

p86 第5章 水と大気の循環

研究室7-107

<http://www.stes.yz.yamagata-u.ac.jp/>

p86 5-1 熱と物質

-(1) 熱の伝わり方

熱の移動には、物質を通して起こる熱伝導と対流、物質の媒介なしでエネルギーが電磁波の形で空間を伝わっていく熱放射の3通りがある。

(厳密には熱伝導と熱放射)

魔法瓶は、熱いお湯や冷たい水などを入れて、3通りの熱の移動を妨げるように作られている。

その構造は二重容器で、その間を真空にし、伝導と対流による熱の輸送を妨げている。

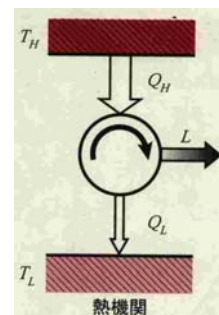
さらに、二重容器の内面を銀メッキすることで、熱放射を反射させ、熱放射の出入りを妨げている。

p45 4.1.2 カルノーの考え-熱素説

- (1)最大熱効率を得るための熱機関は?
- (2)作動流体でその効率は変わるのか?
- (3)熱⇒仕事 変換に限界はあるのか?

熱: 系の内部エネルギーを他の系に輸送する時のエネルギー。熱はこの時しか事象としては現れない。熱素という物質としての実態はない。

熱力学 日本機械学会



熱、それは実体ではない

理想気体で言えば、1自由度当りの運動エネルギーは絶対温度と次の関係がある $\bar{e} \equiv kT/2$

例えば振動エネルギーでも質点の運動エネルギーも同じ様に、動きの活発なものからそれらエネルギーは静的なものへと伝播する。即ち熱は高温から低温へと伝わる。

熱: 系の内部エネルギーを他の系に輸送する時のエネルギー。熱はこの時しか事象としては現れない。熱素という物質としての実態はない。

p87 表5-1 熱伝導率?

表5.1 常温 (20℃) での熱伝導率 (k)

| 物質 | k (J/(m·s·K)) | 物質 | k (J/(m·s·K)) |
|--------|-----------------------|-----|-----------------------|
| アルミニウム | 1.13×10^{-2} | 空気 | 2.37×10^{-6} |
| 金 | 2.97×10^{-2} | 水 | 5.9×10^{-5} |
| 銀 | 4.18×10^{-2} | 綿 | 7.96×10^{-6} |
| 鉄 | 0.49×10^{-2} | 毛布 | 4.2×10^{-6} |
| 鉛 | 0.35×10^{-2} | ガラス | 5×10^{-5} |
| コンクリート | 8.4×10^{-5} | 土 | 1.38×10^{-5} |

kは10²の意味とも取れるがそれでもおかしい。例えばアルミの熱伝導率は次表のように240W/(mK)

