

第 2 章

地球の基礎データ

2.1 大きさ, 重力, 自転, 公転

図 2.1 参照

ほぼ回転楕円体であり、その大きさは

- 赤道半径：6378（又は 6377） km
- 極半径：6356km
- 扁平率：1/（297～298）
- 子午線象限：10000～10002km（約 1 万 km）

赤道の重力加速度 = 9.78 m/s^2

自転角速度 = $7.292 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ （約 10^{-4} rad/s ）

1 恒星日 = 23h56m04s

ちなみに 1 日は約 $24 \times 60 \times 60 = 86,400$ 秒 $\sim 10^5$ 秒

1 太陽年 = 365.2422 日（1 恒星年 = 365.2564 日）

公転軌道長半径 = $1.496 \times 10^{11} \text{ m}$ ($1.5 \times 10^8 \text{ km}$, 1.5 億 km)

平均太陽輻射量は約 1370 W/m^2

◎赤道傾斜角が 23.4 度。夏半球と冬半球がある。

◎地球が球面であることと赤道傾斜角がゼロでないことから、大気上端で受ける 1 日平均太陽輻射量は季節・緯度で変化する

◎このように、極では 1 日中太陽が出ているため、1 日平均でみた太陽輻射量は夏極が大きくなる。

◎近日点黄経が約 100 度、つまり春分の約百日前に近日点、つまり、北半球の冬に最も太陽に近づき、夏が最も太陽に遠い。輻射量は距離の自乗に反比例するから、近日点と遠日点で $\pm 3\%$ 程度変化する。

◎ちなみに、金星は自転の向きが逆で、かつ（表にはないが）自転周期は 243 日と非常に長い。木星や土星は 0.4 日（約 10 時間）と自転が大変はやい。このため、コリオリ力の効果がそれぞれ地球と全く違い、独自の大気循環・気候が生まれている。（図 2.4、2.5、2.6）

2.1.1 軌道変化について

近日点と遠日点で太陽輻射が 7% 程度違う。今は北半球の冬が近日点だが、軌道要素の変化により北半球の夏が近日点になったこともある。そのときは北半球の夏は今より 7% 程度太陽放射を多く受けることになり、外的

惑星

水星, 金星, 火星, 木星, 土星は太古より知られており, 天王星は1781年, 海王星は1846年に発見された。つぎの表は惑星の軌道の要素およびこれと関係のある定数を記したものである。元期2011年8月27日0時JD 2455800.5。軌

惑星	軌道半長径 (天文単位)	離心率 e	軌道傾斜角 i		近日点黄経 ϖ	昇交点黄経 Ω	元期平均近点離角 M_0
			黄道	不変面			
水星	0.3871	0.2056	7.004	6.344	77.474	48.316	309.724
金星	0.7233	0.0068	3.395	2.196	131.565	76.648	28.282
地球	1.0000	0.0167	0.002	1.578	102.976	174.845	231.750
火星	1.5237	0.0934	1.849	1.680	336.112	49.524	89.343
木星	5.2026	0.0485	1.303	0.328	14.356	100.487	13.590
土星	9.5549	0.0555	2.489	0.934	93.123	113.635	99.342
天王星	19.2184	0.0463	0.773	1.028	173.015	74.015	190.960
海王星	30.1104	0.0090	1.770	0.725	48.124	131.782	281.679

太陽, 惑星および衛星

天体	太陽より受ける輻射量 (地球=1)	相対質量 (地球=1)	赤道半径 (km)	赤道傾斜角	赤道重力 (地球=1)	体積 (地球=1)	衛星数
太陽	—	15 595.94	696 000	0	28.01	1304000	—
水星	6.67	6.49	2440	0	0.38	0.055	0
金星	1.91	30.16	6 052	0	0.91	0.857	0
地球	1.00	—	6 378	0.0034	1.00	1.000	1 (1)
火星	0.43	8.94	3 396	0.0059	0.38	0.151	2 (2)
木星	0.037	23.46	71 492	0.0649	2.37	1321	50 (63)
土星	0.011	9.71	60 268	0.0280	0.89	764	53 (66)
天王星	0.0027	1.93	25 559	0.0229	0.93	63	27 (27)
海王星	0.0011	1.17	24 764	0.0171	1.11	58	13 (13)
月	1.00	15 22.58	1 738	3軸不等	0.17	0.0203	—

