

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、消しゴム、書籍 (地球惑星科学入門及び地学図表を含む)、紙束 (ノートやコピーなど)、電卓である。上記以外の物品はすべてカバンの中に入れ、机の上に置いてはならない。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は禁止する。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。
- 数値を扱う場合では正確な数値は求めない。有効数字は 2 桁もあれば十分である。

2023 年 02 月 02 日

問 1 以下のそれぞれは、この授業の内容を正しく理解していない者の発言を想定したものである。これらはいずれも間違いあるいは不正確な内容を含んでいる。発言者の誤解を正すための解説文を作成せよ。

(1-1) 「地球大気のエネルギー源は太陽の光だと言っていた。だから上空に行くほど、太陽に近くなるので気温は上がるはずだ。」

(1-2) 「雲の量が増えると放射の吸収量が増える。このため熱のバランスが崩れて熱平衡状態が得られなくなる。」

(1-3) 「水蒸気の凝結熱は大気循環の熱源だと言っていた。だから水蒸気が無くなってしまえば大気循環も消える。」

(1-4) 「地球の軌道は楕円形であるため 1 年の間に地球と太陽の距離は変化する。だから夏は暑く冬は寒くなる。」

(1-5) 「太陽系の形成に関しては、観測からわかることは何もなくて証拠は 1 つもない。なぜなら、大昔に起きたことだから。」

問2 地球惑星科学分野では様々な場面で対流現象が現れる。対流に関する以下の問を解け。

(2-1) まず、対流を起こす原動力となる浮力に関する理解を確かめよう。考える系の設定を図1に示す。何も加熱が起こっていないときには、底面積 1m^2 、高さ 1m (体積 1m^3) の空気塊において

$$F_p = M_0g \quad (1)$$

という力の釣り合いが成り立つ。 M_0 は加熱が起きていない時の 1m^3 の空気の質量、 g は重力加速度、 F_p は圧力差による力であり 図1に示された2つの圧力 $p_{上}$ 、 $p_{下}$ で決まる。この設定を用いて以下の問に答えよ。

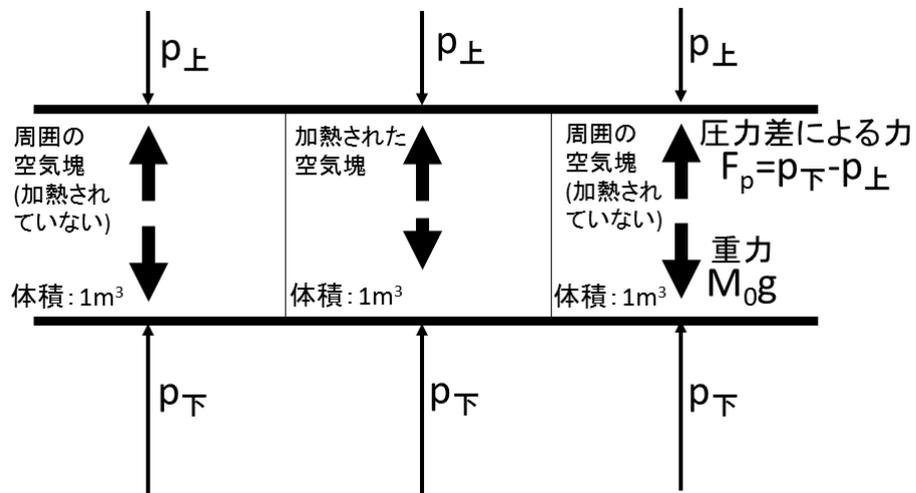


図1: 浮力について考える系。

(2-1-1) ある空気塊だけが局所的に加熱された場合を考える。加熱されると膨張するので 1m^3 あたりの質量は小さくなる。これを M とおく。時間間隔 Δt の間での加熱された空気塊の上昇流速の増加分 Δw は、空気塊に働く力の合計で決定されるので

$$M \frac{\Delta w}{\Delta t} = F_p - Mg \quad (2)$$

が成り立つ。ここで、加熱された空気塊に働く圧力は周囲の空気に働く圧力と同じものであると仮定した。 M_0 、 M 、 g を用いて、 $\frac{\Delta w}{\Delta t}$ を決定する式を導け。求める式の右辺が浮力を表すことになる。

(2-1-2) 加熱されていない周囲の空気の 1m^3 あたりの質量が 1000kg 、加熱され軽くなった空気の 1m^3 あたりの質量が 999kg である場

合に, 1 分間に上昇流はどれだけ加速されるか (上昇流速度の増加量 Δw) を求めよ.