なので一桁小さい。著者にも指摘して「訂正した」との返事があったが皆さんの改訂版ではどうでしょうか。

表5-a 金属熱伝導率-1

| 物質名 | 温度 T / K | 密度 ρ / kg/m ³ | 比熱 c / kJ/(kg·K) | 熱伝導率 λ / W/(m·K) | 熱拡散率 α / mm ² /s | 線膨張率 β / K ⁻¹ | 電気抵抗率 ρ _e / μΩ·cm | 融点 T _m / K | 融解熱 ΔH _f / kJ/kg |
|-----------|----------|--------------------------|------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------------|---|-----------------------------|
| 銀 Ag | 150 | 10 570 | 0.214 | 432 | 192 | 16.9 | 0.06 | T _m =1235.08 K ΔH _f =105 kJ/kg | |
| | 250 | 10 510 | 0.232 | 428 | 176 | 18.4 | 1.27 | | |
| | 300 | 10 490 | 0.237 | 427 | 174 | 19.0 | 1.41 | | |
| | 400 | 10 300 | 0.248 | 405 | 161 | 21.5 | 3.42 | | |
| | 800 | 10 160 | 0.258 | 389 | 149 | 23.7 | 4.78 | | |
| | 1 000 | 10 030 | 0.272 | 374 | 137 | 25.9 | 5.8 | | |
| アルミニウム Al | 150 | 2 702 | 0.886 | 248 | 132 | 16.3 | 1.00 | T _m =933.3 K ΔH _f =395 kJ/kg | |
| | 200 | 2 698 | 0.861 | 237 | 109 | 20.3 | 1.57 | | |
| | 250 | 2 693 | 0.860 | 235 | 106 | 21.8 | 2.14 | | |
| | 300 | 2 688 | 0.905 | 237 | 96.8 | 23.2 | 2.75 | | |
| | 400 | 2 641 | 1.04 | 232 | 83.7 | 28.4 | 6.35 | | |
| | 800 | 2 585 | 1.14 | 220 | 73.6 | 34.9 | 8.95 | | |
| 金 Au | 150 | 19 420 | 0.129 | 328 | 140 | 12.8 | 1.05 | T _m =1337.4 K ΔH _f =64.4 kJ/kg | |
| | 250 | 19 340 | 0.126 | 320 | 131 | 13.9 | 1.45 | | |
| | 300 | 19 300 | 0.129 | 315 | 128 | 14.2 | 2.25 | | |
| | 400 | 19 040 | 0.142 | 304 | 115 | 15.9 | 4.95 | | |
| | 800 | 18 860 | 0.147 | 292 | 107 | 17.0 | 7.00 | | |
| | 1 000 | 18 680 | 0.151 | 278 | 99.1 | 18.8 | 9.25 | | |
| 1 200 | 18 440 | | 262 | 91.3 | 20.8 | 11.25 | | | |

表5-b 金属熱伝導率-2

| 物質名 | 温度 T K | 密度 ρ kg/m³ | 比熱 c kJ/(kg·K) | 熱伝導率 λ W/(m·K) | 熱膨張率 α mm/m | 比熱容量 γ kJ/kg·K | 電気抵抗率 ρ _e μΩ·cm | 融点 T _m K | 沸点 T _b K | 融点 ΔT _m K |
|--------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 銅 Cu | 150 | 8990 | 0.382 | 428 | 147 | 12.8 | 0.05 | 1356 | 2733 | 1418 |
| | 250 | 8930 | 0.376 | 404 | 133 | 13.9 | 1.25 | | | |
| | 350 | 8890 | 0.366 | 389 | 117 | 16.0 | 1.70 | | | |
| | 450 | 8780 | 0.425 | 362 | 102 | 18.9 | 3.35 | | | |
| | 550 | 8660 | 0.447 | 321 | 96.8 | 23.3 | 4.83 | | | |
| | 650 | 8560 | 0.471 | 287 | 98.3 | 22.4 | 6.25 | | | |
| 鉄 Fe | 150 | 7850 | 0.366 | 104 | 49.4 | 7.9 | 3.3 | 1808 | 2733 | 1855 |
| | 250 | 7850 | 0.422 | 86.5 | 26.0 | 11.0 | 7.6 | | | |
| | 350 | 7870 | 0.442 | 86.3 | 22.7 | 11.9 | 9.7 | | | |
| | 450 | 7770 | 0.365 | 54.7 | 12.4 | 13.1 | 16.5 | | | |
| | 550 | 7700 | 0.680 | 42.3 | 8.14 | 18.2 | 40.5 | | | |
| | 650 | 7530 | 1.03 | 32.4 | 4.25 | 16.6 | 95.3 | | | |
| アルミニウム Al | 150 | 2700 | 0.880 | 202 | 23.5 | 23.5 | 0.026 | 933 | 2733 | 1800 |
| | 250 | 2700 | 0.880 | 167 | 8.71 | 23.5 | 0.026 | | | |
| | 350 | 2700 | 0.880 | 167 | 8.71 | 23.5 | 0.026 | | | |
| チタン Ti | 150 | 4510 | 0.526 | 21.9 | 8.6 | 13.1 | 0.35 | 1941 | 2733 | 2550 |
| | 250 | 4510 | 0.526 | 21.9 | 8.6 | 13.1 | 0.35 | | | |
| | 350 | 4510 | 0.526 | 21.9 | 8.6 | 13.1 | 0.35 | | | |

