方の大循環の違いを 100 字程度で説明せよ。

解答

問A c

問B 対流圏の気温は低緯度地方で高く、高緯度地方で低い。高温の大気は膨張しているので、対流圏上部では低緯度から高緯度に向かう気圧傾度がある。これは気温傾度の最も大きい中緯度で最も大きく、この強い気圧傾度力と転向力とによって、中緯度の対流圏上部には強い偏西風が発達する。

問C 夏至の前後に太陽エネルギーが最も多く入射するのは北極であって、成層圏より上では北極の上空が最も高温になる。このため、大気圏のこの部分の気圧は高緯度地方が高く、低緯度地方が低い。これによる気圧傾度力と転向力とによって、中間圏上部には強い偏東風が生じている。

問D 夏の高緯度地方では強い太陽放射によって成層圏より上の大気は高温になるが、入射角が大きく、太陽放射の多くがここで反射、吸収などで失われ、対流圏で吸収されるエネルギーは少なく、対流圏では高緯度地方の大気は低温だから。

問E 低緯度地方では、中、高緯度地方と異なり、転向力が弱く、風は主に気圧傾度力によって吹き、地表を熱帯集束帯に向かう風も、上空を亜熱帯高压帯に向かう風も、中緯度のような激しく蛇行する偏西風や偏東風にならない。

解説

問A 図に示されている通り、偏西風と偏東風が最も強いのは中緯度で、高度 60～80km の領域であるが、ここは中間圏である。中間圏までは激しい風が吹く事によって大気はよくかき混ぜられ、大気の組成は中間圏までほぼ一定になっている。

問B 地衡風では気圧傾度力と転向力とが釣り合っており、偏西風には高緯度に向かう気圧傾度力が働いている。従って、偏西風の強い中緯度地方の高度 10km の上空では低緯度側が高压で、高緯度側が低压である。この原因は以下の通りである。対流圏では太陽放射は低緯度地方で多く吸収され、この地域の大気は高緯度地方よりも高温である。高温の大気は膨張しているので、地表の気圧を一定とすると、対流圏では地表付近を除いて、低緯度が高緯度より高压である。この気圧傾度力によって生じる風が転向力によって偏西風になる。高緯度への気温傾度は中緯度で最も大きく、これに応じて気圧傾度も中緯度で最も大きく、風速がここで大きくなっている。

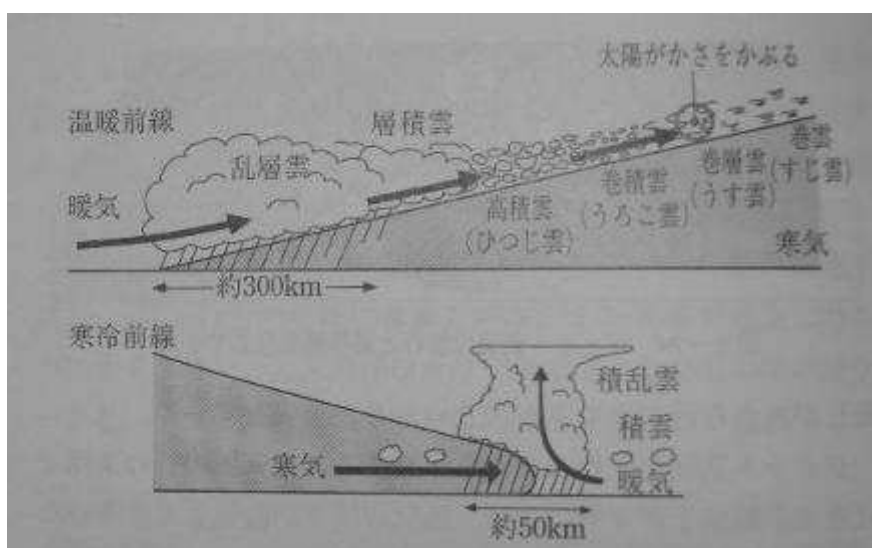
問C 夏至の頃、入射する太陽エネルギーが最も大きいのは夜が無い北極である。このため、成層圏より上の大気圏では、気温は高緯度地方で高く、低緯度地方で低い。よって、この上部の気圧は高緯度では高く、低緯度では低い。この気圧傾度力と転向力とによって、ここでは偏東風が生じる。

問 D 極に入射する太陽放射は入射角が大きく、大気中を通る距離が長いので、大気によって吸収や反射される部分が大きく、地表付近まで達する太陽エネルギーは低緯度地方より少なく、対流圏の気温は夏でも低緯度地方の方が高い。従って、夏でも対流圏の上部は冬と同様、偏西風となっている。

問 E 転向力は地球の自転に伴う地表の回転によるものであって、フーコーの振り子が示すように、地表が回転しない赤道では転向力は働かない。低緯度地方では全体に転向力は弱く、ここでは風は主に気圧傾度力だけによって吹いている。従って、低緯度地方の大気の循環は中緯度地方と異なり、地表付近を亜熱帯高圧帯から熱帯収束帯に向かう風と、上空を熱帯収束帯から亜熱帯高圧帯に向かう風を中心にして成り立っている。これを**ハドレー循環**と呼ぶ。このように、地球大気の大循環の様子が亜熱帯高圧帯を境にして異なるのは、転向力の大小によるものである。

【参考】気圧と前線

雨雲が発達して天気が悪くなる場所には**低気圧**や**前線**が存在する事が多い。そこには必ず上昇気流が存在するからである。逆に**高気圧**が覆うところは天気が良いが、これは下降気流が存在するからである。低気圧が発生する場所により、**熱帯低気圧**と**温帯低気圧**に分類される。温帯低気圧は寒気と暖気の境界線である**前線**上にある。寒気が暖気の下に潜り込む前線を**寒冷前線**、逆に暖気が寒気の上のし上がる前線を**温暖前線**という。温暖前線では暖気が緩やかな傾斜を登る為、雨をもたらす乱層雲も前線から2～300km前方までの広範囲を長期間降る。寒冷前線の場合、寒気の潜り込みで暖気が垂直方向に押し上げられ、積乱雲が発生し激しい雷雨になる。温暖前線では暖気は地表を離れて上昇し、寒冷前線では寒気が侵入してくるので、暖気と地表の接触面が狭くなる。寒冷前線が温暖前線に追いつくと、後方の寒気が前方の寒気に接して**閉塞前線**となり、暖気は地表から切り離される。



温暖前線と寒冷前線

【問題 4-06】 大気の断熱変化と循環【難】

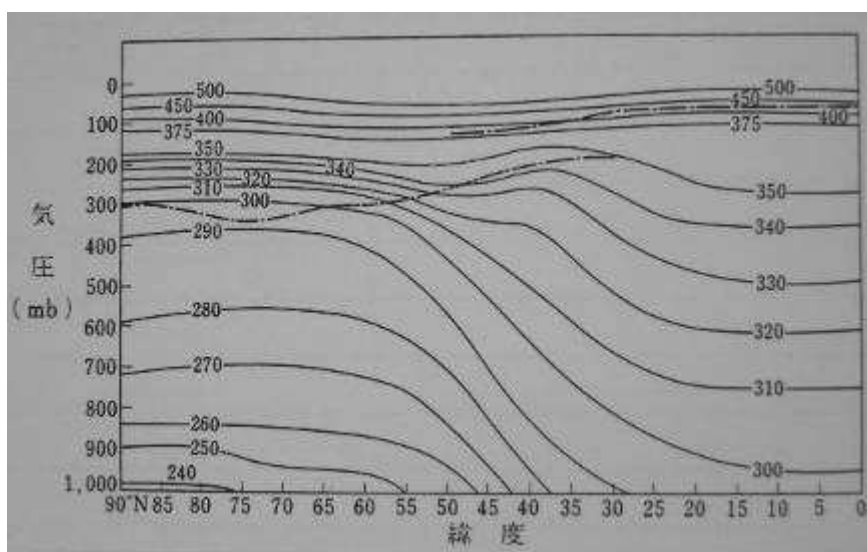
次の文を読み、下の問A～Eに答えよ。

高度 0km（地表）で 20℃の空気塊が、乾燥断熱変化によって高度 1.0km にまで上昇すると、その気温は 10℃になる。また、高度 1.0km で 10℃の空気塊が、乾燥断熱変化によって高度 0km まで下降すると、その気温は 20℃になる。つまり、高度 0km で 20℃の空気塊と高度 1.0km で 10℃の空気塊とは、乾燥断熱変化をしている限り、同一高度または同一気圧では気温が等しいのであって、この状態にある二つの空気塊は**温位が等しい**という。

空気塊の**温位**は、乾燥断熱変化によって、その空気塊が高度 0km（気圧約 1000hPa）のところに移動したときの温度で表している。

下の図は、北半球で西経 80° の子午線に沿った南北鉛直断面上の大気について、1 月の平均温位を示しており、図に示された曲線状の数字は温位であり、その部分の空気塊が乾燥断熱変化によって、高度 0km まで下降したときに達する温度(絶対温度)を示している。

横軸は緯度であり、縦軸は気圧であるが、気圧は高度を示すと言ってよい。例えば、300hPa は高度約 9km を、120hPa は高度約 15km を示している。



図によると、北緯 80° で、高度 9km（300hPa）にある空気塊は、乾燥断熱変化によって高度 0km に達すると 300K となり、北緯 0° で、高度約 9km にある空気塊は、乾燥断熱変化によって、高度 0km に達すると、350K になることが分かる。

- 問 A 北緯 80° では、高度約 9 km (300 hPa)にある空気塊の温位は 300 K である。この空気塊のこの温度における温度はいくらか。
- 問 B 図の 300 hPa 付近にある $\cdots$ は何を表していると考えられるか。
- 問 C 北緯 80° では高度約 9 km (300 hPa) と高度約 15 km (120 hPa)の温位はそれぞれ、 300 K 、 375 K である。この値から、この間の大気の安定性がどのようなになっていると考えられるか、説明せよ。
- 問 D 低緯度地方では、高度 15 km (120 hPa)より上層で、温位が上空に向かって著しく上昇している。このような温位分布を生じた原因を $80\sim 100$ 字で説明せよ。
- 問 E 図によると、中緯度では、地表から約 9 km (300 hPa) 付近までの温位が北に向かって著しく低下している。これによって、この地域の高度約 9 km にはどのような風が吹いていると考えられるか。 $120\sim 160$ 字で説明せよ。

解答

問 A 210K

問 B 圏界面

問 C 温位から気温を求めると、高度 9 km では 210K、高度 15km では 225K である。上空の方が気温は高いので、大気は絶対安定の状態にある。

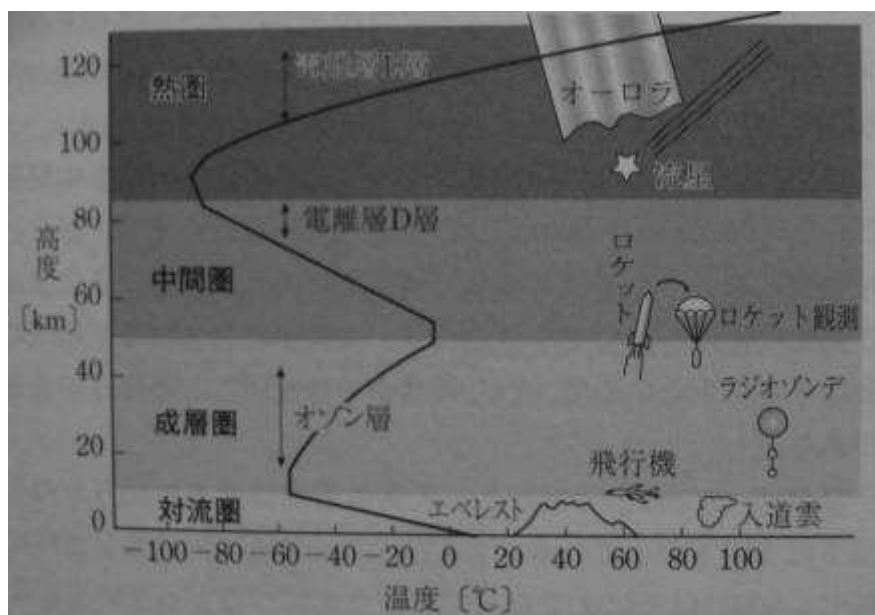
問 D 上空ほど温位が高いのは、上空ほど大気を持つエネルギーが大きい事を示している。この状態は、ここにオゾン層が形成されていて、太陽から入射する紫外線を吸収することによって生じたものである。

問 E 同一高度では温位の差は気温の差に等しい。従って、中緯度では同一高度の気温は北ほど低い。高温の空気は密度が小さいので、上空では南が高圧、北が低圧になっていて、気温差のある大気の上限の高度 9km 付近では南北方向の気圧傾度が最も大きい。この気圧傾度力と右方向に働く転向力とによって、強い偏西風が発達している。

解説

問 A 温位 300K は、その空気塊が高度 0km に移動したときの温度が 300K である事を意味する。乾燥断熱減率は、 $1.0^{\circ}\text{C} / 100\text{m} = 10^{\circ}\text{C}/\text{km}$ であるから、高度 0km で 300K の空気塊は、9km の高度では、これより 90K 低く、 $300\text{K} - 90\text{K} = \underline{210\text{K}}$ である。

問 B 高度 9km より上空では温位が急上昇する。これは 9km より上空では、上空に向かって気温が上昇している事を示しており、ここが成層圏であることが分かる。よって、高度 9km は圏界面である。



大気の温度分布

問 C 高度 9km の気温は $300\text{K}-90\text{K}=210\text{K}$ 、高度 15km の気温は $375\text{K}-(10\text{K}\times 15)=225\text{K}$

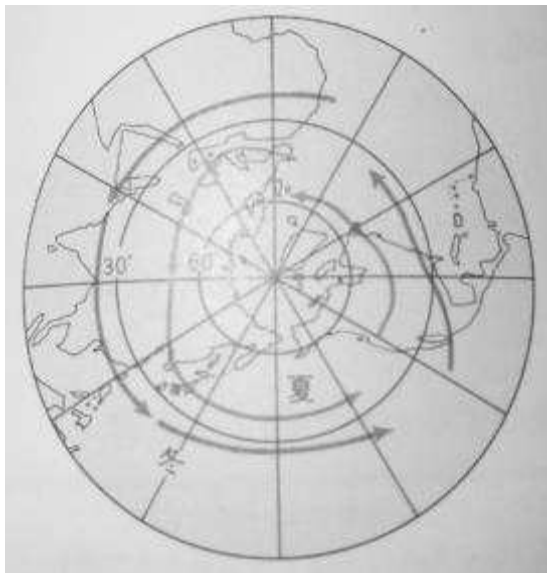
この数字から分かるように、上空ほど気温が高く、大気の状態は絶対安定である。

気温減率が湿潤断熱減率より小さいとき、大気は絶対安定である。

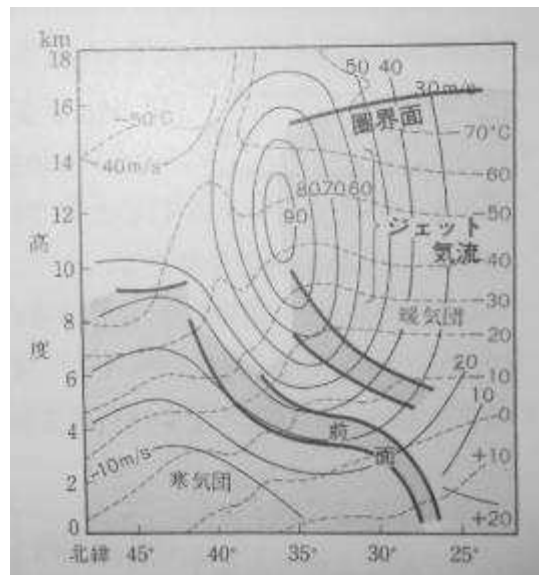
問 D 成層圏では紫外線によって酸素からオゾンが生じ、これが**オゾン層**を形成している。成層圏の気温が高いのは、オゾン層が紫外線を吸収しているからである。

問 E 高温の空気は密度が小さいので、高温の地域ほど上空に向かって気圧が下る割合が小さい。従って、低緯度と高緯度で上空の気圧を比べると、低緯度で高く、高緯度で低くなっている。北半球では運動方向に対して右方向に転向力が働いているので、上空で南高北低の気圧配置があるところには偏西風がある。そして、この気圧傾度の最も大きなところが**ジェット気流**である。

ジェット気流のある高さは 10～12km であり、夏より冬の方が強く、風速は冬場で通常 40m/s、時には 100m/s を超える場合もある。ジェット気流を生じる大きな気圧傾度は、北側の寒気団と南側の暖気団との接触による著しい温度差によるものであり、これより南よりの地表には必ず前線が存在する。幅は数 100km、暑さは数 km で、地球を帯状に取り巻いている。平均位置は夏場と冬場で異なり、冬は低緯度まで南下し、夏場は高緯度まで北上する。



