

# 物理気候学 講義ノート

平成 23 年度版  
里村雄彦

2011 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11 「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、地質年代の用語から：

### 1.4.1 年代推定

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  $^{14}\text{C}$  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、中生代のアンモナイトや恐竜、新生代のほ乳類など) を用いる。

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。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、乾燥地域の石膏や岩塩など

生物の例：植物や花粉の化石、貝やサンゴの化石

### 1.4.2 第四紀の気候変動

図 1.2 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 (ローレンタイド氷床)、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 1.2 で見て取れるように、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 1.3 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 1.4)。寒冷期と温暖期の間を 50 年以下程度で遷移する。

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。これを新ドリラス期 (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。

地質時代			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
			1990年	1987	1983	1980	1969	1960	1937	
頭生代 (Phanerozoic)	新生代 (Cenozoic)	第四紀	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	16
			中新世 (Miocene)	23.3	24	23.7	24	22.5	25	32
		古第三紀 (Paleogene)	漸新世 (Oligocene)	35.4	36	36.6	38	36.0	40	48
			始新世 (Eocene)	56.5	55	57.8	55	53.5	60	68
			暁新世 (Paleocene)	65.0	66	66.4	68	65.0	70	
		中生代 (Mesozoic)	白亜紀 (Cretaceous)	146	140	144	138	135	135	108
	ジュラ紀 (Jurassic)		208	210	208	205	195	180	145	
	三畳(トリアス)紀 (Triassic)		245	250	245	240	235	225	193	
	二畳(ペルム)紀 (Permian)		290	290	286	290	275	270	227	
	石炭紀 (Carboniferous)		363	360	360	360	360	400	275	
	デボン紀 (Devonian)		409	410	408	410	405		313	
	シルル紀 (Silurian)		439	440	438	435	435	440	431	
	古生代 (Paleozoic)	オルドビス紀 (Ordovician)	510	500	505	500	460			
		カンブリア紀 (Cambrian)	570		570	570	570	600	470	
	先カンブリア時代 (Pre-Cambrian)							610		

(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 1.1 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

