

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3 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・電卓・飲料である。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 1 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。ただし、どのような近似を行ったかがわかるように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 月発行のものに基づく。
- 本日は入室キーワードの入力を行わなくて良い。

2025 年 1 月 23 日

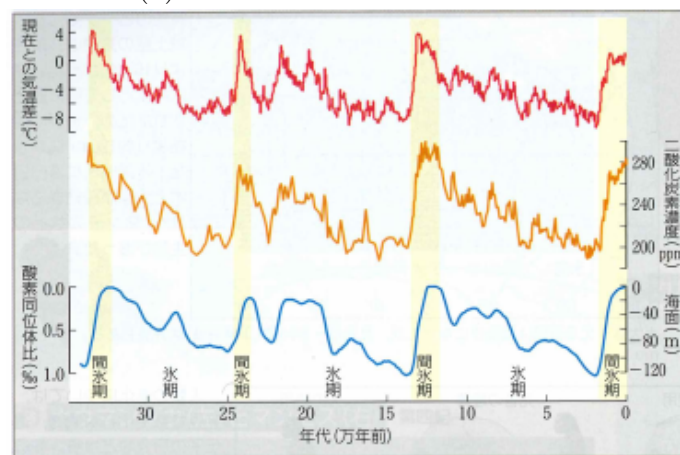
問 1 以下の問題 (a) ~ (j) に答えよ. それぞれ 2 行以内で解答せよ

- (a) 地球大気のおよそ高度 80 km まで大気中の CO_2 濃度はほぼ一定となっている. その理由を答えよ.
- (b) 地球の緯度 30 度付近は他の緯度に比べて降水が少なく, 大陸上では砂漠が形成されている. この理由を説明せよ.
- (c) 地球では冬が寒く夏が暑いという季節変化が起こる. 季節変化が起こる理由を説明せよ.
- (d) 雲の発生段階では凝結核に水蒸気が凝結し雲粒ができる. 雲粒が雨粒まで成長すると降水となって落下する. μm サイズの凝結核から, mm サイズの雨粒までどのように成長するかを説明せよ.
- (e) 豊富な海産資源をもたらす黒潮は風成循環の亜寒帯循環 (風成循環で作られる海洋表層の大きな渦の 1 つ) の一部である. 風成循環の大きな渦が形成されるメカニズムを説明せよ.
- (f) エルニーニョ・ラニーニャ現象では, 赤道域の海面温度が 3 年から 5 年の周期で変動する. 1 年以上の長い周期の変動が起こる理由を説明せよ.
- (g) 太陽系の内側には小質量の岩石惑星, 外側には大質量のガス惑星が存在する. 内側と外側で形成される惑星の質量にこのような差がついた理由として考えられていることを説明せよ.
- (h) 小惑星は太陽系の形成過程を探る上で重要な情報をもたらす. そのために, はやぶさ・はやぶさ 2 などによる探査が行われた. なぜ, 小惑星は太陽系の形成過程を知るための重要な情報をもたらすのか, その理由を説明せよ.
- (i) 地球の中心には金属 (鉄とニッケル) を主成分とするコア (核) が存在する. コアがどのように形成されたのかを説明せよ.
- (j) 系外惑星の多くは, 直接観測することができない. しかし, その存在は検出することができる. どのようにして検出できるのかを説明せよ.

問 2 地球温暖化に関する以下の問題 (a) ~ (g) に解答せよ。

- (a) 地球温暖化では大きな温度上昇率が問題になっている。地球温暖化による温度上昇率が氷期・間氷期サイクルに伴う温度変化に比較してかなり大きな値になっていることを確かめてみよう。図 1(a) を用いて間氷期と間氷期の間の期間における温度の時間変化率, 及び図 1(b) を用いて地球温暖化による温度の時間変化率を, それぞれ K/年 の単位で求めよ。