ジェット気流の平均位置



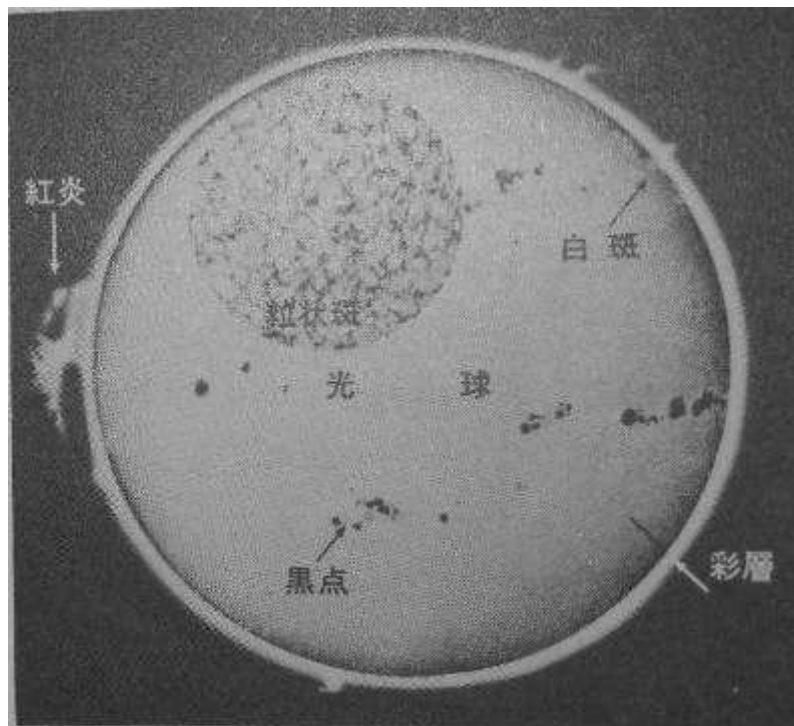
風の垂直分布とジェット気流

【問題 4-07】 太陽放射の基礎

シュテファン・ボルツマンの法則によると、物体の単位表面積から放射されるエネルギーはその絶対温度の 4 乗に比例する。この法則によって、単位表面積から放射されるエネルギーに基づき、その表面温度が求められる。太陽の表面温度が 5800K であることも、これによって求められた。以下の問 A、B に答えよ。

問 A 太陽の単位表面積から放射されるエネルギーは、3 つの量から計算で求められる。この 3 つの量とは何か。 列挙せよ。

問 B 上の 3 つの量を用いて、太陽の単位表面積当たりの放射エネルギーを式で示せ。なお、3 つの量はそれぞれ何であるかを断った上で、適当な記号で表せ。



太陽の光球面

解答

問A 1：太陽定数 2：太陽の半径 3：地球と太陽の距離

問B 太陽定数を I 、太陽の半径を r 、地球と太陽の距離を R とすると、太陽から放射されるエネルギーの合計は $4\pi R^2 \times I$ である。また太陽の表面積は $4\pi r^2$ である。従って、太陽の単位表面積当たりの放射エネルギーは

$$(4\pi R^2 \times I) / (4\pi r^2) = \underline{R^2 \times I / r^2} \quad \text{となる。}$$

解説

太陽は同じ強さで全ての方向に放射しているから、太陽放射の合計は太陽定数に 1 天文単位を半径とする球の表面積を掛ける事によって得られる。また、太陽の単位表面積当たりの放射エネルギーは、太陽の放射エネルギーの合計を太陽の表面積で割る事によって得られる。太陽の表面積は太陽の半径から求められるが、太陽の半径は、太陽の視半径と 1 天文単位から求められる。

以上から、太陽の単位表面積当たりの放射エネルギーを求めるのに必要な量は、太陽定数、太陽と地球の距離、そして太陽の半径もしくは太陽の視半径である事が分かる。

【参考】シュテファン・ボルツマンの法則と太陽放射

黒く感光したフィルム越しに太陽を観察すると、視直径約 $32'$ の白く輝く円盤状に見える。これを**光球**という。光球面は高温のガスでできていて、厚さは約 500km、温度は約 6000K である。太陽定数は $1.95\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ であり、太陽を中心とした半径 1 天文単位の球の表面では、太陽からこの太陽定数に等しいエネルギーを全面に受けるから、光球が 1 秒間に放出する全エネルギーはこの球の表面が 1 秒に受ける全エネルギーに等しいと考えると $3.9 \times 10^{26}\text{J}$ となる。地球と太陽の距離は $1.5 \times 10^{13}\text{cm}$ であるから、光球面は 1m^2 当たり毎秒 $6.3 \times 10^7\text{J}$ のエネルギーを空間に放出している。

一般に恒星のような物体では、表面 1m^2 が 1 秒間に放出する全エネルギーを E ジュール、絶対温度を T とすると、 $E = 5.67 \times 10^{-8} \times T^4$ となる。これがシュテファン・ボルツマンの法則である。この式の E に $6.3 \times 10^7\text{J}$ を代入すると光球面の絶対温度 T が定まり、約 6000K が求まる。

【問題 4-08】 太陽放射と惑星の大気

次の問AからDに答えよ。 問A、Bでは解答を求める過程も記せ。

- 問A 金星では入射する太陽放射の 80%が反射され、吸収されるのは 20%である。金星と太陽の距離を 0.71 天文単位とし、地球で測定される太陽定数が $1.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ とする時、金星の単位表面積に吸収される太陽エネルギーは平均いくらになるか。
- 問B 入射する太陽放射の 30%が反射されるものとして求められる地球の放射平衡温度が 260Kであるとする、金星の放射平衡温度はいくらになるか。 解答の数値は無理数のままでもよい。
- 問C 地球と金星の表面の温度は、それぞれ 290K、720Kであり、これらの値は放射平衡温度と異なっている。その差が地球と金星とで著しく異なる理由を 100 字程度で説明せよ。
- 問D 金星と火星の大気はほとんどが CO_2 であるのに、地球の大気に CO_2 はほとんど含まれていない。しかし、かつては地球の大気にも多くの CO_2 が含まれていたと考えられる。それを示している物質は何か。

解答

- 問 A $1.4 \times 10^2 \text{ W/m}^2$ 問 B $260 \times (14/25)^{(1/4)} \text{ K}$ (解答の導出過程は解説を参照)
- 問 C 金星は 90 気圧にも達する厚い大気に覆われており、しかもその大気の大部分は CO_2 であって、温室効果が地球のそれに比べてはるかに大きい。これが金星で地表の温度と放射平衡温度の差を大きくしている。
- 問 D 石灰岩、石油や石炭などの化石燃料、植物や動物などの生物。

解説

問 A 太陽定数は太陽との距離の 2 乗に反比例する。金星と太陽の距離が 0.71A.U. であるから、金星の太陽定数は $1.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \times (1/0.71)^2 = 2.8 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ である。

金星の半径を r とすると、金星に入射する太陽エネルギーは $2.8 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \times \pi r^2$ である。

よって、単位面積に入射するエネルギーは $2.8 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \times \pi r^2 / 4\pi r^2 = 7 \times 10^2 \text{ W/m}^2$

(太陽定数を I とすると、惑星表面に入射するエネルギーの平均は $I/4$ になる)

金星では、入射エネルギーの 80% が反射されるから、吸収されるエネルギーを平均すると

$$7 \times 10^2 \text{ W/m}^2 \times (1 - 0.8) = \underline{1.4 \times 10^2 \text{ W/m}^2}$$

問 B 地球の単位面積に入射する太陽エネルギーの平均は、金星同様、太陽定数の $1/4$ である。その 30% が反射されるので、吸収されるエネルギーの平均は $1.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \times (1 - 0.3)/4 = 2.5 \times 10^2 \text{ W/m}^2$ 放射するエネルギーは入射するエネルギーに等しく $2.5 \times 10^2 \text{ W/m}^2$ である。

地球の放熱平衡温度を T_e 、放射の比例定数 (シュテファン・ボルツマン定数) を σ とすると、

$$\sigma T_e^4 = 2.5 \times 10^2 \text{ W/m}^2 \quad T_e = 260 \text{ K} \text{ であるから、} \quad \sigma = 2.5 \times 10^2 \text{ W/m}^2 / 260^4 \text{ K}$$

金星の放熱平衡温度を T_v とすると、 $1.4 \times 10^2 \text{ W/m}^2 = \sigma T_v^4$

$$\text{以上から、} T_v^4 = 1.4 \times 10^2 \text{ W/m}^2 \times 260^4 \text{ K} / 2.5 \times 10^2 \text{ W/m}^2 \quad \underline{T_v = 260 \times (14/25)^{(1/4)} \text{ K}}$$

(つまり、金星の放射平衡温度は地球のそれより低くなる)

問 C 地球では地表の温度と放射平衡温度との差が $290 \text{ K} - 260 \text{ K} = 30 \text{ K}$ であるが、金星のそれははるかに大きい。地表の温度と放射平衡温度の差は温室効果によってもたらされる。地球ではこれが大気中の水蒸気と CO_2 によって起こるが、金星では地表の気圧が 90 気圧で、大気の層が厚く、大気に占める CO_2 の割合が高い。このため、金星大気の温室効果は極めて大きい。これによって金星の地表温度と放射平衡温度の差が拡大する。

問 D 地殻には大量の石灰岩がある。これは地球生成時に多かった CO_2 が海水に溶けて CaCO_3 として固定されたものである。また、植物が出現し、これが CO_2 を吸収し固定する事でも CO_2 は減少する。石炭、石油、動植物に含まれる炭素はかつて大気を構成した CO_2 に由来すると言える。

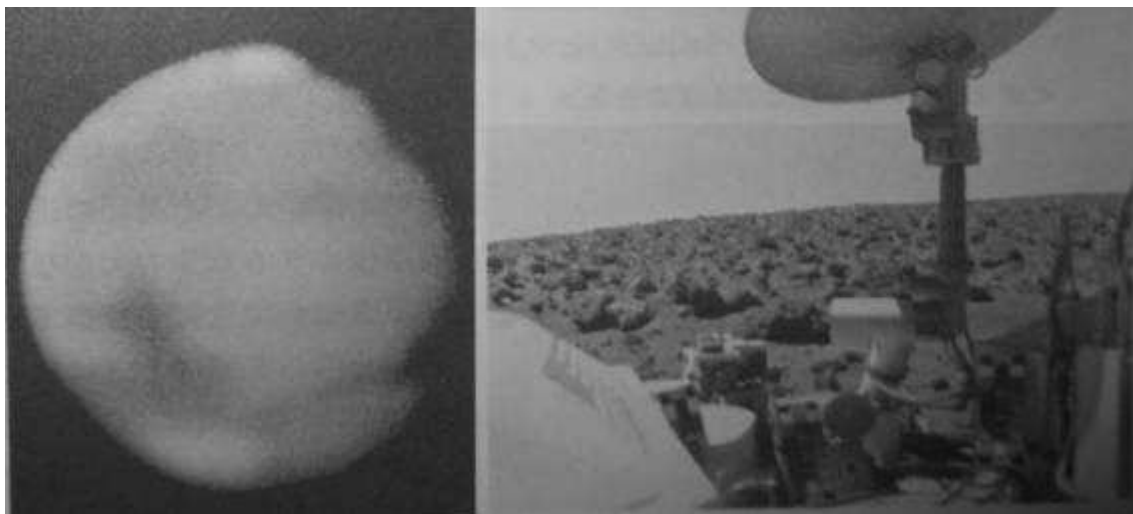
【参考】金星と火星が「水と生命の惑星」になれなかった理由

金星の大きさは地球に近いが、その地表は二酸化炭素の厚い大気に覆われ、猛烈な温室効果によって460℃、90気圧という高温高压の環境にある。誕生当初は水蒸気として存在していたかもしれない水分もこの環境下では存在できず、大気上層で太陽からの紫外線により酸素と水素に分解されてしまい、酸素は地表を酸化するのに消費され、軽い水素は大気圏外に飛び去ってしまった。地球も誕生当時はマグマが地表を覆う灼熱の世界であったが、太陽からの距離が金星よりも遠かったので、水が凝縮して液体の海を形成できた。海に二酸化炭素が溶け込み、岩石成分として固定される事で大気中の二酸化炭素が低い値に押さえられ、平均気温15℃の水の惑星となった。金星と地球の分かれ目は、**太陽からの距離**である。



金星の全景と地表

火星の極付近には氷塊があり、地下には凍土となった水の存在が確認されている。火星の表面には水の流れた形跡があり、かつて海洋が存在していた可能性があるが、現在、火星表面に液体の水は存在しない。火星の重力は地球の3分の1程度で、水蒸気を含む大気の大半を引き止める事ができず、地表の気圧も地球の100分の1程度しかない。火星は地球より太陽からの距離が遠い為、凍結してしまったが、もし地球と同程度の大きさがあって大気を引き止める引力があれば、海と生命が誕生した可能性もあった。火星と地球の分かれ目は、**星のサイズが小さく、重力が不足**であった事である。



火星の全景と地表

【問題 4-09】 淡水と海水の温度変化

次の文を読んで、下記の問A、Bに答えよ。

真水は 4°C で最大の密度をもつ。しかし、密度が最大となる温度は、水に溶けている塩分の温度によって図1に示すように変化する。一方、氷結温度も図1に示すように、真水の 0°C から塩分の増加に伴って下降する。

ある淡水湖の夏季および秋季における水温の鉛直分布を図2に示す。夏季には水温が深さとともに急に減少する安定した層が、表面近くに形作られている。秋になって、湖が表面から冷やされていくと、冷やされた表面の水はすぐ下の層の水よりも重くなって対流を起こし、表層に水温がほぼ一定の混合層がつくられる。

問A 図2の秋季の状態からさらに冷却が進み、ついに湖の表面が凍り始めるまでの表層の水温の鉛直分布の変化の様子を、80～120字で簡潔に答えよ。

問B 通常の海水の塩分は、3.2%から3.8%の範囲にあることを考え、海が淡水の湖や池に比べて凍りにくい理由を、80～120字で簡潔に答えよ。

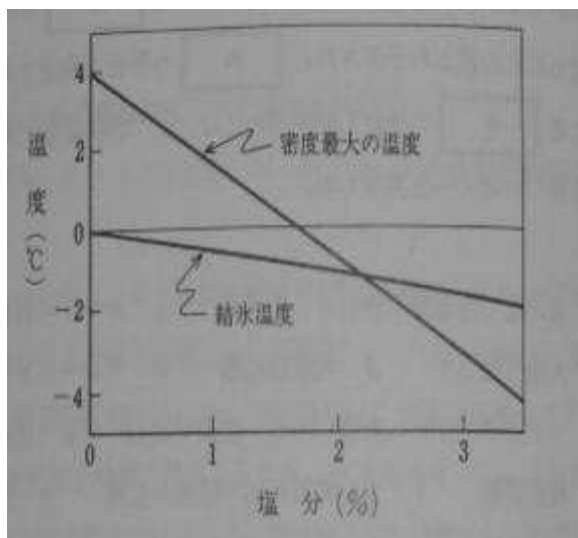


図1

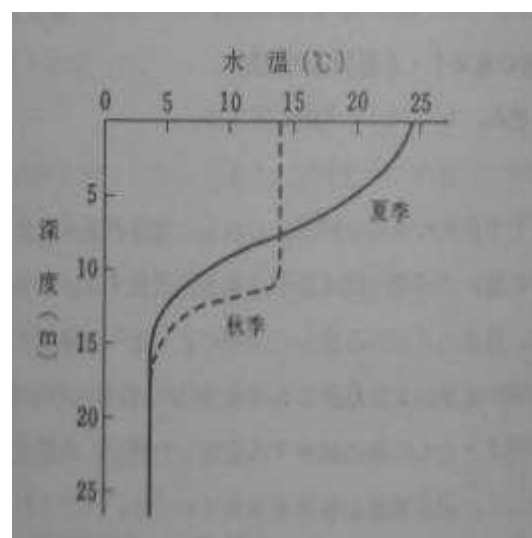


図2

解答

- 問 A 冷却が進むと、0～15m の層はほぼ同じように温度が下り、ついには表面から底まで全体がほぼ 4℃になる。その後、表面の温度は 0℃まで下って凍結を始めるが、約 15m 以下の深さの層は 4℃のままである。
- 問 B 海水の密度最大の温度は氷結温度より低いので、表面で冷却した水は下降し、底の方にあるより高温の水と入れ替わる。海では大循環があり、低温の水と高温の水とが大規模に入れ替わるため

解説

問 A 真水は 4℃で最大密度になるから、これよりも高温の湖水が表面から冷えると、冷えた水はその下のより高温の水と入れ替わり、表層に水温がほぼ一様な混合層を作って冷却を続ける。しかし、4℃以下に冷えるほど密度が小さくなるので、4℃になった湖水では対流が止まり、表面の水の温度が中より低くなり、0℃になると凍結する。しかし、水は熱を伝えにくいので、表面が凍結した後も、深いところの水温は、ほぼ 4℃のままである。

