

# 宇宙地球科学 I (第五回目)

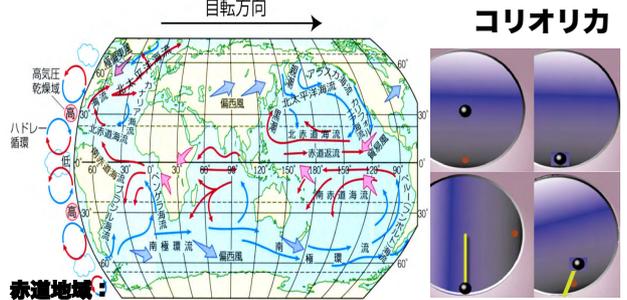
大気・海洋・物質循環

東京大学総合文化研究科：  
小宮 剛 教授

komiya@ea.c.u-tokyo.ac.jp  
http://www43.tok2.com/home/isua/

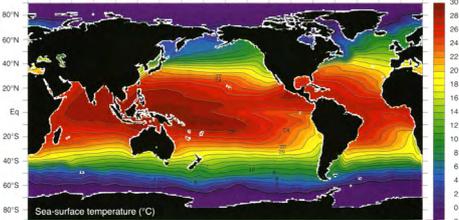
## 海洋の循環(2つのタイプがある)

②-1 海洋表面での循環(海流, 風成循環: 深さ1000m位まで)

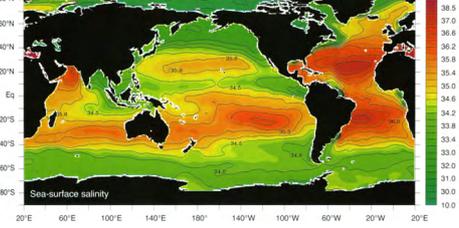


赤道地域：  
ハドレー循環～表面では北から南への空気の流れ+自転→貿易風  
中緯度地域～逆に南から北への流れ+自転→偏西風  
→風+暖かい海水が極域へ移動する→海流

## ②-2A 海洋表面温度分布

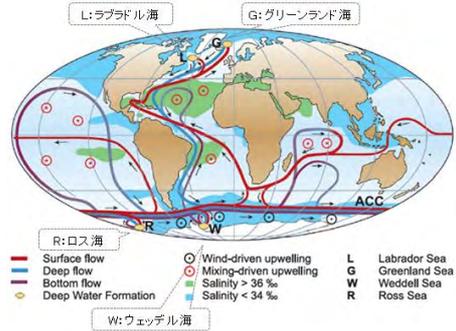


## ②-2B 海洋表面での塩分濃度分布



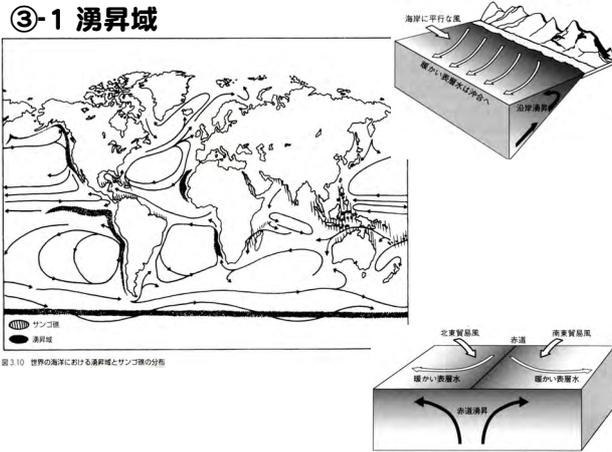
## ②-2

海洋大循環(熱塩循環、Broeckerのベルトコンベアーモデル)

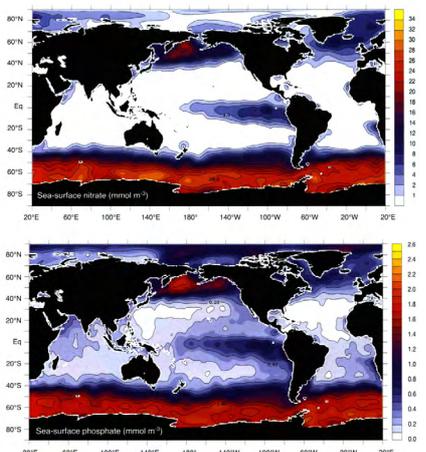


① Stommel (1961) によって提唱され、Broecker によって海水の年代を  $^{14}\text{C}$  を用いて測ることによって実証された。  
→最も古い年代は北太平洋深層水で約2000年(数千年規模で循環)