太陽から受ける輻射量は一定の面積の上の太陽の平均輻射量、月の赤道半径は地球より約1.389×10⁸kg、地球の質量は5.974×10²⁴kg、赤道傾斜角とは各天体の赤道面の軌道面に対する角度である。ただし太陽の赤道傾斜角は黄道(地球の軌道面)に対する角度である。天の下の表は、惑星の環の名前とその位置(惑星の赤道半径を単位)を示したものである。IAUの惑星系命名作業委員会(WGPSN)の報告に従っている。衛星数は、軌道が確定し、IAUによって登録番号と名前がつけられた各惑星の衛星数で、2009年7月末までに発見の報告がIAU回報になされた衛星総数をかっこ内に示した。

表

道要素はすべて平均要素であり, 2000年1月1.5日=JD 2451545.0の黄道と平均分点に準拠している。

太陽からの距離10 ⁶ km	作用圏半徑10 ³ km	対恒星平均運動 μ (平均太陽日)	対恒星公転周期 P (太陽年)	軌道平均速度 (km/s)	道場平均速度 (km/s)	会合周期 (太陽日)
0.460	0.579	14732.42	0.24086	47.36	115.9	Mercury
1.075	1.082	5767.67	0.61521	35.02	583.9	Venus
1.471	1.496	3548.19	1.00004	29.78	—	Earth
2.066	2.279	1886.52	1.88089	24.08	779.9	Mars
7.405	7.783	299.13	11.8622	13.06	398.9	Jupiter
13.501	14.294	120.45	29.4578	9.65	378.1	Saturn
27.419	28.750	30.081	84.0223	6.81	369.7	Uranus
44.640	45.044	21.53	164.774	5.44	367.5	Neptune

び月定数表

天体	質量		密度 ρ (g/cm ³)	軌道速度 (km/s)	自転周期 P (日)	赤道傾斜角	反射能 η	最大等級
	(太陽=1)	(地球=1)						
太陽	1.000	333 946	1.41	617.5	25.38	7.25	—	-26.75
水星	1.6601×10 ⁻⁷	0.05527	5.43	4.25	58.65	~0	0.06	-2.4
金星	2.4478×10 ⁻⁶	0.8150	5.24	10.36	243.02	177.4	0.78	-4.7
地球	3.0404×10 ⁻⁶	1.0000	5.52	11.18	0.9973	23.44	0.30	—
火星	3.2272×10 ⁻⁷	0.1074	3.93	5.02	1.0260	25.19	0.16	-3.0
木星	9.6479×10 ⁻⁶	317.83	1.33	59.53	0.414	3.1	0.73	-2.8
土星	2.8589×10 ⁻⁶	95.16	0.69	36.48	0.444	26.7	0.77	-0.5
天王星	4.3653×10 ⁻⁶	14.54	1.27	21.29	0.718	97.9	0.82	+5.3
海王星	5.1514×10 ⁻⁶	17.15	1.64	23.48	0.671	27.8	0.65	+7.8
月	3.6943×10 ⁻⁸	0.012300	3.34	2.38	27.3217	6.67	0.07	-12.6

D) ボンドアルベド (Bond albedo): 惑星について, 入射全エネルギーに対する反射全エネルギーの割合
 太陽の環
 Halo 1.359~1.718
 Main 1.718~1.807
 Cassini 1.807~2.996
 天王星の環
 Galle 1.69
 Levertier 2.15
 Lassell 2.24
 Arago 2.33
 Adams 2.54
 天王星の環
 D 1.112~1.236
 C 1.236~1.526
 B 1.526~1.950
 A 2.025~2.269
 F 2.327
 G 2.78~3.89
 E 3.0~8.0

図 2.1 惑星表 (理科年表 2011 年版より)

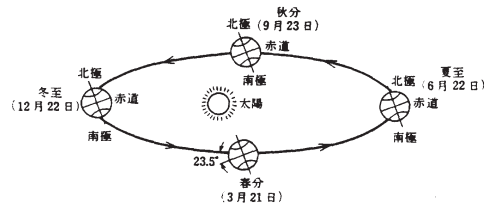


図 1.12 太陽をめぐる地球の公転と季節
赤道面が公転面に対し 23.5° 傾いている点に注意。春分・秋分・夏至・冬至の日射から、昼間の長さを詳しくみると図 1.13 のようになる。