環境エネ5章 26

表5-c 断熱材熱伝導率

| 物質名 | 温度 T K | 密度 ρ kg/m³ | 比熱 c kJ/(kg·K) | 熱伝導率 λ W/(m·K) | 熱膨張率 α mm/m | 備考 |
|-----------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|----------------|------------------------|
| 水 | 273 | 917 | 2.0 | 2.2 | 1.2 | |
| | 300 | 920 | 1.6 | 3.1 | 2.1 | |
| | 373 | 921 | 1.4 | 3.5 | 2.7 | |
| 氷 | 273 | 200 | | 0.15 | | |
| | 273 | 400 | | 0.34 | | |
| | 273 | 800 | | 1.3 | | |
| 発泡スチロール | 100 | 154 | | 0.035 | | (空気を CO ₂) |
| | 250 | 154 | | 0.039 | | |
| 発泡ポリスチレン | 100 | 200 | | 0.032 | | (空気を含む) |
| | 250 | 200 | 0.83 | 0.041 | 0.30 | |
| グラスウール(1) | 293 | 32 | 0.81 | 0.034 | 1.29 | (空気の隙) |
| | 450 | 32 | | 0.037 | | |
| | 650 | 16 | 0.87 | 0.051 | 3.7 | |
| グラスウール(2) | 293 | 16 | | 0.037 | | (空気の隙) |
| | 450 | 16 | | 0.037 | | |
| | 650 | 16 | | 0.037 | | |
| ロックウール(1) | 293 | 80 | | 0.030 | | (空気の隙) |
| | 450 | 80 | | 0.037 | | |
| | 650 | 80 | | 0.040 | | |
| ロックウール(2) | 293 | 300 | | 0.040 | | (空気の隙) |
| | 450 | 300 | | 0.040 | | |
| | 650 | 300 | | 0.041 | | |

環境エネ5章 27

p87 対流による熱の移動

流体(気体や液体など)では、熱の移動は、伝導よりも流体自身の移動によって運ばれる方が大きい。

やかんで水を沸かすときや、風呂の水を下から熱する場合、床に置いたストーブで部屋を暖房する場合などでは、流体の中の温度差で密度差が大きくなり、流体の中に**自然対流**が発生して熱の移動が効果的に行われる。

環境エネ5章 28

p87 強制対流による熱の移動

扇風機の風のように、力学的に引き起こされた流体の流れは、**強制対流**と呼ばれる。

環境エネ5章 29

p87 Newtonの冷却則

Newtonは「高温の壁面から低温の流体粒子へ熱伝導する熱輸送」は、十分離れた流体の温度 T_{∞} と接触面 T_s との温度差・接触面積 A に比例する形で整理しようとした。

$$Q = Ah(T_s - T_{\infty}) \quad h: \text{熱伝達率}$$

環境エネ5章 30

p88 (2) 比熱と熱容量

質量 1kg の物質に $\Delta q[\text{J}]$ の熱を与えた時に、 $\Delta T[\text{K}]$ だけ上昇するものとする。物質の比熱 c は次の様に定義する。

$$c \equiv \Delta q / \Delta T [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$$

