

2. 地球の熱収支と地球温暖化

2・1 地球の熱収支方程式

(a) 大気がないとするとき

$$\begin{aligned} \text{地球の熱放射} &= \text{太陽からの入射光} \\ \varepsilon \sigma T^4 &= (1/4)S (1 - \alpha_m) \end{aligned} \quad (2-1)$$

ε : 地表面の放射率 (0.95)
 σ : ステファン・ボルツマン定数 ($5.674 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)
 T : 地球の平均温度 [K]?
 S : 太陽定数 ($1.382 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$)
 α_m : 地球の平均アルベド (Albedo、反射率、0.33)

(b) 大気があるとき

$$I = Q (1 - \alpha) \quad (2-2)$$

I : 地球からの有効放射量
 Q : 日射量 ($20.8 \text{ kcal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$)
 α : アルベド (Albedo、反射率、0.33)

Budyko(1971)が1963年に行った260地点の3120データより、 I [$\text{kcal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$]は次式で与えられる。

$$I = a_1 + b_1 t_m - n (a_2 + b_2 t_m) \quad (2-3)$$

$a_1 = 14.0$ $a_2 = 3.0$
 $b_1 = 0.14$ $b_2 = 0.1$
 n : 0.1を単位とする雲量 (0~1)

式(2-2)および(2-3)より、 t_m [°C]?

α_n : 完全曇天時 0.46
 α_0 : 完全晴天時 0.20
 $\alpha = \alpha_n n + \alpha_0 (1 - n)$

クイズ : 地球温暖化で雲の量が増えたとき、地球の平均気温はどうなるだろうか? $n = 0.6$ のときの平均気温を計算しなさい。

アルベド (Albedo、反射率)

| | |
|--------|----------|
| 完全反射面 | 1 |
| 新雪 | 0.8~0.95 |
| 雲 | 0.5 |
| 沙漠 | 0.25 |
| 住宅地 | 0.2 |
| アスファルト | 0.15 |
| 森林 | 0.1 |
| 耕地 | 0.1 |
| 完全黒体 | 0 |
| 水面 | 0~1 |

2・2 地表面での熱収支方程式

(太陽熱入射を正として、反射や長波長熱放射など地表・水面から出る場合に負号を付けている。)

表 2-1 大陸と海洋の熱収支 [kcal·cm⁻²·month⁻¹]

| | 大陸 | | | | | | 海洋 | | |
|------------|-------|-----|------|-----|-----|---------|-----|-----|------|
| | ヨーロッパ | アジア | アフリカ | 北米 | 南米 | オーストラリア | 大西洋 | 太平洋 | インド洋 |
| <i>R</i> | 39 | 47 | 68 | 40 | 70 | 70 | 82 | 86 | 85 |
| <i>-LE</i> | -24 | -22 | -26 | -23 | -45 | -22 | -72 | -78 | -77 |
| <i>-P</i> | -15 | -25 | -42 | -17 | -25 | -48 | -8 | -8 | -7 |

R : 日射量、 *LE* : 蒸発による熱流束、 *P* : 地表面から大気への乱流熱伝達熱流束

2・3 熱の水平移動を考慮した平均温度 (緯度毎に平均気温を求める)

[OHP]

表 2-2 大気系の熱収支成分の緯度平均値 [kcal·cm⁻²·month⁻¹]

| | 緯度 | <i>R</i> | <i>L (E - r)</i> | <i>F_a</i> | <i>F_b</i> |
|----|-------|----------|------------------|----------------------|----------------------|
| 北緯 | 70-60 | -49 | 8 | 33 | 8 |
| | 60-50 | -30 | 15 | 4 | 11 |
| | 50-40 | -12 | 9 | -4 | 7 |
| | 40-30 | 4 | 13 | 0 | 9 |
| | 30-20 | 14 | -31 | 16 | 1 |
| | 20-10 | 23 | -11 | -2 | -10 |
| | 10-0 | 39 | 33 | -48 | -24 |
| 南緯 | 0-10 | 31 | 14 | -24 | -21 |
| | 10-20 | 28 | -16 | -9 | -3 |
| | 20-30 | 20 | -32 | 8 | 4 |
| | 30-40 | 9 | -19 | 4 | 6 |
| | 40-50 | -8 | 8 | -6 | 6 |
| | 50-60 | -29 | 27 | -9 | 11 |

