

地球惑星科学II (基礎クラス:29-34)

学期末試験・問題

- 問1 から 問3 の全ての問題に解答せよ.
- 解答期限: 1/30(日) 23:59
- 解答用紙について :
解答用紙として, ELMS/Moodle にアップロードされている word ファイルを使用すること. 解答の際には, 解答用紙用 word ファイルの欄の大きさはできるだけ変えないようにし, 各問の解答は解答欄に収まるように工夫すること. ページ数は 2 とする. 1 ページのものは不可. 3 ページ以上のものも不可.
- 数値を扱う場合では正確な数値は求めない. 図の読み取り, 計算においては有効数字を 1 桁とすることで十分である. 計算の際には電卓, 計算機を使用しても構わない. 平方根の値を求める場合は平方根表 (この問題冊子 p.9) を用いても良い. 計算を要する問題の解答では, 計算過程の記述, あるいはどのような式変形をおこなったかの説明を記載するようにすること.
- 持ち込み可能物品 :
解答にあたっては何を参照しても構わない. 必要に応じて, 書籍の参照, ネットワークでの検索などを行え. 調べたものについては, 必ず出典を記載すること. ただし, 独力で解答すること. 他人への相談, ネットワーク上に存在する質問箱などの利用は禁止である. これらは不正行為であるとみなす. 不正行為を行った者は, 処分され卒業が延期される.
- 解答用紙の提出方法 :
解答用紙用 word ファイルの編集が終わったら pdf に変換し, ファイル名を「学生番号.pdf」 (例: 02215963.pdf) に変えて Moodle にアップロードせよ.

2022 年 01 月 27 日

問 1 以下の問にそれぞれ 40 字程度 (1 行程度) で答えよ。文章のみで説明を行い、図は用いないこと。

(1-1) 地球の大気・海洋系は時間平均・緯度経度平均状態を考えると数年の時間スケール内ではほぼ平衡状態にある。平衡状態にあるとはどういう意味かを説明せよ。

(1-2) 前問 (1-1) とは異なり、10 年以上の時間スケールを考えた場合、地球の気候は変動しうる。このような長い時間スケールを持つ気候変動の例を 1 つ挙げ、どのようなものか説明せよ。

(1-3) 海洋の深層循環を作り出すプロセスについて説明せよ。

(1-4) 木星が地球よりも大きな質量を持つ惑星となった理由を説明せよ。

(1-5) グレートウォール、ボイドという宇宙の大規模構造が作られた理由を説明せよ。

問 2 地球環境における水の重要性に関する以下の問に答えよ。

(2-1) 水の存在は大気の温度分布に大きな影響を与える。本問 (2-1) から (2-3) までは、このことを例を使って考えてみる。

地表付近で温度 T_0 を持つ空気塊を断熱的に上昇させることを考える。高度 5km で凝結が起こるとして、空気塊の温度の高度変化を表すグラフを解答用紙の図にかけ。傾きの大きさは問わないが、凝結が起こる高度の上と下で気温の変化率の違い (変化率の大小関係) がわかるようにせよ。

(2-2) 前問 (2-1) で考えた設定において、凝結高度の上と下で気温の変化率が変わる理由を 30 字以内で説明せよ

(2-3) (2-1) で考えた設定において、不安定となる周囲の大気の温度分布の 1 例のグラフを解答用紙にかけ。ただし、周囲の大気の温度は地表付近では T_0 (問 (2-1) で考えた空気塊の地表付近の温度と同じ値) を持つとせよ。(2-1) の解答と区別がつくように線種を変えて (点線などを使い)、**「周囲の大気」** という文字を添えよ。

(2-4) 地球では雲が特徴的な分布を示す。図 1 は地球全体の雲の画像である。雲の分布の大雑把な特徴を大気の大循環と結びつけて 50 字程度で説明せよ。



図 1: 雲の分布. 原図は地学図表 p.181.

(2-5) 大気中で水が凝結すると雲が生じるとともに凝結加熱が発生し、これが循環のエネルギー源となる。凝結加熱がエネルギー源となっている構造の 1 つに台風 (熱帯低気圧) がある。

台風の簡単な数式モデルとして、図 2 に示すプロセスの組み合わせを考える。図 2 に示された変数の大きさは以下のように決まると仮定する。

- 上昇流 w の時間変化率は凝結加熱量 q に比例する。この比例係数を K とする。
- 地表風 u の大きさは上昇流 w の大きさに比例する。この比例係数を L とする。
- 蒸発量 e は地表風 u の大きさに比例する。この比例係数を M と

