

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.
- 地球惑星科学入門・地学図表・自筆ノート・筆記具のみ持ちこみ可.
電子機器 (電卓など) は一切持ち込み不可.
- 携帯電話やアラーム付きの時計の電源を切り, 鞆にしまうこと.
- 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. 不正行為を行った場合には 0 点とする.
- 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.
- 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.
以下の例のように四捨五入をして計算せよ.

3.14 ~ 3

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. 三角関数の値を求める場合は三角関数表 (地学図表 p.193 またはこの問題冊子 p.7) を用いよ.

2016 年 01 月 28 日

問 1 以下の問にそれぞれ 100 字程度 (3 行程度) で答えよ.

- (a) 温室効果とは何かを説明せよ. 太陽放射と地球放射の両方に言及すること.
- (b) 天気予報で「大気が不安定です」と言っているのはどのようなことを意味しているかを説明せよ.
- (c) 気候変動の例を 1 つ挙げ, その特徴 (どのような現象か, 時間スケールはどの程度か等)・原因として考えられているもの・重要性について説明せよ.
- (d) 水素 (原子量は 1)・酸素 (原子量は 8, 鉄より軽い)・臭素 (原子量は 35, 鉄より重い) の各元素はいつどのような過程で作られたのかを説明せよ.
- (e) 宇宙が膨張していることはどのような物理量を観測しどのような原理を用いてわかったのかを説明せよ.

問2 地球の大気と海洋で生じている大規模な循環に関して、以下の問 (a) ~ (e) に答えよ。

- (a) 大気の大規模な循環を作りだしているのは入射する太陽放射エネルギー量の南北差である。図1のように、春分の状況(赤道の正午に太陽が真上にある状況)を考える。北緯45度における単位面積あたりの入射太陽放射エネルギー量は赤道における入射太陽放射エネルギー量のおよそ何倍になっているか求めよ。

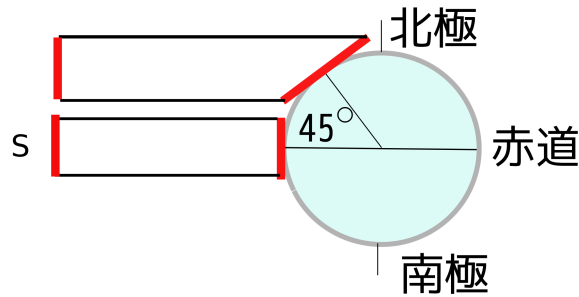


図1: 入射太陽放射エネルギー量の緯度による違い。春分の場合。図中の S は太陽定数を表す。太陽定数とは、大気の上端において太陽光線に垂直な面が単位面積あたり単位時間あたりに受け取る太陽放射エネルギー量である。

- (b) 大気の循環によって図2に示される雲分布も作られる。雲の量の緯度方向の変化のおおまかな特徴を説明し、そのような変化が生じる理由を大規模な大気循環と関連づけて説明せよ。

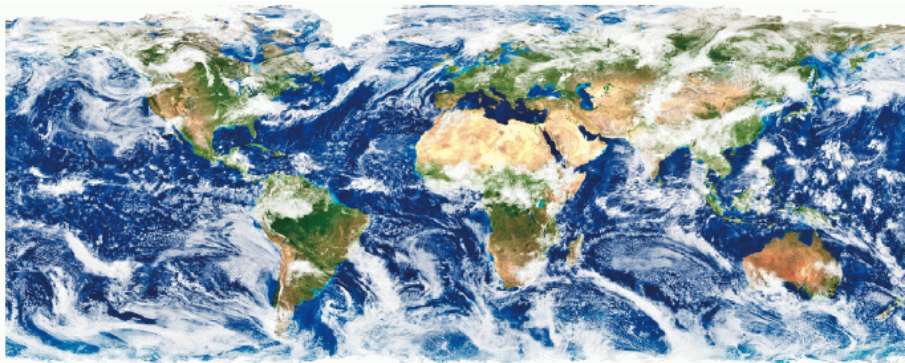


図2: 雲の分布。原図は地学図表 163 ページ。

- (c) 海洋中にも大規模な循環が生じている。その特徴と成因を説明せよ。
(d) 大気の循環は季節変化する。これは、地球の自転軸が23度傾いており入射太陽放射エネルギー量が季節によって変わるためである。次の2つの時期について考える。(1) 北半球の夏至(北緯23度では正午に太陽が真上に来る)、(2) 北半球の冬至(南緯23度では正午に太陽が真上に来る)。北緯45度の正午となる地点における単位面積あたりの入射太陽

