

地球惑星科学II (基礎クラス:29–34)

学期末試験・問題

- 試験開始の指示があるまで試験問題を見ないこと。
- 問1 から 問5 の全ての問題に解答せよ。
- 解答用紙は指定のものを使うこと。解答欄は解答用紙の裏面に続いている。必ず学生番号と氏名を記入すること。
- 各問題には字数制限は設けていないが、解答欄に収まるように解答せよ。
- 試験に持ち込んで良いものは、筆記具・地球惑星科学入門・地学図表・自筆ノート(授業資料に書き込みをしたものも含む)・時計・電卓・飲料・ハンカチ・ティッシュペーパー・常備薬である。スマートフォン、タブレット、電子辞書等の電子機器は、必ずアラームの設定を解除し電源を切り、カバンにしまうこと。これらの電子機器を電卓として使用することも禁止する。身につけたり、手に持っていたり、机上に置くと、理由の如何を問わずに不正行為とみなす。
- 他受験者の迷惑となる行為は厳に慎み、静粛を保つこと。
- 不正行為は決して行わないこと。不正行為を行った者は、処分され卒業が延期される。
- 計算の際には正確な数値を出す必要はない。有効数字 2 桁の計算で十分である。電卓を使わなくても計算できるように数字をうまく切り捨て・切り上げせよ。どのような近似を行ったのかという説明も含め、計算過程も記すこと。
- 問題文中に示されている地学図表のページ数は 2024 年 2 月発行の二訂版ニューステージ地学図表に基づく。
- 本日は入室キーワードの入力を行わなくて良い。

2026 年 1 月 29 日

問 1 以下の問題 (a) ~ (d) に答えよ.

- (a) 大気温度が高度に伴い下降したり上昇したりするのは, 太陽放射がどこで何によって吸収されることで生じているか答えよ.
- (b) 温室効果に関して, 大気と地表面のそれぞれがどのような放射 (太陽放射: 可視光か地球放射: 赤外線か) を吸収し, あるいは放出しどのようなエネルギーのやり取りがあるのかを説明せよ. 更に, このやり取りによって大気がない場合よりも表面温度が高くなる理由についても述べよ.
- (c) 宇宙が膨張していることは恒星が放出する光のスペクトルを調べるとわかる. その理由を説明せよ.
- (d) 元素の合成に関して, H, He の 2 つの元素はいつ合成されたか, Li, ~ Fe はどこでどのように合成されたか, Fe より重い元素はどこでどのように合成されたか, の 3 点に対する説明を記せ.

問 2 大気, 海洋, 宇宙には共通する物理的な過程が働いている. 以下のプロセスが重要となる地球惑星科学的な現象をそれぞれ 2 つ挙げよ.

- (a) 潮汐
- (b) 衝突

問 3 大気と海洋では循環が起きている. 循環による熱輸送と物質輸送が現在の地球の気候状態を決定している. 地球の大気と海洋中の循環に関する以下の問題 (a) ~ (h) に解答せよ.

- (a) 大気や海洋に生じる循環の多くは対流である. 対流の定義を答えよ.
- (b) 太陽放射量は緯度によって異なる. この放射量の緯度差が大気や海洋の循環を生み出す. 簡単な場合について, 大気上端における (大気によって吸収される前の) 太陽放射量の緯度分布のグラフを描いてみよう. 春分の日 (正午 (昼の 12 時) になっている経度における太陽放射量の大きさ F を緯度 θ (度) の関数として式で表せ. 赤道では太陽が真上に見えており, 太陽放射量 $F(\theta)$ は赤道で最大となる. この最大値を S_0 とせよ. 更に, 横軸に緯度をとったときの太陽放射量 $F(\theta)$ のグラフの概形を解答欄の下に書け.
- (c) 大気中に生じる温帯低気圧でも海洋表層に生じる風成循環でも流れ場はほぼ地衝流になっている. 地衝流とはどのようなものか説明せよ.

- (d) 図1に示すように, 大気中に生じるハドレー循環も風成循環も空気または海水がぐるぐる回っているだけである. それでも南北方向に熱が輸送されている. その理由を説明せよ.