する。

- 凝結加熱量 q は蒸発量 e に比例する。この比例係数を N とする。比例係数 K, L, M, N はいずれも正の値となる。このモデルにおいて、 w と比例係数だけを含む式を作り、 w は時間とともに増加していくことを示せ。解答の仕方としては、微分方程式を解いても良いし、差分法を用いて計算をおこなうのでも良い。

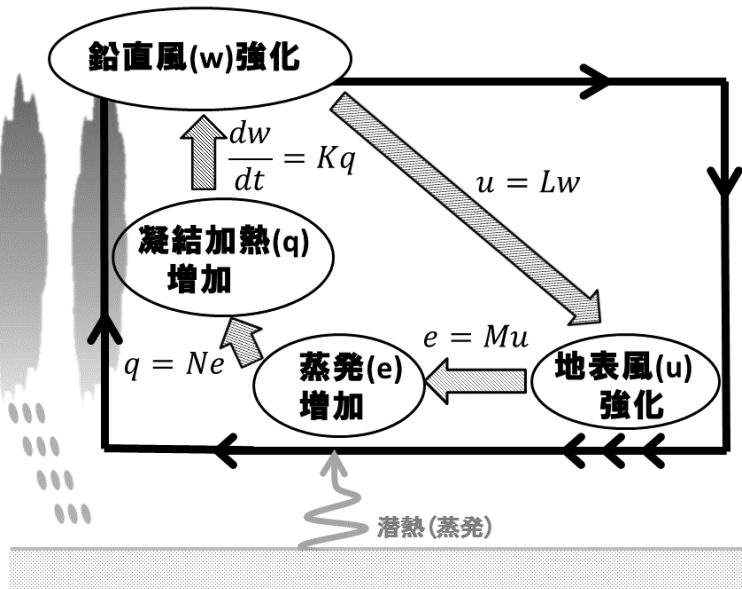


図 2: 台風の発達メカニズムを示す模式図。

- (2-6) 前問 (2-5) で考えたプロセスだけが存在すると台風は発達をし続けることになる。しかし、台風を減衰させるプロセスもある。凝結で生じた熱は対流圏上部の周囲の大気を加熱することにより対流を抑制するように働く。その理由を 30 字程度で答えよ。
- (2-7) 雲は気候の決定に強く影響する。地球において仮想的に雲量が少し増加した状況を想定してみると、雲の効果により表面温度が上がる可能性も、下がる可能性もある。雲量が増えた場合に表面温度を上げる機構、表面温度を下げる機構をそれぞれ 1 つずつ挙げよ。

(2-8) 地球では大量の水が海洋を形成している。海洋は大気に比べて長い時間スケールを持っているため、長い期間にわたる気候の変化をもたらす得る。ここでは、大気と海洋の循環の時間スケールについて考えることにする。大気ハドレー循環において空気塊が1周する時間と海洋の亜熱帯循環(図3)において水塊が1周する時間を見積もれ。ただし、ハドレー循環の風速の典型的な大きさを 5 m sec^{-1} 、亜熱帯循環の流速の典型的な大きさを 0.1 m sec^{-1} とせよ。

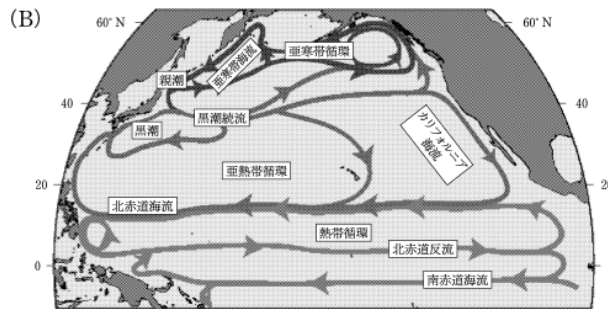


図 3: 太平洋上層の循環. この図の左側は東経 120 度, 右側は西経 90 度になっている. 原図は地球惑星科学入門 p.284.

(2-9) 海洋が存在することにより地球では炭素循環が起こっている (図 4). これは炭素が大気, 大陸, 海洋底, 地球内部を循環するものである。炭素循環においては、大陸表面における岩石の風化のプロセスが重要である。岩石の風化のプロセスを通して大気中の CO_2 が除去され海洋に炭酸イオン (HCO_3^-) が運ばれることになる。風化量は、表面温度が高いほど早く進行する。地球の歴史を通して太陽定数は増加してきたが、炭素循環により気候が安定に保たれてきたと考えられている。炭素循環により気候が安定化される理由を 50 字程度で説明せよ。

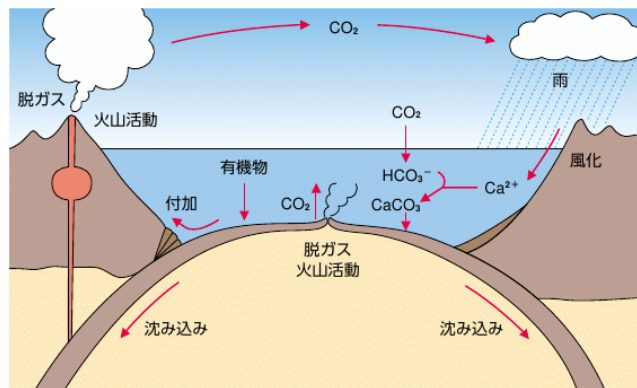


図 4: 炭素の循環. 原図は地学図表 p.205.