- (2-2) 空気塊が浮力を得ても必ずしも対流が発生するとは限らない. ここでは, 水蒸気を含まない空気において対流が発生する条件について考えよう. 図2に示す直線の温度分布を考える. 下端の温度は 300K で固定されているが上部境界の温度は変化する. 上部境界の温度が変化しても温度分布は直線のままであるとする. この時, 対流が発生するために上部境界の温度が満たすべき条件を求めよ. ただし, 乾燥断熱減率 (水蒸気を含まない空気塊を断熱的に上昇させた場合の温度の減少率) の値を 5.5 K/km とせよ.

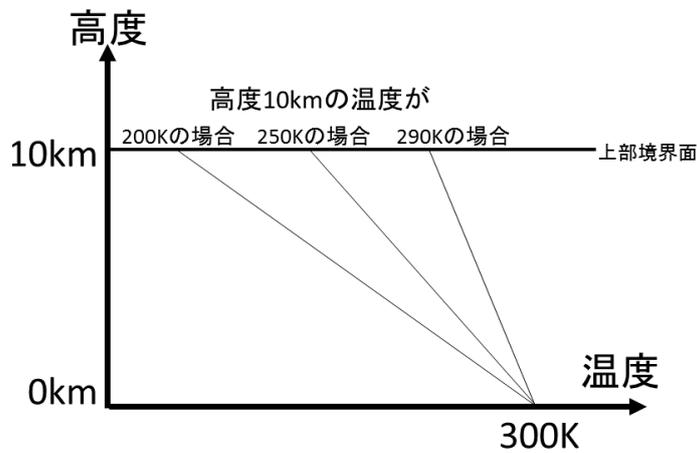


図 2: 温度の鉛直分布.

- (2-3) 地球大気においては, 図3に示す大規模循環をはじめ, 様々なスケールの対流が発生している. 以下の問に答えよ.

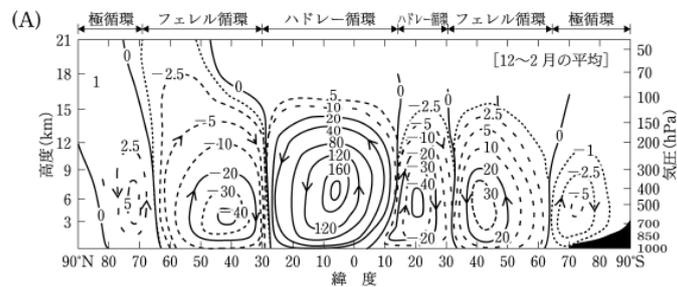


図 3: 地球大気の大規模循環. 原図は地球惑星科学入門第2版 p.232.

- (2-3-1) 地球大気では強い対流が発生すると雲が形成され降水が起こる. 雨が出来る過程を説明せよ.

(2-3-2) ハドレー循環の速度のスケールを求めよ。ハドレー循環では1周するのに30日かかると考えよ。

(2-3-3) 天気の周期(天気が悪くなってまた悪くなるまでの時間)はおおむね4,5日であることは経験的に知っているであろう。低気圧の移動速度がおよそ30km/時であるとした場合に,低気圧と低気圧の間の距離を見積もれ。

(2-4) 地球の海洋の熱塩循環も対流の1種である。海洋表面の密度分布が熱塩循環の成因を考える上で重要である。海洋表面の温度,塩分,密度の図及び海水の密度の値(図4)をもとに以下の間に答えよ。