(a) 氷期・間氷期サイクル



(b) 地球温暖化

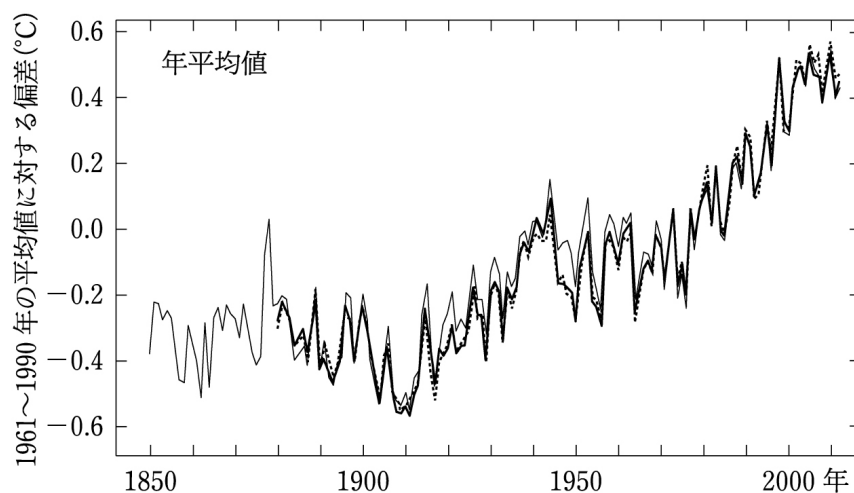


図 1: 表面温度の全球平均値の変動. (a) 氷期・間氷期サイクルの場合. 原図は地学図表 198 ページ. (b) 地球温暖化の場合. 原図は地球惑星科学入門 338 ページ. いずれも横軸は時間.

- (b) 地球温暖化は大気中の CO_2 濃度が増加したために起きている．大気中の CO_2 濃度が増加した場合に，大気と地表面の熱収支の図（図 2）のどこかどのように変わるか（図中に示されている放射量の矢印のどれがどのように変わるか）を推定し，温度が上昇する理由を説明せよ．

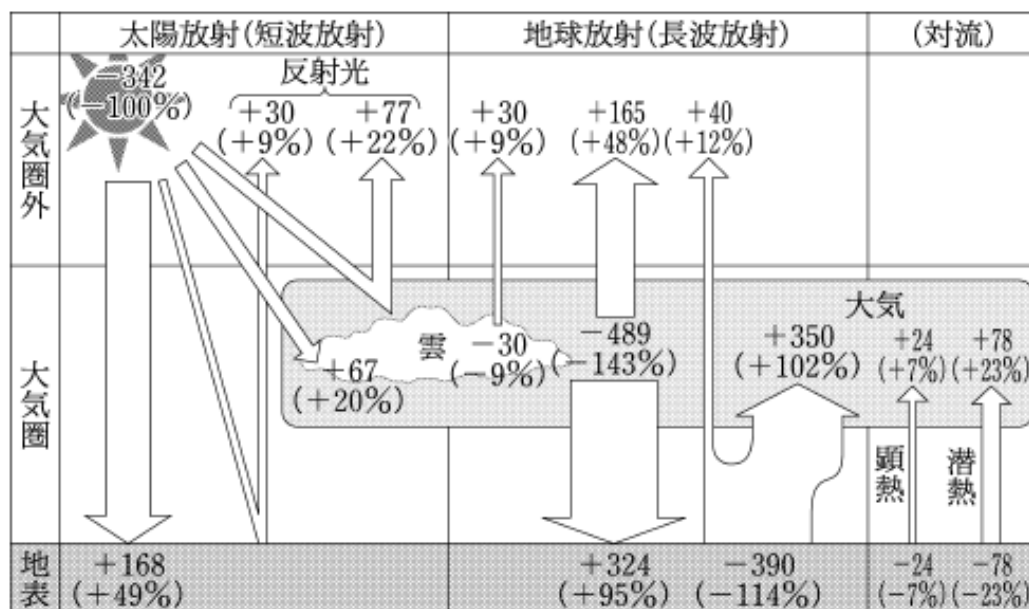


図 2: 地球全体の熱収支．単位は $\text{W}/\text{m}^2 = \text{J}/\text{sec}/\text{m}^2$ ．原図は地球惑星科学入門 222 ページ．

- (c) 地球温暖化の影響は高緯度地域で顕著に現れると言われている。これは表面のアルベド (入射した太陽放射を反射する割合, 氷面積が大きいほど値は大きくなる) が変化することにより温度の増加量が増幅されるためである。この機構はアイス・アルベドフィードバックと呼ばれる。

ここでは, 高緯度に存在する, 部分的に氷で覆われた領域を考える。この領域における大気と地表面の熱収支を表現する簡単なモデルを考える (図 3)。地表面の熱収支を表現する式は以下のようになる。

$$\sigma T_a^4 + S(1 - A) = \sigma T_g^4 \quad (1)$$

ここで, A は表面のアルベド (次元は無し), S は地表面に入射する太陽放射のフラックス [W/m^2] (地表面に 1 m^2 あたり 1 秒あたりに入射する太陽エネルギー量), T_g は表面温度 [K], T_a は大気温度 [K], σ [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$] はステファン・ボルツマン定数である。

この領域の氷面積の変化の仕方として,

case A: T_g が変わると氷面積が変化する (T_g が高くなると氷面積が減少する) 場合

case B: T_g が変わっても氷面積は変化しない場合

の 2 つの場合を考えよう。地球温暖化により少し T_a が高くなった時に, case A では, case B に比べて, T_g の変化量が大きくなることを (1) を使って説明せよ。 T_a が変化する前には, case A と case B で T_g 及び A の値は等しいものとする。