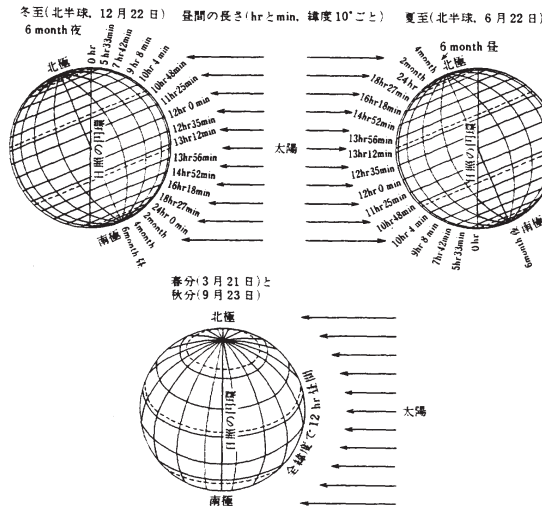


図 1.13 昼間の長さ
春分と秋分のとき、正午の日射は赤道で垂直となり、地球のちょうど半分が日が当たるから、地球上どこでも昼と夜の長さが同じ(12時間)になる。夏至と冬至のとき、正午の日射は極方向の極限(北緯・南緯 23.5°)に達し、赤道を除いて日射量の不均一が最大となり、緯度 0° 以外で昼と夜の差が最大となる。

図 2.2 太陽入射量の変化 1

条件としては暑い夏と寒い冬になる。このような太陽放射の極僅かな変化がフィードバックを通して大きな変化を引き起こすという説がある (ミランコビッチ説)。図 2.7、2.8 参照。

図 2.9 のように日射量と酸素同位体比に共通の周期成分が含まれていることが分かる。2 万年と 4 万年の周期については、日射量に対する線形応答としても大きな間違いはないであろう。しかし、図 2.9(c) のように、日射量では振幅の弱い 10 万年周期の変動が酸素同位体には強く現れている。

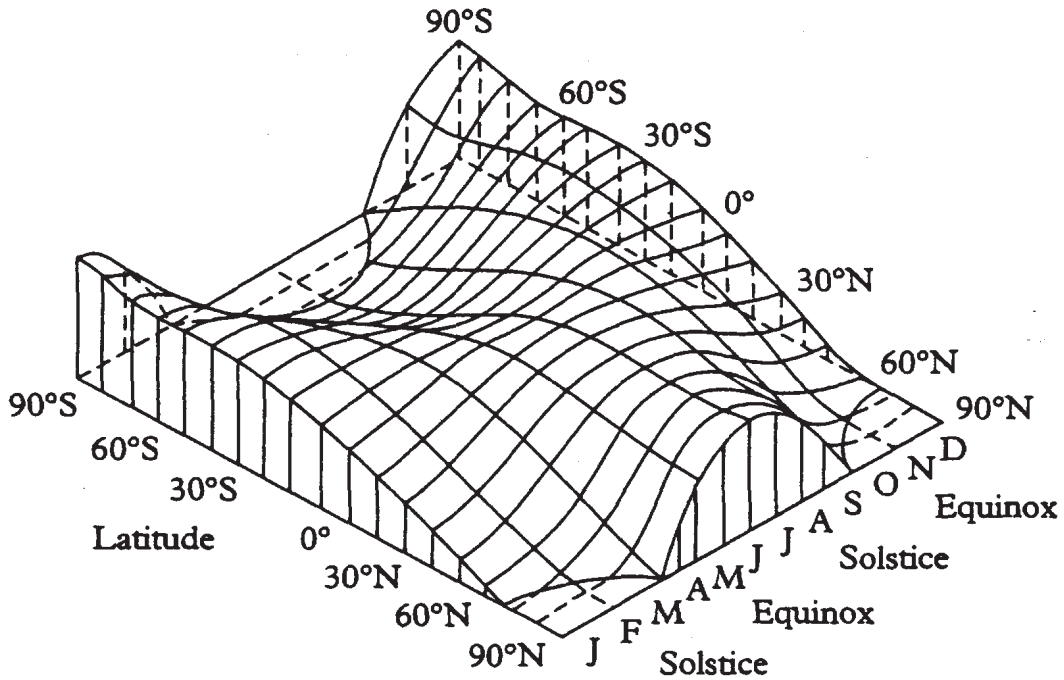
この原因には、CO₂ のフィードバックや、氷床のフィードバックによるものが候補として挙げられている (図 2.10、図 2.11)。