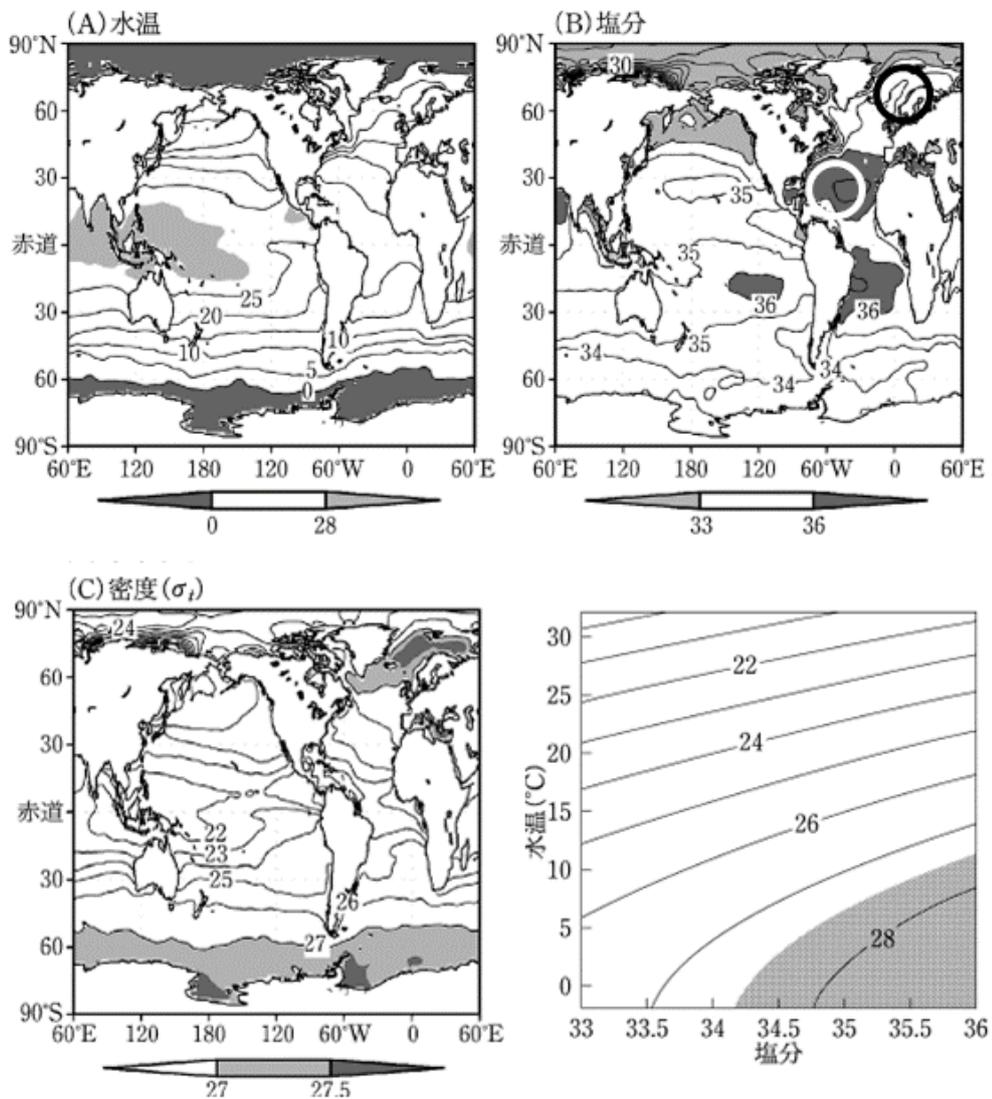


図 4: 海洋表面温度, 塩分, 密度. 海水の密度. 原図は地球惑星科学入門 p.276, p.279

- (2-4-1) 表面塩分は、大雑把には高緯度で低く低緯度で高くなっている。その理由を説明せよ。
- (2-4-2) 大西洋の中央部 (図4右上図の白丸領域) とグリーンランド沖 (図4右上図の黒丸領域) を比べると大西洋中央部の方が塩分が高い。しかし、密度はグリーンランド沖の方が高くなる。この理由を水温分布、塩分分布、海水密度の図を用いて説明せよ。図が見にくいので適宜地学図表の図を参照しても良い。
- (2-5) 太陽表面には粒状斑 (図5中の白い「つぶつぶ」) と呼ばれる対流現象が起こっている。図5は太陽表面の画像に北アメリカ大陸を重ねたものである。この図を用いて粒状斑の流れが1周する時間スケールを見積もれ。ただし、粒状斑の深さ方向の長さスケールは水平方向の長さスケールと同じと仮定し、流れの平均速度を 2.0 km/s とせよ。

