

# 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。
- 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 2020 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。

2024 年 02 月 01 日

問1 以下の (a) ~ (f) は学生が書いたレポートの一部であり、いずれも誤りを含んだものである。あなたはこれらのレポートに対してコメントを付ける立場にあるとする。各レポートのどこが間違っているか、正しい知識はどのようなものかを学生に正確に伝えるコメントの文章を作成せよ。

- (a) 天気予報で「大気が不安定」と言われた日は傘を持っていった方が良い。「大気が不安定」とは晴れたり雨が降ったりを繰り返さず天気になることを意味しているからである。
- (b) 地球の気候にとってのエネルギー源は太陽の光である。よって、エネルギー源である太陽に近い上空ほど気温が高くなる。
- (c) 冬が寒く夏が暑いのは、地球と太陽の距離が変わるためである。冬には地球・太陽間の距離が長くなっており、夏には短くなっている。
- (d) 地球の自転が無くなったとすると、コリオリ力が無くなってしまう。その場合、大気の運動を駆動する力が無くなるので大気の運動は止まると予想される。
- (e) 太陽系内の惑星も星の一種なので内部で核融合を起こしているものもある。
- (f) 太陽系内の木星は大きな質量を持つ。この理由は、木星が太陽から離れた領域で形成されたため公転周期が長くなり、長時間かけて周囲の微惑星・ペブルをかき集めることができたからである。

問2 図1は宇宙の始まりから現在に至るまでいくつかの現象を時系列的に並べたものである。以下の問題 (a) ~ (e) に答えよ。

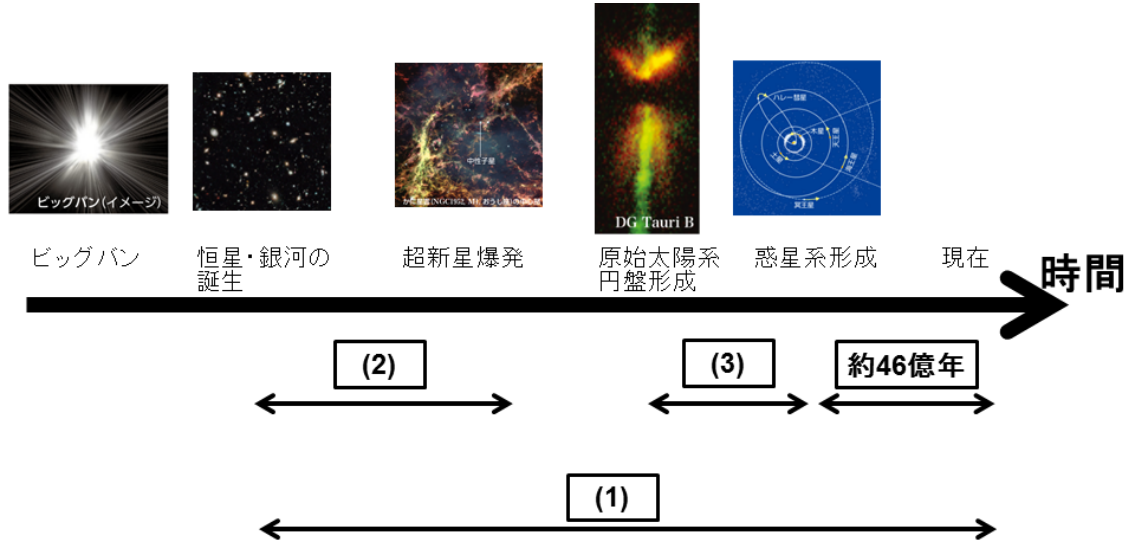


図1: 宇宙の歴史. 時間軸の下に書かれた長方形の箱には時間が入る. 図中の写真が掲載されている地学図表のページ数は以下の通り. ビッグバン: p.8, 恒星・銀河の誕生: p.11, 超新星爆発: p.43, 原始太陽系円盤形成: p.42, 惑星系形成: p.16.