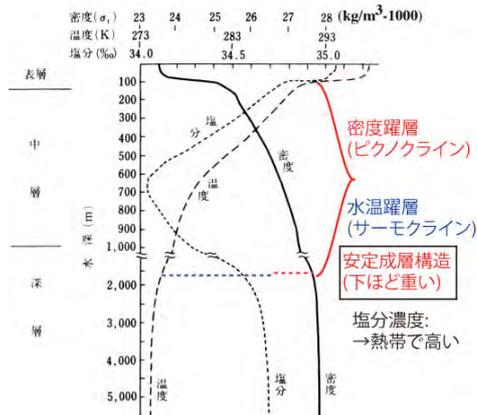
## ③-1 湧昇域



## ④ 海洋表層の栄養塩の濃度分布 2大重要栄養塩( $\text{NO}_3^-$ , P)



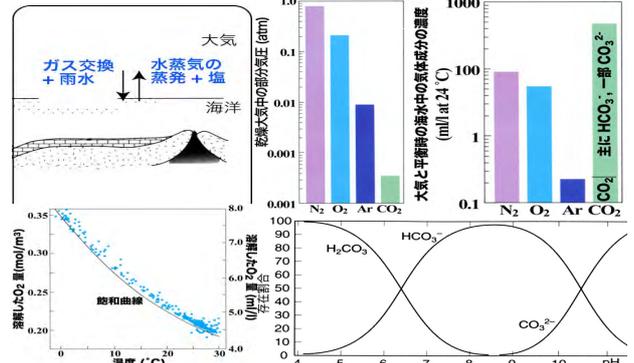
## ①-2 垂直構造つづき



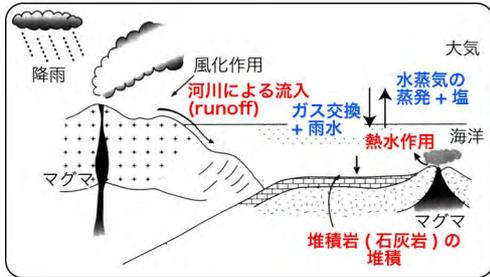
## (5) 溶存ガス -大気とのガス交換+雨水-

(1) 大気とのガス交換

気体が液体に溶け込む量: ヘンリーの法則に則る



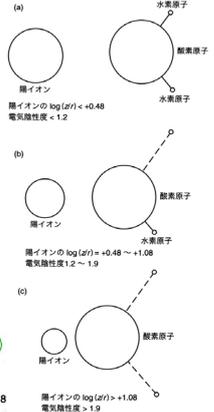
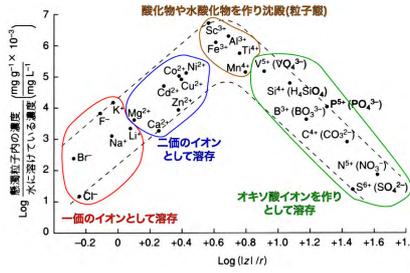
# (1) 海洋: 海洋への物質の流入・流出



- (1) 大陸地殻(河川による)の流入(浸食・風化・運搬)
- (2) 中央海嶺における熱水変質作用
- (3) 堆積物(石灰岩・泥岩・チャート・Mnノジュール)の堆積
- (4) 大気とのガス交換や雨水による流入。蒸発