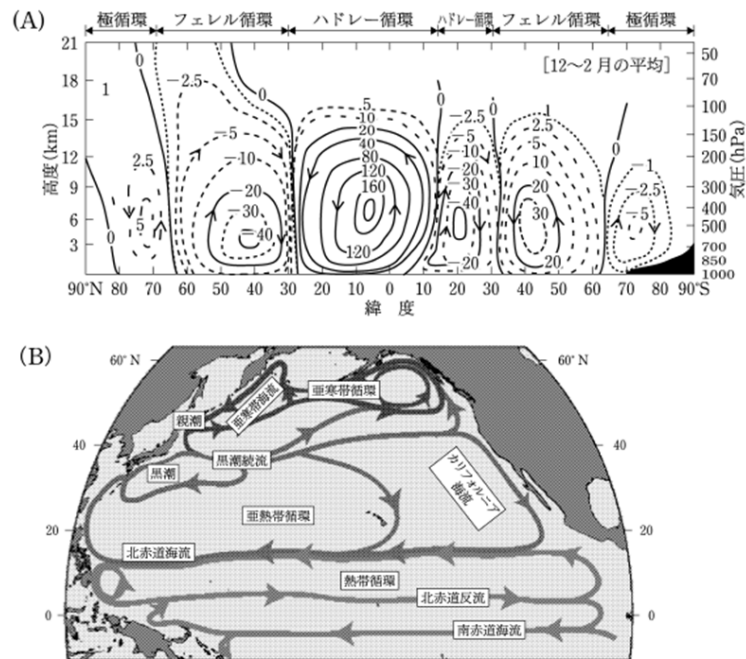


図 1: 大気と海洋における流れの模式図. 上図 (A) はハドレー循環. 原図は地球惑星科学入門第二版 p.232, 図 19.3 上図. 下図 (B) は風成循環の流れ (ジャイヤ). 原図は地球惑星科学入門第二版 p.284, 図 24.1 下図.

- (e) 台風は低緯度領域から中緯度領域に熱だけではなく水も輸送している. 台風が輸送する水の量について考えよう. 台風において活発な雲対流が生じている部分に含まれている水蒸気は 1 m^2 あたり概ね 50 kg と見積もられている. この水がすべて凝結したとすると何 mm の降水になるか (1 m^2 の面積に質量 50 kg の水が降り積もった場合, 何 mm の高さになるか) 答えよ. 液体の水の密度として 1000 kg/m^3 の値を用いよ. また, この降水量は日本の年平均降水量 1500 mm/年 の何分の 1 になっているか答えよ.

- (f) 積雲対流における上昇流について考えよう．空気塊の浮力の大きさは周囲の大気の温度と空気塊の温度の差によって決まる．これを式で表したものが以下である．

$$\frac{\Delta w}{\Delta t} = g \frac{T_{ad} - T_e}{T_e}. \quad (1)$$

右辺は浮力を表現する． T_{ad} は空気塊の温度, T_e は周囲の空気の温度, g は重力加速度である． Δw は時間間隔 Δt の間に浮力によって生じる上昇流の増加量である ($\frac{\Delta w}{\Delta t}$ が加速度を表す)．周囲の大気の温度の分布として 図 2 に示す破線に従う状況を考える．この状況で地表付近に存在する空気塊を持ち上げた時に対流が発生するかどうか考察しよう．地表では, 周囲の空気の温度も空気塊の温度も 290 K とする．乾燥断熱減率の値を 1K/100m, 湿潤断熱減率の値を 0.5 K/100m, 周囲の気温の温度勾配の値を 0.8K/100m として以下の (i) と (ii) に答えよ．

- (i) 空気塊に含まれる水蒸気量が少ない場合 (図 2 の実線) を考える．この場合, 地表付近では上昇流が生じ得ないことを (1) をもとに説明せよ．
- (ii) 空気塊に大量の水蒸気が含まれる場合 (図 2 には示されていない) を考える．(i) で考えた空気塊とは異なり, この空気塊は高度 300m まで持ち上げると凝結が生じるものとする．300 m まで持ち上げて凝結させただけでは対流は発生しないが, 更に持ち上げると対流が発生できるようになる．高度 何 m まで持ち上げると対流が発生し得ることになるか, 求めよ．