2.2 大気組成

平均的な物質構成は、図 2.12 のようになっている。温暖化物質として問題になっている CO₂ の存在比が非常に小さいことに注意。

現在の大气の鉛直断面は図 2.13 のようになっている。通常の大気科学で対象にするのは、下部熱圏の 100km 程度まで。その辺りまでは分子量がほぼ一定 (28.94) であり、大気を構成する物質が良く攪拌されている (均質圏、homosphere)。それより上では、軽い分子の比率が大きくなり、大気の分子量は減少しはじめる (非均質圏、heterosphere) (図 2.14)。もちろん、均質圏でも地上に発生源があり大気中に消滅原因のある物質 (フロンやメタン) や大気中に生成・消滅原因のある物質 (オゾン) などは鉛直方向に不均一に分布する。

物質分布ではなく温度構造で大気を分類すると、下から対流圏 (10 数 km、troposphere)、成層圏 (50km、



ϕ	90	70	50	30	0	-30	-50	-70	-90
3 January	0	0	90	231	413	505	509	514	547
21 March	0	149	280	378	436	378	280	149	0
22 June	524	492	482	474	384	213	80	0	0
4 July	513	482	477	472	386	216	84	0	0
23 September	0	147	276	373	430	372	276	147	0
21 December	0	0	86	227	410	507	514	526	559

Positive (negative) latitudes for the Northern (Southern) Hemisphere

ORBITAL PARAMETERS. Figure 4. *Solar irradiance (watts per square meter) at the top of the atmosphere as a function of the latitude and seasons through the year.*

図 2.3 太陽入射量の変化2 (Schneider Ed., Encyclopedia of Climate and Weather より)

stratosphere)、中間圏 (80km、mesosphere)、熱圏 (80km、thermosphere) となる (図 2.15)。それぞれの境界は、対流圏界面 (もしくは単に圏界面、tropopause)、成層圏界面 (stratopause)、中間圏界面 (mesopause) と呼ばれる。対流圏は温度が高度と共に下がるが、後述の断熱冷却率よりは少なく、凝結が起こらなければ (日中の境界層 (地面近く) を除き) 安定である。中間圏も同様に安定。ただし、対流圏では湿潤対流が頻繁に起こり、上下に良く混合されている。成層圏では温度は下部で等温、それ以上で高度とともに昇温していて、非常に静的に安定な状態となっている。