## 溶存元素

- ①イオン(+錯体),無機錯体や有機錯体
- ②粒子態~有機物,水酸化物や酸化物等



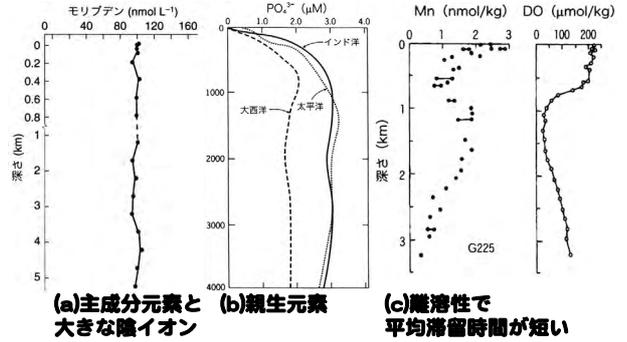
海水中の主要イオンの濃度と滞留時間

イオン	濃度(μM)	滞留時間(万年)
豊富な元素		
Cl <sup>-</sup>	5.6x10 <sup>5</sup>	9,000
Na <sup>+</sup>	4.3x10 <sup>5</sup>	6,000
Mg <sup>2+</sup>	5.3x10 <sup>4</sup>	1,000
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2.9x10 <sup>4</sup>	900
Ca <sup>2+</sup>	1.1x10 <sup>4</sup>	100
K <sup>+</sup>	1.0x10 <sup>4</sup>	1,000
C(HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , CO <sub>2</sub> )	2-2.4x10 <sup>3</sup>	8
Br <sup>-</sup>	8.6x10 <sup>2</sup>	10,000
B(B(OH) <sub>3</sub> , B(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	4.3x10 <sup>2</sup>	1,000
栄養塩		
Cu (CuCO <sub>3</sub> , Cu <sup>2+</sup> , Cu(OH) <sup>+</sup> )	0.02-1x10 <sup>-3</sup>	0.05
Si(OH) <sub>4</sub>	0-3x10 <sup>-3</sup>	7
Fe (Fe(OH) <sub>3</sub> )	0.5-6x10 <sup>-3</sup>	0.5
P (NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> , HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , MgHPO <sub>4</sub> )	0-0.18x <sup>-3</sup>	2
不溶性		
Mn (Mn <sup>2+</sup> , MnCl <sup>+</sup> )	0.08-3x10 <sup>-3</sup>	0.006
Al (Al(OH) <sub>3</sub> , Al(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	0-4x10 <sup>-2</sup>	0.02
希土類		
Ce(CeCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> , Ce <sup>3+</sup> , CeCl <sup>3+</sup> )	3-80x10 <sup>-6</sup>	0.01
Nd(NdCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> , Nd <sup>3+</sup> , NdSO <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	7-50x10 <sup>-6</sup>	0.06
可溶性 (アルカリ)		
Sr <sup>2+</sup>	91	5
Rb <sup>+</sup>	1.4	300
可溶性 (オキシ酸)		
MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.07x10 <sup>-1</sup>	80
UO <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> <sup>4-</sup>	1.4x10 <sup>-2</sup>	40

平均滞留時間(τ)≡(海水中の全量 mol)/(流入量mol/y)  
タイムスケール: 熱塩循環(数千年), 海流(数ヶ月)

## ③ 海水組成の鉛直分布

- (a) 保存性成分型 ~鉛直方向で濃度が変化しない
- (b) リサイクル型 ~表層が低く、深層が高い
- (c) スキャベンジ型~表層で多く、深層で少ない。



## (9) 生物ポンプと物理 (無機, アルカリ) ポンプ ~CO<sub>2</sub>を深海に運ぶプロセス~

- ①生物ポンプ
- 有光層と植物プランクトン

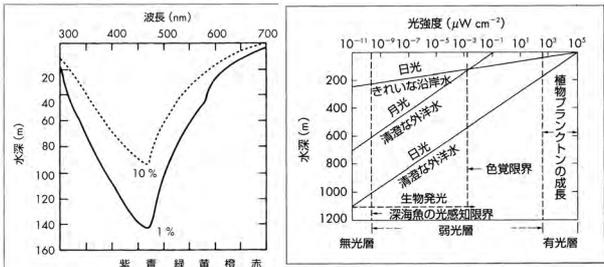


図 2.4 清澄な海水における波長ごとの光透過率  
透過率が10%および1%になる水深を線で結んだ。  
図 2.5 光の透過に基づく鉛直の生態区分  
光強度は対数表示であることに注意。無光層・弱光層・有光層を区切る破線はおおよその目安である。

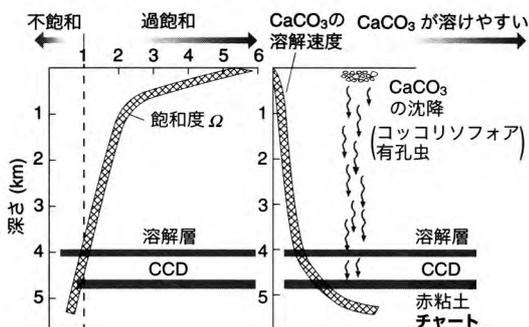
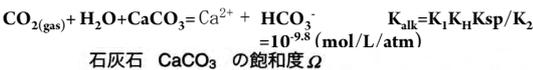
## ①-1生物の化学組成と栄養塩濃度