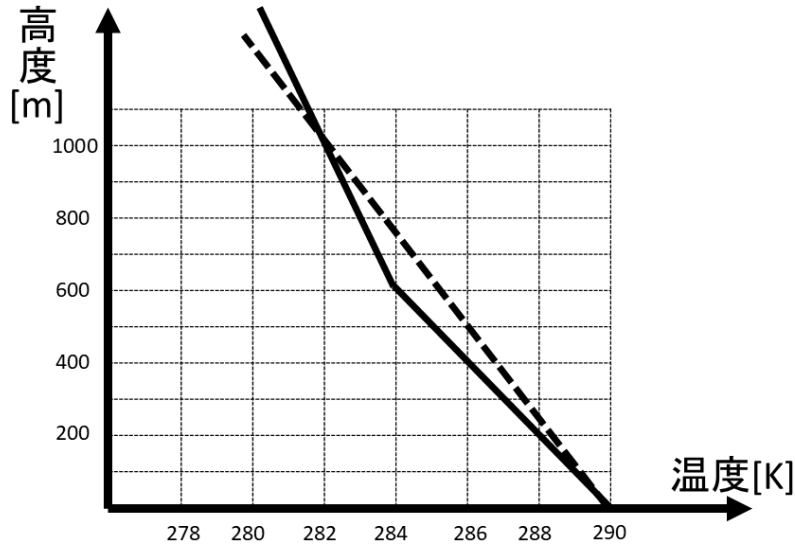


図 2: 温度の高度分布．横軸は温度 [K]．縦軸は高度 [m]．実線は空気塊の温度 T_{ad} を表す．高度が低い領域では乾燥断熱減率に, 高度が高い領域では湿潤断熱減率に従う．破線は周囲の空気の温度 T_e を表す．

(g) 海洋の深層循環はグリーンランド沖と南極海における海水の沈み込みによって駆動されている. この 2 つの海域における海水の沈み込みについて考える. 海水の密度が 1028 kg/m^3 ($\sigma_t = 28$) になると沈み込むものとして, 以下の (i) と (ii) に答えよ.

(i) グリーンランド沖について考える. 図 3 からグリーンランド沖 (経度 0 度, 北緯 70 度付近) で最も高い塩分値を読み取れ. この塩分を持つ海水が 摂氏 0 度 (273K) まで冷却されると水塊の沈み込みが起こることを図 4 を用いて説明せよ.

(ii) 南極海について考える. 図 3 から南極海の領域 (東経 180 度, 南緯 70 度付近) で最も高い塩分値を読み取れ. この塩分を持つ海水は 摂氏 0 度 (273K) まで冷却されるだけでは沈み込みは起こらないことを図 4 を用いて説明せよ. 南極海では海水が生成する際に塩分が海水中に排出され海水塩分が上昇することにより沈み込みが起こる.

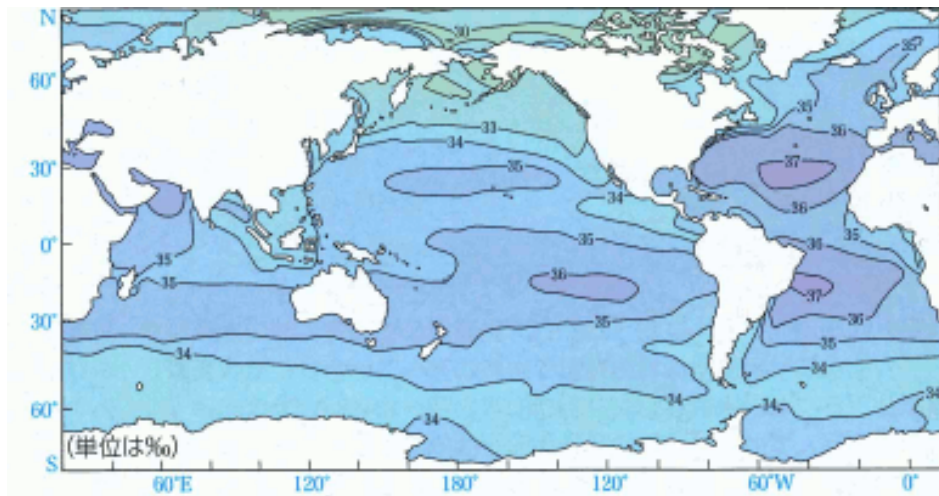


図 3: 海面における塩分 [‰]. 横軸は経度. 縦軸は緯度. 原図は二訂版ニューステージ地学図表 p.99.