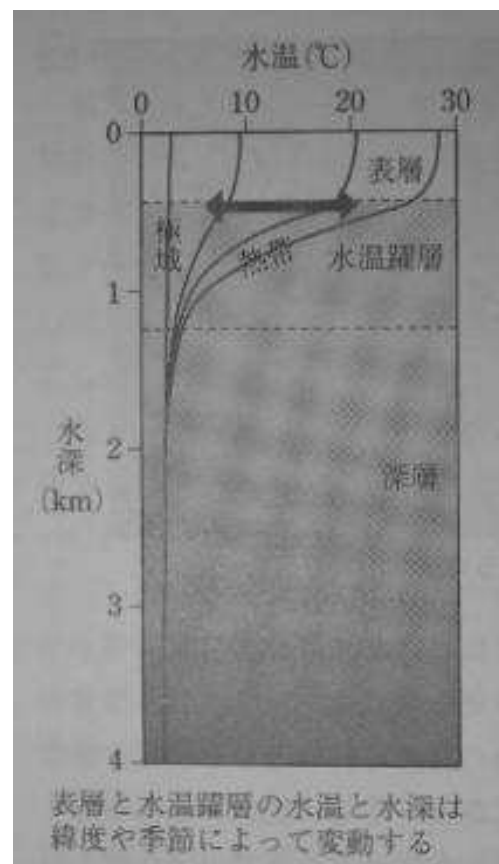
問 B 海水では、密度最大の温度が氷結温度より低いので、表面で冷えた海水は対流によって下層の水と混合し、海水全体が冷える。また、海全体の大循環があり、低緯度と高緯度の水が入れ替わる事もあって、温度が下りにくい。

【参考】海洋の構造

大気圏が対流圏や成層圏といった領域に分けられるように、海洋も温度の鉛直構造で区分できる。表面から深さ数百mまでは比較的等温な**表面混合層(表層)**があり、その下に温度勾配の大きな**水温躍層**がある。水温躍層より深い部分を**深層**といい、深さとともに緩やかに温度が下っていく。表面混合層には、風や波による攪拌作用や、海面の冷却に伴う冬季の対流が及ぶので、その層の水温は季節的に大きく変動し、夏季には表面近くの海水が温められて、水温躍層を季節的に生じることがある。

海洋の大半を占める深層は、 2°C 前後と冷たく、海水は表層よりも密度が大きい。つまり、海洋は冷たく重い海水が底に横たわり、太陽光によって温められ、相対的に軽い表層の海水がその上に乗っている安定的な、密度成層をなす構造になっている。その間の水温躍層は両者が接する部分で、表層水と深層水の緩衝地帯的な層である。

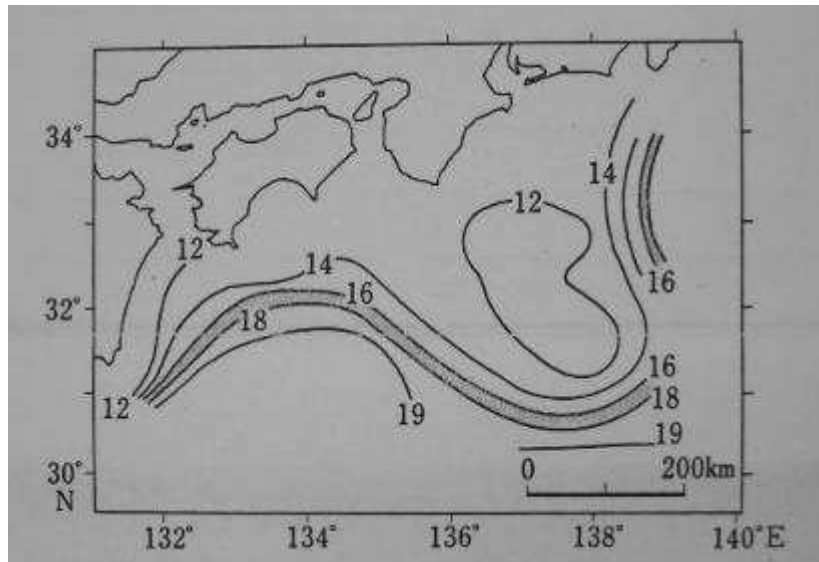
海水は常に動いており、低緯度の暖かい海水を高緯度に運ぶ事で、地球の熱循環を受け持ったり、表層と深層の水を交換することで、深層に酸素を供給したりするなど、地球環境に与える影響は大きい。



海水温の鉛直分布

【問題 4-10】 海水と海流

以下の図は、ある時期の太平洋の日本列島南の水域の水温分布と黒潮の位置を示したものである。図から判るように、黒潮の水温はその両側の海水と比べて必ずしも高くなっていない。次の問A～Cに答えよ。



7～8月における水深 200m での水温(°C)の水平分布
濃い部分が黒潮の位置

- 問A 黒潮が西から東に流れる水域の海面はどの方向に傾いているか。
- 問B 黒潮が海水の等温線に沿って流れる理由を 100 字程度で説明せよ。
- 問C 黒潮の海水は親潮と比べて、透明度が高く、栄養塩(窒素やリンを含む塩)に乏しい。
この理由を 70 字程度で説明せよ。

解答

問A 南で高く、北で低くなっている。

問B 海面の高低は主に水温によって決まっており、表層内ではジオイドに平行な面で等圧線が等温線に平行である。海流では地衡風同様、圧力傾度力と転向力とが釣り合っており、黒潮は等温線に平行に流れる。

問C 黒潮の水域では、表層水の温度は深層水に比べて著しく高く、非常に安定な状態である。これによって海水には対流がなく、海底の物質が上昇しないから。

解説

問A 北半球であるから、西から東に向かって流れる黒潮には、その流れる方向の右、つまり南に向かって転向力が働いており、これと釣り合って、北向きに圧力傾度力が働いている。黒潮が東に流れるところでは、南ほど水温が高いため海面が高くなっており、これによって海面の表層では水圧に差が生じる。

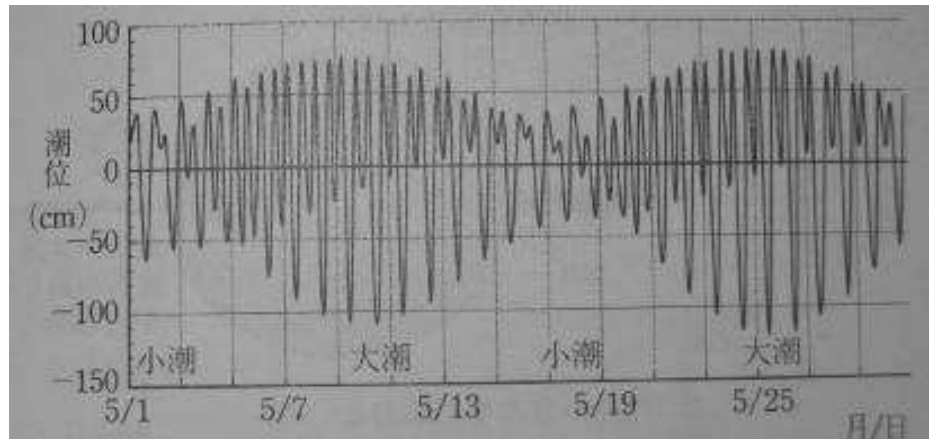
問B 水温が高いほど海面が高く、水中の同一水平面で考えると、高温な部分ほど水圧が大きいため、水中の等圧線は等温線とほぼ平行になっている。海水も地衡風と同じ力のバランスのもとに、地衡流として水中の等圧線と平行に流れているので、その方向は等温線と平行である。

問C 黒潮の水温は高いが、その下にある深層水の水温は 0°C に近い。従ってこの水域では海水の安定度が高く、対流が起こらず、黒潮に流入する泥などは次第に沈殿して透明度が高くなり、海底から物質が湧き上がらないので栄養塩類も少ない。一方、親潮の水域では表面の水温が低く、安定度が低い。特に冬になると表面が低温となって不安定になり、表層水と深層水が入れ替わって、海底に沈んでいる物質が浮上する。これが親潮の透明度が低く、栄養塩に富む原因である。

【問題 4-11】 潮汐と起潮力①

下の図は、東京港で 30 日間観測した潮位の変動を示したものである。

この現象に関して次の問 A～C に答えよ。 なお、この問題では、地球と月の軌道面が一致しているものとして考えよ。



問 A 満潮の起こる周期は平均してほぼいくらか。 周期を求める過程も記し、答えは時間単位で、小数点以下 1 桁まで答えよ。 なお、必要ならば次の周期を使用せよ。

1 朔望月：29.5 日 1 恒星月(月の公転周期)：27.3 日

問 B 図によると、満潮時と干潮時の潮位の差は大きく見ると約 15 日を周期として変化している。 この原因を 60～100 字で説明せよ。

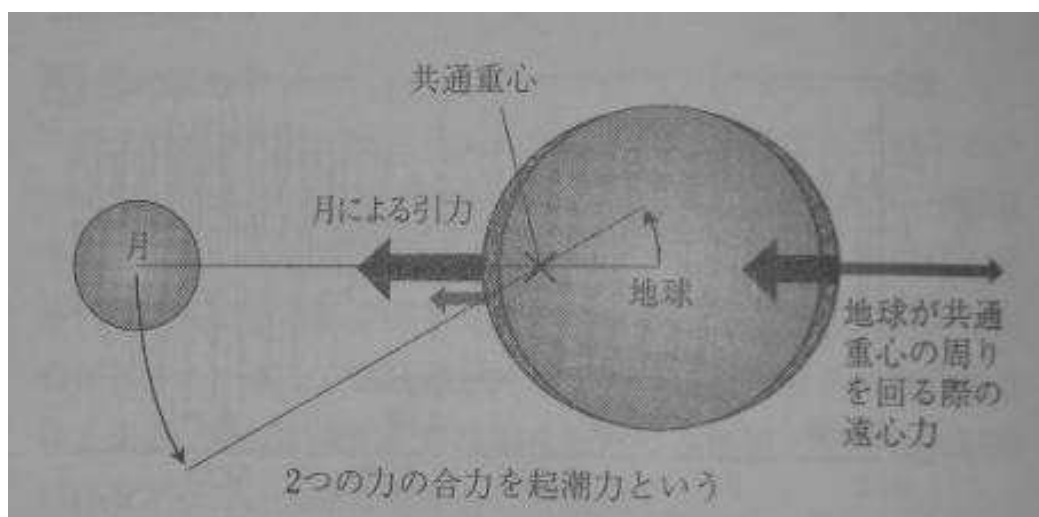
問 C 図によると、ある満潮と次の満潮の潮位が著しく異なる事が多い。 この現象を日潮不等という。 日潮不等が起こる原因を 60～100 字で説明せよ。

解答

- 問A 満潮は月の南中周期の間に2回起こる。 また、1朔望月の間に月は $(29.5 - 1) = 28.5$ 回南中する。 よって、満潮の起こる周期は $24 \text{ 時間} \times (29.5 / 28.5) \div 2 = \underline{12.4 \text{ 時間}}$ となる。
- 問B 朔と望では、月と太陽の起潮力の方向が一致して大潮となるが、上弦と下弦では、月と太陽の起潮力の方向が直行して、月の起潮力が弱められるので小潮となる。
- 問C 地球の赤道面と、月と地球の軌道面は斜交しているので、月が赤道上にある場合を除いて、月の側にある場合と、月の反対側にある場合とで、赤道を除く各地点における起潮力の大きさが異なるから。

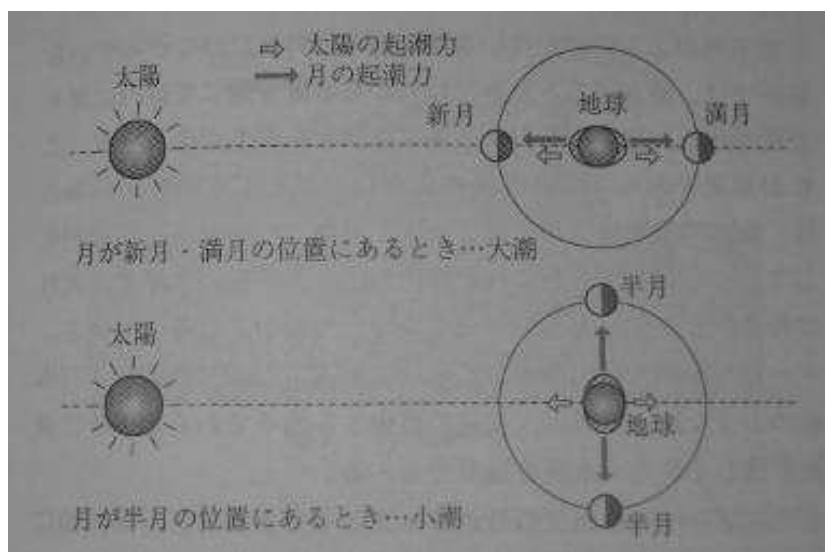
解説

問A 起潮力は月と太陽の引力と、地球がそれらの天体との共通重心のまわりを公転する事によって生じる遠心力の差であって、月の方向とその逆方向に働き、月が一つの子午線を通過する間に2回ずつ満潮と干潮が起こる。 朔の月はほぼ正午に南中するが、その後、月の南中時刻は次第に遅れていって、次の朔の日にもまた、ほぼ正午に南中する。 この事は、1朔望月の29.5日の間に月は太陽に1周遅れる事を示している。 つまり、29.5日の間に月は1回だけ南中する回数が少ないのである。 従って、月の南中する周期は次のように求められる。 $29.5 \text{ 日} / (29.5 - 1) = 1.035 \text{ 日} = 24.8 \text{ 時間} \text{ (24 時間 50 分)}$ 24.8時間に2回満潮が起こるから、その周期は12.4時間(12時間25分)である。

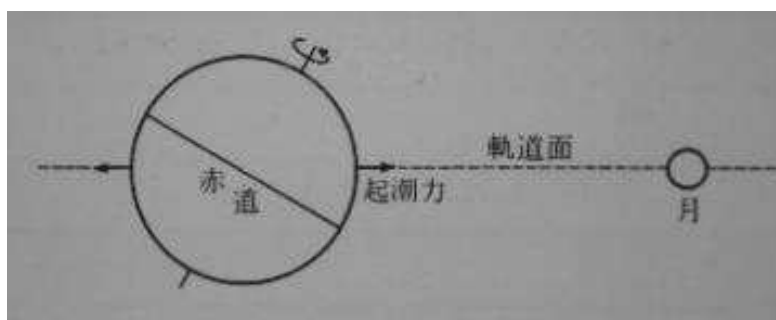


問B 起潮力の原因となる天体の質量をM、地球からの距離をR、地球の半径をr、万有引力定数をG、とする時、起潮力は次の式で表される。 $2rMG / R^3$

この式から、月による起潮力は太陽のそれの約 2 倍になり、潮汐は月の南中周期に合わせて起こる事がわかる。 朔と望の時には、両者の起潮力が同じ方向に働き、潮差が大きくなる。これが大潮である。上弦と下弦の時には、両者の起潮力が垂直方向に働いて弱まり、潮差が小さくなる。これが小潮である。従って、約 15 日の周期で大潮と小潮が繰り返される。



問C 地球の赤道面と、地球と月の軌道面が斜交している状態を図示すると、下図のようになる。この時、北半球では、月の側に働く起潮力は大きい、月の反対側に働く起潮力は小さい。このため、ある時の潮差が大きければ、その次の潮差は小さくなる。



【問題 4-12】 潮汐と起潮力②

潮汐に関する次の文を読み、以下の問に答えよ。

月の質量を M 、月と地球の距離を d 、地球の半径を r 、万有引力定数を G とする時、地球の重心にある単位質量に働く月の引力は（ 1 ）で、月が天頂にある地表の単位質量に働く月の引力は（ 2 ）で表される。

また、地球の質量は月の 81 倍であるから、地球から月と地球の共通重心までの距離は（ 3 ）で表され、地球と月はこの共通重心に対して同じ周期で公転している。地球の重心ではこれによる遠心力と月の引力とが釣り合っているが。月が天頂にある地表では月の引力の方が大きく、この差が起潮力で、その大きさは近似的に（ 4 ）で表される。

潮汐が月と太陽とによって起こされていることから、地球、月、太陽の位置関係によって潮位に差が生じる。そして、大潮は月齢（ 5 ）と（ 6 ）の時に起こる。

月の公転周期および、地球の太陽に対する公転周期をそれぞれ、 a および b とする時、地球上の一点に対する月の南中周期は（ 7 ）で表され、この式によって、満潮の周期は平均（ 8 ）時間（ 9 ）分と求められる。

潮汐による海面のふくらみは、地球と月とを結ぶ直線からずれている。これが原因となって、地球の自転角速度は次第に（ 10 ）なり、また、月と地球との距離は次第に（ 11 ）なる。