- (1) 植物プランクトンの元素組成比  
C:N:P=106:16:1 (Redfield比)



植物プランクトンの遺骸が沈降して、分解され、深海にC, N, Pが運ばれる →生物ポンプ1

## ⑤ CaCO<sub>3</sub>の溶解と水深



## ⑥ 生物ポンプと無機 (物理, アルカリ) ポンプまとめ

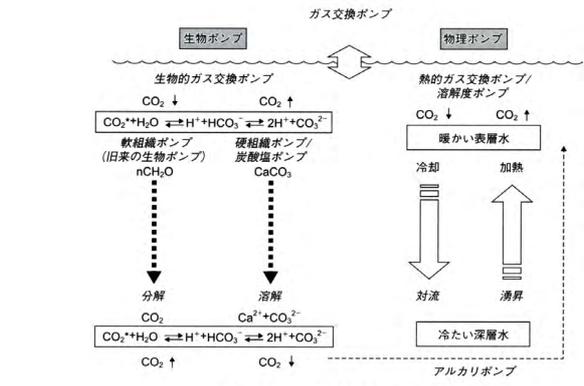


図 1.3.9 生物ポンプと物理ポンプのまとめ。

## (2) 大気組成

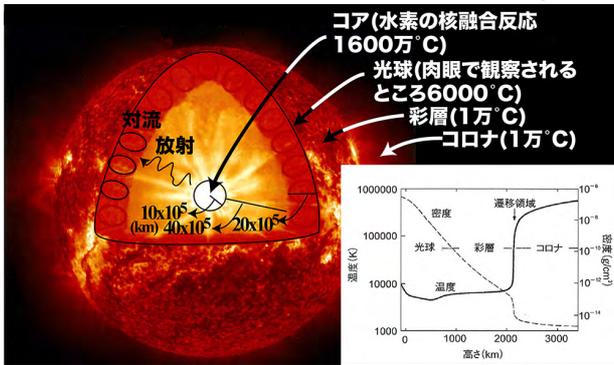
### ① 地球大気組成

地表における乾燥大気組成比

成分	分子量	容積存在比 (ppmv)	平均滞留時間
N <sub>2</sub>	28.01	780800	2×10 <sup>7</sup> 年
O <sub>2</sub>	32	209500	2200年
Ar	39.94	9340	
CO <sub>2</sub>	44.01	360	増加率: 年0.4% 4年
Ne	20.18	18	
He	4.00	5.2	
CH <sub>4</sub>	16.05	1.8	増加率: 年1.0% 12年
Kr	83.80	1.1	
H <sub>2</sub>	2.02	0.5	2年
N <sub>2</sub> O	44.02	0.3	増加率: 年0.2% 114年
CO	28.01	0.1	変動大 0.1年
Xe	131.29	0.09	
O <sub>3</sub>	48.00	0.03	変動大 数日-数週間
H <sub>2</sub> O	18.02	1000-30000	変動大

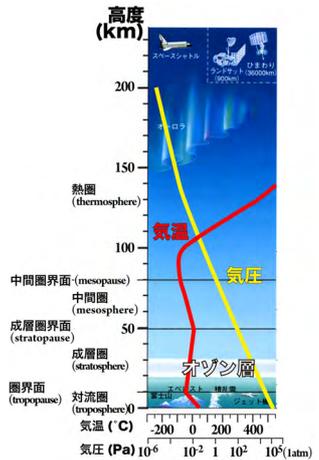
## 太陽について

反応	分率
$p + p \rightarrow \text{H} + e^+ + \nu$	99.75%
$p + e^- + p \rightarrow \text{H} + \nu$	0.25%
$3\text{H} + p \rightarrow \text{He} + \gamma$	
$3\text{He} + \text{He} \rightarrow \text{He} + 2p$	86%