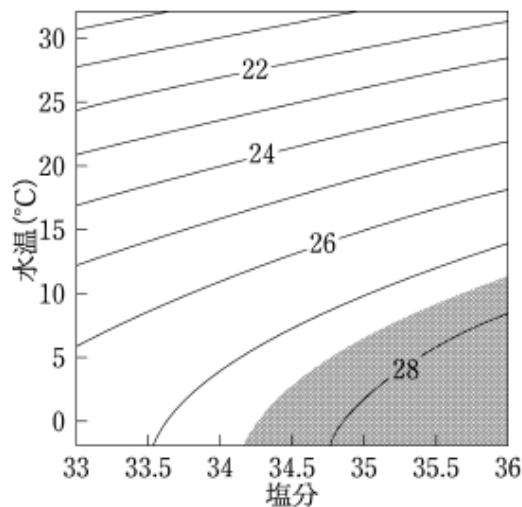


図 4: 海水の密度 σ_t . σ_t は本来の海水の密度 [kg/m^3] から 1000 kg/m^3 を差し引いたものである. 横軸は塩分 [‰]. 縦軸は水温 [$^{\circ}\text{C}$]. 原図は地球惑星科学入門第二版 p.276, 図 23.1.

- (h) 大気循環と海洋循環はそれぞれ独立して存在するわけではなくお互いに影響を及ぼし合っている。その例が ENSO である。エルニーニョ時の大気と海洋の状態に関して、以下の (i) と (ii) に答えよ。
- (i) 赤道域の大気の東風が弱まると海洋の湧昇が弱まる理由を説明せよ。
 - (ii) 湧昇が弱まっている場合、赤道域の大気対流が立つ場所がどのように変化するか説明せよ。

問 4 図 5 はこれまでに発見された系外惑星の質量と軌道半径 (正しくは軌道長半径: 楕円軌道の長軸方向の半径) の関係を示したものである. 系外惑星に関する以下の問題 (a) ~ (g) に答えよ. 必要に応じて,
 $1 \text{ パーセク} = 3.26 \text{ 光年}$, $1 \text{ 光年} = 63241.1 \text{ au}$, $1 \text{ au} = 1.49 \times 10^{11} \text{ m}$
 の換算式及び表 1 を用いよ.

