

# 物理気候学 講義ノート

平成 24 年度版  
里村雄彦

2012 年 4 月

# 第1章

## イントロダクション

### 1.1 講義の趣旨

◎本講義は気候の物理的理解をするための基礎について話すものであり、気候変化そのものの議論をする予定はない。講義内容は気候形成に重要な大気の非断熱過程を中心にしている。

単位認定：出席点、レポート、および随時行なう小試験や期末試験によって行なう。

### 1.2 講義内容予定

1. 地球の基礎データ、大気組成
2. 状態方程式
3. 静力学平衡
4. 断熱変化
5. 大気放射
6. 大気境界層
7. 大気大循環・数値モデル

### 1.3 参考書

- 大気科学講座1 「地表に近い大気」、竹内・近藤、東大出版会、1981、226 頁
- 大気科学講座2 「雲や降水を伴う大気」、浅井他、東大出版会、1981、249 頁
- 大気科学講座3 「成層圏と中間圏の大気」、松野・島崎、東大出版会、1981、279 頁
- 大気科学講座4 「大気の大循環」、岸保他、東大出版会、1982、256 頁
- 一般気象学、小倉、東大出版会、1984、314 頁
- 岩波講座地球惑星科学 1 1 「気候変動論」、住他、岩波書店、1996、272 頁
- Climate System Modeling, K. E. Trenberth, Cambridge, 1992, 788 pp.
- Introduction to Circulating Atmosphere, I. N. James, Cambridge, 1994, 422 pp.

### 1.4 気候の変化について

(この項、主として上記「気候変動論」を基礎にしている。)

気候変動の詳細な記述は行わないが、いくつかのキーワードのみ参考のために書いておく。まず、地質年代の用語：図 1.2, 1.1 参照

Epoch	System	Series Epoch	Stage Age	Age Ma	GSSP	
Phanerozoic	Cenozoic	Quaternary	Holocene		0.0117	▷
			Pleistocene	Upper "Ionian" Catabrian Gelasian	0.126 0.781 1.806 2.588	▷ ▷ ▷ ▷
		Pliocene	Piacenzian	3.600	▷	
			Zanclean	5.332	▷	
			Miocene	Messinian Tortonian Serravallian Langhian Burdigalian Aquitanian	7.246 11.608 13.82 15.97 20.43 23.03	▷ ▷ ▷ ▷ ▷ ▷
		Paleogene	Oligocene	Chattian	28.4 ± 0.1	▷
				Rupelian	33.9 ± 0.1	▷
			Eocene	Priabonian	37.2 ± 0.1	▷
				Bartonian	40.4 ± 0.2	▷
				Lutetian	48.6 ± 0.2	▷
	Paleocene		Ypresian	55.8 ± 0.2	▷	
			Thanetian	58.7 ± 0.2	▷	
			Selandian	- 61.1	▷	
			Danian	65.5 ± 0.3	▷	
	Mesozoic	Cretaceous	Maastrichtian	70.6 ± 0.6	▷	
			Campanian	83.5 ± 0.7	▷	
			Santonian	85.8 ± 0.7	▷	
			Coniacian	- 88.6	▷	
			Turonian	93.6 ± 0.8	▷	
Lower		Cenomanian	99.6 ± 0.9	▷		
		Albian	112.0 ± 1.0	▷		
		Aptian	125.0 ± 1.0	▷		
		Barremian	130.0 ± 1.5	▷		
		Berriasian	145.5 ± 4.0	▷		

図 1.1 国際地質系統・地質年代表 2009 から抜粋。GSSP の欄は国際標準模式層断面及び地点が定義されている部分。

地質時代	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
	1990年	1987	1983	1980	1969	1960	1937	
新生代 (Cenozoic)	第四紀 (Quaternary)	完新世 (Holocene)	0.01	0.01	2.0			
		更新世 (Pleistocene)	1.64	1.67	1.6	1.8	1	
	新第三紀 (Neogene)	鮮新世 (Pliocene)	5.2	5.1	5.3	5.0	5.5	11
		中新世 (Miocene)	23.3	24	23.7	24	22.5	25
	第三紀 (Tertiary)	漸新世 (Oligocene)	35.4	36	36.6	38	36.0	40
		始新世 (Eocene)	56.5	55	57.8	55	53.5	60
		晩新世 (Paleocene)	65.0	66	66.4	68	65.0	70
	中生代 (Mesozoic)	白亜紀 (Cretaceous)	146	140	144	138	135	135
		ジュラ紀 (Jurassic)	208	210	208	205	195	180
		三畳(トリアス)紀 (Triassic)	245	250	245	240	235	225
二畳(ペルム)紀 (Permian)		290	290	286	290	275	270	
石炭紀 (Carboniferous)		363	360	360	360	360	400	
デボン紀 (Devonian)		409	410	408	410	405	313	
シルル紀 (Silurian)		439	440	438	435	435	440	
オルドビス紀 (Ordovician)		510	500	505	500	~460		
カンブリア紀 (Cambrian)		570	570	570	570	570	600	
先カンブリア時代 (Pre-Cambrian)						~610	470	