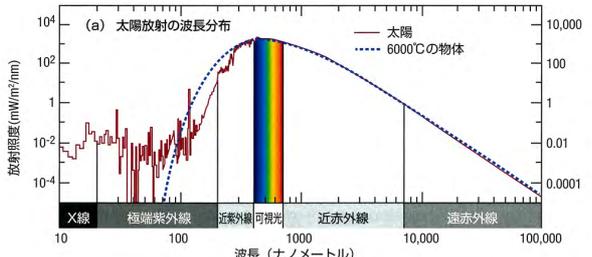


## (1) 地球の大気構造

**熱圏**  
 ① 太陽の紫外放射による電離・解離による加熱: 高度ほど高温  
 ② 重力的に成層  
**中間圏**  
 ① O<sub>3</sub>の紫外吸光による加熱とCO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O等による赤外放射冷却  
**成層圏**: 高度25-50km付近の温度極大まで。  
 ① O<sub>3</sub>の紫外放射吸収加熱とCO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>の赤外放射冷却  
 ② O<sub>3</sub>の主要部は成層圏にあり, その中心は中緯度で25km付近  
**対流圏**: 高度15km付近に現れる最初の温度極小まで。  
 ① 温度(密度)的に不安定  
 ② 圏界面は赤道(17)極域(8km)



## (1) 光について



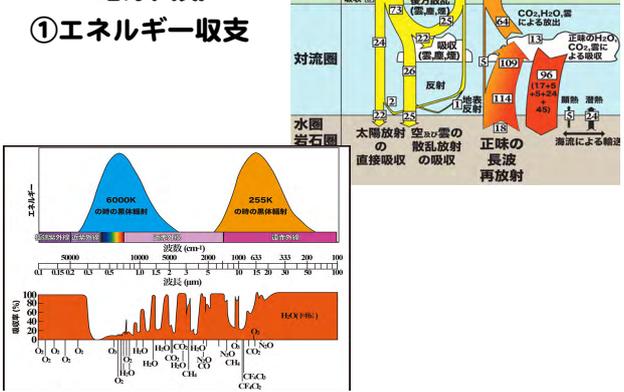
太陽放射スペクトル  
 大気外~6000Kの黒体  
 輻射スペクトルに近似→可視光の所にピーク

## 太陽定数(Fs)とは

黒体放射を考えると太陽が放射するエネルギーは  
 $E_s = \sigma T_s^4$  (J/m<sup>2</sup>)  
 太陽全体の放射エネルギー  
 $E_s = 4\pi R_s^2 \sigma T_s^4$   
 Ts: 太陽の黒体放射の温度(5770 K)  
 ステファン-ボルツマン定数:  $\sigma = 2\pi^5 k^4 / 15 c^2 h^3 = 5.67 \times 10^{-8} (W/m^2 K^4)$   
 プランク定数:  $h = 6.63 \times 10^{-34} Js$ , ボルツマン定数:  $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$   
 Rs: 太陽の半径  $\sim 7 \times 10^8 km$ , d: 太陽と地球の距離  $1.5 \times 10^8 km$   
**地球への放射エネルギー(Fs 5770Kに相当)**  
 $F_s = E_s / 4\pi d^2 = 4\pi R_s^2 \sigma T_s^4 / 4\pi d^2 = \sigma T_s^4 (R_s^2 / d^2) = 1370 W/m^2$   
**地球への全入射エネルギー:**  $\pi R_e^2 F_s$   
 単位表面積あたり  $\pi R_e^2 F_s / 4\pi R_e^2 = F_s / 4$   
 地球の散乱断面積:  $\pi R_e^2$ ,  $R_e$ : 地球の半径  
 ① 地球の有効温度(放射平衡温度)を計算せよただし, 地球全体のアルベド(A)を0.28とする。有効温度とは宇宙から見た時の地球の黒体放射温度。  
 解答:  
 \* 地球への全入射太陽エネルギーは  $\pi R_e^2 F_s$ 。アルベドを考慮し, 地球表面に達する単位表面積あたりのエネルギーは  $F_s(1-A)/4$   
 \* 有効温度を  $T_e$  とすると, 黒体放射を仮定して,  $\sigma T_e^4$   
 \* 地球表面に入射するエネルギーと放射エネルギーが釣り合っているとすると  $F_s(1-A)/4 = \sigma T_e^4$ ,  $T_e = [F_s(1-A)/4\sigma]^{1/4} = 257K$