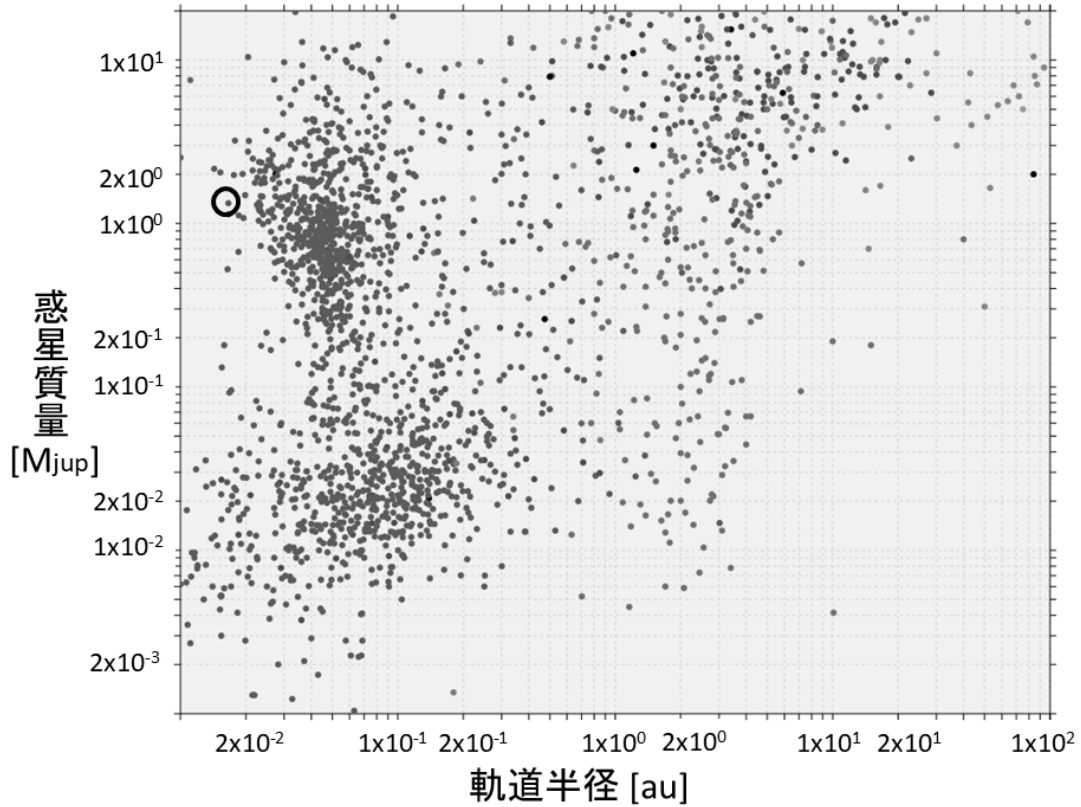


図 5: これまでに発見された系外惑星の質量と軌道半径の関係. 横軸は軌道半径 [au]. 縦軸は惑星質量であり, 木星質量 M_{jup} で規格化したもの (木星質量と等しい場合は 1 となる). 左上の丸印で囲んだものが問題で扱う惑星 HAT-P-23 Ab を表す.

n	2	3	5	7	11	13	17	19	23
$n^{1/2}$	1.41	1.73	2.23	2.65	3.31	3.61	4.12	4.36	4.80
$n^{1/3}$	1.26	1.44	1.71	1.91	2.22	2.35	2.57	2.67	2.84
$n^{1/4}$	1.19	1.31	1.50	1.63	1.82	1.90	2.03	2.10	2.20

表 1: 2 乗根, 3 乗根, 4 乗根の値.

- (a) 図 5 に示された系外惑星の 1 つに HAT-P-23 Ab と名付けられたものがある. この惑星の主星 (中心の恒星) は HAT-P-23 というものである. 恒星 HAT-P-23 の年周視差は 2.7×10^{-3} 秒 (1 秒は $1/3600$ 度), 実視等級 (見かけの等級は) 12.4 等であることが観測からわかっている. この観測値を使って以下の (i) と (ii) に答えよ.
- (i) 年周視差の値を用いて HAT-P-23 までの距離をパーセク単位で求めよ.
- (ii) 恒星 HAT-P-23 の絶対等級の概数を求めよ. 絶対等級の正確な値は求める必要はなく, 例えば「1 等と 2 等の間」という解答で良い. 恒星の

明るさは距離の 2 乗に反比例することを用いよ. 等級が 1 異なると明るさはおよそ 2.512 倍異なる (等級が 5 異なると明るさは 100 倍異なる). 2.512^n の値については表 2 を参照せよ.

n	2	3	4	5	6	7	8	9
2.512^n	6.310	15.85	39.81	100.0	251.2	631.2	1585	3982

表 2: 2.512^n の値.

- (b) 恒星の絶対等級がわかった上で恒星のスペクトル型を観測すると恒星質量を見積もることができる. 更に, 恒星の周囲の系外惑星の公転周期がわかると, ケプラーの第三法則により惑星の軌道半径を求めることができる. ケプラーの第三法則 (恒星から遠い惑星ほど公転周期が長い) を式で書くと

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{GM_*} a^3 \quad (2)$$

となる. ただし, P は公転周期 (単位は秒), a は軌道半径 (単位は m), π は円周率, M_* は中心の恒星の質量 (単位は kg), $G = 6.674 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2$ は万有引力定数と呼ばれる定数である. 観測によって得られた恒星 HAT-P-23 の質量は $1.15 \times 10^{30} \text{ kg}$, トランジット法により得られた惑星 HAT-P-23 Ab の公転周期は 1.2 日である. これらの観測値を使って惑星 HAT-P-23 Ab の軌道半径を天文単位 (au) で求めよ. この答えは 図 5 を見ればわかってしまうが, (2) を用いて計算せよ. 3 乗根の値については, 表 1 を参照せよ.

- (c) 図 5 には地球型惑星も木星型惑星も示されている. 地球型惑星と木星型惑星の違いを主成分, 質量, 惑星半径に注目して説明せよ.
- (d) トランジット法から惑星 HAT-P-23 Ab の半径は $7.62 \times 10^7 \text{ m}$, 更にドップラー法から質量は $2.54 \times 10^{27} \text{ kg}$ であることがわかっている. これらの値を使って惑星 HAT-P-23 Ab の密度を推定せよ. 更に, 惑星 HAT-P-23 Ab は地球型惑星か巨大ガス惑星 (木星型惑星もしくは天王星型惑星) かのどちらと考えられるか答えよ. 表 3 を使って考えよ.