(1) Harland et al., 1990. (2) Haq and van Eysinga, 1987. (3) Dnag, 1983. (4) USGS, 1980. (5) Berggren, 1969; PTS, 1971. (6) Holms, 1960. (7) Holmes, 1937.

図 1.2 地質学的年代。数字の単位は MaBP (100 万年前)。年代と共に境界の絶対年代が変遷している

### 1.4.1 年代推定と古気候推定

古気候を復元するためには気候要素を推定できる岩石・鉱物、化石などが含まれている地層の年代を決定する必要がある。地層の年代には、放射性同位体を用いた絶対年代もしくは放射年代と、順序から決まった相対年代がある。

放射年代測定には、親核種と娘核種の比が壊変によって時間と共に変わることを使う方法 (K-Ar 法、Pb-Sr 法、U-Pb 法など)、平衡状態にあった系から生物の死亡などにより親核種が固定された後に親核種の量が減って行くことを利用する <sup>14</sup>C 法、親核種の核分裂による飛跡を使うフィッシュントラック法などがある。

相対年代には、特定の地質時代に限って産出する化石 (示準化石：古生代の三葉虫やフデシシ、中生代のアンモ

ナイトや恐竜、新生代のピカリヤやカヘイ石など）を用いる。

古気候の復元には、地層内の堆積物から推定する方法と、産出化石の生息環境（絶滅種の場合は近い生物の生息環境）から推定する方法がある（その用途に用いられる化石を「示相化石」と呼ぶ）。化石や堆積物の化学分析や同位体分析によって水温の指標や海水特性の指標も得られる。（ストロンチウムやマグネシウム、炭素同位体比など。酸素同位体も海水温の推定に用いられる）

堆積物の例：湿潤熱帯赤色土壌のラテライトやボーキサイト、氷河末端のモレーン（図 1.3）、乾燥地域の石膏や岩塩など

示相化石の例：植物や花粉の化石、有孔虫や貝やサンゴの化石



図 1.3 ヒマラヤの氷河湖。モレーンの高さまで氷河湖の水位が上がり決壊の危険。（北海道大学博物館）

#### 1.4.2 第四紀の気候変動

図 1.4 において、(a) の中国のレス（風成堆積物）では経験的に磁化率が高いほど湿潤・温暖であった（または乾燥度の指標となっている）と考えられている（メカニズムは良く分からないらしい）。(b) の海底堆積物中の炭酸塩の比率が小さいと、氷によって運ばれた陸起源碎屑物が増えたことを示す。(c)(d) は海底堆積物中の底生有孔虫の酸素同位体比で、世界中の氷の総量が多くなると（液体の水が少なくなると）図の下側へ行く。(d) に書かれている数字は酸素同位体ステージであり、奇数が間氷期、偶数が氷期に対応する。約 2 万 1 千年ほど前には最後の氷河極大期であり、最終氷期極大期（LGM: Last Glacial Maximum）と呼ぶ。このときには、北米ではカナダ米国国境付近まで（ローレントイド氷床）、ヨーロッパは北ヨーロッパが氷床に覆われていたと考えられている。しかし、シベリアとチベットには氷床が無かったらしい。

図 1.4 で見取れるように、2.4-5 MaBP の頃から変動が大きくなり、特に第四紀である最近の 1 MaBP は振幅が大きくなっている。その際、氷期の氷床が大きくなる形で振幅が大きくなっていることが分かる。これにはロッキー山脈やチベット高原の上昇（15 MaBP 頃に開始、3 MaBP 頃より影響が出始める）によって大気循環が大きく変わったためであると考えられている。周期は図 1.5 で分かるように、1MaBP より前では約 4 万年周期、後では約 10 万年周期の変動が大きい。

数万年から数十万年のミランコビッチフォーシングについては後述。

その他、グリーンランド全域の氷床コアに見られる 3 千年程度の振動はダンスガード・エシガー振動（Dansgaard-Oeschger Oscillation）と呼ばれている（図 1.6）。寒冷期と温暖期の間を 50 年以下程度で遷移する。