ある物体の温度を1度だけ上昇させるのに必要な熱量をその物体の熱容量と言う。

環境エネ5章 31

p89 ㊦ (3) 物質の状態変化

多くの物質は温度と圧力によって、固体・液体・気体のいずれかの状態をとる。

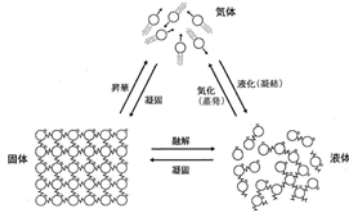


図3.1 物質の相転移

環境エネ5章

32

p89 ㊦ 相変化には潜熱が介在

固体が液体に相転移するのに必要な単位質量当たりの熱(潜熱)を融解熱、逆は**凝固熱**という。その値は同じ。

液体が気体に相転移するのに必要な単位当たりの潜熱を気化(蒸発)熱、逆は**凝縮熱**という。

固体から気体に相転移するのに必要な潜熱を**昇華熱**、逆も昇華熱という。

気化熱(水)として吸収したエネルギーは、水分子間の結合を切り離すために用いられる。

環境エネ5章

33

p89 ㊦ 沸点と気化熱

表3.3 沸点と気化熱

| 物質 | 沸点(°C) (1 atm) | 気化熱(kcal/kg) (沸点で) |
|-----------|-------------------|-----------------------|
| 水銀 | 357.0 | 68 |
| 水 | 100 | 539 |
| エーテル(エチル) | 34.5 | 84 |
| アルコール | 78.3 | 205 |
| アンモニア | -33.4 | 325 |
| 二酸化炭素 | -78.5 | 138 |
| 硫化水素 | -61 | 132 |
| 塩素 | -34.6 | 67 |
| 空気 | -194 | 47 |
| 酸素 | -183.0 | 51 |
| 窒素 | -195.8 | 48 |
| 水素 | -252.8 | 108 |

環境エネ5章

34

水の相図

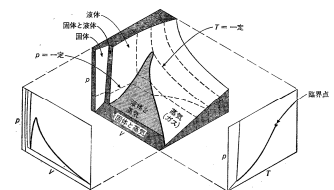


図3.6 p-v-T 曲線の p-v 面と p-T 面への投影

水蒸気はある圧力以上では液化する。

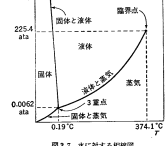


図3.7 水に対する相図

W Warren H. Giedt(久我 修訳)、工科系のための熱物理学、みすず書房(1974),p.64

環境エネ5章

35

p90 ㊦ 5-2 水の循環

1) 水の由来

地球の水はどこから来たのか? その答えの1つは隕石。

石質隕石の中に炭素質コンドライトという隕石があり、この隕石が分子の状態の水を結晶の中に含んでいる。

「結晶中の水」とは結晶構造に**水分子**として組み込まれた状態の水分子。

叩き割ったからといって液体の水が出て来る訳ではない。

宇宙平均ではMax.で3%という説あり、海洋だけでは0.02%。残りは地球内部に隠れている。

環境エネ5章

36

p90 ㊦ 結晶水を含む例として石膏

石膏を加熱すると石膏は硬石膏といわれる別の物質に変化し、**水**が分離される。

地球に炭素質コンドライト型隕石が衝突する場合、一定の大きさ以上の隕石は燃え尽きることなく地表に到達する。

炭素質隕石でない普通の球粒隕石は、最も数の多いタイプの隕石だが、含まれる結晶水は質量の0.1%程度しかない。

ハレー彗星の場合は、その成分のほとんどは水であり、質量は100兆kgもあると考えている。

環境エネ5章

37

p90 ㊦ ハレー彗星 周期彗星第1番

核は約 8 x 8 x 16 km の大きさでジャガイモのような不定形をしている。核の密度は 0.1-0.25 g/cm³ と推定されている。核の表面は非常に暗い色をしており、アルベドは約0.04と非常に小さい。

探査機ジオットによる調査で彗星核表面には炭素が多く存在することが明らかになっている。

核から放出された物質の組成(体積比)は、水(氷)が80%、一酸化炭素が10%、メタンとアンモニアの混合物が2.5%などとなっており、他に炭化水素や鉄、ナトリウムなどが微量に含まれる。またシアンガスもわずかに含まれる。



1986年3月8日に撮影されたハレー彗星

p90 ㊦ 液体の状態の水が海を形成

(2) 海の誕生

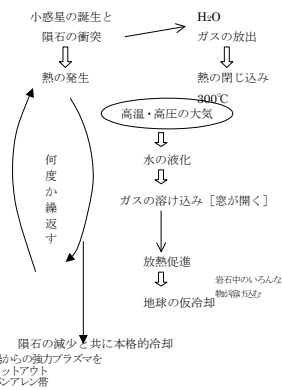
地球に誕生した水は、地球大気や地表が水の臨界温度374°C以下に冷却されるまで水蒸気(ガス)。