惑星	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星
密度 $[\text{g}/\text{cm}^3]$	5.43	5.24	5.51	3.93	1.33	0.69	1.27	1.64

表 3: 太陽系内惑星の密度

- (e) 惑星 HAT-P-23 Ab はどのように形成されたと考えられているかを説明せよ. (b), (d) の解答ができていいるなら, その結果を踏まえて解答してもらいたい.
- (f) 系外の地球型惑星の一部は大気を有すると想像される. 地球型惑星における大気の形成過程について説明せよ.

- (g) 図5で示された惑星の中にはハビタブルゾーン内に位置する地球型惑星もある。ハビタブルゾーンの境界位置は恒星によって変わる。ここでは、恒星の質量に対してハビタブルゾーンの位置がどのように変わるかを考えよう。非常に大雑把に太陽系における火星(軌道半径は 1.5 au , $S = 0.4S_E$)と金星(軌道半径は 0.7 au , $S = 1.9S_E$)の間がハビタブルゾーンになると考えることにする。ただし、 S は恒星から a の距離において恒星からの光に対して垂直な面が 1 m^2 あたりに1秒間で受け取るエネルギー $[\text{W/m}^2]$ (地球の場合だと太陽定数に対応する), S_E は地球の太陽定数である。他の恒星の周囲でも、火星と金星における入射太陽放射のエネルギー量 S の値でハビタブルゾーンの境界位置が決まるとして、以下の (i) と (ii) に答えよ。

- (i) 恒星の光度 (1秒あたりに恒星が放出する光の全エネルギー) $L [\text{W}]$ と惑星の軌道半径 $a [\text{m}]$ の間には

$$L = 4\pi a^2 S \quad (3)$$

の関係が成り立つ。また、恒星の光度 L と恒星の質量 M_* の間で質量光度関係

$$L = AM_*^4 \quad (4)$$

が成り立つ。ここで、 A は定数である (問題を回答するにあたり A の値は必要ない)。 (3) と (4) を用いると

$$\mu = \alpha^{1/2} \psi^{1/4} \quad (5)$$

が得られることを解答欄の左側で説明せよ。ただし、 μ は M_* を太陽質量で割ったもの ($\mu = 1$ が太陽質量に対応する), α は惑星の軌道半径 a を地球の軌道半径で割ったもの (天文単位で測った軌道半径, $\alpha=1$ が地球の軌道半径, すなわち 1 au に対応する), ψ は S を地球の太陽定数 S_E で割ったもの ($\psi = 1$ が地球の太陽定数に対応する) である。 μ, α, ψ はいずれも次元を持たない量である。(5) がハビタブルゾーンの境界位置を決める式となる。

- (ii) 式 (5) を用いて恒星の質量が変わった時に入射太陽エネルギー量が金星の S となる位置 (ハビタブルゾーンの内側境界) 及び火星の S となる位置 (ハビタブルゾーンの外側境界) を示すグラフ (2本) を解答欄右側の座標軸に書け。2乗根, 4乗根の値が必要な場合には、表1を用いよ。

問 5 地球惑星科学に限らず、生成 AI は上手く活用せねばならない。生成 AI の答えを鵜呑みにしてはならず、自分で確認し、答えの真偽を考察する必要がある。

これについて、担当教員が chatGPT に聞いた質問 (以下) を例にとって考えてみよう。

質問: 10 億年後における地球の表面温度は現在の値と比べてどのように違うか、300 字以内で教えてください。

上の質問に対して以下の回答が返ってきた。

回答: 約 10 億年後には、太陽の核反応が進むことで放出するエネルギーが現在よりおよそ 10 % 増加すると考えられています。その結果、地球はより多くの太陽放射を受け取り、平均表面温度は現在より数十度上昇すると推定されます。この温暖化により海洋の蒸発が進み、水蒸気による温室効果がさらに強まることで、地表は生命の生存が困難なほど高温になります。最終的には、現在のような温暖で安定した気候は失われると考えられます。

字数制限をつけたとはいえ、この回答は不十分である。授業内容を踏まえて不十分な点を指摘してあなたの考えを説明せよ。