なお、1 恒星月は 27.3 日、1 朔望月は 29.5 日である。

問A （ 1 ）～（ 4 ）および（ 7 ）に該当する式を示せ。

問B （ 5 ）、（ 6 ）および（ 8 ）、（ 9 ）に該当する値を答えよ。
少数点以下は省略し、整数で答えよ。

問C （ 10 ）、（ 11 ）に該当する語句を答えよ。

問D 日本列島の太平洋岸では、1 日に 2 回起こる満潮の潮位に差がある。これを日潮不等という。これは主に何が原因で起こるか、30 字程度で説明せよ。

解答

問A 1 : MG/d^2 2 : $MG/(d-r)^2$ 3 : $d/82$

4 : $2rMG/d^3$ 7 : $ab/(ab+a-b)$

問B 5 : 0 6 : 15 (5、6 は順不同) 8 : 12 9 : 25

問C 10 : 小さく 11 : 大きく

問D 月の軌道面と地球の赤道面が斜交するから。

解説

問A 万有引力は質量に比例し、距離の 2 乗に反比例するので、地球の重心にある単位質量に働く月の引力は MG/d^2 である。 月が天頂にある時、その地点と月の距離は $d-r$ であり、そこにある単位質量に働く月の引力は $MG/(d-r)^2$ となる。

地球の重心から、月と地球の共通重心までの距離を a とすると、月から共通重心までの距離は $d-a$
 $81M/M = (d-a)/a$ であるから、 $a = d/82$ となる。

地球上の各点に働く遠心力は、地球の重心に働く月の引力に等しい。 従って、月が天頂にある時、その単位質量に働く月の起潮力は

$$\{MG/(d-r)^2\} - MG/d^2 = MG[1/(d-r)^2 - 1/d^2] = MG[(2dr-r^2)/d^2 \times (d-r)^2]$$

この式で、 r の値は d と比べて非常に小さいので、分子の r^2 と分母の r とを無視すると、

$$2drMG/d^4 = 2rMG/d^3 \text{ となる。これが近似的な起潮力である。}$$

月の公転周期を a 日、地球の太陽に対する公転周期を b 日、1 朔望月を k 日とすると、1 朔望月の間に月が天球を太陽より 1 周多くまわるから $1/k = 1/a - 1/b$ $k = ab/(b-a)$

1 朔望月の間に月の南中は、太陽の南中より 1 回少なく、 $\{ab/(b-a)\} - 1$ 回南中するから、その周期は $\{ab/(b-a)\} / [\{ab/(b-a)\} - 1] = ab/(ab+a-b)$ となる。

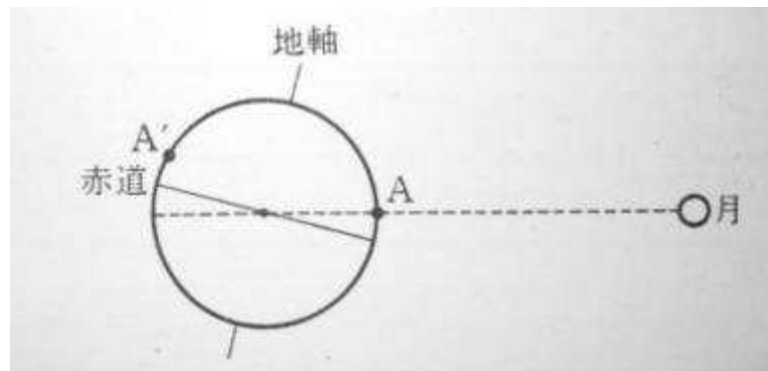
問B 大潮は地球、月、太陽が 1 直線になる時、つまり、朔と望の時に起こる。

1 朔望月は $ab/(b-a) = 29.5$ 日 であるから、月の南中周期は $29.5/(29.5-1) = 1.035$ 日 $= 24\text{h}50\text{m}$

従って、満潮の起こる周期は、 24 時間 50 分の半分で、**12 時間 25 分** になる。

問 C 潮汐によって地球の自転は遅くなっており、これに伴って、角運動量保存則より、月は加速されている。このため、地球と月の距離は大きくなっていく。

問 D 月と地球の関係は、下図のようになる。 図で A 点に働く月の起潮力は大きい、地球の自転によって、A' 点にいった時には起潮力は小さい。これが、潮位が高低の繰り返しをする理由である。



【参考】高潮と津波

湾内は外海から押し寄せた波が集まる場所である。暴風に押されて湾内に流入した海水は、奥に進みにつれて海面高度を押し上げる。この時に満潮が重なると、予想を上回る海面高度となり、岸壁を越える高波が押し寄せる。これが**高潮**である。台風が接近したときは気圧が下るので、これも海面を持ち上げる効果がある。高波の被害は巨大波によるもの以上に、川の水や地表に降った雨水が海に流れ込めず、洪水を引き起こした事による場合が大きい。被害を抑止するには、台風の位置や中心気圧だけでなく、湾内の風向、満潮の時刻にも注意を払わなければならない。

地震や海底火山の噴火、地滑りの落下などにより海水が振動し、発生した巨大な波が**津波**である。地震による津波は、地震によって海底の一部が急激に隆起・陥没する事により、その海底上の海水が急激に上下する事で発生する。水面を波紋が広がるように八方に広がり、速いところでは秒速 200m以上になる。海岸に接近すると速度を落とし、波の間隔が詰まって、波高が高くなる。奥に行くほど狭まる形の湾では津波が奥に進むにつれて更に波高が上昇し、海岸に打ちつける。3.11 の東日本大震災において、M9.0 の超巨大地震が引き起こした、死者・行方不明者 2 万人を超える巨大津波は記憶に新しい。その凄惨な映像は、人智を超越した自然の猛威を前にしての、文明社会の非力さを痛感させるが、少しでも被害を食い止める為の事前・事後の備えを尽くしていかなければならない。

第五章 惑星・宇宙

5-01 ケプラーの法則と静止衛星の軌道

5-02 天球運動・惑星の視運動①

5-03 天球運動・惑星の視運動②

5-04 天球運動・地球と月の視運動

5-05 惑星と太陽の年周運動

5-06 星の明るさに関する基本問題

5-07 超新星の光度と星の一生

5-08 恒星の光度・距離と銀河系の構造

5-09 クェーサーの光度とハッブルの法則

5-10 連星の光度・質量・距離①

5-11 連星の光度・質量・距離②

5-12 主系列星の光度・質量・寿命

【問題 5-01】 ケプラーの法則と静止衛星の軌道

次の文を読んで、下の問A、Bに答えよ。

太陽および惑星の質量をそれぞれ、 M および m 、惑星の軌道を円として、その半径を a 、公転速度を V 、万有引力定数を G とする時、惑星と太陽の間に働く万有引力は（ 1 ）、公転する惑星に働く遠心力は（ 2 ）で表される。

また、惑星の公転周期を T とすると、 $V = 2\pi a / T$ であるから、惑星に働く遠心力を、 m 、 a 、 T で表すと（ 3 ）になる。

以上を整理すると、ケプラーの第3法則は、 $a^3 / T^2 =$ （ 4 ） と表される。

一方、質量がそれぞれ、太陽の m_1 倍および m_2 倍の質量を持つ2つの星によって構成される連星間の距離が r 天文単位、公転周期が t 年である時、次の式が成り立つ。

$r^3 / t^2 =$ （ 5 ） この式によって、連星の質量が求められる。

例えば、ある連星の年周視差および角距離がそれぞれ $0.30''$ 、および $6.0''$ であって、公転周期が 40 年であるとする、この連星の質量の和は太陽の（ 6 ）倍である。

ケプラーの第3法則は人工衛星の公転にも適用される。

地球の質量は太陽の 3.0×10^{-6} 倍であることから、静止衛星の軌道半径は（ 7 ）天文単位であることが分かる。

問A 文中の（ 1 ）～（ 5 ）のそれぞれに該当する式を示せ。

問B 文中の（ 6 ）および（ 7 ）に該当する数値を、計算式とともに示せ。

必要ならば、次の値を用いよ。 $2.7^3 = 20$ $2.8^3 = 22$ $2.9^3 = 24$

解答

問A 1 : GMm/a^2 2 : mV^2/a 3 : $4\pi^2 \times am/T^2$
 4 : $GM/4\pi^2$ 5 : $m_1 + m_2$

問B 6 : $6.0/0.30 = 20$ $m_1 + m_2 = 20^3/40^2 = 5$ 5倍
 7 : $r^3/(1/365)^2 = 3.0 \times 10^{(-6)}$
 $r^3 = 3.0 \times 10^{(-6)} / 365^2 = 22.6 \times 10^{(-12)}$
 $r \doteq 2.8 \times 10^{(-4)}$ $2.8 \times 10^{(-4)}$ 天文単位

解説

問A 二つの天体の質量をそれぞれ M および m 、両天体間の距離を a 、万有引力定数を G とすると、両天体間に働く万有引力の大きさは、 GMm/a^2 となる。

質量 m の惑星が、速度 V 、半径 a の円運動をする時、その惑星に働く遠心力は、 mV^2/a である。

公転周期を T とする時、 $V = 2\pi a/T$ であるから、その時惑星に働く遠心力は

$$mV^2/a = m(2\pi a)^2/aT^2 = \underline{4\pi^2 \times am/T^2} \text{ となる。}$$

惑星が円軌道を公転する時、惑星に働く引力と遠心力とは釣り合っている。

よって、 $GmM/a^2 = 4\pi^2 \times am/T^2$ 整理して、 $a^3/T^2 = GM/4\pi^2$ (= 定数)

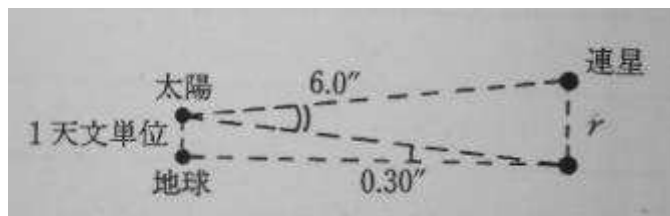
これが、**ケプラーの第3法則**である。

また、ケプラーの第3法則より、質量が太陽の m_1 倍および m_2 倍の連星間の距離を r 天文単位、連星の公転周期を t 年とすると、 $r^3/t^2 = m_1 + m_2$ が成立する。

問B 連星と太陽系の関係は、下図のようになる。 連星間の距離を r 天文単位とすると、

$$r = 6.0/0.30 = 20 \text{ 天文単位} \quad \text{この値と連星の公転周期が 40 年であることから}$$

$$m_1 + m_2 = 20^3/40^2 = 8000/1600 = 5 \quad \underline{\text{5倍}} \text{ になる。}$$



静止衛星の公転周期は、1日 = $1/365$ 年である。 従って、その軌道半径を r 天文単位とすると、

ケプラーの第3法則より、 $r^3/(1/365)^2 = 3.0 \times 10^{(-6)}$

$$r^3 = 3.0 \times 10^{(-6)} / 365^2 = 22.6 \times 10^{(-12)}$$

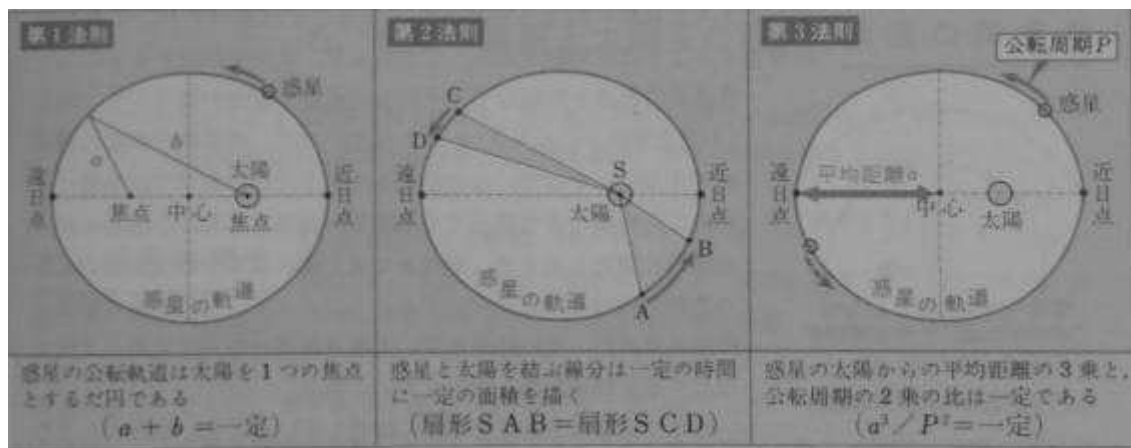
$$2.8^3 = 22 \text{ であるから } r \doteq 2.8 \times 10^{(-4)} \text{ 天文単位 となる。}$$

【参考】ケプラーの法則

第一法則： 惑星は、太陽を一つの焦点とする、惑星によりそれぞれ決まった形と大きさの楕円軌道上を公転する。 この法則から、惑星の太陽からの距離がその軌道上の位置によって異なる事が判る。 惑星が太陽に最も近づく点を**近日点**といい、最も遠ざかる点を**遠日点**という。 地球の近日点は太陽が黄経約 103° に来た時で、その時の地球の太陽からの距離は約 $1.47 \times 10^8 \text{ km}$ である。

第二法則： 惑星は、太陽と惑星を結んだ線分が等しい時間に等しい面積を掃くように移動する。 （面積速度一定の法則） 惑星の軌道が楕円である事がわかると、観測により、その惑星の公転速度がわかる。 惑星の公転速度はその位置によって異なり、近日点で最も速く、遠日点で最も遅い。 惑星が一定時間に移動する距離を軌道上の任意の2箇所でとり、そこらを弧 AB、弧 CD とすると、それらが太陽 S とつくる面積 SAB と SCD は等しくなる。

第三法則： 惑星の太陽からの平均距離の3乗と、公転周期の2乗との比は、惑星によらず一定である。 惑星の公転周期 P は、会合周期から求められる。 地球と太陽の平均距離を1天文単位とすると、各惑星の太陽からの距離は、作図によって求められる。 各惑星の平均距離を3乗し、公転周期を2乗して、その比を調べると、どの惑星についても同じ値になる。



ケプラーの法則

【問題 5-02】 天球運動・惑星の視運動①

北緯 30° の地点で火星を観測するものとして、次の問 A～C に答えよ。
但し、火星の軌道傾斜角は 0° とする。

問 A ある歳の夏至に火星がちょうど衝になった。 この日の火星の南中高度はいくらか。

問 B 問 A の日に太陽が 12 時に南中したとする。 この日に、この地点で火星が水平線に現れる時刻は 18 時(午後 6 時) を基準にして、それより早くなるか遅くなるか、理由と共に 80 字程度で答えよ。

問 C 合の少し前に火星は天球上で太陽のどちら側にあるか。 東、西、南、北で示した上で、その理由を 60 字程度で述べよ。

解答

問A 36.6°

問B 18時より遅い (理由) 天の赤道上にあって、赤経で太陽と12時間離れていれば、18時頃地平線に現れるが、この時火星は冬至点に近いので、これより遅くなる。

問C 東側 (理由) 火星は外惑星で公転角速度が地球より小さく、合の時順行している視運動の速度が太陽より小さいから。

解説

問A 軌道傾斜角を 0° とすると、惑星は黄道上を移動する。 従って夏至に衝となった火星はそのときの太陽の位置、夏至点から 180° 離れた冬至点にある。よって北緯 30° の地点における南中高度は次のように求められる。 $90^\circ - 30^\circ - 23.4^\circ = \underline{36.6^\circ}$

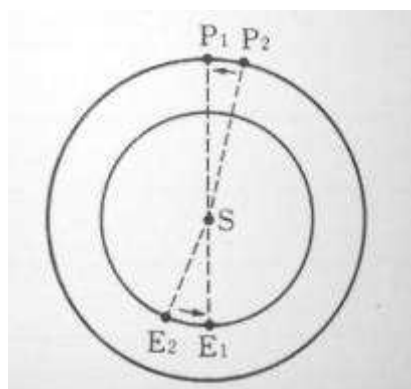
問B 春分の日太陽は、南中時刻の6時間前に地平線に現れる。 この日の太陽の南中高度を12時とすれば、太陽は6時頃地平線に現れる。 冬至の日には太陽は天の赤道の 23.4° 南にあるので、日の出自体は春分の日よりかなり遅い。 夏至の日に冬至点にある火星が地平線に現れる時刻は、冬至の日の日の出時刻より約12時間遅れるので、6時の12時間後、つまり18時よりかなり遅くなる。

問C 合の時の地球及び火星の位置をそれぞれE1およびP1、合の少し前の地球及び火星の位置をE2およびP2、太陽をSとして、これらの関係は下図のようになる。

ケプラーの第3法則から外惑星の公転角速度は地球のそれより小さいので

角E1SE2 > 角P1SP2 であるから 角P2SE2 < 180° 合の少し前には火星は太陽の東側にある。

外惑星の視運動の速度は太陽のそれより遅く、合で外惑星は太陽に追い抜かれる。



【問題 5-03】 天球運動・惑星の視運動②

惑星の軌道はいずれも円で、軌道傾斜は 0° （惑星は全て黄道上を移動すると考える）、黄道と天の赤道のなす角度は 23.5° 、金星の最大離角は 45° 、観測地は北緯 30° にあるものとして、次の問A～Eに答えよ。 問A～Cについては根拠も添えて答えよ。