地表面温度が臨界温度以下になると、大気中の水蒸気は凝結し細かな水滴である雲となった。

雲からは雨が降り、川が出来、水溜りに塩類が溶け込み、海が出来鉄等の金属が溶け込んだ。

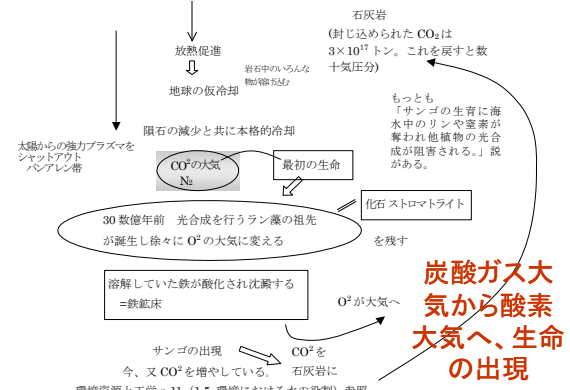
太陽に近い金星は二酸化炭素が大気のほとんどを占め、480°Cの灼熱の世界である。

地球は太陽からの距離と質量が適度であった。



火の玉地球から冷却

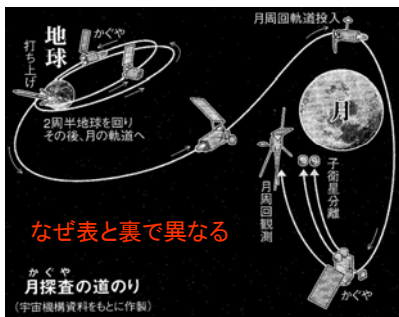
マグマオーシャンそして冷却



炭酸ガス大気から酸素大気へ、生命の出現

かぐや葉月16日'07 打ち上げ

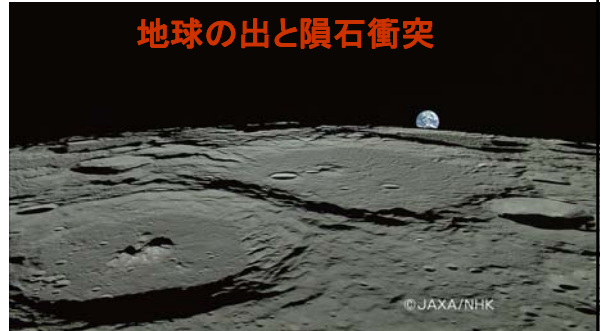
月の誕生は、地球と同じ時期と場所
誕生直後は全体が厚さ数百キロメートルという高温の「マグマの海」で覆われていて徐々に冷え、地殻とマントルに分離



なぜ表と裏で異なる

かぐや 月探査の道のり (宇宙機構資料をもとに作成)

地球の出と隕石衝突



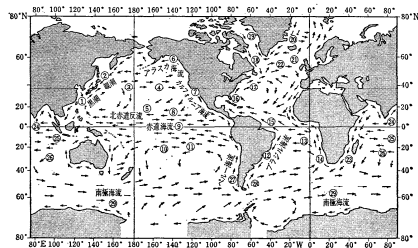
・プラスチック : Plekett [82.1N/174.3E 直径109km] :左
・ロジェストベンスキー : Rozhdestvenskiy [85.2N/166.4W 直径177km] :右
かぐや搭載のハイビジョンカメラ 2008年4月5日に、HDTVによって撮影された画像

p90 太陽熱が地球大気を掻き回す

太陽熱は、赤道付近では強すぎ、極付近では弱すぎる。
 その間を水の**気化熱**として水蒸気に含まれて移動し、降雨降雪で地表に戻り
 温度が**均一**で調和の取れた地球環境を作り出している。

p91 (3) 表層海流と海洋大循環

海水は地球表面の**70.8%**を覆い、地球にある水の**97.5%**を占めている。
 表層の海流は主に地球の**自転**と大気の大循環の影響を受けて発生する。
 黒潮やメキシコ湾流は偏西風や貿易風などのように海面を一定の方向に吹く風の影響を受けた**吹送流**である。



