

# 太陽光エネルギーと地表温度について

(人間活動の抑制についての私的検討)

2017年05月18日

菅原 政治郎

# 1. 背景

約45年前に、一冊の本「原子炉と核反応入門」(ア・エヌ・プロツェンコ著 東京図書 1966年8月10日発行)を読んだことが有ります。その中で、心に引っ掛かる以下の文章が有りました。

「一般に地上では太陽からやってくるエネルギーの20%以上のエネルギーを発生させてはならないことも考慮する必要がある。そうしなければ地球は過熱しはじめる。」

プロツェンコ氏は20%の根拠を示さずに数値のみを掲載したので、それ程重く気に留めては居なかったのですが、近年の温暖化現象や、山賀進氏のホームページの「6・3 地球の温度」に数値は違いますが、「もし、太陽の放射がいまより少し(10%くらい)大きくなったり、あるいは人間が作り出すエネルギーが大きくなりすぎて…」と、プロツェンコ氏と同様の趣旨の文章が掲載されておりました。

(注: 山賀進氏の10%の根拠は、「自然の数理」島津康男et.al, 1975年2月28日、筑摩書房です)

又、西田進氏のインターネット資料に「温室効果ガスによる地表面の温度上昇」と言う資料が有りましたので、太陽光エネルギーが変動した場合、地表温度がどの様になるのかを検討してみたくおりました。

この愛おしい地球を温暖化から守り、見直すためにも、太陽光と地表温度について少々検討してみました。

## 2. 地表温度

地表温度には、太陽からの輻射エネルギー、太陽-地球間距離と大気存在が関係します。それらについて、以下に検討してみます。

### 2.1 太陽輻射エネルギー

太陽の全輻射エネルギーは、太陽の平均温度 $T_{sun}$ 、太陽の表面積 $S_{sun}$ が分れば、ステファン・ボルツマン定数 $\sigma$ を用いて式(2.1)により算出出来ます。

$$E_{sun} = \sigma \cdot T_{sun}^4 S_{sun} \quad \dots(2.1)$$

理科年表に拠る諸量は以下の通りです。

- ①ステファン・ボルツマン定数 $\sigma = 5.670367 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$  ( $\text{J/s/m}^2/\text{K}^4$ )
- ②太陽温度 $T_{sun}$  は、5777 K (Kelvin:熱力学温度で、イギリスの物理学者ウィリアム・トムソンに因むもの)です。
- ③太陽の半径  $r_{sun} = 6.960 \times 10^8 \text{ m} \Rightarrow S_{sun} = 6.08735 \times 10^{18} \text{ m}^2$

このため、太陽の輻射エネルギー  $E_{sun}$  は、以下となります。

$$\begin{aligned}
E_{sun} &= \sigma \cdot T_{sun}^4 S_{sun} \\
&= 5.670367 \times 10^{-8} \cdot (5777)^4 \cdot 6.08735 \times 10^{18} \\
&= 3.84458 \times 10^{26} \text{ J / s}
\end{aligned}
\tag{2.2}$$

## 2.2 太陽から受ける大気外の地球のエネルギー-Earth<sub>-EX</sub>

大気が無い場合の地球が太陽から受ける単位断面積当たりのエネルギーを Eearth<sub>-EX</sub> とすると、Eearth<sub>-EX</sub> は式(2.3)で与えられます。

$$Eearth_{-EX} = E_{sun} \cdot \theta / 4\pi / CSe \tag{2.3}$$

ここに、 $\theta$ : 太陽から見た地球の立体角、CSe: 地球の断面積、

立体角  $\theta$  は以下となります。

$$\begin{aligned}
\theta &= \frac{CSe}{Dse^2} = \frac{\pi \cdot r_e^2}{Dse^2} = \frac{1.27802 \times 10^{14}}{(1.4959787 \times 10^{11})^2} \\
&= 5.71067 \times 10^{-9} \text{ steradian}
\end{aligned}
\tag{2.4}$$

ここに、 $r_e$ : 地球の半径、Dse: 太陽-地球間距離。

以上より、地球が太陽から受ける単位断面積当たりのエネルギー(大気外)  $E_{earth\_EX}$  は、以下となります。

$$E_{earth\_EX} = \frac{E_{sun} \cdot \theta}{4\pi \cdot CSe} = \frac{1.74713 \times 10^{17}}{1.27802 \times 10^{14}} \quad \dots(2.5)$$
$$= 1367.06 \text{ J / s / m}^2$$