放射エネルギー量は (2) の場合に対して (1) の場合ではおよそ何倍になっているかを求めよ。

- (e) 入射太陽放射エネルギー量の変化に対して、自転軸の傾きの効果 (前問 (d) の結果) に比べて、地球の公転軌道が楕円であることによって生じる地球-太陽間の距離が変化する効果は小さい。このことを、図 3 に基づいて考える。図中の点 A では、地球が太陽に一番近づき、太陽地球間の距離は $a(1 - e)$ となる。点 B では、地球が太陽から一番遠ざかり、太陽地球間の距離は $a(1 + e)$ となる。ここで、 a は楕円の長半径、 e は離心率 (楕円が真円からどれだけずれているかを表す指標) である。点 A と点 B で地球に入射する太陽エネルギー量が何パーセント違うのかを求めよ。離心率の値として $e = 0.017$ を用いよ。なお、計算においては、 e^2 は微小な量であり 1 と e に比べて無視できること、および近似式 $\frac{1}{1 - 2e} \sim 1 + 2e$ を用いよ。

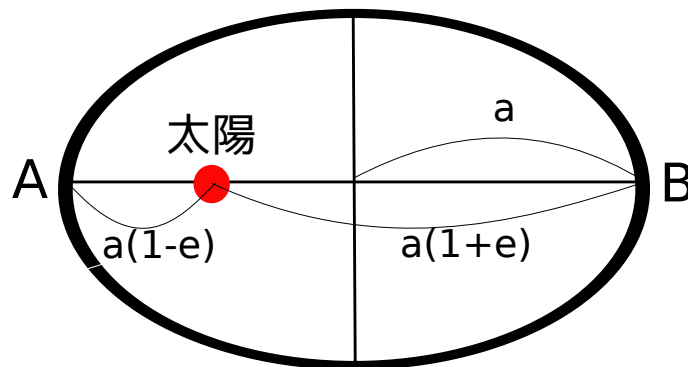


図 3: 地球の公転軌道. 太実線の楕円は地球の公転軌道. 実際の地球の公転軌道はもっと真円に近いが, 考えやすくするため離心率が大きな図にしている. a は軌道長半径, e は離心率. 地球の場合 $e = 0.017$. 点 A は地球が太陽に一番近づく点, 点 B は地球が太陽から一番遠ざかる点である.

問3 銀河系(図4)にはおよそ2000億個の恒星が存在すると推定されている。この中で通信可能な地球外文明の数は次のドレイク方程式によって見積もられる。

$$N = R \times f_p \times n_e \times f_L \times f_i \times f_c \times L$$

ただし

R 銀河系内で毎年誕生する恒星の数

f_p 誕生した恒星が惑星系をもつ割合

n_e 各惑星系における生命の存在に適した惑星の数

f_L 生命の存在に適した惑星上で生命が誕生する割合

f_i 誕生した生命が知的生命体まで進化する割合

f_c 進化した知的生命体が通信可能な段階まで文明を発展させる割合

L 通信を行う文明が維持される時間(年)

以下の問(a)~(e)に従い地球外文明と交信できる可能性について考察せよ。

(a) 本問と次問(b)で R の大きさを見積もる。まず恒星の平均寿命(主系列星にある期間の長さ)について考える。太陽の寿命はおよそ100億年であるが、質量が変われば恒星の寿命は変わる。例として、図5中のベガについて考える。恒星における核融合の燃料となる水素量は恒星の質量に比例し、恒星が単位時間あたりに放出するエネルギー量は恒星の明るさに比例すると仮定して、ベガのおおよその寿命を見積もれ。その際、絶対等級で1等違うと明るさはおよそ2.5倍違うことを使うと良い。更に、恒星の平均寿命は質量によって変化することを考慮の上、恒星の平均寿命をごく大雑把に決めてみよう。そのように決めた理由も示せ。

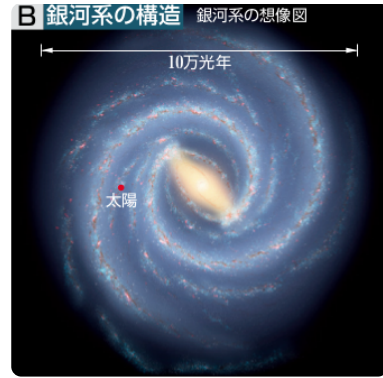


図4: 銀河系の想像図。原図は地学図表 p.14.