ロ. 表層の水の流れ

図 5.10 表層のおもな海流
 ① 黒潮、② 親潮、③ 黒潮続流、④ 北太平洋海流、⑤⑥⑦ 北赤道海流、⑧ アラスカ海流、⑨ カリフォルニア海流、⑩ 北赤道逆流、⑪ 南赤道海流、⑫⑬ 南赤道逆流、⑭ ブラジルの海流、⑮ ペンタゴン海流、⑯ アラゴ海流、⑰ フロリダ海流、⑱ 湾流、⑲ ユタドール海流、⑳ 西アフリカ海流、㉑ 東アフリカ海流、㉒ アーモング海流、㉓ 北大西洋海流、㉔ アゴラス海流、㉕ 赤道逆流、㉖ ベルギー海流またはアンボルト海流、㉗ フォークランド海流、㉘ 南極海流

河村 武、岩城英夫編集、環境科学 I、朝倉書店(1992 6刷)、p162
 環境エネ5章

(4) 海洋中心のエネルギー収支

(4) エネルギーの収支

イ. 地球のエネルギー収支

水が海面から大気へ蒸発で運ぶ熱量
 =36PW (peta ≡ 10¹⁵)

vs

人類使用量の3600倍

人類のエネルギー消費量 10¹³W

太陽定数 / 4 = 350w/m² の内、**66%** を受けている。

太陽定数「S[W/m²]」と人類消費エネルギー

人類のエネルギー消費量: 10¹³W ~

地球に降り注ぐ太陽エネルギーの**66%**を受け、
 水が海面から大気へ蒸発で運ぶ熱量 =36PW
 (peta ≡ 10¹⁵W) 程度。 **人類使用量の3600倍**

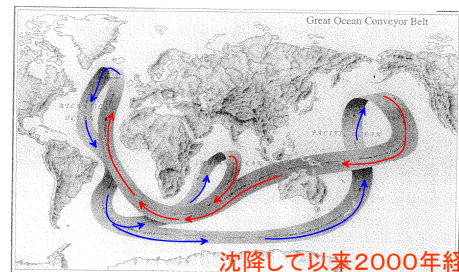
$$E_s = S \pi a^2 = 1400W / m^2 \times \pi \times (6400km)^2$$

$$= 1.4 \cdot 10^3 \times \pi \times 6.4^2 \times 10^{3 \times 2} \times 10^6 W$$

$$= 1.8 \cdot 10^{2+5+6+6} W = 1.8 \cdot 10^{4+15} W$$

$$\approx 10^6 \times [\text{人類エネルギー消費量}]$$

p92 塩分濃度や温度差による密度流



沈降して以来2000年経過

図 5.3 世界の海水循環を示す模式図(ベルトコンベアー循環)——
 北大西洋で沈んだ海水がインド洋と太平洋で湧昇して北大西洋まで流れている。(Broecker, 1987より)

地球上の水循環

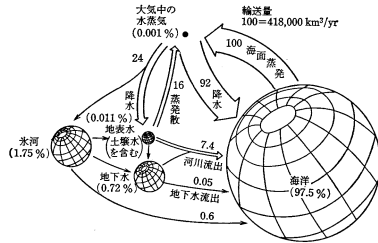


図 3.28 地球上の水循環 (概観, 1977)
球の体積は貯留量, ()内の数字は地球上の水の総量(1.38×10⁶km³)に対する%。われわれの生活に密接な関係をもつ地表水は、量は少ないが輸送量が多い。

河村 武、岩城英夫編集、環境科学 I、朝倉書店(1992 6刷),p.86

襟裳岬の緑化事業



文月2日 '09 ここから

5-3 大気の循環の前

p93 5-3大気の循環

(1)地球の気温を平滑化する大気
赤道付近は太陽のエネルギーを最も多く受けるため、大気は暖まり地表の水は蒸発する。その結果大量に水蒸気を含む湿った大気が形成される。湿った空気とは水蒸気の割合が多い空気のこと。「湿った空気」は上昇して気圧が下がり膨張して温度が下がるが、水蒸気が雲(水滴)になるときに**潜熱**を放出するので温度があまり下らない。