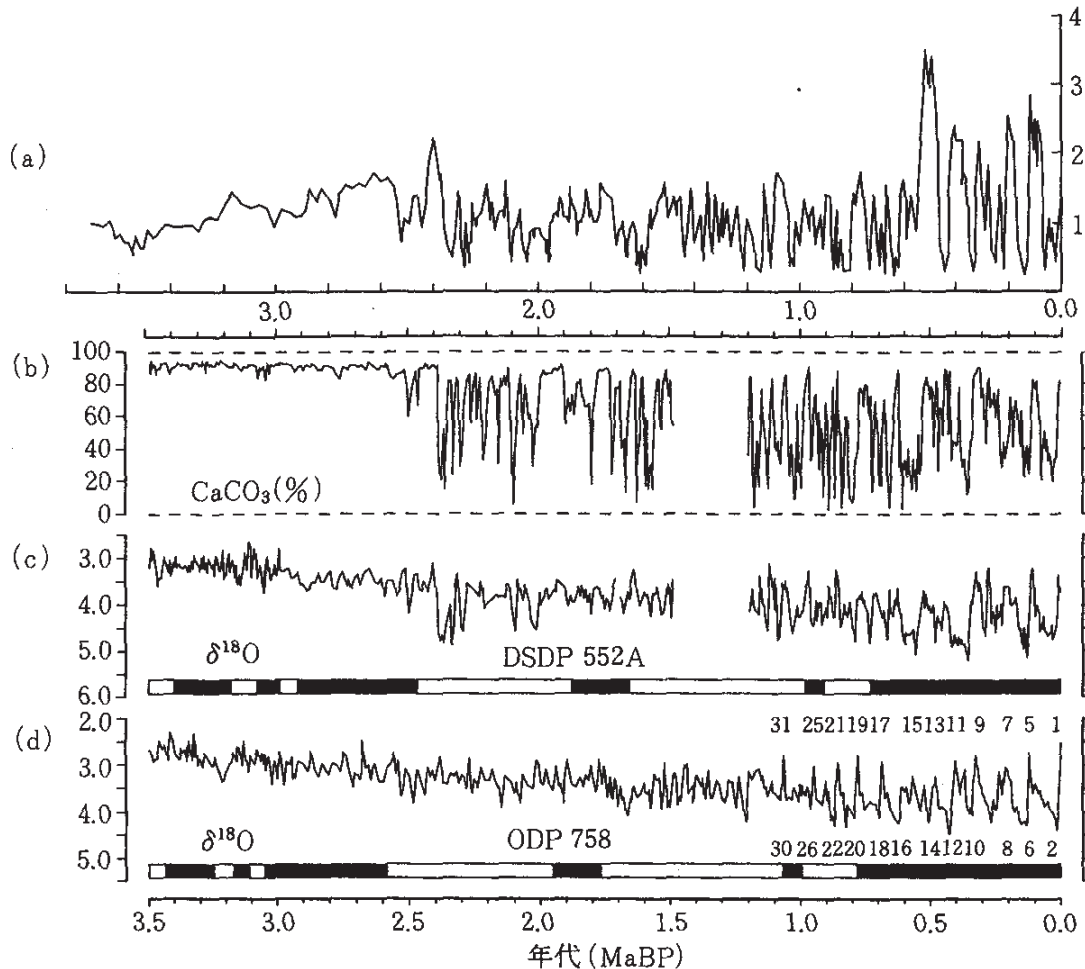


図 4.6 過去約 3.5 Ma 間の古気候指標の時系列. 横軸は年代 (MaBP). (a) 中国の西峰 (Xifeng, 36°N, 107°E) のレスの磁化率 (常用対数の相対値) (Liu X. M. et al. のデータから Kukla (1987) が作図したもの). (b) DSDP 552A (56°N, 23°W) の堆積物中の炭酸塩の比率 (%) (Shackleton et al., 1984 の図を再現するように DSDP 報告書のデータから作図). (c) DSDP 552A の底生有孔虫の酸素同位体比 (‰) (Shackleton et al., 1984 の図を再現するように DSDP 報告書のデータから作図). 下の帯は, 地磁気の正 (黒), 逆 (白) 磁極期を示す. (d) ODP 758 (5°N, 90°E) の底生有孔虫の酸素同位体比 (‰) (Chen et al., 1995 のデータから作図). 図の中の数字はステージ番号. 下の帯は, 地磁気の正 (黒), 逆 (白) 磁極期を示す. 年代尺度は図の (a), (b), (c) の曲線については共通であり, 曲線 (c) の下に示した地磁気逆転事件のいくつかの年代をカリウム・アルゴン法にもとづいて与え, その間は海底コアについては堆積速度一定, レスについては堆積速度が磁化率に応じて変わると仮定して求めたものである. 曲線 (d) については, 改訂された地磁気逆転の年代値に基づき, 地球軌道要素による微調整をしたものである. 図の左端付近の 3.44 MaBP に見えている逆から正への地磁気逆転 (ギルバート逆磁極期の終わり) は, カリウム・アルゴン年代に従って約 3.55~3.6 MaBP とするのが適当と思われるが, ここでは Chen らの論文のままとした. 3 MaBP 以後については Shackleton らが 1990 年に示した尺度 (Eddy and Oeschger, 1993 の本の Shackleton の解説参照) とほとんど一致する.