問 3 恒星の見かけの明るさ (実視等級) と色は観測することができる. これらの量から様々なことを知ることができる. 恒星の観測から得られる情報に関して以下の問に答えよ.

(3-1) 変光星 A はとある星団に属するセファイド型変光星である. 図 5 (a) に変光星 A の実視等級を観測した結果を示す. この図とセファイド変光星の光度周期関係 (図 5b) を用いて, 変光星 A が属する星団までの距離は 1000 パーセクとなることを示せ. 絶対等級とは恒星が 10 パーセク (32.6 光年) の距離にあったとしたときの等級である. 等級が 5 小さくなると明るさは 100 倍になる.



図 5: (a) 変光星 A の実視等級の観測結果. (b) 周期光度関係.

(3-2) 前問 (3-1) の変光星 A が属する星団の中の別の恒星 B の実視等級を 10 等とする. 恒星 B の放射エネルギー量 (1 秒で恒星が放出するエネルギー量. 単位は $\text{J sec}^{-1} = \text{W}$ となる) を求めよ. ただし, 太陽の絶対等級を 5.0 (実際は 4.83), 太陽の放出エネルギー量を $4.0 \times 10^{26} \text{ W}$ (実際は $3.85 \times 10^{26} \text{ W}$) とせよ. また, 恒星の明るさは放射エネルギー全量に比例すると考えよ.

(3-3) 図6は恒星Bのスペクトルを観測したものである。この結果とウィーンの変位則を用いて恒星Bの温度の値を推定せよ。ウィーンの変位則とは

$$\lambda_m T = b \quad (1)$$

である。ただし、 λ_m はスペクトルがピークとなる波長[m], T は絶対温度[K], $b = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m K}$ である。これを図にしたものは図7である。

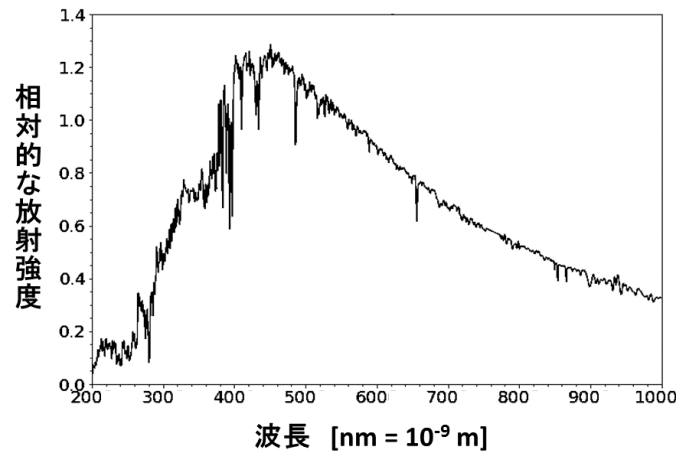


図6: 恒星Bの放射スペクトル. 横軸は波長. その単位は nm (10^9 m) である. よって, 横軸上の 200 というのは $200 \times 10^{-9} \text{ m}$ を表す. 縦軸は 555.6 nm の値を基準とした放射エネルギー量を表す. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:F5V_star_spectrum.png を改変.

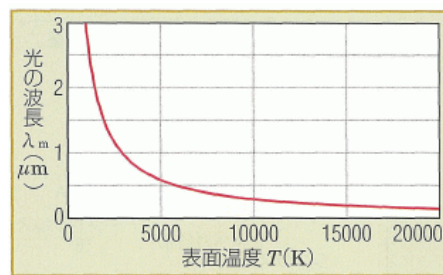


図7: 表面温度 T [K] を持つ物体が出す放射の強度が最大となる波長 $[\mu\text{m}]$ の関係. ウィーンの変位則という. 原図は地学図表 p.39.