問A 春分の日には木星が衝になったとしたら、この日には木星の南中高度はいくらか。

問B 冬至の日には木星が衝になったとしたら、この日には木星の南中高度はいくらか。

問C 東方最大離角の時、金星は太陽より、ほぼ何時間前または後に南中するか。
その時間および、太陽の前または後を答えよ。

問D 西方最大離角が、春分の日に関起こつた場合と、秋分の日に関起こつた場合とで、その日に金星が地平線に出ている時間は等しいか、または異なるか、異なるとすればどちらが長いか、理由を添えて 60～100 字で答えよ。

問E 合の直前に木星は天球上で太陽の東西どちら側にあるか、理由を添えて 60～100 字で答えよ。

解答

問A この時、木星は秋分点にあるから、その南中高度は次のように求められる。

$$90^{\circ} - 30^{\circ} = \underline{60^{\circ}}$$

問B この時、木星は夏至点にあるから、その南中高度は次のように求められる。

$$90^{\circ} - 30^{\circ} + 23.5^{\circ} = \underline{83.5^{\circ}}$$

問C 天球は日周運動によって、1 時間に約 15° 回転する。

従って、太陽との南中時刻の差は $45^{\circ} \div 15^{\circ}/h = 3h$

太陽の東にあるから、太陽に遅れて南中する。

約 3 時間後

問D 春分の日には西方最大離角となった金星は天の赤道の南側にあるが、秋分の日には西方最大離角となった金星は天の赤道の北側にある。従って、北半球では秋分の日には西方最大離角の方が、地平線に出ている時間が長い。

問E 外惑星の公転角速度は地球のそれより小さいので、外惑星の視運動の速度は太陽より小さい。従って、合では天球上で太陽が追い抜かれるので、その直前には太陽の東側にある。

解説

問A 春分の日には太陽は春分点にある。この時、木星が衝になったとすると、木星は黄道上で春分点と 180° 離れた秋分点にある。秋分点の赤緯は 0° であるから、北緯 30° におけるその南中高度は、 $90^{\circ} - 30^{\circ} = \underline{60^{\circ}}$ と求められる。

問B 冬至には太陽の冬至点にある。この時、木星が衝になったとすると、木星は黄道上で冬至点と 180° 離れた夏至点にある。夏至点の赤緯は $+23.5^{\circ}$ であるから、北緯 30° における南中高度は、 $90^{\circ} - 30^{\circ} + 23.5^{\circ} = \underline{83.5^{\circ}}$ と求められる。

問C 金星の最大離角は 45° であるから、東方最大離角の金星は太陽の東側 45° の点にある。天球の日周運動の角速度は約 15° であるから、この時、金星は太陽より約 3 時間遅れて南中する。しかし、厳密に言えば、日周運動の角速度は $15^{\circ}/h$ より少し早く、また黄道と赤道は斜行しているので、この時の太陽と金星の赤経差は 3 時間より少し短いので、両者の南中時刻の差は、ちょうど 3 時間とはならない。

問D 春分に西方最大離角になったとすれば、この時、金星は黄道上で春分点と 45° 離れてその西側、つまり冬至点側にあつて、点の赤道の南側にある。また、秋分に西方最大離角となったとすると、この時金星は秋分点と 45° 離れてその西側、つまり、夏至点側にあつて、天の赤道の北側にある。

北緯 30° では天の北極付近の星は周極星であり、天の南極付近の星は、地平線上に現れない。また、出没星では、北にあるものほど地平線上に出ている時間が長い。

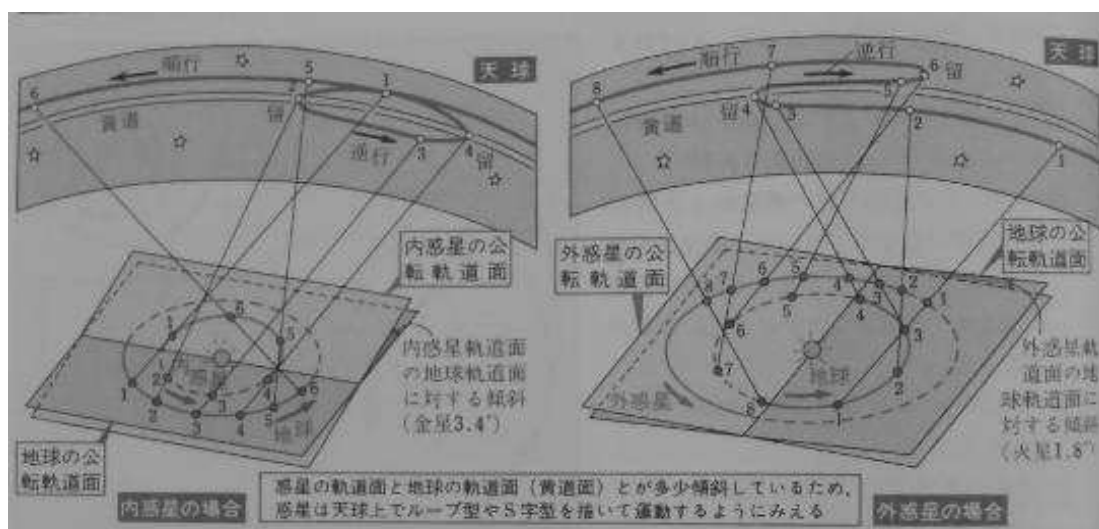
従つて、秋分の日西方最大離角となった時の方が、春分の日西方最大離角となった時よりも金星の地平線上に出ている時間が長い。

問E ケプラーの第3法則より、惑星の公転角速度は軌道長半径が大きいほど小さい。従つて、外惑星が天球上を動く早さは、太陽のそれより遅く、合の時には太陽が外惑星を西から東側に追い越していく。

【参考】惑星の現象

天球上に見られるほとんどの天体は、互いの位置を変えない恒星であるが、太陽は例外で、他の恒星の間を縫つて天球上を1年で1週する。(太陽の年周運動) 他にも、恒星の間を縫つて運動する星があり、これらを**惑星**という。惑星には、地球の他に太陽に近い方から水星・金星・(地球)・火星・木星・土星・天王星・海王星・冥王星がある。(冥王星は小惑星に分類される) この内、地球の内側で太陽の周りを公転している水星と金星を**内惑星**、それ以外の地球の外側で公転している惑星を**外惑星**という。

惑星の位置を長期観測すると、下図のように、どの惑星も黄道に沿つて、複雑な動きを天球上で行っているのが判る。これは、惑星の軌道面が黄道面、つまり地球の軌道面とほぼ一致しているからである。惑星は、通常、太陽の年周方向と同じに天球上を西から東へ移動し、これを**順行**という。しかし、東から西へ移動する事もあり、これを**逆行**という。順行から逆行、逆行から順行に移るとき、惑星は天球上に止まって見える。これを**留**という。惑星が地球に対して、太陽と同じ方向に來た時を**合**、太陽と反対の方向に來た時を**衝**という。

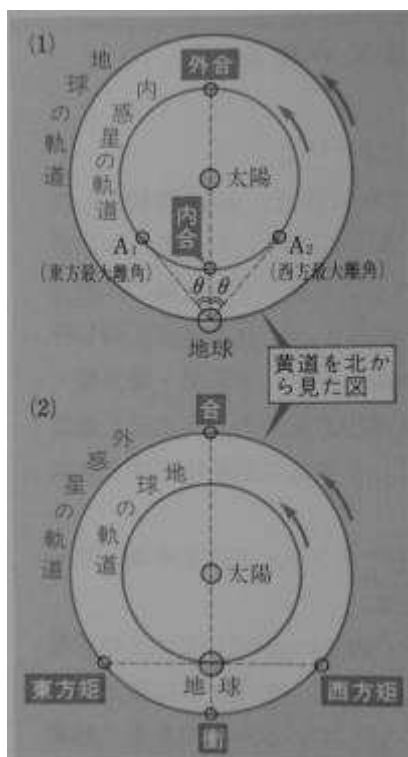


惑星の天球上の運動

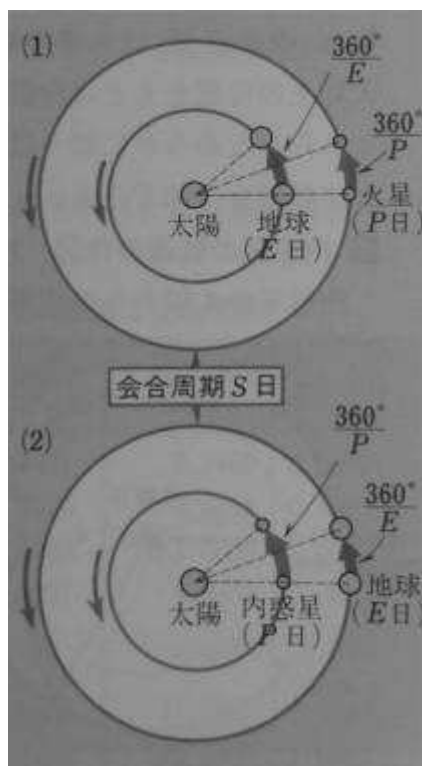
内惑星は、天球上で太陽を中心に東西方向に一定角度の範囲内で往復運動を行いながら、太陽とともに運動しているように見える。内惑星が太陽から最も離れて見えるのは、地球からその惑星の軌道に引いた接線上の接点に内惑星が来た時で、その時、太陽と内惑星のなす角度を**最大離角**という。内惑星が太陽より西に見える時、**西方最大離角**、東に見える時、**東方最大離角**という。地球・内惑星・太陽と並ぶ時を**内合**、地球・太陽・内惑星とならぶ時を**外合**という。内合の時、内惑星は太陽の光球面の中を通過する。これを**日面通過**という。惑星の軌道面と地球の軌道面とはやや傾斜している為、極めて稀にしか起こらないが、2012年6月6日、21世紀最後の金星による日面通過が観測された。（次回は105年後、2117年12月11日）外惑星には最大離角はなく、太陽と同じ方向に来る合の時も、180°離れた方向に来る衝の時もある。衝の時、地球に最接近するので観測に好都合であるが、合の時は内惑星同様、太陽に重なり観測できない。外惑星が太陽から90°離れた方向に見える時を**矩**という。（東にある時は**東方矩**、西にある時は**西方矩**）

衝や合など、同一の惑星の現象が繰り返される周期を**会合周期**という。火星(外惑星)の公転周期をE日、会合周期をS日、地球の公転周期をP日とすると、地球と火星が1日に軌道を公転する角度は、それぞれ $360^\circ/P$ 、 $360^\circ/E$ となる。この角度が合計して 360° になるまでの日数が会合周期なので、 $\{(360^\circ/E)-(360^\circ/P)\} \times S = 360^\circ$ **$(1/E)-(1/P)=1/S$** の関係が成立する。

内惑星の場合、公転周期が地球より短いので、P、Eの関係が反対になる。すなわち **$(1/P)-(1/E)=1/S$** の関係が成立する。



内惑星と外惑星の現象



公転周期の測定

【問題 5-04】 天球運動・地球と月の視運動

地球は、周期約 365 日で、楕円軌道を描いて公転している。月は地球に、その同じ側を向けた状態で地球を中心とする軌道を公転し、周期 29.5 日（1 朔望月）で満ち欠けしている。ここでは問題を単純にする為、月の軌道は地球の公転軌道上にある円とし、地球の自転軸とその軌道面のなす角を 66.5° 、月の自転角と軌道面のなす角を 90° とする。

次の問 A～E について、根拠を示して答えよ。

問 A 1 朔望月は一定ではなく、季節によってわずかながら長短がある。その最も長いのはいつごろか。

問 B 地球上の各地点では、太陽は日周運動によって、平均 24 時間ごとに南中する。月面の各点では、太陽の南中周期は平均いくらになるか。

問 C 黄道と天の赤道とが斜交するため、地球上の各地点では季節によって、太陽の南中高度が変化する。今、春分の日ちょうど下弦であったとしたら、この日には北緯 35° の地点で月の南中高度はいくらになるか。

問 D 月面の北緯 35° の点では、地球の夏至の日に太陽の南中高度はいくらになるか。

問 E 月面から観察しても、太陽は天球上を西から東に向かって移動する。しかし、その移動の様子は、地球から観測したものとは異なっている。どのように異なっているか、100～150 字で説明せよ。

解答

- 問A 1月 根拠： 近日点では地球の公転角速度が大きく、太陽が天球上を東に動く速度が大きいため。
- 問B 29.5 日（1 朔望月） 根拠： 月は自転、公転の周期が等しく、地球にいつも同じ面を向けているので、1 朔望月は太陽の南中周期を示す。
- 問C 31.5° 根拠： 月と地球の軌道面が一致するので月は黄道上にあり、春分の日の下弦で、月は春分点の西 90° の冬至点にあるから。
- 問D 55° 根拠： 月から観測すると、黄道と天の赤道が一致しているため、月の北緯 35° では太陽の南中高度は常に 55° になる。
- 問E 望のときには、地球の公転と地球に対する月の公転の方向が一致し、月の太陽に対する公転速度が大きくなるが、朔のときには、地球の公転と地球に対する月の公転の方向が逆になり、月の太陽に対する公転速度が小さい。これに対応して、太陽が天球上を動く速度は1 朔望月を周期にして変化する。

解説

問A 月は公転の結果として、地球から見て天球上を東に移動する。 月が地球を 1 周する周期が恒星月である。 一方、太陽も地球の公転の結果として、天球上を東に動き、約 365 日で一周する。 この運動で、月が天空上で太陽に 1 周差をつける期間が1 朔望月である。

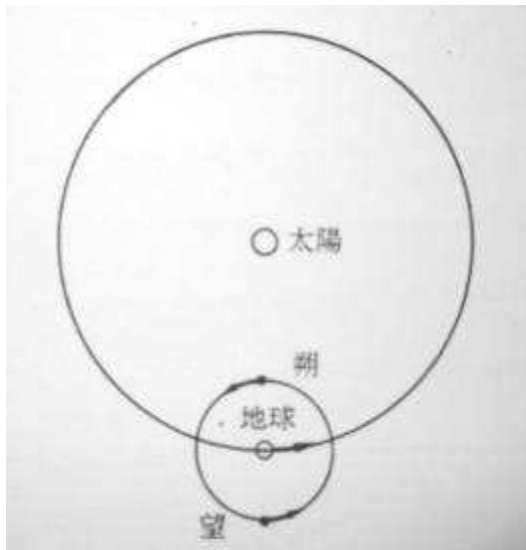
問B 満月の時は、地球から見た月面の中心に対して、太陽が南中している。 従って、1 朔望月は月面の中心で太陽が南中する周期である。 月の自転と公転の周期は等しいので、地上から見る月面の中心は定点と考えられ、1 朔望月は月面の各点における太陽の南中周期である。

問C 下弦の時、月は天球上で太陽の 90° 西側にある。 従って、春分の日が下弦とすれば、この時月は春分点の 90° 西側にある冬至点であって、北緯 35° の地点では、月の南中高度は次のように求められる。

$$90^\circ - 35^\circ - (90^\circ - 65.5^\circ) = \underline{31.5^\circ}$$

問D 月の自転軸と地球の軌道面に一致している月の軌道面のなす角が 90° と仮定すると、月では天の赤道と黄道とは一致している。 従って、月面の各点では、太陽の南中高度はそれぞれ一定であって、月面の北緯 35° の点では常に 55° である。

問E 月は地球と共に太陽を回っているが、月は地球をも回るため、月が地球と太陽の間に入ると（朔の時）図のように月の地球に対する動きと、地球の動きが逆方向になり、月が太陽を回る角速度が小さくなる。また、月が太陽の反対側に来ると（望の時）、月の地球に対する動きと、地球の動きとが同方向になり、月が太陽を回る角速度が大きくなる。以上から、朔のころは月からみて太陽が天空上を動く速度が小さく、望のころは大きくなるということができる。



【問題 5-05】 惑星と太陽の年周運動

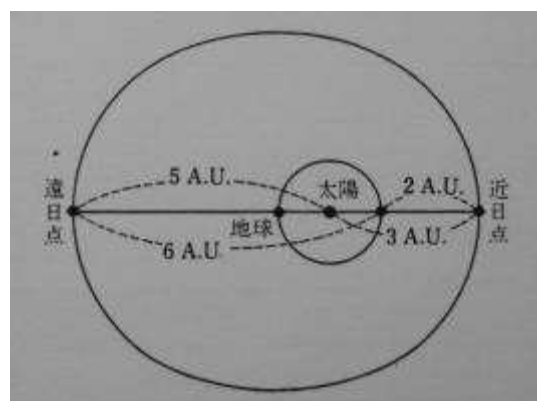
仮想惑星 P がある。 P の自転および公転は下表に従っており、地球の軌道は半径 1 天文単位の子であるとして、次の問 A～C に答えよ。 問 A、B では、答えを導く過程も記せ。