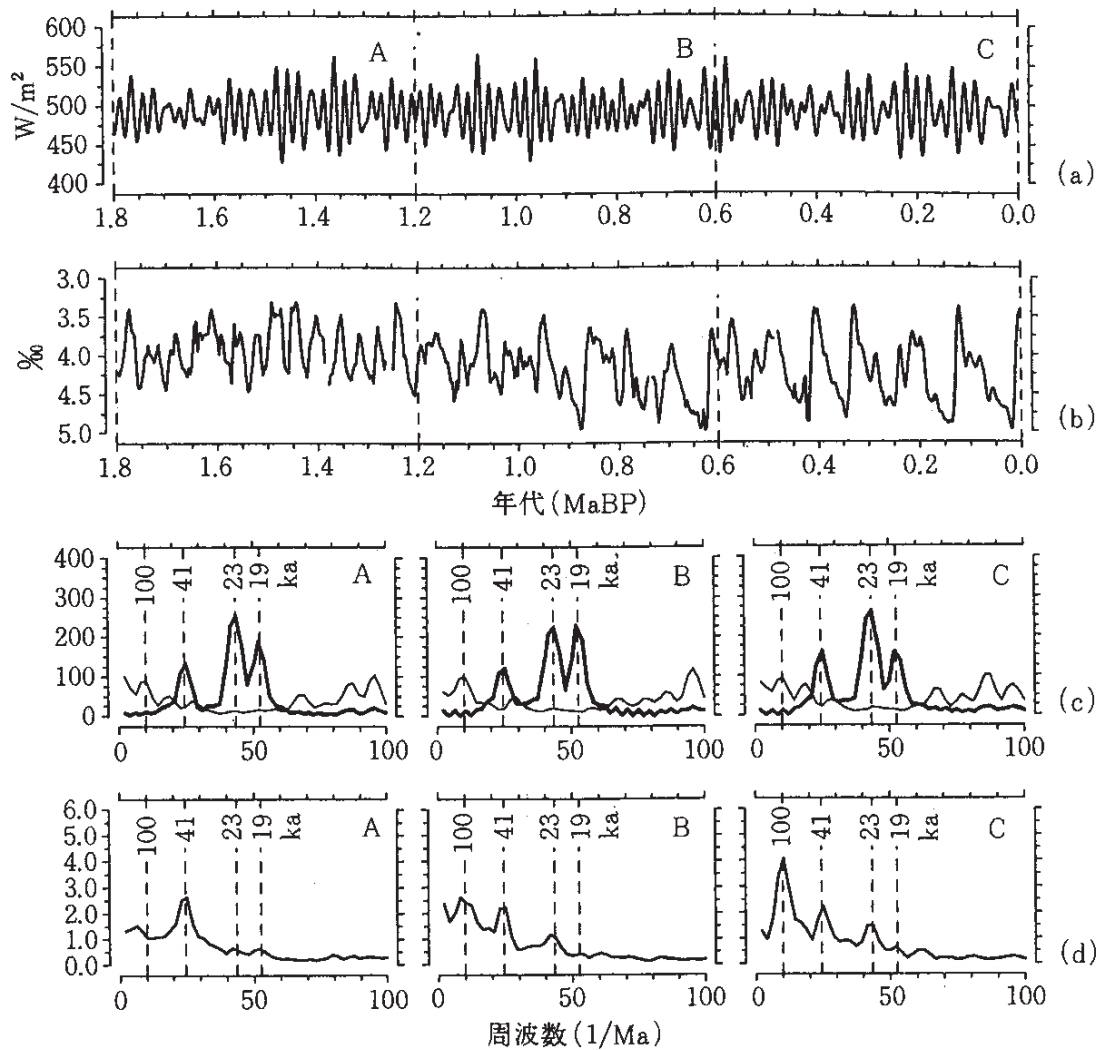


図 4.10 日射量と海底コアの酸素同位体比の 180 万年間の時系列を、60 万年ごとに区切ってパワースペクトルを比較したもの (Imbrie et al., 1993 の図の再現)。(a)北緯 65 度の 6 月なかばの日射量 ( $W/m^2$ ) (Berger, 1979 にならって計算)。(b)底生有孔虫の酸素同位体比 (‰)。1.8 Ma から 0.4 Ma までは、ODP677 (1°N, 84°W) コアのもの、0.4 Ma から現在までは、多数のコアを総合した benthic stack である (Imbrie et al., 1992 で記述されている)。(c)図 (a) で破線で区切られた A, B, C のそれぞれの期間について、Blackman-Tukey (ラグ共分散) 法によって計算した (a) の時系列のパワースペクトル (太線)。細線は、(a) の時系列の長時間平均からの偏差の 2 乗のパワースペクトル。破線は、軌道要素の主要な周期を示す。(d) A, B, C のそれぞれの期間についての (b) の時系列の Blackman-Tukey 法によるパワースペクトル。

図 1.5 日射変動と酸素同位体の周樹分析 (住ほか、気候変動論 (1996) より)

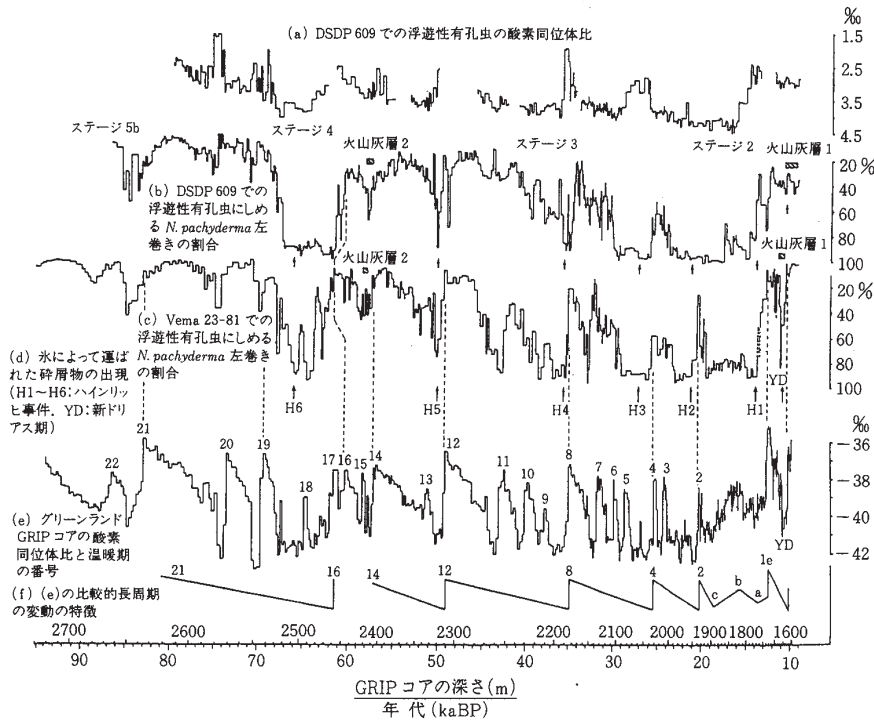