では、このような大気構造はどのようにして説明されるのか。この問題意識を念頭において、以後、熱力学と

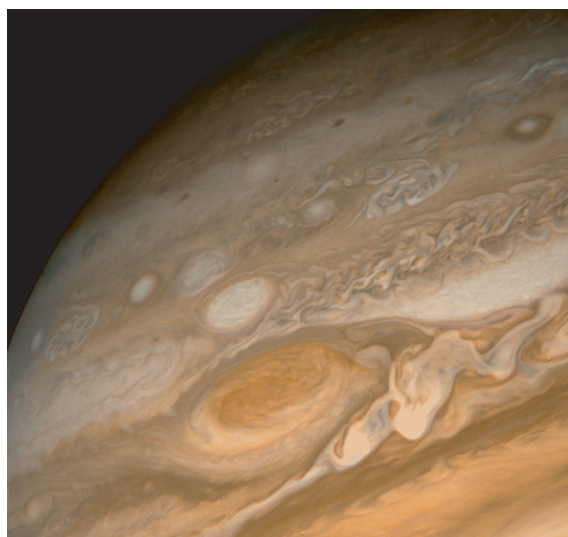


图 2.4 木星

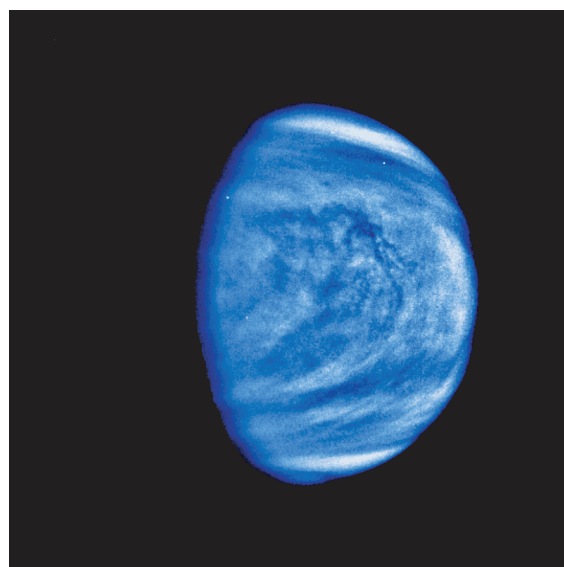


图 2.5 金星

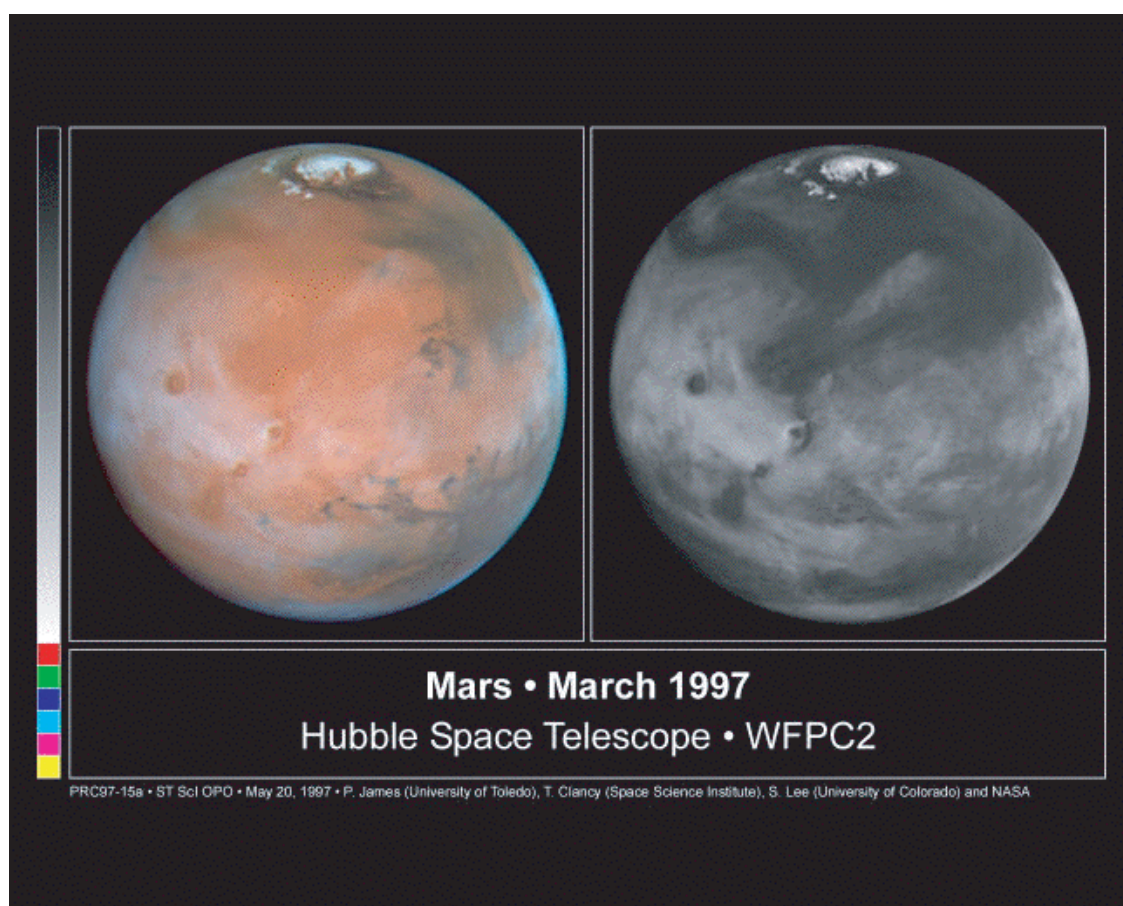


图 2.6 火星

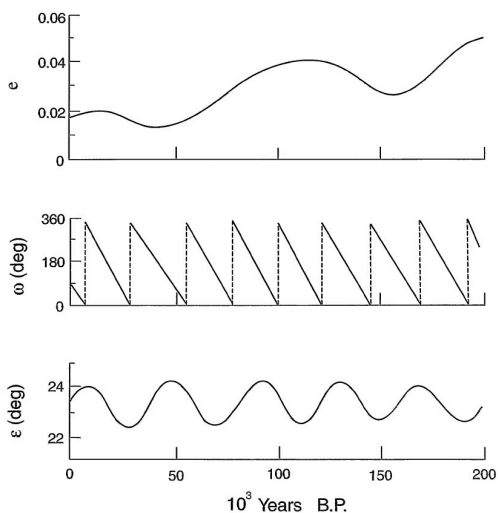
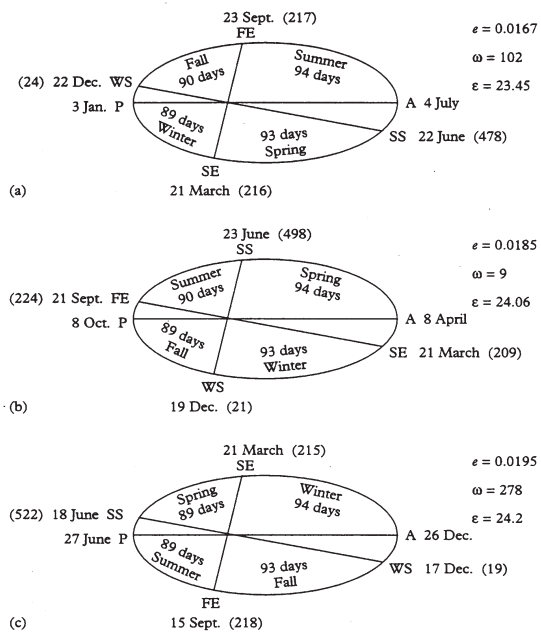