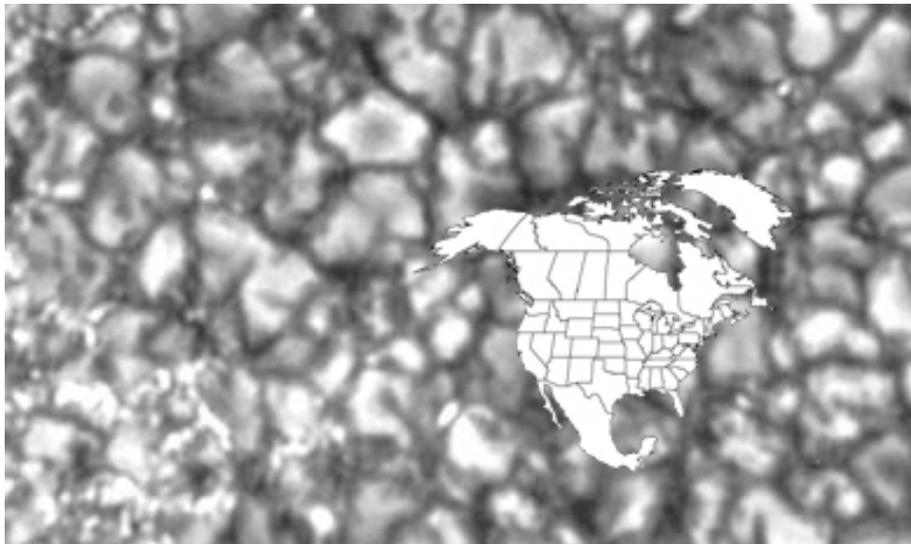


図 5: 粒状斑と北アメリカ大陸. 原図は <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4b/Granules2.jpg>

問 3 宇宙・地球の進化に関する以下の問題を解け.

(3-1) 図6は宇宙の進化を考える上で重要なハッブルの法則が成り立つことを示す図である. 以下の問に答えよ.

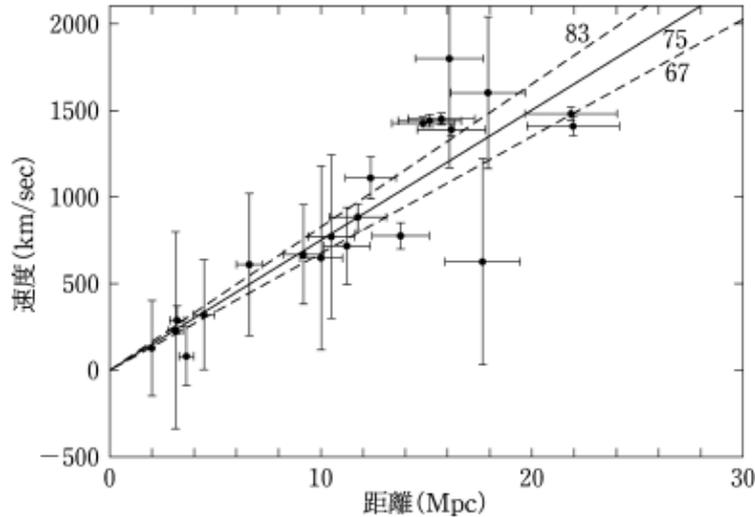


図 6: 近傍銀河の距離と後退速度の関係. 横軸の Mpc は 10^6 パーセクを表し, $1 \text{ Mpc} = 3.1 \times 10^{22} \text{ m}$ である. 原図は地球惑星科学入門 353 ページ.

(3-1-1) 図6を作成するためには各銀河までの距離を測定する必要がある. 銀河までの距離を測定する方法を1つ挙げ, その原理について説明せよ.

(3-1-2) ハッブルの法則から, 過去において宇宙は1点に集中していたと推論される. 銀河の後退速度を一定だと仮定した場合, 全ての銀河は何年前に1点に集中していたことになるか, 大雑把に計算せよ. ただし, 図6のグラフの傾きを表す比例係数の値として $H = 75 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ を用いよ.

(3-2) 宇宙が誕生してしばらくたつと恒星が生まれる. 恒星の1つである太陽に関する以下の問に答えよ.

(3-2-1) 太陽は宇宙で最初にできた恒星ではない. その根拠となるものを答えよ.

(3-2-2) 太陽の進化について, 誕生から終末に至る過程を説明せよ.