図 4.14 ダンスガード・エシガー振動、ハインリッヒ事件、北大西洋の海洋環境変化の対比 (Bond et al., 1993). (a) 海底コア DSDP 609 (50°N, 24°W) での浮遊性有孔虫の酸素同位体比 (%). (b) DSDP 609 での浮遊性有孔虫のうち *N. pachyderma* の左巻きの割合 (%). 値が大きい (図で下向き) ほど低温と考えられる. 斜線をつけた箱は火山灰層を示す. (c) 海底コア V23-81 (54°N, 18°W) での浮遊性有孔虫のうち *N. pachyderma* の左巻きの割合 (%). (d) V23-81 で検出される、水によって運ばれた碎屑物の出現 (ハインリッヒ事件 H1~H6 および新ドリアス期 YD). (e) グリーンランド水床 GRIP コアの酸素同位体比 (%). (f) (e) の比較的長周期の変動の特徴を取り出したもの. (Reprinted by permission from Nature, Copyright Macmillan Magazines Ltd.)

図 1.6 ダンスガード・エシガー振動 (住ほか、気候変動論 (1996) より)

約 1 万年前前後の千年間、ヨーロッパを中心とした寒冷化が起こった。これを新ドリアス期 (Younger Dryas) と呼ぶ。YD は北アメリカにはほとんど見られず、東アジアには少しシグナルがあることも分かっている。北欧の海面水温が 40 年以内に 5K 以上の上下があった。これは淡水の大量の流入によって海洋深層循環が弱まったためという説が有力である。