Figure 2.7 The eccentricity e , the obliquity of the ecliptic ϵ , and the longitude of the perihelion ω of the earth as functions of year before the present.

図 2.7 軌道要素の変化 (Liou “An Introduction to Atmospheric Radiation” (2002) より)



ORBITAL VARIATIONS. Figure 3. Shift of the position of the equinoxes and the solstices around the Earth's elliptical orbit for (a) today, (b) 5,500 years ago, and (c) 11,000 years ago. SE: spring equinox, FE: fall equinox, SS: summer solstice, WS: winter solstice, P: perihelion, A: aphelion. The orientation of this orbit has been kept arbitrarily the same and the beginning of the spring is fixed on calendar date 21 March. The beginning of the other seasons is changing in time because the length of the seasons is changing. The numerical values of the eccentricity, e , of the obliquity, ϵ , of the longitude of the perihelion, ω (measured from FE), and of the 60° north insolation at the solstices and equinoxes (values in parentheses) are taken from Berger and Loutre (1991). (In this figure, the shape and angles are exaggerated for clarity.)

図 2.8 近日点黄経の変化 (Schneider Ed., Encyclopedia of Climate and Weather より)

大気放射について概観する。

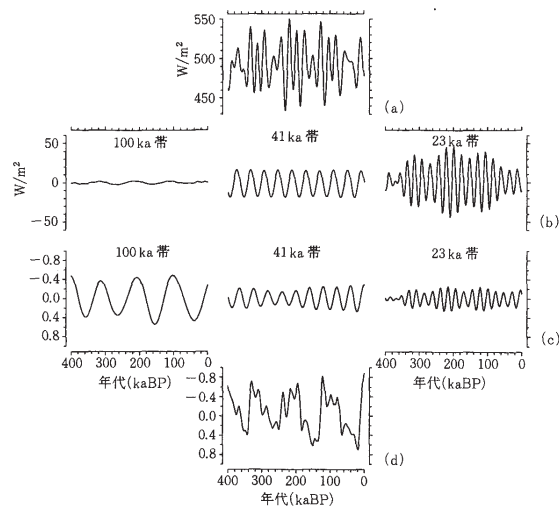


図 4.9 日射量と海底コアの酸素同位体比の最近 40 万年間の時系列から、デジタルフィルタで周期帯成分を取り出して比較したもの (Imbrie et al., 1993 の図の再現)。(a)北緯 65 度の 6 月なかばの日射量 (W/m^2) (Berger, 1979 にならって計算)。(b) (a) のうちから、バンドパスフィルタで、10 万年前後、4.1 万年前後、2.3 万年前後の周期帯成分をそれぞれ取り出したもの。(c) (d) のうちから、バンドパスフィルタで、10 万年前後、4.1 万年前後、2.3 万年前後の周期帯成分をそれぞれ取り出したもの。(d) 5 つの海底コアの浮遊性有孔虫の酸素同位体比を総合した SPECMAP stack と呼ばれるもの (%、ただし 0 は長期間平均を示す。Berger et al., 1984 の Imbrie ほかの論文で記述されている。

図 2.9 日射量と海底コア酸素同位体比の周期帯毎の変動 (住ほか、気候変動論 (1996) より)