(3-4) 恒星Bの放射エネルギー量(問(3-2)の結果)と温度(問(3-3)の結果)から半径を計算せよ。温度 T の物質が単位面積あたり、単位時間あたりに放出する光のエネルギー量は σT^4 となることを用いよ。ここで $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ はシュテファン・ボルツマン定数である。

- (3-5) 恒星の観測データから星団の年齢を知ることができる。図 8 は 2 つの星団に含まれる恒星のデータをもとにして作った HR 図である。(a) と (b) のどちらの星団が年老いた星が多いかを記号で答えよ。また、そのように考えた理由も 30 字程度で説明せよ。

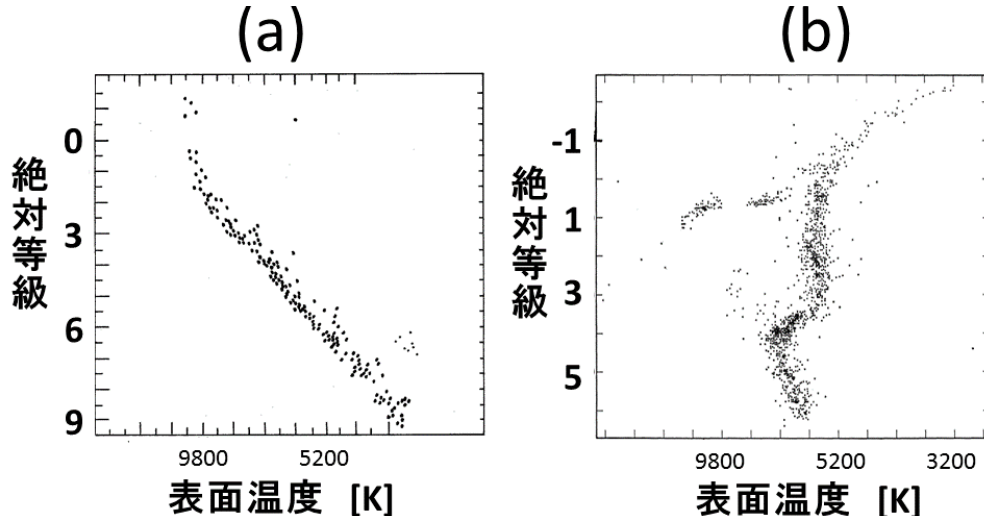


図 8: 2 つの星団の HR 図.

- (3-6) 恒星は原子を作り出す場としても重要である。炭素原子 (原子番号 6. 鉄原子よりも軽い) と銅原子 (原子番号 29. 鉄原子よりも重い) はどのように形成されたのか, 恒星の進化に関連付けてそれぞれ 30 字程度で答えよ。
- (3-7) 銀河に含まれる恒星の観測データを用いるとの進化に関する手がかりも得られる。宇宙は膨張していることは, 恒星に関するどのような観測からわかったものか 60 字程度で答えよ。
- (3-8) 恒星の放射量はその周囲の惑星の表面温度を決定づける。ここでは大気を持たない惑星を考える。大気がない惑星の熱収支の式は

$$(1 - A)S\pi R^2 = \sigma T^4 \times 4\pi R^2 \quad (2)$$

となる。ここで, T は惑星の表面温度 [K], R は惑星の半径 [m], S は太陽定数 [W m^{-2}], A はアルベド (反射率) である。恒星から惑星までの距離を a [AU] として, S を a の関数として表せ。また, 横軸に a をとった場合の T のグラフを描け。ただし, $a = 1$ における太陽定数 (地球の太陽定数) の値として $S_0 = 1400 \text{ W m}^{-2}$ (実際には 1366 W m^{-2}) を, アルベドの値として $A = 0.3$ を用いよ。

- (3-9) 実際の惑星の表面温度は前問 (3-8) で求めた T とは異なるものになる場合もある。惑星の表面温度を T とは異なるものにする機構を 1 つ挙げ, その機構はどのようなものか, 30 字程度で説明せよ。

付録

| n | \sqrt{n} | n | \sqrt{n} | n | \sqrt{n} | n | \sqrt{n} | n | \sqrt{n} |
|------|------------|------|------------|------|------------|------|------------|------|------------|
| 2.0 | 1.4 | 13.0 | 3.6 | 31.0 | 5.6 | 53.0 | 7.3 | 73.0 | 8.5 |
| 3.0 | 1.7 | 17.0 | 4.1 | 37.0 | 6.1 | 59.0 | 7.7 | 79.0 | 8.9 |
| 5.0 | 2.2 | 19.0 | 4.4 | 41.0 | 6.4 | 61.0 | 7.8 | 83.0 | 9.1 |
| 7.0 | 2.6 | 23.0 | 4.8 | 43.0 | 6.6 | 67.0 | 8.2 | 89.0 | 9.4 |
| 11.0 | 3.3 | 29.0 | 5.4 | 47.0 | 6.9 | 71.0 | 8.4 | 97.0 | 9.8 |

表 1: 平方根表.