- (a) 宇宙の年齢 (図1中の (1)) を大雑把に見積もることを考える. ハッブルの法則 (図2) から, 過去において宇宙は1点に集中していたことになる. 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. これが宇宙の年齢の大雑把な目安となる.
- (b) 宇宙の中で恒星の誕生・死は繰り返りかえし起こっている. 大質量星は死を迎える際に超新星爆発を起こす. 我々の太陽系は超新星爆発 (他の星の死) をきっかけに生まれたと考えられている. ここでは, 太陽系が生まれる直前に超新星爆発を起こした恒星 (これを恒星 X と名づけよう) の寿命 (図1中の (2)) を大雑把に見積もることを考えよう. 恒星の寿命は, もともと恒星が持っている気体量に比例し (燃料の量が倍になれば寿命も倍になる), 恒星の明るさに反比例する (明るさが倍になれば燃料を使う早さも倍になる) と考えられる. 恒星 X の質量を太陽の10倍であるとして, 大雑把に恒星 X の寿命を見積もれ. 図3の質量と光度の関係, および太陽の寿命は100億年であることを用いよ. ここで得られる寿命は, 図1中の (1) に比べると十分短いものになっている.

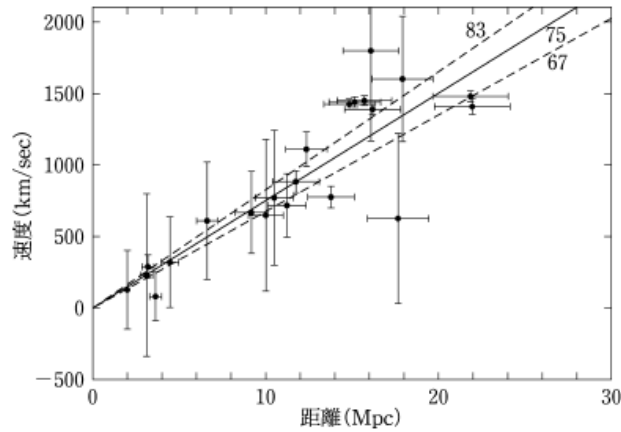


図 2: 近傍銀河の距離と後退速度の関係. 横軸の Mpc は  $10^6$  パーセクを表し,  $1 \text{ Mpc} = 3.1 \times 10^{22} \text{ m}$  である. 原図は地球惑星科学入門 355 ページ.

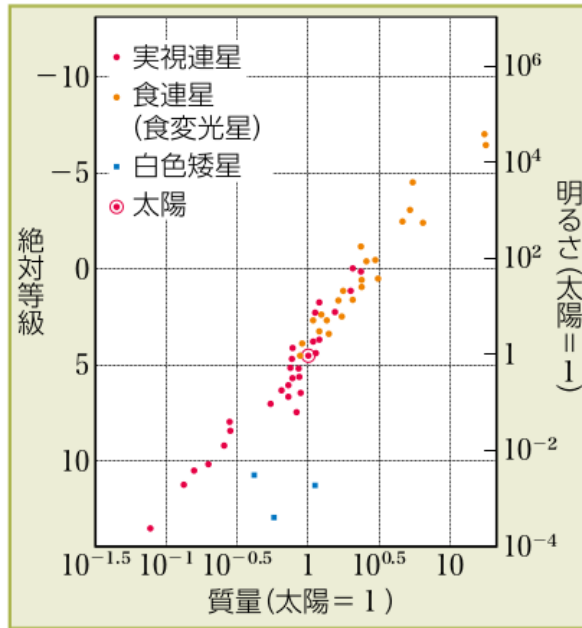


図 3: 恒星の質量と光度の関係. 原図は地学図表 44 ページ.

- (c) 原始太陽系円盤の寿命 (図 1 中の (3)) を大雑把に見積もることを考える. 中心に原始恒星が形成された後には, 原始太陽系円盤には質量にして太陽のおよそ 1% 分の気体が残ると考えられる. 原始太陽系円盤では図に示す双極分子流 (bipolar jet) が存在する. これは, 円盤と垂直方向に高速で気体が噴出される現象である. 双極分子流 (bipolar jet) によって 1 年でおおよそ  $2 \times 10^{22} \text{ kg}$  の気体が消失したとすると, およそ何年で原始太陽系円盤の気体が無くなるか, 大雑把に見積もれ. 太陽の質量と

して  $1.9884 \times 10^{30}$  kg を用いよ. この時間の長さが原始太陽系円盤の寿命の目安となり, したがって惑星形成が起こる時間の目安となる. 恒星の進化の時間スケールに比べると, 惑星は瞬時のうちに形成される, と言えるだろう.