上記エネルギー  $E_{earth\_EX}$  を受けた場合の温度  $T_{earth\_EX}$  は、以下となります。

$$T_{earth\_EX} = \left( \frac{E_{earth\_EX}}{4\sigma} \right)^{1/4} = 278.63 \text{ K} = 5.48^\circ\text{C} \quad \dots(2.6)$$

太陽光エネルギーを全吸収する場合で大気が無い場合、地球の表面温度は約  $5.5^\circ\text{C}$  となり、この温度は東京における1月から2月中旬の平均気温に近いものです。又、年平均気温で見ると、フィンランドのヘルシンキ( $5.3^\circ\text{C}$ )、ロシアのペテルブルグ( $5.8^\circ\text{C}$ )、モスクワ( $5.8^\circ\text{C}$ )、アルゼンチンのUshuaia Aero ( $5.9^\circ\text{C}$ )が近い温度となっています。

ちなみに、ヘルシンキ(の6月の平均気温は $14.6^\circ\text{C}$ 、7月は $17.7^\circ\text{C}$ ですので、人間の社会活動には問題ない温度と考えられます。

## 2.3 アルベドの考慮

前節までは、アルベド=0、即ち、地球による太陽光の反射を無視した、太陽光の全吸収状態での温度を考慮しました。しかし、実際にはある程度の反射があるので、その効果を考慮する必要があります。

### 2.3.1 アルベドの種類

アルベド(albedo)とは、天体の外部からの入射光に対する、反射光の比で、反射能(はんしゃのう)とも言われています。アルベドには、以下に示す二種類のものが有ります。(Wikipediaに記載の原文のまま)

#### ボンドアルベド

入射光の総量に対する反射光の総量の割合である。入射角や反射角を問わない。通常は電磁波の波長も問わず、全帯域についてスペクトル密度を積分する。そのため、入射エネルギーに対する反射エネルギーの割合とも言える。ボンドアルベドは必ず1以下であり、鏡面反射でも乱反射でも、入射光を全て反射すれば1である。 **地球のボンドアルベド= 0.306**

#### 幾何アルベド

位相角 $0^\circ$  (入射光の方向へ反射する)への反射光の強さを、天体表面が完全ランバート面だと仮定した場合と比較する。ランバート面はその性質上、光源に垂直でも斜めでも、平面でも曲面でも、反射光の強さは同じである。そのため、より一般化し「同じ断面積の完全ランバート面と比較」と表現されることもある。鏡面反射が強ければ幾何アルベドはボンドアルベドより高くなり、1を超えることもある。 **地球の幾何アルベド= 0.367**

## 2.3.2 アルベドの選択

入射角や反射角を問わず、電磁波の波長も問わず、全帯域についてスペクトル密度を積分する入射エネルギーに対する反射エネルギーの割合であるボンドアルベドを使用します。

**Albedo= 0.306**

## 2.3.3 アルベド時の大気外の地球温度

式(2.6)と同様に、アルベド時の大気外の温度は、以下の様に求められます。

(注:アルベドに対して特別の記号は見られないため、本資料ではAbと記載します。)

$$T_{earth-EX,Ab} = \left( \frac{E_{earth-EX} \cdot (1 - Ab)}{4\sigma} \right)^{1/4} = 254.31K = -18.8^{\circ}C \quad \dots(2.7)$$

太陽光エネルギーが70%に減少すれば、温度が低下することは予想されることですが、約 $-19^{\circ}C$ は人間の生活活動としては低過ぎる温度と考えられます。ちなみに、理科年表における年平均値で見ると、カナダのユーレカ( $-18.8^{\circ}C$ )、ロシアの Oymyakon ( $-15.5^{\circ}C$ ) が近い温度です。

## 2.4 大気が存在する場合の地表温度

人間の生活空間は、大気に覆われたものです。このため、大気を含めた地表温度を考慮する必要があります。大気が存在することにより、太陽光の散乱・吸収が起こり地表に到達するエネルギーは少なくなりますが、大気が存在するために地表からの反射エネルギーを蓄積し、地表を暖める効果が有ります。

### 2.4.1 地球温度評価モデル

1章で言及しましたが、西田進氏の資料「**温室効果ガスによる地表面の温度上昇**」を基に、大気による太陽光の吸収・反射を繰り返すモデルを用い、地表面及び大気の温度を試算しました。**(西田氏のモデルでは、吸収・反射の繰り返しモデルは入っておりません)**