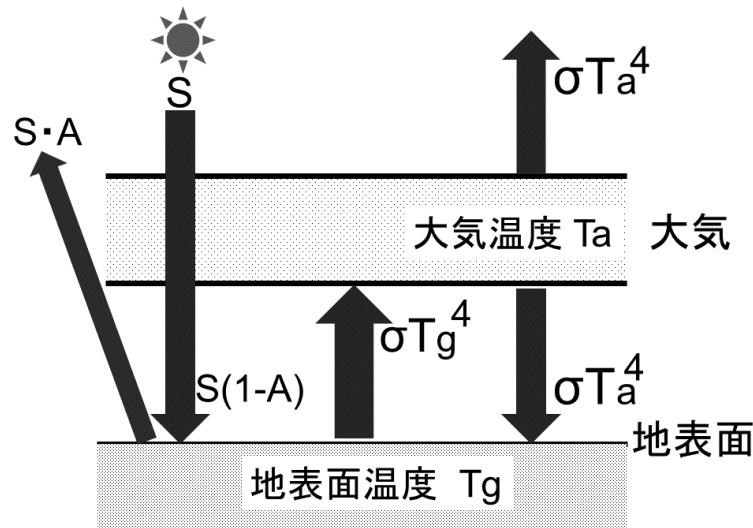


図 3: 大気と地表面の熱収支を表現する簡単モデル。大気は等温の 1 層であるという簡単化を行っている。

- (d) 地球温暖化により、氷床が融解し海水面が上昇することが心配されている。もしもグリーンランドの氷が全部溶け、その融解水が全て海洋に流入したとすると、海水面は何 m 上昇すると推定されるか、概算値を求めよ。ただし、海洋の面積を $3.61 \times 10^8 \text{ km}^2$ 、グリーンランド上の氷床体積を $2.9 \times 10^6 \text{ km}^3$ とせよ。また、氷から水に相変化する際に体積は 0.92 倍になるとせよ (水の密度は 1000 Kg/m^3 であるのに対して、氷の密度は 920 Kg/m^3)。
- (e) 地球温暖化の予測においては、複雑な応答を示すプロセスについても考慮する必要がある。例えば、雲は温度の増加に対して 2 つの相反する効果を持っている。気温が上昇し雲の量が増えた場合に、雲は地球の温度を高くする効果も地球の温度を低くする効果も持つ。この 2 つの効果はそれぞれどのようにしてもたらされると考えられるか、答えよ。
- (f) 大気中の CO_2 濃度の増加は人間活動における化石燃料の使用が主な原因だと考えられている。そのため、温暖化対策として、化石燃料の代替となるエネルギー源が注目されている。ここでは、化石燃料の代替候補の 1 つである太陽光発電について考えてみる。

東芝のソーラーパネルは、面積 50 m^2 の場合に 10kW ($= 10000 \text{ J/sec}$) の出力ができるそうである。昼夜の存在、緯度による日射量の差などを一切無視して 50 m^2 のソーラーパネルが常に 10kW の出力できると仮定して、この太陽光発電で人類が使用する全エネルギー ($4 \times 10^{20} \text{ J/年}$) をまかなうためにはどれほどのソーラパネルが必要か見積もれ。地球 (半径は 6400km) の表面積に対する必要なソーラパネルの面積の比で答えよ。

上記の結果をもとに考えた場合、化石燃料を廃止して全て太陽光発電に切替えることは現実的だろうか？ あなたの考えを記せ。

- (g) 地球温暖化対策として、大気中の CO_2 濃度を減少させるというものが考えられる。この 1 つとして、深くまで沈み込んでいる海水に CO_2 を溶かして沈みこませてしまう、という方法が思いつくかもしれない。この方法の問題点について、海洋全体の循環がどのようなものになっているかを踏まえて論じよ。