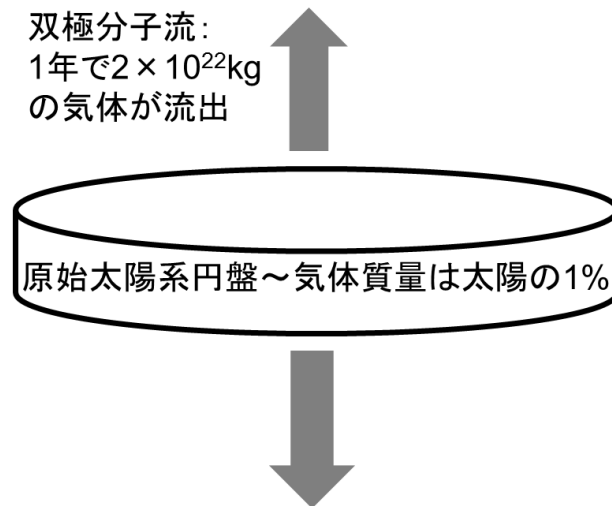


図 4: 双極分子流 (bipolar jet) の模式図. 図中央の薄い円筒が原始太陽系円盤を表す. 上下に出ている灰色矢印は上下に噴き出す双極分子流 (bipolar jet) を表す.

- (d) 表1は人体に多く含まれる元素を示したものである。対内に多く含まれる酸素と炭素がどこでどのように合成されたか, 合成されたそれらの元素がどのように集積しあなたの体を作るに至ったのかを説明せよ。

構成元素	存在量 (kg)
酸素	45.50
炭素	12.60
水素	7.00
窒素	2.10
カルシウム	1.05
リン	0.70

表 1: 人体 70kg に含まれる各元素の対内存在量

- (e) 地球が形成されてから現在までにおよそ 46 億年の時間が経過したと考えられている。この期間に起こった出来事のうち地球の歴史にとって一番重要だとあなたが考えるものを 1 つ選び, その出来事はどのようなものか, どのような重要性を持つのかを説明せよ。

問 3 全球平均した温度に関するモデル

$$(1 - A)S = 4.0\sigma T^4 \quad (1)$$

を考える. この式は, 惑星に入射する太陽放射エネルギーと惑星が射出する赤外線エネルギーのつりあいを表したものである (下の 図 5 参照). ここで,  $A$  はアルベド (入射する太陽放射が散乱・反射される割合, 次元は無し),  $S$  は太陽定数 (太陽放射に垂直な面が  $1 \text{ m}^2$  あたり,  $1$  秒あたりにうけとる太陽エネルギー量, 次元は  $[\text{W}/\text{m}^2]$ ),  $T$  は温室効果を考えない場合の全球平均温度 (次元は  $[\text{K}]$ ),  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}]$  はステファン・ボルツマン定数である. この式を用いて, 太陽から様々な距離にある惑星の気候について考える. 以下の問題 (a) ~ (f) に答えよ.