近日点距離	3 天文単位
遠日点距離	5 天文単位
軌道傾斜	0°
公転方向	地球と同じ
軌道面と赤道面のなす角	0°
自転周期	8 年
自転の方向	地球と同じ

問 A Pはその軌道の近日点通過時に、地球から見て衝であるとする、地球との距離が最小となった時の P の見かけの明るさは、距離が最大となった時の何倍になるか。また、P の見かけの等級は、地球との距離が最小になった時に 0.0 等であるとする、地球との距離が最大になった時には何等になるか。但し、太陽による食は考えない事とする。必要ならば、 $\log 2 = 0.30$ 、 $\log 3 = 0.48$ (底は 10 の常用対数)を使用せよ。

問 B P から観測して、太陽が天球を一周する周期はいくらか。

問 C 我々が日本列島で観察する時、太陽は東の地平線から出て、西の地平線に沈む。 P が近日点を通る時、その表面にある太陽がちょうど天頂に見られた。 この地点で、約 1 年間、地球から太陽を観察したとすると、見かけ上、太陽はどのように動くか。 理由とともに 100 字以内で説明せよ。



解答

問 A 25 倍、 3.5 等 (解答の導出過程は解説を参照)

問 B 8 年 (解答の導出過程は解説を参照)

問 C 近日点では P の公転角速度がその平均値より大きいので、太陽が天球を移動する角速度は P の自転角速度より大きい。従って、太陽は天頂から真東の地平線に向かって、ゆっくり移動する。

解説

問 A P が近日点にあるとき、P と太陽の距離は 3 A.U.(天文単位)で、P と地球との距離は 2A.U.である。

P の軌道の長半径は $(3 + 5) / 2 = 4$ A.U. となる。 P の公転周期を T 年とすると、

ケプラーの第 3 法則により、 $4^3 / T^2 = 1$ であるから、 $T = 8$ 年 となる。

従って、近日点通過の 4 年後に P は遠日点にあり、地球は元の位置にあるので、この時、地球から見て合であるから、地球からの距離が最も大きく、6 A.U. である。

P の見かけの明るさは、P と地球の距離の 2 乗と、P と太陽の 2 乗の積に反比例するので、P の見かけの明るさの最大値を $L_{\max}$ 、最小値を $L_{\min}$ とすると、

$$L_{\max} / L_{\min} = (6^2 \times 5^2) / (3^2 \times 2^2) = 5^2 = \underline{25 \text{ 倍}}$$

P が最も明るいときに m_1 等、最も暗いときに m_2 等であるとすれば、

$$100^{\{(m_2 - m_1) / 5\}} = 5^2 \quad \text{両辺の常用対数をとって、} \log 100^{\{(m_2 - m_1) / 5\}} = \log 5^2$$

$$\{(m_2 - m_1) / 5\} \log 100 = 2 \log 5 \quad (m_2 - m_1) / 5 = \log 5 = \log (10/2) = 1 - \log 2 = 0.70$$

$$m_1 = 0.0 \quad \text{であるから、} \underline{m_2 = 3.5 \text{ 等}}$$

問 B 太陽が天球を一周する年周運動の周期は、その惑星の公転周期に等しく、P の場合、問 A ですでに求めたように、8 年である。

問 C P から観察すると、太陽は天球上を東に向かって、周期 8 年で一周する。 また、P の自転は周期が 8 年で、その方向は地球と同じであるから、P から観察すると、天球は東から西に向かって 8 年周期で 1 回転する。 従って、公転角速度が一定ならば、太陽は見かけ上、空で動かないはずである。 しかし、P の軌道は楕円であり、近日点では公転角速度が平均角速度より大きく、太陽が天球上を東に移動する速度は平均よりも大きい。 つまり、太陽が天球を東に移動する角速度は天球の日周運動の角速度より大きく、太陽は見かけ上、ゆっくり西から東に向かって動く。 P の軌道傾斜、軌道面と赤道面のなす角度はともに 0° であるから、P から観察すると、太陽は常に天の赤道上にあり、近日点では見かけ上、天頂から真東に向かって動く。

【問題 5-06】 星の光度に関する基本問題

次の文の空欄（ 1 ）から（ 10 ）に当てはまる適切な数値、または式を答えよ。
なお、 $\log 2.5 = 2/5$ $\log 4 = 3/5$ （底は 10 の常用対数）とする。

1 等星の明るさは 6 等星の（ 1 ）倍であって、 m 等星と n 等星の明るさをそれぞれ L_m 、 L_n とすると、 $L_m / L_n =$ （ 2 ）である。

星の見かけの明るさは距離の（ 3 ）乗に比例するので、地球から見て、 -2.7 等の太陽を、太陽から 10 天文単位の土星から観測すると、（ 4 ）等になり、太陽から 40 天文単位の冥王星から観測すれば、約（ 5 ）等になる。

距離を（ 6 ）パーセクとして求めた星の見かけの明るさが絶対等級であるから、距離 r パーセクの星の見かけの明るさは、絶対等級の明るさの（ 7 ）倍である。そして、距離 r パーセクの星の見かけの明るさを m 等級、絶対等級を M 等級とし、 M の値を m と r とによって表すと、 $M =$ （ 8 ）となる。

また、この星の年周視差を p'' とすると、 p と r の間には $p =$ （ 9 ）
の関係が成り立つので、 M を m および p によって表すと、 $M =$ （ 10 ）になる。

解答

$$\begin{array}{lllll} 1 : & 100 & 2 : & 100^{\{(n-m)/5\}} & 3 : & -2 & 4 : & -22 & 5 : & -19 \\ 6 : & 10 & 7 : & (10/r)^2 & 8 : & m+5.0 - 5 \log r \\ 9 : & 1/r & 10 : & m+5.0 + 5 \log p & & & & & & (\text{対数の底はいずれも } 10) \end{array}$$

解説

星の等級： 星に5等級の差があると、明るさは100倍になるので、1等級の差は $100^{(1/5)}$ である。

そして、 $(n-m)$ 等級の差があると、明るさは $100^{\{(n-m)/5\}}$ 倍 になる。

土星から見た太陽： 星の明るさは距離の2乗に反比例（-2乗に比例）するので、太陽から10天文単位の距離にある土星から観察する時の太陽の明るさは、地球から観察するときの $10^{(-2)}$ 倍、つまり、 $1/100$ であって、見かけの等級は5等級低くなる。つまり、 $-27 \text{ 等} + 5 \text{ 等} = \underline{-22 \text{ 等}}$ となる。

冥王星から見た太陽： 冥王星と太陽の距離は40天文単位であるから、冥王星から観察すると、太陽の明るさは地球から観察した時の $40^{(-2)}$ 倍、つまり、 $1/(16 \times 100)$ 倍である。 $\log 4 = 3/5$ であるから、 $10^{(3/5)} = 4$ つまり、 $100^{(3/5)} = 16$ 従って、明るさの16倍は3等級差であるから、 $1/(16 \times 100)$ は8等級差である。つまり、 $-27 \text{ 等} + 8 \text{ 等} = \underline{-19 \text{ 等}}$ となる。

絶対等級： 距離10パーセクの星の明るさが絶対等級であるから、距離 r パーセクの星の明るさは、その絶対等級の明るさの $(10/r)^2$ 倍である。よって、この星の絶対等級を M 、見かけの等級を m とすると $100^{\{(M-m)/5\}} = (10/r)^2$ となる。 両辺の常用対数(底は10)をとると、

$$\log 100^{\{(M-m)/5\}} = \log (10/r)^2 \rightarrow \{(M-m)/5\} \log 100 = 2 \log (10/r) \rightarrow$$

$$\{(M-m)/5\} \times 2 = 2(1 - \log r) \rightarrow \underline{M = m + 5 - 5 \log r} \text{ となる。}$$

年周視差を p'' とすると、 $p = 1/r$ であるから、

$$M = m + 5 - 5 \log (1/p) = \underline{m + 5 + 5 \log p} \text{ となる。} \quad (\text{対数の底は } 10)$$

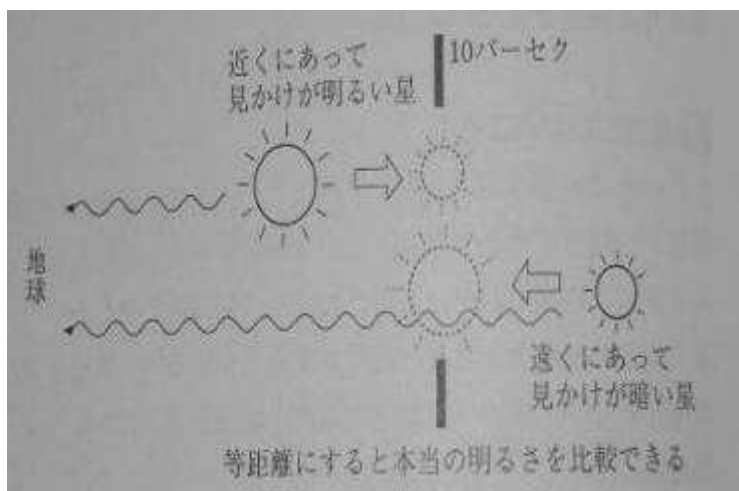
【参考】星までの距離と光度(明るさ)

宇宙で距離を表すには**光年**という単位を使うことが多い。光年とは光が1年間に進む距離の事で、秒速約30万kmであるから、一年で約9.5兆kmとなり、地球と太陽の距離である1天文単位の約6万倍である。単に星までの距離を表すだけでなく、どれくらい昔の光を見ているのかという時間も表している。

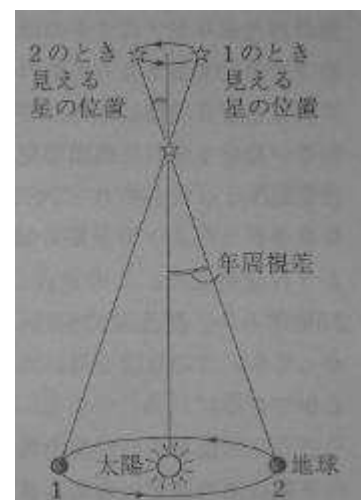
230万光年離れたアンドロメダ銀河から届いた光は230万年前、人類が二足歩行を始めた頃に発せられた光の輝きを見ることになる。

天文学の距離の単位として、**パーセク**もよく用いられる。地球が太陽の周りを1年かけて公転する時、地球に近い星は1年周期でわずかに動いて見える。この見かけの動きを**年周視差**という。これは地球と星と太陽をつないだ、星を頂点とする三角形の頂角の大きさと表され、角度が大きいほど、距離は近い事になる。ここで、年周視差が1秒(1度の10分の1)に相当する距離を1パーセクといい、約3.26光年になる。100パーセク未満であれば、年周視差から星までの距離を求められるが、それ以上の距離については、別の方法を用いなければならない。

星の明るさは**等級**で表される。19世紀に入って、琴座ベガ(織女星)を0等星とし、1等星が6等星よりちょうど100倍明るいと定義した。これによると、1等級明るければ約2.5倍明るい事になる。こうして決められた等級を**見かけの等級**というが、これは実際の星の明るさと距離によって決まる。星同士の絶対的な明るさを比較するには、全ての星を同じ距離に並べて比較する必要がある。その場合、星を全て10パーセク(32.6光年)の距離に置いたときの明るさである**絶対等級**を用いる。絶対等級は、直接は判らないので、本問題のように、見かけの等級と星までの距離から計算して求める。



見かけの明るさと絶対等級



年周視差

【問題 5-07】 超新星の光度と星の一生

1980 年代後半、地球から約 17 万光年離れた大マゼラン雲に超新星が出現した。 ケプラーが観測した超新星以来、約 400 年ぶりに肉眼で観測できる超新星であった。 超新星は恒星進化の果ての大爆発と考えられている。 これに関して、以下の問 A～C に答えよ。

問 A 超新星の見かけの明るさは 3 等級であった。 もし、この超新星爆発が七夕の星「牽牛星」の距離（約 17 光年）で起こったとしたら、何等星に見えるか。
計算の過程も含めて答えよ。

問 B この超新星の絶対等級は何等級か。 また、それは太陽の明るさの約何倍か。
 $10 \text{ パーセク} = 33 \text{ 光年}$ 、 $\log(33/17) = 0.3$ 、太陽の絶対等級を 4.5 等級とせよ。

問 C 「星の一生」について、下記の語句を最低一度は使って、200～300 字で説明せよ。

白色矮星 主系列星 星間ガス 赤色巨星 核反応

解答

問A 距離 17 光年の位置にあるとした時の見かけの明るさを m 等級とすると、

$$100^{\{(3-m)/5\}} = (170000/17)^2 = 100^4$$

$$(3-m)/5 = 4 \quad m = -17 \quad \underline{\underline{-17.0 \text{ 等星}}}$$

問B 絶対等級を M 等級とすると、

$$100^{\{M-(-17.0)\}/5} = (33/17)^2 \quad \text{両辺の常用対数をとって}$$

$$\log 100^{\{(M+17.0)\}/5} = \log(33/17)^2 \quad (M+17.0)/5 = \log(33/17) = 0.3$$

$$\text{よって、} M = 1.5 - 17.0 = \underline{\underline{-15.5 \text{ 等級}}}$$

超新星の光度を L 、太陽の光度を L' とすると、

$$L'/L = 100^{\{4.5-(-15.5)\}/5} = 100^4 = \underline{\underline{10^8 \text{ 倍}}}$$

問C 宇宙空間にある星間ガスとダストからなる星間雲の密度の大きい部分で、その重力による収縮が起こると原始星が生まれる。原始星の収縮が進み、その中心部の温度が上昇すると、水素 - ヘリウムの核反応が始まる。これが主系列星である。主系列星の内部にヘリウムが溜まり、その核ができると、その外側の部分は膨張して赤色巨星になる。赤色巨星では、ヘリウムがより大きい原子に変わる核反応が起こり、外側から質量を放出するようになる。やがて核反応が終わると、星は収縮して白色矮星になる。質量が大きい星は超新星になり、その後、中性子星やブラックホールなどが残る。こうして、星はその一生を終える。

解説

問A 星の見かけの明るさは距離の 2 乗に反比例する。星の等級は明るさが 100 倍になるごとに 5 等級小さくなる。星の距離が 1.7×10^5 光年から 17 光年に変わると、その見かけの明るさは

$\{(1.7 \times 10^5)/17\}^2$ 倍になる。また、見かけの等級が 3 等級から m 等級に変わると、その明るさは

$$100^{\{(3-m)/5\}} \text{ 倍になる。従って、} 100^{\{(3-m)/5\}} = \{(1.7 \times 10^5)/17\}^2$$

この式を解いて、 $m = -17$ 等 となる。

問B 絶対等級は星を 10 パーセク (33 光年) の距離に置いた時の見掛けの等級である。従って、ここでは距離 17 光年で見かけの等級が -17 等級の星が、33 光年を隔てて何光年になるかを求めればよい。

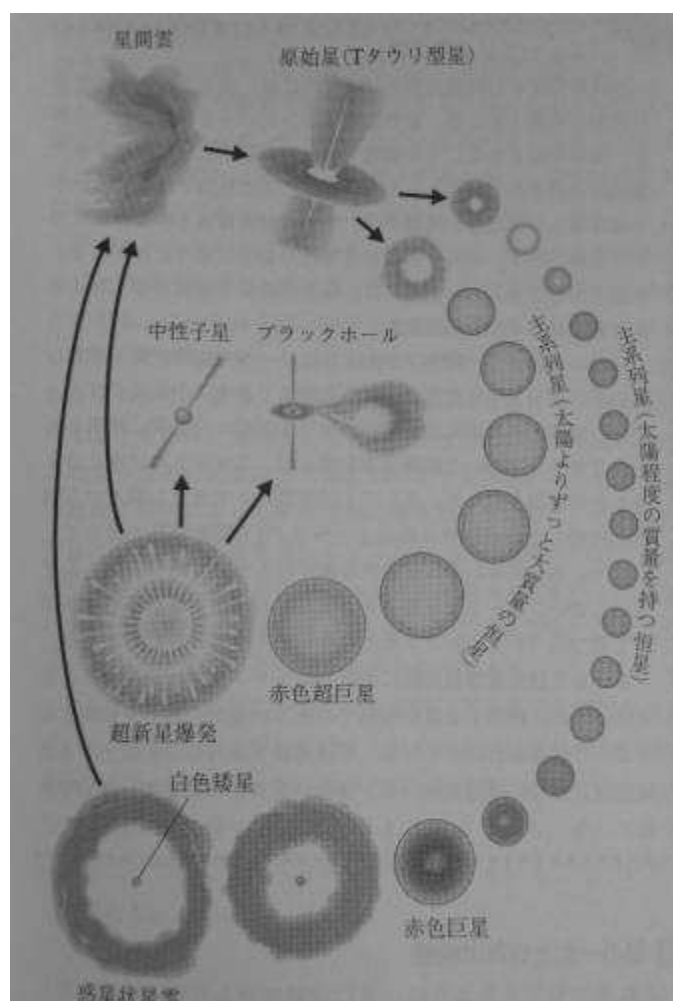
この超新星の絶対等級を M 等級とすると、次の式が得られる。

$$100^{\{M-(-17.0)\}/5} = (33/17)^2 \quad \text{この式から } M = 1.5 - 17.0 = \underline{\underline{-15.5 \text{ 等級}}}$$