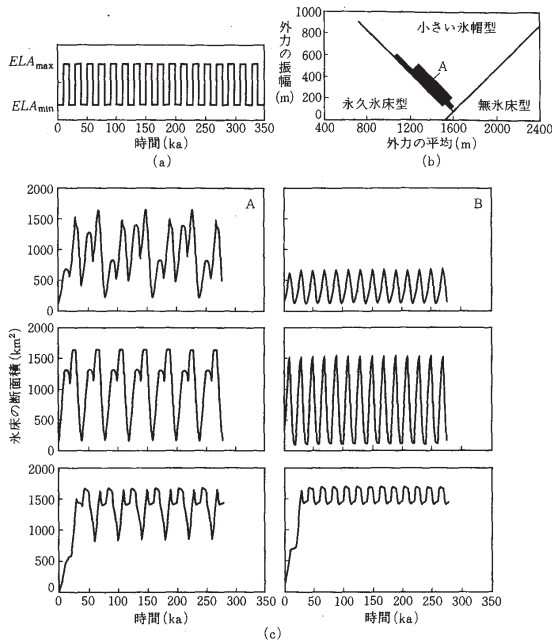
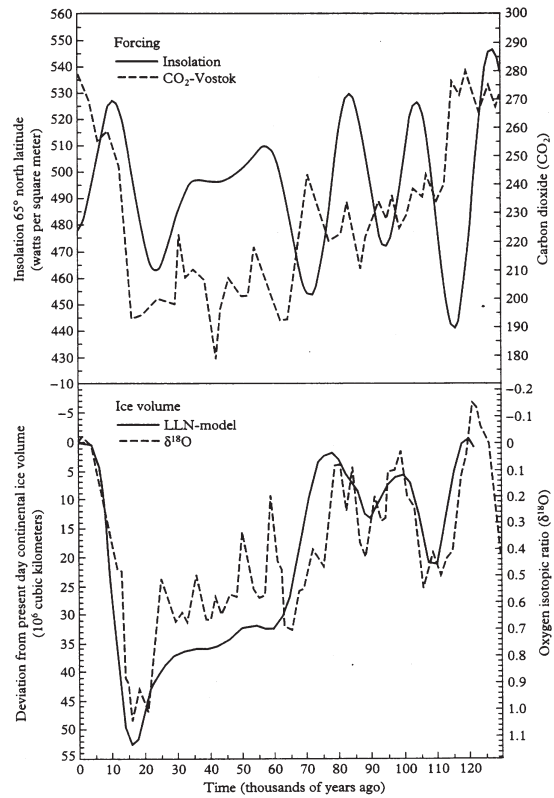


図 4.11 氷床の力学モデルに 2 万年周期の外力を与えたときの応答 (Abe-Ouchi, 1993; 阿部, 1994)。(a)外力の与えかた。外部条件である氷床の均衡線高度を 2 万年周期の矩形波型に変化させている。横軸は時間 (単位: ka)。(b)得られた氷床の変動のタイプと与えた外部条件との関係。横軸は外力の平均 $((ELA_{min} + ELA_{max})/2)$, 単位: m, 縦軸は外力の変化の振幅 $((ELA_{max} - ELA_{min})/2)$, 単位: m)。A は強い非線形応答の現われる領域。(c)氷床の断面積 (単位: km^2) の時系列。[A]強い非線形応答。外力の倍周期よりも長い周期の不規則な振動が生じる場合と、外力の倍周期 (4 万年) で氷床が生成消滅または振動する場合。[B]線形応答。外力の周期 (2 万年) で氷床が生成消滅または振動する場合。

図 2.10 氷床 feedback を入れたシミュレーション (住ほか、気候変動論 (1996) より)



ORBITAL VARIATIONS. Figure 5. Long-term variations of ice volume simulated by the LLN-model (from Gallée et al., 1992) in response to insolation and CO_2 forcings over the last glacial-interglacial cycle. The dotted line of the lower panel represents the $\delta^{18}O$ values taken from Labeyrie et al. (1987) as a proxy for total ice volume over the Earth.

図 2.11 CO_2 feedback を入れたシミュレーション (Schneider Ed., Encyclopedia of Climate and Weather より)

表 2.1 地表付近の大気組成

成分	分子式	分子量	存在比率(%)	
			容積比	重量比
窒素分子	N ₂	28.01	78.088	75.527
酸素分子	O ₂	32.00	20.949	23.143
アルゴン	Ar	39.94	0.93	1.282
炭酸ガス	CO ₂	44.01	0.03	0.0456
一酸化炭素	CO	28.01	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵
ネオン	Ne	20.18	1.8×10 ⁻³	1.25×10 ⁻³
ヘリウム	He	4.00	5.24×10 ⁻⁴	7.24×10 ⁻⁵
メタン	CH ₄	16.05	1.4×10 ⁻⁴	7.25×10 ⁻⁵
クリプトン	Kr	83.7	1.14×10 ⁻⁴	3.30×10 ⁻⁴
一酸化二窒素	N ₂ O	44.02	5×10 ⁻⁵	7.6×10 ⁻⁵
水素分子	H ₂	2.02	5×10 ⁻⁵	3.48×10 ⁻⁶
オゾン	O ₃	48.0	2×10 ⁻⁶	3×10 ⁻⁶
水蒸気	H ₂ O	18.02	不定	不定