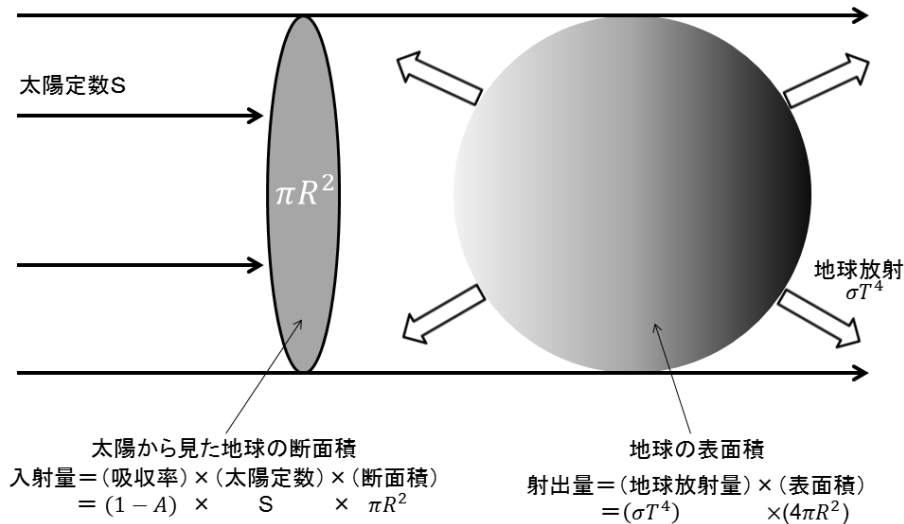


図 5: 全球平均温度  $T$  を使った気候モデル. この図は地球惑星科学入門 p.227 「太陽放射の入射の様子」の図と基本的に同じ状況を示すものである.

- (a) 惑星の軌道の半径が変わった場合に, 太陽定数はどのように変化するか説明せよ.

- (b) 式 (1) で計算される温度  $T$  が 200K になる位置, 及び 400 K になる位置 (図 6 の  $??\text{AU}$  で示された 2 カ所の位置) の太陽からの距離をごく大雑把に求めて, 天文単位 (AU: 地球と太陽の間の距離) で答えよ. ただし, アルベド  $A$  の値として 0.3 を用いよ. 1AU における太陽定数の値は  $1370 \text{ W/m}^2$  であるとせよ.

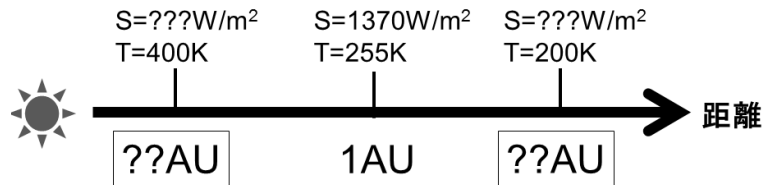


図 6: 太陽からの距離に応じた全球平均温度の変化.

- (c) 大気が存在する場合, 温室効果のために, 式 (1) で決まる温度よりも表面温度は 20K から 30K 高いものになる. 温室効果とはどのようなものか説明せよ. 放射の吸収の観点から説明せよ.
- (d) 前問 (a) から (c) までの結果から推測されるように, 惑星表面に液体の水が存在できる領域 (惑星の表面温度が  $0\text{C}$  以上で  $100\text{C}$  以下となる領域) は太陽の周囲の特定の領域のみとなる. 太陽の明るさの時間変化を考えた場合, 惑星表面に液体の水が存在できる領域の概形を解答用紙の図に書き入れよ. この結果は, 地球の温暖な気候の存在が永遠に保証されているわけではないということを示すものである.
- (e) ここまで, アルベド  $A$  は一定であると考えてきた.  $A$  が一定の場合,  $S$  が 10% 増加すると温度  $T$  は  $(1.1)^{1/4} \sim 1.02$  倍になる. しかし, 実際の気候はもっと複雑な振舞いを示す.  $T$  に応じて雲量や氷床の量が変化しこれによりアルベド  $A$  の値が変化しうる. 一般にアルベド  $A$  は温度  $T$  の関数となっているのである. では, アルベド  $A$  は温度  $T$  に対する増加関数となっているだろうか, それとも減少関数となっているだろうか? あなたの推測を書け. そのように考える理由も論理的に説明せよ. また, アルベド  $A$  が一定値だとした場合に比べて,  $S$  の変化に対する温度  $T$  の変化量は大きくなるか小さくなるかどちらか? 理由とともに答えよ.
- (f) 式 (1) は全球平均状態に関する式になっているが, 実際には入射する太陽放射量は緯度分布を持つ. これにより生じる大気中及び海洋中の大規模循環に関する説明を行え.