p93 地球規模の大循環

結果として、周りより温度の高い軽い空気塊となり上昇を続けて低気圧を形成する。
低緯度の循環では、赤道付近の湿潤な軽い大気は赤道低気圧を形成し上昇気流となつて対流圏の上限まで進み、北、あるいは南に向かって進む。中緯度付近まで来ると大気は赤道付近より冷えて下降し、中緯度高気圧を形成する。

p94 地球規模の大循環模式図

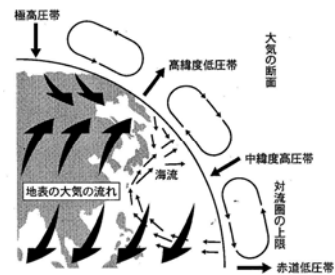


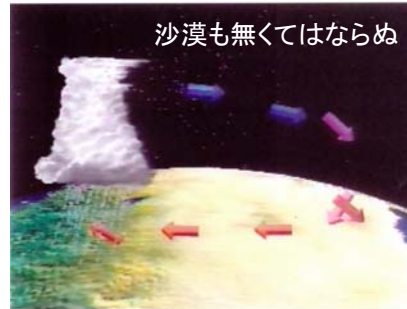
図5.4 地球規模の大気の大循環

日本付近など中緯度では、この大気の大循環の影響を受けて、西から東に天気が変わっていく。

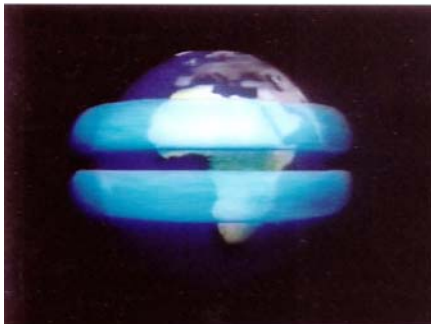
p93 中緯度に大気が降りてくる高圧帯

そこでは大気は断熱圧縮で温度上昇し乾燥した大気となる。
 南北半球の中緯度帯にはこうした理由で形成された砂漠が分布している。
 地球の大気は重力により引きつけられ、一般的には上層ほど大気は薄くなる構造をしている。

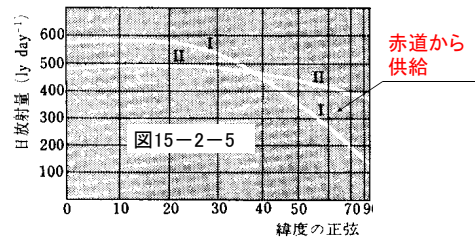
構造的に出来るサバンナと沙漠



構造的な両半球における大循環



太陽放射 I と大気から宇宙空間への長波放射 II

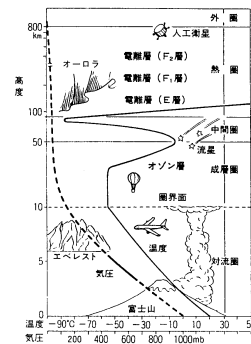


曲線 I は、大気-地球系が吸収した太陽放射、
 曲線 II は大気から宇宙空間へ逃げてゆく長波放射で(両者の全地球表面での積分値は等しい。)
 それらの曲線は38° Nで交差している。

p93 オゾン層は、紫外線吸収で温度上昇

上空約30km付近を中心に分布するオゾン層は、紫外線を吸収して温度が上昇し、上層ほど温度が高いという成層状態となり、成層圏を形成している。
 成層圏が存在することは上昇すると温度が下がる構造の対流圏に上限が出来ていることを意味し、大気はもう上昇できない。

その結果、大気の動きは対流圏の中で循環することになり、地球の大気が引力の届かない所まで広がることなく、地球の大気は逃げない構造が出来上がっている。



成層圏の高温層の存在

が、水蒸気を含んだ空気塊の上昇を阻み、対流圏を存在させている。対流圏の存在が地球に降り注ぐ太陽エネルギーを和らげ穏やかな地球環境を実現している。
水蒸気を含んだ空気塊の方が低温で重い

図 2-1 地球大気の鉛直構造 [坂井「地球環境論 15講」, 東京教学社 (1983) より]