星名		赤経	赤緯	スペクトル型	見かけの等級	絶対等級	有効温度 (K)	質量 (太陽=1)	半径 (太陽=1)	平均密度 (g/cm³)	年周視差	距離 (光年)
	太陽	—	—	G2V	-26.75	4.82	5777	1	1	1.41	—	—
主系列星	カシオペア座 ηA	ηCas	00 49 +57 49	G0V	3.44	4.6	5940	0.87	1.03	1.14	0.168	19.4
	カシオペア座 ηB	ηCas	00 49 +57 49	M0V	7.22	8.3	3800	0.54	0.81	1.41	0.168	19.4
	ほうおう座 ζA	ζPhe	01 08 -55 15	B6V	3.9	-0.9	15000	6.1	3.4	0.22	0.011	299
	ほうおう座 ζB	ζPhe	01 08 -55 15	A0V	5.8	1.0	11000	3.0	2.0	0.53	0.011	299
	アケルナル	αEri	01 38 -57 14	B3Vpe	0.5	-2.7	—	—	—	—	0.023	140
	シリウスA	αCMa	06 45 -16 43	A1V	-1.44	1.45	10400	2.14	1.7	0.55	0.379	8.6
	カストル	αGem	07 35 +31 53	A1V+A2V	1.6d	0.6	—	—	—	—	0.064	51
	プロキオンA	αCMi	07 39 +05 14	F5IV-V	0.40	2.67	6450	1.78	2.1	0.25	0.285	11.5
	レプルス	αLeo	10 08 +11 58	B7V	1.35	-0.6	13000	—	3.7	—	0.041	79
	ケンタウルス座 α	αCen	14 40 -60 50	G2V+K1V	-0.3d	4.1	—	—	—	—	0.755	4.3
	へびつかい座 70A	70Oph	18 05 +02 30	K0V	4.03	5.5	5290	0.89	0.85	2.0	0.197	16.6
	へびつかい座 70B	70Oph	18 05 +02 30	K6V	5.98	7.4	4250	0.66	0.80	1.8	0.197	16.6
	ベガ	αLyr	18 37 +38 47	A0Va	0.03	0.6	9500	3.0	2.6	0.16	0.130	25
	アルタイル	αAql	19 51 +08 52	A7V	0.77	2.2	8250	1.7	1.9	0.8	0.195	17
	はくちょう座 61A	61Cyg	21 07 +38 44	K5Ve	5.20	7.49	5100	0.9	1.0	1	0.287	11.4
	クリューガー 60A		22 28 +57 42	M2V	9.59	11.58	3150	0.26	0.32	11	0.250	13.0
	クリューガー 60B		22 28 +57 42	M5Ve	11.41	13.40	2950	0.16	0.25	14	0.250	13.0
	フォーマルハウト	αPsA	22 58 -29 37	A3V	1.16	1.7	9300	—	1.8	—	0.130	25

図5: 主系列星の緒量。原表は地学図表 p.39.

(b) 銀河系中の恒星数は時間とともに一定だと仮定すれば, 毎年死んでいく恒星数と誕生する恒星数は等しくなる. 恒星の平均寿命がわかれば, 1年の間で1つの星が死を迎える確率が計算できる. これと前問 (a) の結果をもとに R を見積もってみよ.

(c) n_e としてハビタブルゾーンの中に入る惑星の数をとることにし, 惑星間の間隔を大雑把に見積もることを考える. 惑星は微惑星の集積によって形成されると言われている. これから, 地球は図6のドーナツ型の網掛け領域(その幅は r) から微惑星をかき集めて形成されたと考えてみる. 原始太陽系円盤内で太陽から1AU (AU は天文単位) の距離にある領域では, 単位面積あたりに存在する微惑星質量はおよそ 10 g cm^{-2} であったと見積もられている. これから地球を作るた

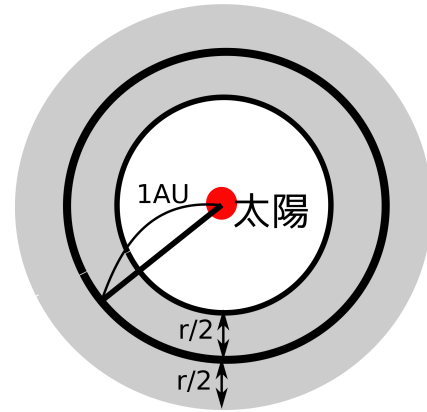


図6: 地球を作るために微惑星を集めてくる領域(網掛け部分). 太実線は地球の公転軌道. AU は天文単位であり, およそ $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$.