問 3 図 4 は ヘルツシュプルング・ラッセル図 (HR 図) の 1 例である。以下の問題 (a) ~ (h) に答えよ。

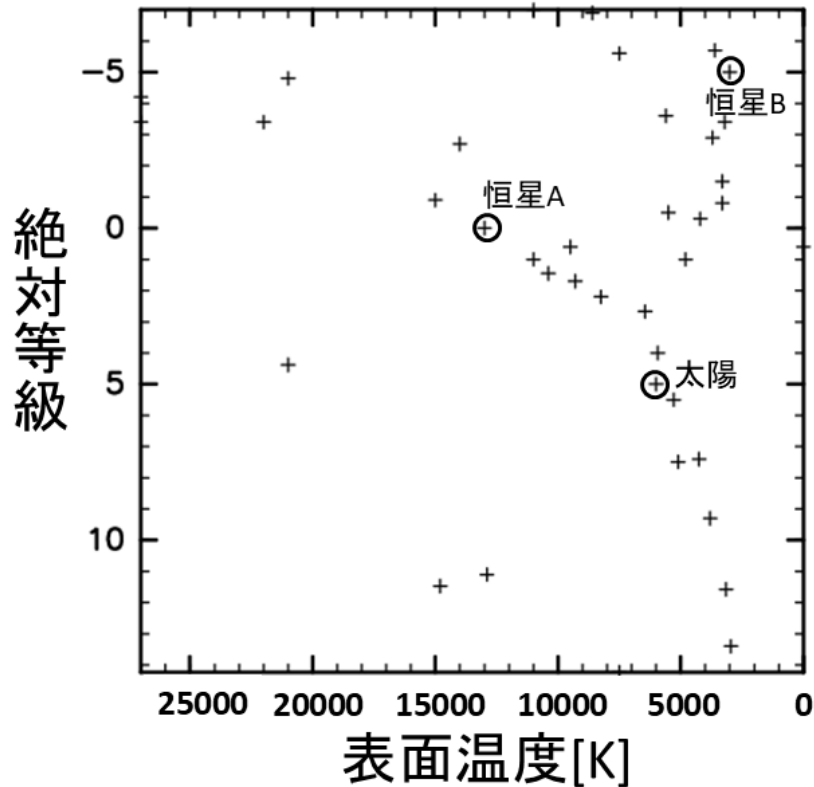


図 4: HR 図の 1 例。○印をつけた恒星は問題で使用するものである。

- (a) 図 4 の横軸は恒星の表面温度, 縦軸は絶対等級 (恒星を 10 パーセクの距離に置いた場合の星の明るさ) である。恒星の表面温度を求める方法, 及び恒星の絶対光度を求める方法それぞれの原理を説明せよ。
- (b) 太陽は主系列星の 1 つである。主系列星は核融合反応で生成されたエネルギーにより光を放っている。主系列星における核融合反応とはどのような反応かを説明せよ。また, 核融合反応は主系列星内部のどの部分で起こるか?, 理由とともに答えよ。
- (c) 恒星の寿命は恒星質量によって大きく変わる。これについて, 質量光度関係

$$L \sim M^{\alpha} \quad (2)$$

を用いて考察しよう。ここで, 光度 L は恒星全体で 1 秒間に放出される光のエネルギーの総量 [J sec^{-1}], M は恒星質量 [kg], α は正の定数である。(2) を用いて, 恒星の寿命 (恒星内部で核融合反応が起こる時間) は $L^{-\alpha-1}$ に比例することを示せ。

- (d) 前問 (c) の結果を使って, 図 4 の恒星 A の寿命は太陽の寿命の何倍かを求めよ. ただし, (2) における指数として $\alpha = 3$ を用いよ. なお, 図 4 の縦軸の絶対等級は光度 L そのものではないことに注意せよ. 絶対等級の値が 5 減少すると L は 100 倍になる. この問題を解くにあたって, 前問 (c) が解答できていなくても構わない.
- (e) 太陽の材料となった物質は, 太陽形成以前に死を迎えた恒星から放出されたものである. 太陽の材料を放出した恒星は, 太陽に比べてかなり質量が大きかったはずである. この理由を, 恒星内部に存在する元素に関連付けて説明せよ.
- (f) 太陽は, 図 4 の恒星 B のような赤色巨星に進化すると考えられている. 恒星 B の半径を推定してみよう. 恒星の光度は

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (3)$$

で決まるものとする. ただし, R は恒星半径, T は恒星の表面温度である. σT^4 は温度 T の物体の表面で 1 m^2 あたりに放出される放射エネルギーとなっている. この式と, 絶対等級が 5 異なると光度 L は 100 倍異なることを用いて, 恒星 B の半径は太陽の半径の何倍になるかを見積もれ.

また, 得られた恒星半径は, 太陽系のどの惑星の軌道半径を越えているかを答えよ. 惑星の軌道半径については表 1 を, 太陽の半径については $6.960 \times 10^5 \text{ km}$ の値を用いよ.

惑星名	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星
軌道長半径 (10^6 km)	57.9	108.2	149.6	227.9	778.3	1429.4	2875.0	4504.4

表 1: 惑星の軌道長半径 (惑星軌道の楕円の長軸の長さ).

- (g) 宇宙が膨張していることの証拠の 1 つは恒星から射出する放射 (光) の観測によって得られた. 恒星に対するどのような観測から宇宙が膨張していることがわかったのか, 原理とともに説明せよ.
- (h) 宇宙において恒星はどのように分布しているか? そのような構造が作られた過程も説明せよ.