R : 大気系の熱放射、 *L* : 水の蒸発潜熱、 *E* : 水の蒸発量、 *r* : 降雨量、
F_a : 大気圏における水平熱輸送量、 *F_b* : 水圏における水平熱輸送量

[OHP]

$$C = Q(1 - \alpha) - I = \gamma(t - t_p) \quad (2-4)$$

C : 大気圏および水圏を一緒にした水平熱輸送量 [kcal·cm⁻²·month⁻¹]

γ : 0.235 kcal·cm⁻²·month⁻¹·°C⁻¹

t : 緯度毎の平均温度 [°C]

t_p : 接地気層の地球全体の平均温度 [°C]

I : 地表からの有効放射 (放出する長波長放射-吸収した大気放射)

[OHP]

クイズ:

- (1) 式(2-2)~(2-4)を用いて、緯度毎の平均気温を求める式を導きなさい。

答え

$$t = \{Q(1 - \alpha) - a_1 + a_2 n + \gamma t_p\} / (\gamma + b_1 - b_2 n) \quad (2-5)$$

- (2) 雲量が 0.5 で、地球のアルベドもそのまま太陽放射が 0.1%変化すると、地球の平均気温はどれほど変化しますか？
 (3) 地球の平均アルベドが 0.01 変化すると、地球の平均気温は何度上がりますか？

2・4 大気と海洋

木村龍治（東大海洋研究所）

地球内部からの熱量： $50 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$
太陽熱： $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

大気 1 cm^2 の気柱：約 1 kg
対流圏は全空気の 8 割
オゾン層は太陽放射を良く吸収する。＝成層圏と対流圏を分ける。
昼：地表面が加熱され対流混合層が発達する。
夜：放射冷却により大気が下方から冷却され安定な成層となる。
(接地逆転層)

海洋 平均水深 4 km ：約 400 kg
比熱 空気：水 = 1 : 4
蓄えられる熱量は、海水が大気の 1000 倍以上大きい。
海水は、 70 m で可視光線の 99% を吸収してしまう。

熱塩循環

平均塩分濃度 3.5 %

昼：水分の蒸発により海面付近の塩分濃度が高くなる。

雨：海面付近の塩分濃度が低くなる。

海水：できれば海水の塩分濃度は高くなり、融ければ低くなる。

※ 「冷室効果？」海水が海面から深海底に潜り込めるのは南極大陸の周辺とグリーンランド沖に限られている。極域の海面における放射環境が海洋全体の水温を決定する。

※ 表層数百メートルの厚さの層のみ水温が顕著な緯度変化を示す。

※ 北半球の大気中に放出したガスは 1 年も経てば北半球全体に拡散する。海水の場合は、海面から沈み込んだ水が再び海面に戻るのに 1000 年のオーダーが必要になる。

2・5 温室効果と地球温暖化

南極やグリーンランドの氷床は 2000 m の深さで 16 万年前の情報が保存されている。

温室効果

3 原子分子からなる H_2O (0. 3%)、 CO_2 (350 ppm)、 O_3 (0. 1 ppm) が赤外線を吸収して、大気が透明であれば -18°C であるところ、地球の平均気温を 15°C に保っている。

地球温暖化

産業革命前の炭酸ガスの大気中濃度 280 ppm、1988 年で 350 ppm、2006 年現在 380 ppm

地球温暖化シミュレーション

炭酸ガス濃度 300 ppm から 600 ppm になったときのシミュレーション

1967 鉛直次元熱平衡モデル

Manabe and Wetherald, 米国海洋大気庁 (NOAA) 地球流体力学研究所 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)

大気大循環モデル (Atmospheric General Circulation Model, AGCM)

大気・海洋混合層モデル (A Coupled Ocean-atmosphere General Circulation Model, COGCM)

太陽定数 大気の上端 80 km に入射する太陽放射： 1.382 kW·m⁻²

