

## 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

地球の熱放射 = 太陽からの入射光

$$I [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}] = \varepsilon \sigma T^4 = (1/4)S (1 - \alpha_m) \quad (2-1)$$

$I$  : 地球からの長波長熱放射 [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ] = 地球が受ける太陽熱の短波長熱放射

$\varepsilon$  : 地表面の放射率 (0.95)

$\sigma$  : 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 ( $1.382 \text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ )

$\alpha_m$  : 地球の平均アルベド (Albedo、反射率、0.33)

#### (b) 大気があるとき

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。(彼が用いた  $S = 83.2 \text{kcal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{month}^{-1} = 1.344 \text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ )

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

$$a_1 = 14.0 \quad a_2 = 3.0$$

$$b_1 = 0.14 \quad b_2 = 0.1$$

$n$  : 0.1を単位とする雲量 (0 ~ 1)

式(2-1)および(2-2)より、 $t_m$ [°C]?

アルベドの雲量による変化

$$\alpha_n : \text{完全曇天時} \quad 0.46$$

$$\alpha_0 : \text{完全晴天時} \quad 0.20$$

$$\alpha = \alpha_n n + \alpha_0 (1 - n)$$

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<sup>-2</sup>·month<sup>-1</sup>; 1 kcal·cm<sup>-2</sup>·month<sup>-1</sup> = 0.01615 kW·m<sup>-2</sup>]

	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<sup>-2</sup>·month<sup>-1</sup>]

	緯度	<i>R</i>	<i>L</i> ( <i>E</i> - <i>r</i> )	<i>F<sub>a</sub></i>	<i>F<sub>b</sub></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<sub>a</sub>* : 大気圏における水平熱輸送量、 *F<sub>b</sub>* : 水圏における水平熱輸送量

[OHP]

$$C = Q(1 - \alpha) - I = \gamma(t - t_p) \quad (2-3)$$

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

$\gamma$  : 0.235 kcal·cm<sup>-2</sup>·month<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>

*t* : 緯度毎の平均温度 [°C]

*t<sub>p</sub>* : 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(2-1)~(2-3)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

$$t = \{Q(1 - \alpha) - a_1 + a_2 n + \gamma t_p\} / (\gamma + b_1 - b_2 n) \quad (2-4)$$

(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?

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  $1 \text{ cm}^2$  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  $\text{H}_2\text{O}$  (0. 3%)、 $\text{CO}_2$  (350 ppm)、 $\text{O}_3$  (0. 1 ppm) が赤外線を吸収して、大気が透明であれば  $-1.8^\circ\text{C}$  であるところ、地球の平均気温を  $15^\circ\text{C}$  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、2010 年現在 380 ppm を超えている

#### 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)

IPCC のホームページから、詳細な計算シミュレーションテキストをダウンロードできる。

資料： 太陽放射と地球放射

太陽定数 大気の上端 80 km に入射する太陽放射： 1.382 kW·m<sup>-2</sup>