図 2.12 大気の組成 (松野・島崎、成層圏と中間圏の大気 (1981) より)

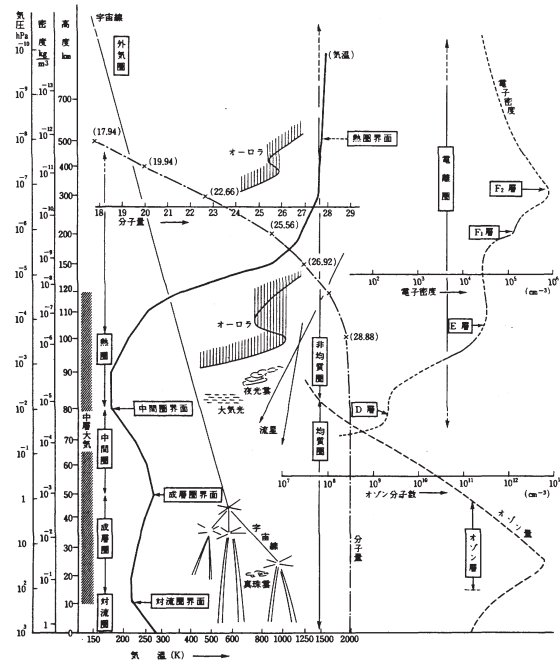


図 2.13 大気の鉛直変化 (和達監修、気象の事典 (1993) より)

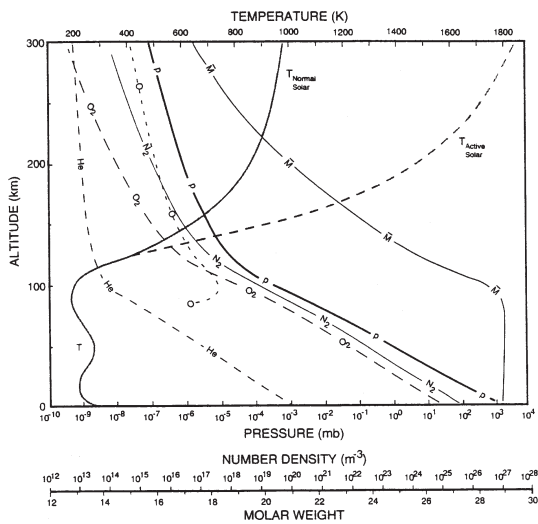


Figure 1.3 Global-mean pressure (bold), temperature (shaded), mean molar weight (solid), and number densities of atmospheric constituents, as functions of altitude. Source: U.S. Standard Atmosphere (1976).

図 2.14 分子の数密度鉛直変化 (Salby, Fundamentals of Atmospheric Physics (1996) より)

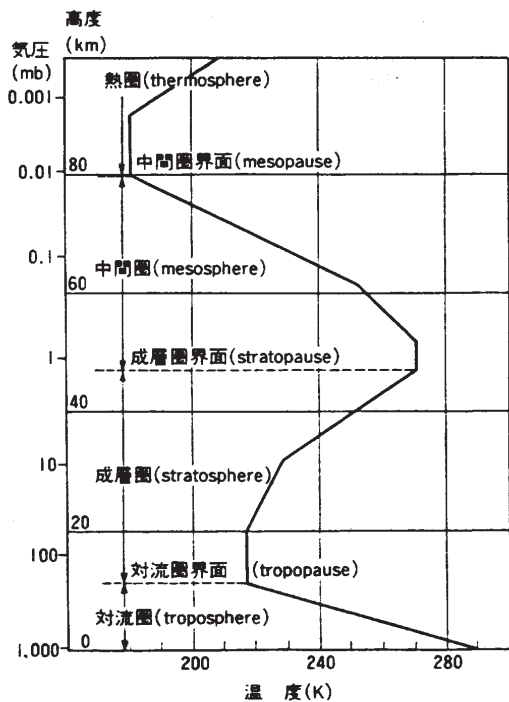


図 1.1 大気の区分. 温度分布は1962年の米国標準大気.

図 2.15 気温の鉛直変化 (松野・島崎、成層圏と中間圏の大気 (1981) より)