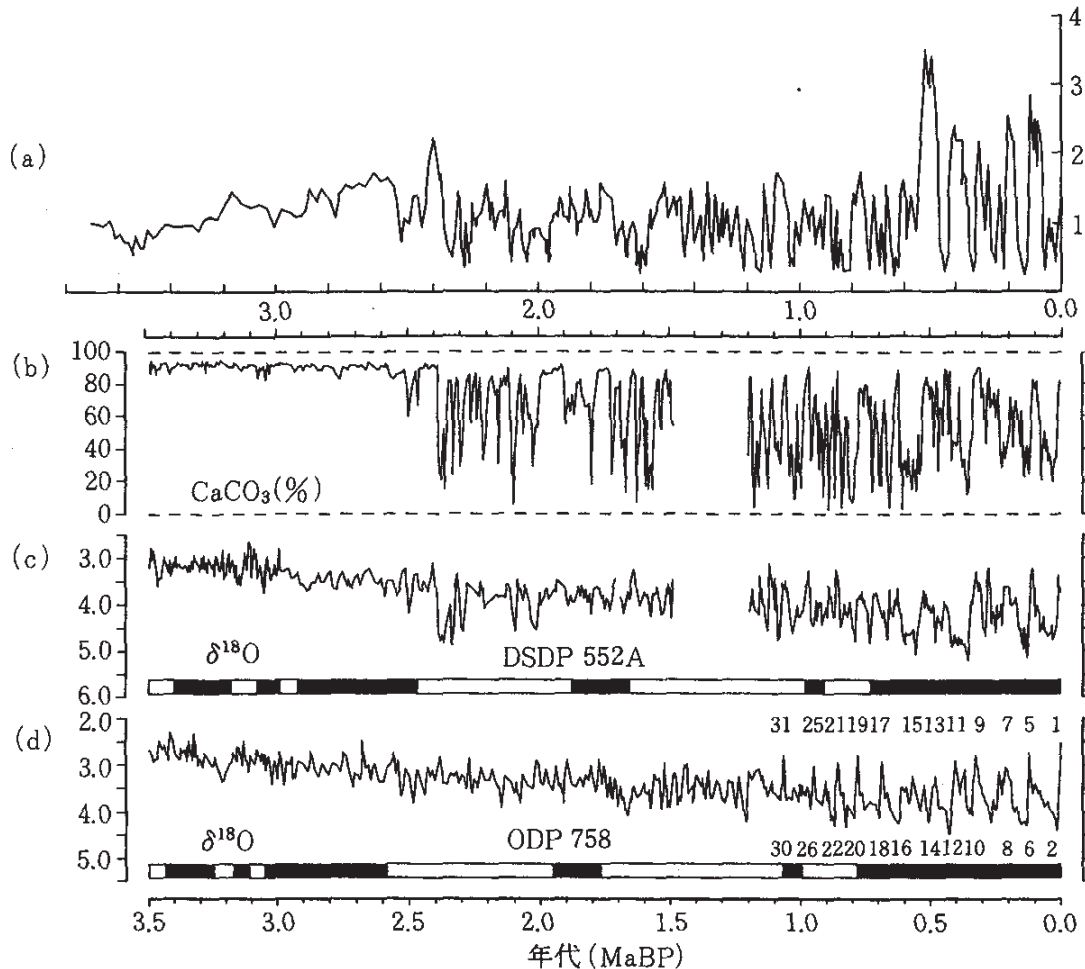


図 4.6 過去約 3.5 Ma 間の古気候指標の時系列. 横軸は年代 (MaBP). (a) 中国の西峰 (Xifeng, 36°N, 107°E) のレスの磁化率 (常用対数の相対値) (Liu X. M. et al. のデータから Kukla (1987) が作図したもの). (b) DSDP 552A (56°N, 23°W) の堆積物中の炭酸塩の比率 (%) (Shackleton et al., 1984 の図を再現するように DSDP 報告書のデータから作図). (c) DSDP 552A の底生有孔虫の酸素同位体比 (‰) (Shackleton et al., 1984 の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 of 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.