めに必要な微惑星を集める領域の幅(図6中の r) を求めよ. その際, 地球の質量は $6 \times 10^{24} \text{ kg}$ であるとし, 原始太陽系円盤は十分薄いと仮定せよ. 更に, この幅 r と現在の太陽におけるハビタブルゾーンの幅 ($0.7 \text{ AU} \sim 1.1 \text{ AU}$) と比較して, ハビタブルゾーン中に形成される惑星の数 n_e を予想せよ. 予想の根拠も記述せよ.

(d) 地学図表では f_L の値として1が用いられている. 授業で学習した内容に基づき, この数値が妥当であるか妥当でないかを議論せよ. それをもとに, 自分で妥当だと思う数値を示せ.

(e) ここまでで自分で求めた R , n_e , f_L の値と地学図表に与えられている数値 ($f_p = 1$, $f_i = 0.01$, $f_c = 0.01$, $L = 10000$) を用いて N を計算せよ. 更に, 求めた N を用いてもっとも近隣の地球外文明までの距離を推定せよ. その際, 銀河系は厚さの無視できる薄い円形の円盤と見なせること, 地球外文明は銀河系内で均等に存在することを仮定せよ. 最後に, 上の結果に基づき人類が地球外文明と交信することの可能性について議論せよ.

5 三角関数表

角	sin	cos	tan	cot	
0°	0.0000	1.0000	0.0000	∞	90°
1	0.0175	0.9998	0.0175	57.2900	89
2	0.0349	0.9994	0.0349	28.6363	88
3	0.0523	0.9986	0.0524	19.0811	87
4	0.0698	0.9976	0.0699	14.3007	86
5	0.0872	0.9962	0.0875	11.4301	85
6	0.1045	0.9945	0.1051	9.5144	84
7	0.1219	0.9925	0.1228	8.1443	83
8	0.1392	0.9903	0.1405	7.1154	82
9	0.1564	0.9877	0.1584	6.3138	81
10	0.1736	0.9848	0.1763	5.6713	80
11	0.1908	0.9816	0.1944	5.1446	79
12	0.2079	0.9781	0.2126	4.7046	78
13	0.2250	0.9744	0.2309	4.3315	77
14	0.2419	0.9703	0.2493	4.0108	76
15	0.2588	0.9659	0.2679	3.7321	75
16	0.2756	0.9613	0.2867	3.4874	74
17	0.2924	0.9563	0.3057	3.2709	73
18	0.3090	0.9511	0.3249	3.0777	72
19	0.3256	0.9455	0.3443	2.9042	71
20	0.3420	0.9397	0.3640	2.7475	70
21	0.3584	0.9336	0.3839	2.6051	69
22	0.3746	0.9272	0.4040	2.4751	68
23	0.3907	0.9205	0.4245	2.3559	67
24	0.4067	0.9135	0.4452	2.2460	66
25	0.4226	0.9063	0.4663	2.1445	65
26	0.4384	0.8988	0.4877	2.0503	64
27	0.4540	0.8910	0.5095	1.9626	63
28	0.4695	0.8829	0.5317	1.8807	62
29	0.4848	0.8746	0.5543	1.8040	61
30	0.5000	0.8660	0.5774	1.7321	60
31	0.5150	0.8572	0.6009	1.6643	59
32	0.5299	0.8480	0.6249	1.6003	58
33	0.5446	0.8387	0.6494	1.5399	57
34	0.5592	0.8290	0.6745	1.4826	56
35	0.5736	0.8192	0.7002	1.4281	55
36	0.5878	0.8090	0.7265	1.3764	54
37	0.6018	0.7986	0.7536	1.3270	53
38	0.6157	0.7880	0.7813	1.2799	52
39	0.6293	0.7771	0.8098	1.2349	51
40	0.6428	0.7660	0.8391	1.1918	50
41	0.6561	0.7547	0.8693	1.1504	49
42	0.6691	0.7431	0.9004	1.1106	48
43	0.6820	0.7314	0.9325	1.0724	47
44	0.6947	0.7193	0.9657	1.0355	46
45	0.7071	0.7071	1.0000	1.0000	45
	cos	sin	cot	tan	角

図 7: 三角関数表. 原表は地学図表 193 ページ. 角度 0° から 45° までは sin の値は一番左の列に, 角度 45° から 90° までは sin の値は左から 2 番目の列に示されている.