星の等級は明るさが 100 倍になるごとに 5 等級小さくなるから、 -15.5 等級、および 4.5 等級の明るさをそれぞれ L 、 L' とすると、 $L'/L = 100^{\{4.5-(-15.5)\}/5} = 100^4 = \underline{\underline{10^8 \text{ 倍}}}$

この超新星の光度が太陽の 10^8 倍であることが分かる。

問C 星の寿命は最低でも数百万年あるといわれる。宇宙空間は完全な真空ではなく、ガスや塵といった**星間物質**がわずかに存在している。それが特に密集している地域を**星間雲**といい、この中で原子が結合して分子となり、次第に高密度な**分子雲**になる。この分子雲がコアとなり、周辺の物質が吸い寄せられ星の原型が造られる。その際、重力エネルギーが熱となって放出され、分子雲コアは温度が上昇し、赤外線を放射する**原始星**となる。さらに収縮すると可視光線で輝き始め、温度が 1000 万 K を超えると中心部で**核融合反応**が起こり、膨大なエネルギーを生じる**主系列星**となる。主系列星として輝いている間、核融合反応の燃えカスであるヘリウムが蓄積される。ヘリウムの方が水素より重いので、中心部に沈みこみ、その周辺の球殻の部分で水素の核融合が起こる。燃えカスのヘリウムの量が、星の質量の 2 割を超えると、ヘリウムの塊は自重で収縮を始める。収縮によって生じた熱は、外側の球殻を熱し、この部分で水素核融合を起こす。この熱によって星の外層が膨張し、**赤色巨星**となる。これ以降の星の進化は星の質量によって変わってくる。太陽程度の星ならば、外層のガスが離散し、中心部のヘリウムの燃えカスが白く小さな**白色矮星**として見える。太陽よりずっと大きなサイズの星だと、**超新星爆発**を起こして星間雲に戻る。あるいは重力崩壊を引き起こして、**中性子星**や**ブラックホール**になる。



星の一生

【問題 5-08】 恒星の光度・距離と銀河系の構造

バーナード星は、ケンタウルス α (連星) に次いで、近距離の星として知られている。バーナード星について、下表の数値が知られている。この星に関して次の問 A～F に答えよ。問 B～D では解答にいたる過程も記せ。

赤経	17 時 50 分 (17h50m)
赤緯	$+4^{\circ} 30'$
年周視差	$0.5''$
固有運動	$10''$ /年
視線速度 (注)	-110km/s
見かけの等級	9.5 等
スペクトル型	M 4

(注) 視線速度がマイナスである事は、この星の接近を示している。

問 A バーナード星が夜中に南中するのは何月ごろか、理由とともに答えよ。

問 B バーナード星までの距離はいくらか。

問 C バーナード星の絶対等級はいくらか。

問 D バーナード星の視線に垂直な方向の速度を km/s で表せ。
但し、 $1 \text{ 年} = 3 \times 10^7 \text{ s}$ である。

問 E 視線速度は星の何を観測する事によって求められるか。

問 F 太陽、およびその近傍の星の多くは、速度約 250km/s で銀河回転をしているが、上の数値はバーナード星の銀河回転の速度がこれと著しく異なる事を示している。これはバーナード星と太陽の銀河系を構成する星としての運動がどのように異なる事によるのか。80～120 字で説明せよ。

解答

問A 6月 (理由) 夏至の頃、太陽とバーナード星の赤経の差が 12h になるから。

問B $6 \times 10^{13} \text{ km}$ 問C 13 等 問D 100 km/s

(解答を求める過程については、解説を参照)

問E スペクトルの赤方偏移または青方偏移

問F バーナード星が太陽と同じ銀河回転をしているとすれば、ケプラーの法則から、その速度は太陽に近いはずである。この天体と太陽の相対速度の大きさは、この天体の軌道が銀河系を構成している多くの恒星の軌道と異なっている事を示している。

解説

問A バーナード星の位置は赤経が $17^{\text{h}}50^{\text{m}}$ で、冬至点の赤経に近い。従って、夏至点との赤経差がほぼ 12h であるから、夏至の頃、夜半に南中する。

問B 年周視差は下図のように、長さ 1 天文単位(A.U.)の弧の中心角とみなしてよいから、バーナード星と太陽の距離を r A.U. 年周視差を θ ラジアンとすると、

$r\theta = 1$ $\theta = 0.5'' = 0.5\pi/180 \times 60 \times 60$ ラジアン であるから、 $r = 4.2 \times 10^5 \text{ A.U.}$

$1 \text{ A.U.} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$ であるから、 $r = 1.5 \times 10^8 \times 4.2 \times 10^5 \div \underline{6 \times 10^{13} \text{ km}}$



問C 年周視差 $0.5''$ の距離は $0.1''$ で示される絶対等級の距離の $1/5$ 倍である。

従って、バーナード星の絶対等級の明るさはその見かけの明るさの $1/25$ 倍である。

$10^{0.7} = 5$ より $100^{0.7} = 25$ $100^{(3.5/2)} = 25$

よってバーナード星の絶対等級は見かけの等級より、3.5 大きな数となり、 $9.5 + 3.5 = \underline{13 \text{ 等}}$ となる。

(絶対等級を $M = m + 5.0 + 5 \log p$ の式から求める事も可能である。この場合、 $\log 5 = 0.7$ を用いる)

問D 固有運動は視線に垂直方向の動きを示している。年周視差 $5''$ の距離にある天体の固有運動が、 $10''/\text{年}$ であるから、この速度は $10/0.5 \text{ A.U./年} = 20 \text{ A.U./年}$ である。

$20 \text{ A.U./年} = 1.5 \times 10^8 \times 20 \text{ km/年} = 3 \times 10^9 \text{ km} / 3 \times 10^7 \text{ s} = \underline{100 \text{ km/s}}$

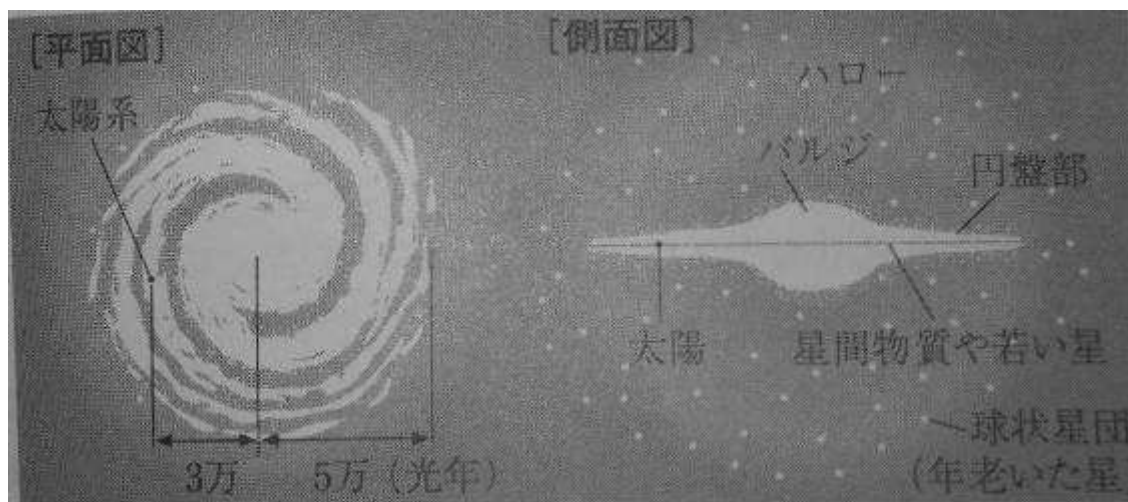
問E 視線速度はスペクトルの赤方偏移または青方偏移から求められる。

問 F ケプラーの法則から、軌道半径が等しければ、公転速度も等しいことが導き出せる。バーナード星は太陽との相対速度が大きくても、太陽の近くにあつて、銀河系を構成する天体であるから、銀河系の中心に対しては太陽とほぼ、同じ速度でなければならない。これは、バーナード星の公転速度の方向が銀河回転をする太陽の方向と異なる事を意味する。つまり、バーナード星は銀河系内で銀河面と交わる軌道を公転しているのである。このような星は高速度星とよばれており、球状星団など銀河系のハローを構成する天体がこれに属している。

【参考】銀河系の構造

我々の銀河系は数千億個の星の集合体で、上から見ると中心から伸びる2本の腕が渦を巻くように伸びている。また、横から見ると中心部が厚く盛り上がり、腕がその周辺を円盤状に取り巻いている。中心の厚い部分を**バルジ**、周辺を**円盤部**という。我々の太陽系は円盤部にあり、銀河系の中心から約3万光年離れたところを約2億5千万年の周期で回っている。円盤部の周辺も、数は少ないが恒星が銀河を包むように取り巻いている。この部分を**ハロー**という。

バルジとハローには古い星が多く分布し、ハローには年老いた星が密集して存在する**球状星団**が多く分布する。一方、円盤部では若い星や星間物質が多く存在し、誕生したての若い星の集団である**散開星団**が多く分布している。



銀河系の構造

【問題 5-09】 ケーサーの光度とハッブルの法則

次の文を読んで、下の問A、Bに答えよ。

ケーサー（準星）は電波を強く発する天体であって、その一つQからは実験室で水素が放射する波長 4860Å （オームストロング）の輝線スペクトルが波長 5630Å として発射されている。これはスペクトルの（ 1 ）と呼ばれる現象で、これによって、この天体が速度約 $4 \times 10^4 \text{ km/s}$ で後退している事が分かる。

ある銀河の後退速度を $v \text{ km/s}$ 、その距離を r 光年、ハッブル定数を $20 \text{ km/s} \cdot 10^6 \text{ 光年}$ とする時、ハッブルの法則は次の式で表される。（ 2 ）

この法則は宇宙の（ 3 ）を示すと考えられているが、この法則から求められる Q の距離は（ 4 ）光年である。Q の見かけの等級は 13 等級であるから、この絶対等級、つまり、この天体を年周視差（ 5 ）秒角の距離から見たときの明るさは、約（ 6 ）等である。

ケーサーがこのような大きなエネルギーを放出するのには、その中心にあるブラックホールが関与していると考えられている。最近の観測によって、Q は視半径約 10 秒角もある銀河の中心角であることが分かった。この銀河の半径を計算によって求めると、約（ 7 ）光年に達する。中心角（ケーサー）を除くこの銀河の見かけの明るさは 16 等で、その光度は中心角の約（ 8 ）倍である。

なお、 $100^{(1/5)} \doteq 2.5$ 、 $100^{(4/5)} \doteq 40$ とせよ。

問A 文中の（ 1 ）～（ 3 ）、（ 5 ）に適切な語句、式、数を答えよ。

問B 文中の（ 4 ）、（ 6 ）～（ 8 ）の値を求め、計算式とともに記せ。

解答

- 問 A 1 : 赤方偏移 2 : $v = (20\text{km/s} \cdot 10^6 \text{ 光年}) \times r$
3 : 膨張 5 : 0.1
問 B 4 : 2×10^9 6 : -26 7 : $1 \times 10^5 \text{ 光年}$ 8 : 16
(計算式、数値の導出過程については、解説を参照)

解説

問 A 後退する天体の放射する光はドップラー効果によって、そのスペクトルの位置に変化が起こる。
これを、**スペクトルの赤方偏移**という。

銀河の後退速度は、その距離に比例する。 銀河の後退速度を v 、ハッブルの定数を H 、銀河の距離を r とする時、**ハッブルの法則**は次の式で表される。 $v = H \cdot r$

H の値は確定していないが、 $20\text{km/s} \cdot 10^6 \text{ 光年}$ 程度と推定されており、これを採用するとハッブルの法則は $v = (20\text{km/s} \cdot 10^6 \text{ 光年}) \times r$ で表される。

この法則が成り立つ事は、宇宙が**膨張**している証拠であるといわれている。

天体を距離 **10 パーセク (年周視差 $0.1''$)** とした時の見かけの明るさを、**絶対等級**としている。

問 B クェーサー Q の後退速度 $4 \times 10^4 \text{km/s}$ をハッブルの法則に代入すると、Q までの距離 r 光年は、
 $4 \times 10^4 \text{km/s} = (20\text{km/s} \cdot 10^6 \text{ 光年}) \times r$ $r = 2 \times 10^9 \text{ 光年}$

Q の距離 $2 \times 10^9 \text{ 光年}$ と、絶対等級の距離 33 光年 (1 パーセク) の比は
 $2 \times 10^9 / 33 = 6 \times 10^7$ よって、Q の絶対等級の明るさは、見かけの明るさの
 $(6 \times 10^7)^2 \div 40 \times 10^{15}$ 倍である。 星の明るさは 100 倍になるたびに 5 等級上がるので、
Q の見かけの等級を m 、絶対等級を M とすると、
 $100^{\{(m-M)/5\}} = 4 \times 10^{15} = 40 \times 10^{14} = 40 \times 100^7 = 40 \times 100^{(35/5)}$
 $100^{(4/5)} \div 40$ であるから、 $100^{\{(m-M)/5\}} = 100^{(39/5)}$ $m = 13$ であるから、
 $13 - M = 39$ $M = -26$ よって、Q の絶対等級は 約 -26 等 である。

$10''$ は $(1/360)^\circ$ であるから、Q の半径を a とすると、 $a = (2 \times 10^9 \times \pi) / 360 \times 180 \text{ 光年}$
 $\pi = 3.1$ として、 $a = (2 \times 10^9 \times 3.1) / 360 \times 180 = \underline{1 \times 10^5 \text{ 光年}}$

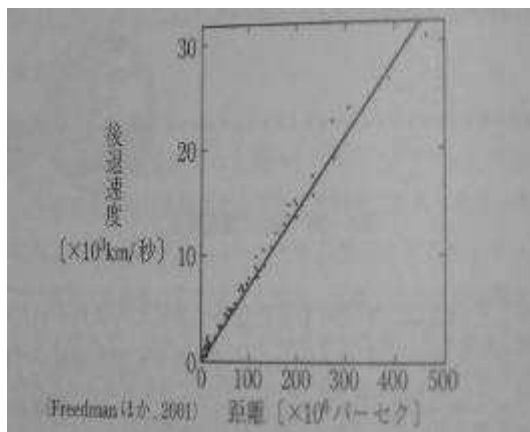
中心角の光度は 13 等で、他の部分の光度の 16 等よりも 3 等級明るい。
よって、中心角の光度は他の部分の $100^{(3/5)} = 2.5^3 \div \underline{16 \text{ 倍}}$ である。

【参考】ハッブルの法則とビッグバン理論

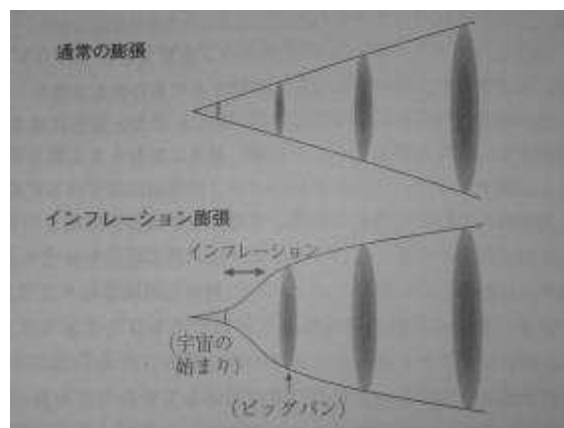
1929年、アメリカのハッブルは、銀河のスペクトルのほぼ全てが本来の波長から赤色の方向にずれる事を確認していた。スペクトルのずれは光のドップラー効果の結果であり、長波長側である赤方にずれるという事は、宇宙の銀河が、我々の銀河系から遠ざかっているという事である。ずれの大きさが大きくなれば、遠ざかる速度も速くなる。ハッブルは観測の結果、我々の銀河系から遠い銀河ほど、早く遠ざかっている事を発見した。この事実は、宇宙全体が一様に膨張しているということである。

宇宙が膨張しているならば、遠い過去に遡れば、宇宙は一点から生じたことになる。この出発点がビッグバンである。ハッブルが発見した銀河の距離と後退速度の関係（ハッブルの法則）は、ビッグバン理論の根拠になった。

しかし、ビッグバンの瞬間には温度も密度も無限大となり、科学の理論が成立しなくなる。また、爆発現象の結果としては、この宇宙が均一すぎるという疑問も残った。ビッグバン理論の問題点を克服する為に提唱されたのが、インフレーション理論である。宇宙の最初期においては、現在の膨張とは異なり、ある時期まで指数関数的に急膨張したというものである。このインフレーション理論により、ビッグバン理論の問題点の多くが解消した。



ハッブルの法則



インフレーション理論の概念

【問題 5-10】 連星の光度・質量・距離①

次の文を読み、問A～Eに答えよ。 解答にあたり、数値を求める経過も記せ。

主星 S1 および伴星 S2 とによって構成される連星がある。その公転軌道は共通重心を中心とする円であって、地球の公転軌道はその軌道面の延長上にある。年周視差は $0.05''$ 、S1 と S2 の見かけの距離の最大値は $0.40''$ である。S1 と S2 はいずれも変光星ではないが、連星としては 5 年ごとにその光度が一時的に減少する。また、S1 および S2 については下表のような観測結果がある。