## (3) エネルギー収支と地球大気

### ① エネルギー収支



## ② 分子の構造と吸収

水分子 (p ≠ 0) 二酸化炭素分子 (p = 0, 赤外吸収しない)  
 対称伸縮振動: 2738 nm, 7776, 7204 nm  
 非対称伸縮振動: 2656 nm, 4257 nm  
 変角振動 (折れ曲がり): 6269 nm, 14992 nm  
 p: 双極子モーメント ~電荷の偏り~  
 水分子と二酸化炭素分子の振動の様式と吸収波長  
 水と二酸化炭素分子は回転によって長波長の電磁波(遠赤外線)を吸収

温室効果ガスの特徴(赤外線をよく吸収する分子)  
 ① 極性のある分子(ΔQ: 極性の大きさ, X(N<sub>2</sub>やO<sub>2</sub>))  
 ② 振動により結合長が変化(Δq: 結合長の変化量)  
 赤外線の吸収量: δμ (= ΔQ \* Δq) の2乗に比例

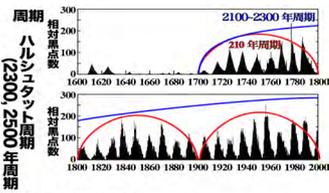
## (4) 各惑星の物理的特性と大気や温度の比較

特性	金星	地球	火星
全質量 (10 <sup>27</sup> kg)	5	6	0.6
半径 (km)	6049	6371	3390
大気の質量 (割合)	100	1	0.06
表面気圧 (atm)	90	1	0.008
太陽からの距離 (10 <sup>6</sup> km)	108	150	228
太陽定数 (W/cm <sup>2</sup> )	2613	1380	589
アルベド (%)	75	30	15
雲量 (%)	100	50	変動する
有効放射温度 (°C)	-39	-18	-56
表面温度 (°C)	427	15	-53
温室効果による温度上昇 (°C)	446	33	3
N <sub>2</sub> (%)	<2	78	<2.5
O <sub>2</sub> (%)	<1 ppmv	21	<0.25
CO <sub>2</sub> (%)	>98	0.035	>96
H <sub>2</sub> O (%)	1 × 10 <sup>-4</sup> - 0.3	3 × 10 <sup>-4</sup> - 4	<0.001
SO <sub>2</sub> (%)	150 ppmv	<1 ppbv	0
Ar (%)	ppmv	0.9	1.6
雲の組成	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	塵, H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub>

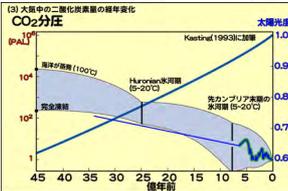
太陽定数: 太陽からの入射エネルギー量 → 太陽からの距離に依存。  
 有効放射温度: 宇宙から見た時の地球の温度: (入射エネルギー) - (入射時の大気による吸収) - (放射時の大気による吸収: 温室効果)

地球のリズムの周期：10~100万年

ヘル周期  
(黒点周期と磁極反転)  
(シユワーベ周期)  
太陽黒点周期  
ドゥイリエ周期(210年)  
グライバーク周期(87年)  
本陽大期(シユース)  
トウリエ周期(210年)



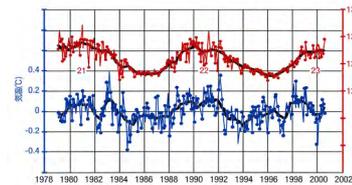
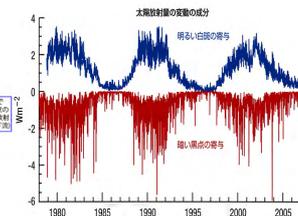
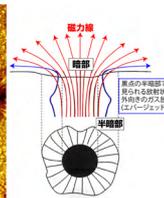
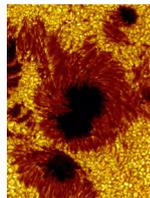
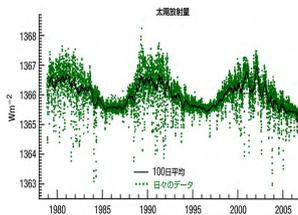
太陽黒点



## 黒点周期と太陽の活動



黒点と白斑



(1) 黒点周期(太陽放射量と良い相関)ただし、絶対量があわない。  
0.1%→0.06°Cの変動。(実際は0.12°C変動)