(3-3) 宇宙の大規模構造の特徴となっているグレートウォールは初期の密度の僅かなゆらぎが拡大したものであると考えられる. ここでは, 初期の僅かな質量差は時間の経過とともに増大することを考察する. 重力が強いほど周囲の物質を引きつけ質量の増加率が大きくなることを非常に簡単にモデル化し, 物質の質量変化は以下の式で決まると考えることに

する.

$$\frac{dM}{dt} = aM \quad (3)$$

この式を差分化すると

$$M^{n+1} = M^n + aM^n \Delta t \quad (4)$$

となる. ここで, M^n は n ステップ目における質量の値, Δt はステップ間の時間間隔である. 初期質量として $M_0 = m_0$ と $M_0 = 1.1m_0$ を持つ 2 つの物質を考える. Δt 後には 2 つの物質の質量差は初期の質量差 $0.1 m_0$ よりも大きくなることを示せ.

3-4 惑星の形成に関する以下の問に答えよ.

(3-4-1) 地球を作るのに微惑星がおおよそ何個必要となるかを見積もれ. ただし, 微惑星の直径を 10km とせよ.

(3-4-2) 木星はどのように形成されたと考えられているか, 説明せよ.

(3-4-3) Hot Jupiter と呼ばれる系外惑星は, 木星と同様に巨大ガス惑星だと考えられている. Hot Jupiter はどのように形成されたと考えられているか, 説明せよ.

3-5 地球の大気海洋システムは地球の誕生以来, 大きく変化してきた. 大気・海洋の長期進化に関する以下の問を解け.

(3-5-1) 地球の大気と海洋はどのように形成されたかを説明せよ.

(3-5-2) 太陽の光度は時間とともに増加してきた. 地球では炭素循環 (図 7) が起きているため, 太陽光度の増加に対して気候の変化は緩やかなものであったと考えられている. この安定化プロセスについて考えるため, 放射の釣り合いの式

$$(1 - A)S = \varepsilon\sigma T^4 \quad (5)$$

を用いる. ここで, S は太陽定数, T は地球の表面温度, A はアルベド (反射率) である. ε は射出率と呼ばれ, 温室効果の強さを表現するものである. 温室効果が強くなると ε は減少する. 太陽定数が少し増加した状況を考えて, 炭素循環がない場合に比べて炭素循環が存在する場合の温度の上昇量は小さいものになることを式 (5) を用いて説明せよ. アルベド A は定数として扱って良い.

(3-5-3) 7 億年前には地球表面全体が凍結した可能性がある (雪玉地球仮説). 炭素循環においてどのような変化があると全球凍結状態が発生すると想像されるか?

(3-5-4) 地球表面全体が凍結したとはいえ、海洋の深層まで凍結したわけではないと考えられる。海洋全体が凍結してしまうと融解させるのに莫大なエネルギーが必要となってしまう。このエネルギー量について考えるために、海洋全体 (質量: 10^{21} Kg) が凍っており、その温度が摂氏 0 度になっている状況を考えよう。海洋全てを融かすのに入射太陽エネルギー (1.8×10^{17} J/sec: 1 秒あたりに 1.8×10^{17} J の熱量が入射する) をまるまる使ったとして何年かかるかを大雑把に見積もれ。ただし、氷の融解熱は約 3.3×10^5 J/Kg (1 Kg の氷を融かすのに 3.3×10^5 J の熱量が必要となる) である。

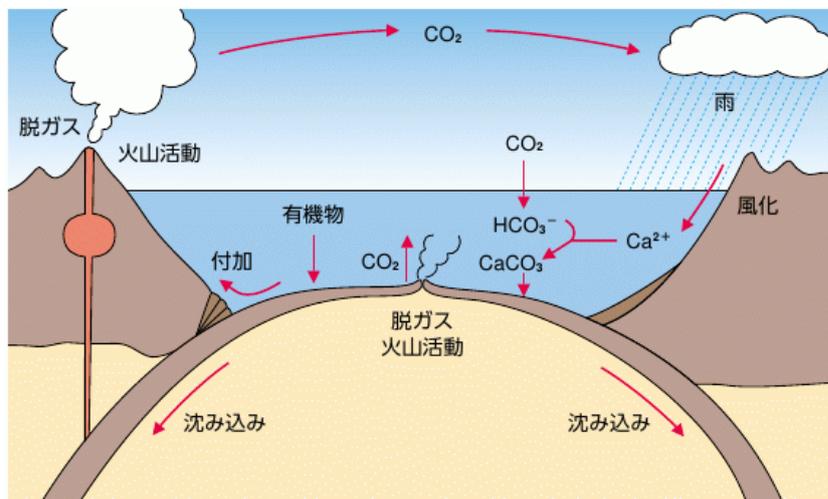


図 7: 炭素の循環. 原図は地学図表 p.205.