必要ならば、 $\log 2 = 0.30$ 、 $\log 2.5 = 0.40$ （対数の底は 10）を利用せよ。

	S 1	S 2
スペクトル型	K	A
表面温度	4000K	8000K
みかけの等級	1.0 等	3.0 等

問A S1 の絶対等級はいくらか。

問B 5 年ごとに起こる連星の一時的な光度の変化では、平常時の何分の 1 だけ減少するか。

問C S1 の半径は S2 の半径の何倍か。

問D S1 と S2 の質量の和は太陽の何倍か。

問E 恒星を主系列星、白色矮星、巨星に分けると、S1 および S2 はそれぞれどれに属していると考えられるか。該当するものを 1 つ選んだ上、そのように判断した根拠をそれぞれ、50 字程度で述べよ。

解答

問A -0.5 等 問B $1/7.3$ と $1/120$ 問C 10 倍 問D 5 倍

(数値の導出過程は、解説を参照)

問E S1: 巨星 主系列星の太陽と比べて、表面温度が低いのに、光度が大きいから。
S2: 主系列星 主系列星の太陽と比べて、表面温度、光度ともに大きく、HR図で太陽の左上に位置するから。

解説

問A 年周視差 p 、見かけの明るさが m 等級の星の絶対等級を M とすると、 $M = m + 5.0 + 5 \log p$

S1の絶対等級を M_1 とすると、 $M_1 = 1.0 + 5.0 + 5 \log 0.05$

$\log 0.05 = \log (0.1/2) = \log 0.1 - \log 2 = -1 - 0.3 = -1.3$ (対数の底は 10)

従って、 $M_1 = 1.0 + 5.0 + 5 \times (-1.3) = -0.5$ -0.5 等級 となる。

問B 表より、S1はS2よりも低温で光度が大きいので、S1の半径はS2より大きい。S2がS1の向こう側にあるとき食が起こると、S2は完全に隠れるので、連星の光度はS2の光度分減少する。また、S2がS1の手前の時食が起こると、S2の断面積によって、S1の放射が遮られる。S1とS2は2等級の差があり、S2の明るさを1とすると、S1の明るさは $2.5^2 \div 6.3$ になる。S1とS2の合成された明るさは $6.3 + 1.0 = 7.3$ であるから、S2が向こう側に隠れると、連星は $1/7.3$ だけ減光する。

シュテファン・ボルツマンの法則より、単位面積当たりの放射エネルギー量は、温度の4乗に比例する。S2によって遮られるS1の放射エネルギーはS2の放射エネルギーの $(4000/8000)^4 = 1/16$ であるから、S2が手前に来た時の連星の減光は $(1/7.3) \times (1/16) \div$ $1/120$ である。

問C 星の表面積は光度に比例し、表面温度の4乗に反比例する。S1、S2の半径を r_1 、 r_2 とすると
 $4\pi r_1^2 / 4\pi r_2^2 = r_1^2 / r_2^2 = (2.5)^2 \times 8000^4 / 4000^4 = 2.5^2 \times 2^4$

従って、 $r_1 / r_2 = 10$ 10 倍 となる。

問D 連星の質量を太陽の M 倍、連星間の距離を a 天文単位(A.U.)、連星の公転周期を p 年とすると、ケプラーの第3法則により、 $a^3 / p^2 = M$ が成立する。 $a = 0.4 / 0.05 = 8$ 天文単位

減光は1公転周期の間に2回起こるから、 $p = 5 \times 2 = 10$ 年。従って、 $M = 8^3 / 10^2 \div$ 5.1 倍

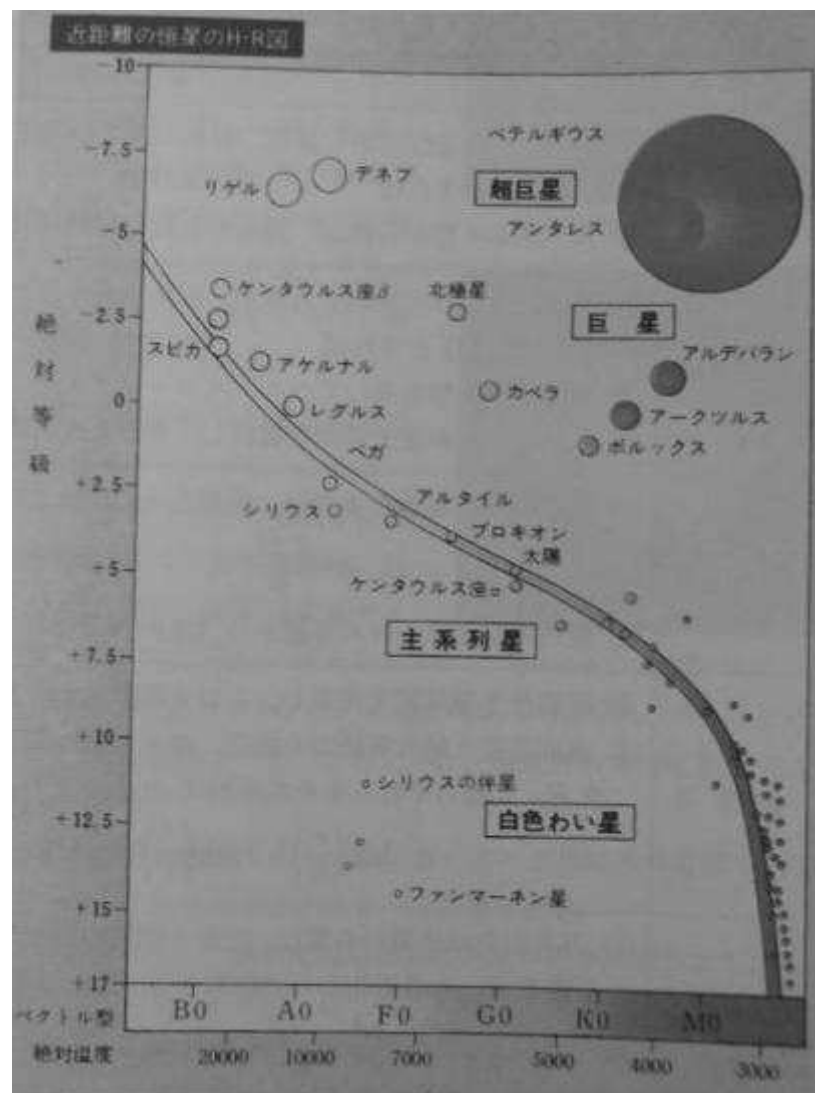
問E 主系列星では、高温ほど光度が大きく、低温ほど光度が小さい。S1は絶対等級 -0.5 等で、スペクトルがK型であるから、G型で $+5$ 等の太陽と比較すると、HR図で右上に位置する。太陽は主系列星であるから、S1は巨星である。S2は絶対等級が 1.5 等で、スペクトルがA型である。これはHR図で主系列星の太陽の左上に位置し、主系列星になると考えてよい。

【参考】 ヘルツシュプリング・ラッセル図 (HR 図)

星の明るさと色を組み合わせる事で、星の性質に関する情報を引き出す事ができる。 そのために造られたのが、星の絶対等級を縦軸、色を横軸とするヘルツシュプリング・ラッセル図 (HR 図) である。横軸はスペクトル型が用いられるが、結局は表面温度を目盛ると同じことになる。

ステファン・ボルツマンの法則より、星が放つ光の強さは、表面温度が高くなるほど強くなる。 星のサイズが大きいほど、表面積も大きくなり、放射される光の量も大きくなるので、明るくなる。

左上から右下にかけて斜めに分布する恒星群を**主系列星**といい、太陽もここに属する。 この右上に属する星は表面温度が低く、サイズが大きな**赤色巨星**と呼ばれ、左下に散在する星は暗く、極めて小さな**白色矮星**と呼ばれる星である。



HR(ヘルツシュプリング・ラッセル)図

【問題 5-11】 連星の光度・質量・距離②

主星Aおよび伴星Bからなる連星がある。A、B間の見かけの距離は $1.20''$ 、年周視差は $0.40''$ である。AおよびBの見かけの等級は、それぞれ -1 等および $+4$ 等であり、表面温度は、それぞれ 8000K および 4000K である。AおよびBの共通重心に対する公転軌道は円であって、地球はその軌道面の延長上にあるため、この連星には 1.5 年に一度の割合で食による暗い時期がある。

これについて次の問いに、答えを導く過程も簡潔に記して答えよ。

問A 主星Aの絶対等級はいくらか。 $100^{(1/5)} = 2.5$ である。

問B この連星の食による減光量の極大値は大きい時には小さい時の何倍になるか。

問C 主星Aの半径は伴星Bの半径の何倍か。

問D この連星の質量の和は太陽の何倍か。

問E 太陽系からこの連星までの距離は何光年か。

解答

問A 2等 問B 16倍 問C 2.5倍 問D 3倍 問E 8.3光年

(解答の導出過程は、解説を参照)

解説

多くの星は2つ以上の星によって、共通重心の周りを公転している。これを**連星**という。地球がその軌道面上にある時、連星の食が起こり、光度が変化する。これを**食連星**という。連星間の距離と公転周期から、その質量が求められる。

問A 絶対等級とは星を年周視差 $0.10''$ (10 パーセク)に置いた時の明るさである。年周視差 $0.40''$ の星を年周視差 $0.10''$ の距離に移すと、その距離は4倍になり、明るさは距離の2乗に反比例するので $1/16$ 倍になる。1等級の差は $100^{(1/5)}$ 倍であり、 $100^{(1/5)} = 2.5$ とすると、 $100^{(3/5)} \approx 16$ であるから、明るさが $1/16$ になると、星の等級は3等低くなる。従って、主星Aの絶対等級は $-1等 + 3等 = \underline{2等}$ となる。

問B 主星Aの表面温度はBの表面温度より高いので、単位面積当たりの明るさ(輝度)はAの方が大きい。従って、連星の食で減光量が多いのはAの前にBが重なった時であり、減光量が少ないのはBがAの前に隠れた時である。地球は連星の軌道面上にあるので、Aの一部が隠される場合もBが隠れる場合も、隠れる面積はBの断面積に等しく、その減光量の比は、AとBの輝度の比になる。シュテファン・ボルツマンの法則より、単位面積当たりの放射量は温度の4乗に比例する。従って、2回の食の減光量の比はAとBの表面温度の4乗の比であり、減光量の極大値の大きい時と小さい時の比は $(8000 / 4000)^4 = \underline{16倍}$ となる。

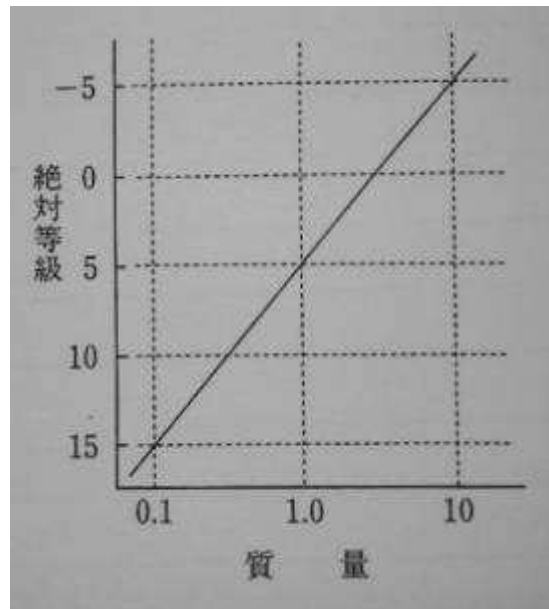
問C AとBの光度の差は5等級であるから、Aの光度はBの100倍である。単位表面積の放射量は16:1であるから、Aの表面積はBの表面積よりも大きい。星の明るさは表面積と輝度の積に比例するので、A、Bの表面積をそれぞれ S_A 、 S_B とすると、 $16S_A / S_B = 100$ $S_A / S_B = 100 / 16$
従って、AとBの半径をそれぞれ r_A 、 r_B とすると $(r_A / r_B)^2 = 100/16$ $r_A / r_B = \underline{2.5倍}$

問D 連星の公転周期は減光2回分の3年である。AとBの距離は $1.20 / 0.40 \text{ A.U.} = 3.0 \text{ A.U.}$
連星の質量の和をMとすると、ケプラーの第3法則により、 $3^3 / 3^2 = M$ $M = 3$
連星の質量の和は太陽の **3倍** である。 (A.U. は天文単位)

問E 星の距離は年周視差に反比例する。太陽系から連星までの距離が3.3光年だとすると、年周視差は $1''$ となる。実際の距離をDとすると、 $D = 3.3 / 0.40 \text{ 光年} \approx \underline{8.3 \text{ 光年}}$

【問題 5-12】 主系列星の光度・質量・寿命

下図は太陽近傍の主系列星の絶対等級と質量の関係を示したものである。 質量は太陽を1として、これとの比で表している。 図をもとにして次の問A～Cに答えよ。



- 問A 主系列星の光度（放射エネルギー）を太陽のL倍、質量を太陽のM倍として、LとMの関係式を求めよ。
- 問B 恒星が主系列にとどまる時間（恒星の寿命）をT年とし、Tと（太陽の質量の比）Mとの関係式を求めよ。 但し、太陽の寿命を 1×10^{10} 年とし、主系列にとどまる間、その光度は一定とし、主系列星の内部で核融合によって消費される元素の重量比は一定であるものとする。
- 問C ある星団が生まれてから現在までに経過した時間はどのようにして求められるか、100～150 字で説明せよ。

解答

- 問 A 問題の図より、星は質量が 10 倍大きくなるごとに、絶対等級で 10 等 (10^4 倍) 明るくなる。つまり、光度 L は質量 M の 4 乗に比例しており、比例定数を k とすると、

$$\underline{L = M^4 \times k}$$
 が成立する。
- 問 B 星の寿命 T はその質量 M に比例し、光度 L に反比例する。比例定数を k' とすると

$$T = (M/L)k' \quad L = M^4 \times k$$
 であるから、

$$T = Mk' / M^4 \times k = (k' / k) / M^3$$

 $M = 1$ とすると $T = 1 \times 10^{10}$ であるから、 $k' / k = 1 \times 10^{10}$
 従って、 $\underline{T = 1 \times 10^{10} / M^3}$ となる。
- 問 C 一つの星団を構成する星はほぼ同時に誕生しているので、光度が大きく、寿命の短いものから順に巨星へと進化する。従って、一つの星団の年齢は、現在その星団に残っている主系列星のうち、最も光度の大きなものの寿命を、光度から計算によって求める事によって、近似的に測れる。

解説

- 問 A 星の絶対等級は光度を示すものであって、絶対等級の数が 5 減少するごとに光度は 100 倍になる。従って、 -5 等級の光度は 5 等星の、また 5 等星の光度は 15 等星の、それぞれ 100^2 倍である。
- 問題の図の光度 L と質量 M の関係を表にすると、下表のようになる。

L	$10^{(-4)}$	1	10^4
M	$10^{(-1)}$	1	10

光度 L は質量 M の 4 乗に比例する事が示されているので、比例定数を k とすると

$\underline{L = M^4 \times k}$ … ① の関係が成立する。これを、主系列星の質量・光度関係という。

問 B 主系列星の質量は核融合反応する元素の質量に比例しており、光度は核融合反応の速度を意味するから、その寿命は 質量 ÷ 光度 に比例する。従って、主系列星の寿命を T 年、比例定数を k' とすると

$T = (M/L)k'$ この式に①を代入して、 $T = Mk' / M^4 \times k = (k' / k) / M^3$ … ②

主系列星の太陽で、 $M = 1$ 、 $T = 1 \times 10^{10}$ であるから、 $k' / k = 1 \times 10^{10}$ … ③

③を②に代入して、 $\underline{T = 1 \times 10^{10} / M^3}$ … ④ これが求める T と M の関係式である。

問 C 問 A、B より、星の寿命は星の絶対等級から求められる事が分かった。 近距離の星の絶対等級は測定によって得られる見かけの等級と年周視差から、計算によって求められる。

より遠距離の星団に属する星については、主系列星の絶対等級はスペクトル型から求めたり、ケフェウス型変光星の変光周期と見かけの等級から求められる星団の距離を利用して求めたりする。

星団は星雲の中で形成され、一つの星団に属する星はほぼ同時に誕生したと考えられている。 星は光度の大きいものほど寿命が短いので、一つの星団に属する星は、光度の大きいものから順に巨星へと進化していく。 従って、星団に属する巨星は、同じ星団に属する主系列星よりも光度が大きい主系列星であったはずであり、一つの星団の中に残された最も光度の大きい主系列星は、巨星になる直前にあるといえることができる。 つまり、一つの星団に残された最も光度の大きい主系列星の寿命が、その星団の存在期間を示すことになる。

大学入試地学 記述論述問題集



(C) 2012 大学入試地学研究会

2012 年 10 月 01 日発行