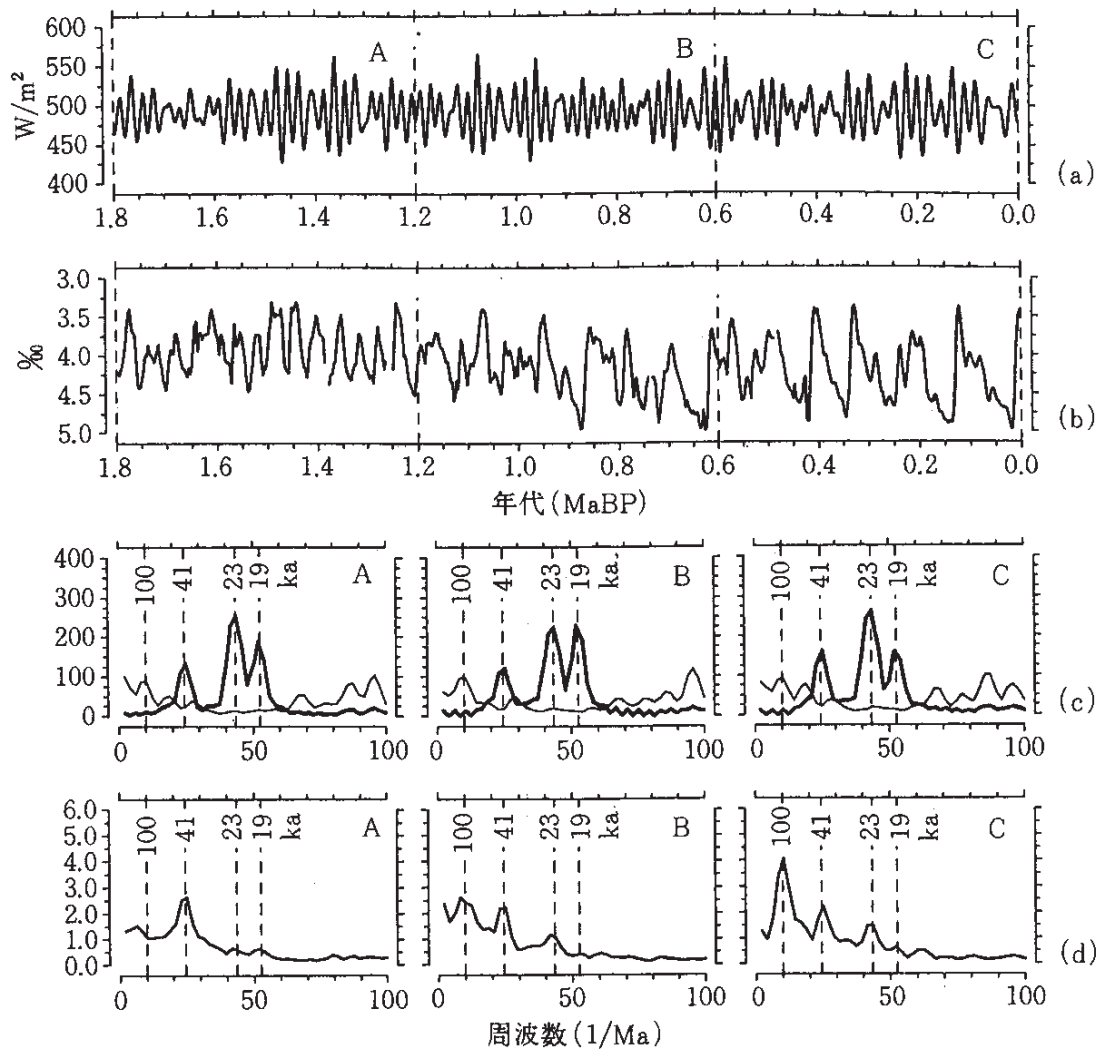


図 4.10 日射量と海底コアの酸素同位体比の 180 万年間の時系列を、60 万年ごとに区切ってパワースペクトルを比較したもの (Imbrie et al., 1993 の図の再現). (a)北緯 65 度の 6 月なかばの日射量 ( $W/m^2$ ) (Berger, 1979 にならって計算). (b)底生有孔虫の酸素同位体比 (‰). 1.8 Ma から 0.4 Ma までは, ODP677 (1°N, 84°W) コアのもの, 0.4 Ma から現在までは, 多数のコアを総合した benthic stack である (Imbrie et al., 1992 で記述されている). (c)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 1.3 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)

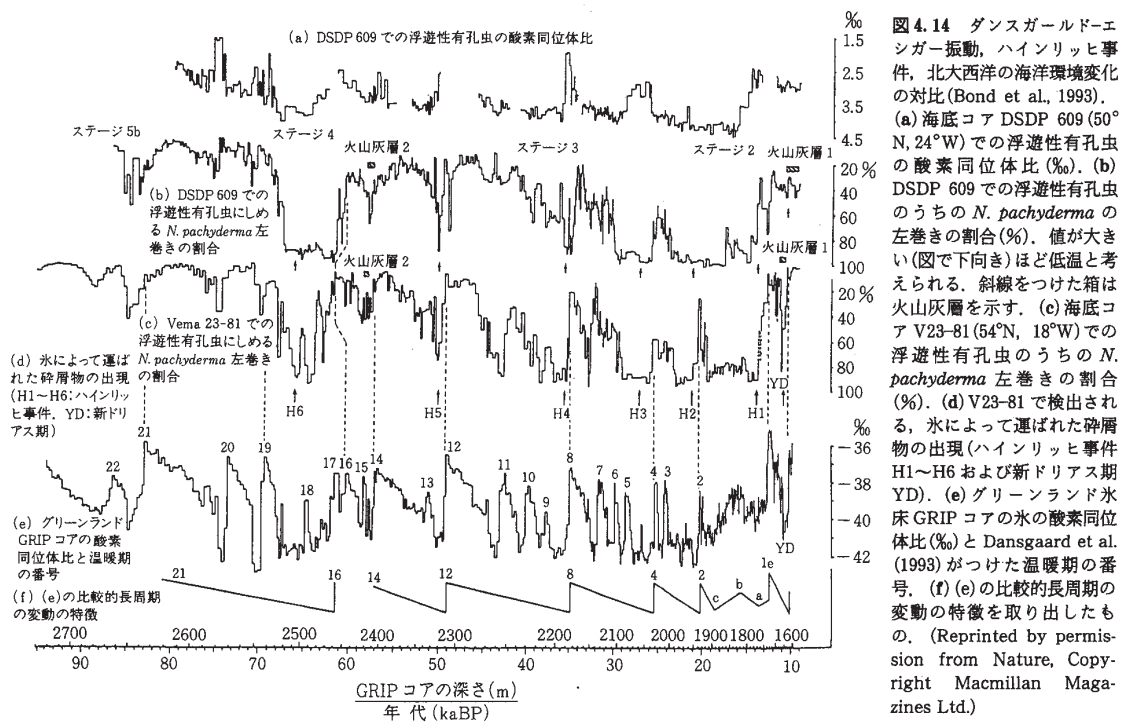


図 4.14 ダンスガード・エシガー振動、ハイน์リッヒ事件、北大西洋の海洋環境変化の対比 (Bond et al., 1993). (a) 海底コア DSDP 609 (50°N, 24°W) での浮遊性有孔虫の酸素同位体比 (%). (b) DSDP 609 での浮遊性有孔虫のうちの *N. pachyderma* の左巻きの割合 (%). 値が大きい (図で下向き) ほど低温と考えられる. 斜線をつけた箱は火山灰層を示す. (c) 海底コア V23-81 (54°N, 18°W) での浮遊性有孔虫のうちの *N. pachyderma* 左巻きの割合 (%). (d) V23-81 で検出される、氷によって運ばれた砕屑物の出現 (ハイน์リッヒ事件 H1~H6 および新ドリマス期 YD). (e) グリーンランド氷床 GRIP コアの氷の酸素同位体比 (%). (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 1.4 ダンスガード・エシガー振動 (住ほか、気候変動論 (1996) より)