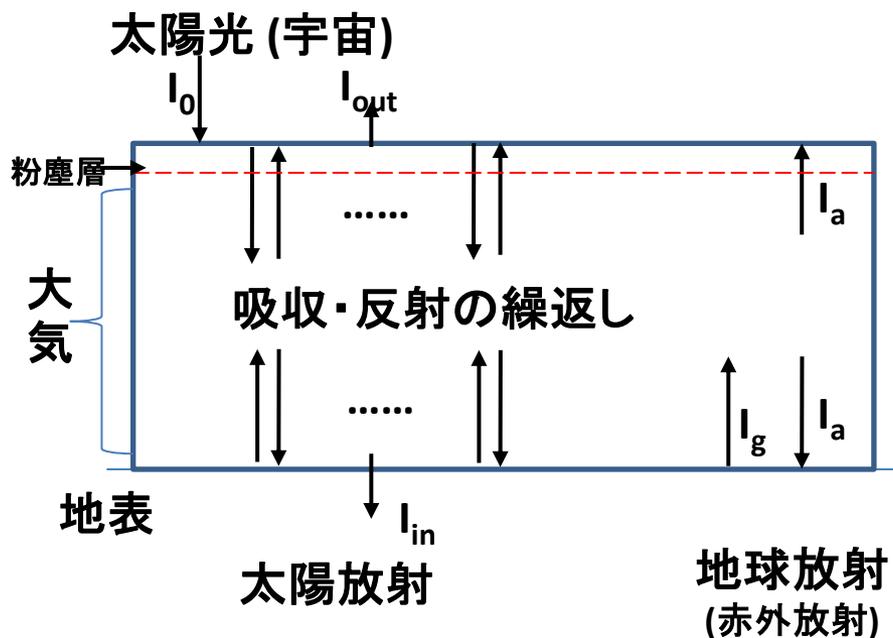


図1 太陽光の吸収・反射イメージ

ここに、

$I_0$ : 単位面積当たりの入射太陽光エネルギー ( $\text{J/s/m}^2$ )

$I_{\text{out}}$ : 粉塵層及び大気層により吸収・反射されて宇宙へ放出される太陽光エネルギー ( $\text{J/s/m}^2$ )

$I_{\text{in}}$ : 粉塵層及び大気層により吸収・反射されて地表へ吸収される太陽光エネルギー ( $\text{J/s/m}^2$ )

$I_g$ : 地球からの単位面積当たりの放射エネルギー ( $\text{J/s/m}^2$ )

$I_a$ : 大気からの単位面積当たりの放射エネルギー ( $\text{J/s/m}^2$ )

## 2.4.1 地球温度評価モデル (続き)

図1に示す様に、大気上層部に一時的な噴火による粉塵層を取り扱えるようにし、又、地表部にて太陽光を反射するモデルを作成しました。

エネルギーバランスを考えるに当たり、以下の様に仮定しました。

- (1) 太陽光の大気外の入射エネルギーを $I_0$ とします。  $I_0 = E_{\text{earth\_EX}}/4$  です。
- (2) 粉塵層による太陽光の反射は一時的なものであり、平常時のアルベドの計算には含めないとします。
- (3) 粉塵層の反射率を $E_1$ 、存在率を $r_1$ とします。
- (4) 大気層による太陽光の吸収率を $\alpha$ とします。太陽光の吸収は太陽から地球に向う場合と、地表から粉塵層に向う場合の2通りで生じるものとし、吸収率は変わらないものとします。
- (5) 地表面からの放射(赤外放射)エネルギー $I_g$ は大気層を暖め、大気層による放射エネルギー $I_a$ は、地表と宇宙へ同量放射されるものとします。
- (6) 地表面での太陽光の反射率を $A'$ とします。観測値のアルベド  $A_b = 0.306$ と、大気の太陽光吸収率 $\alpha = 0.2$ より、 $A' = A_b / (1 - \alpha)^2$ で与えられる定数とします。
- (7) 粉塵層と地表面で、幾度となく太陽光の反射が行われるものとします。

## 2.4.2 太陽光の宇宙への反射

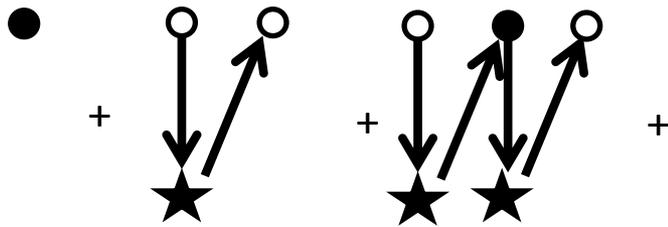


図2 太陽光の宇宙への反射イメージ

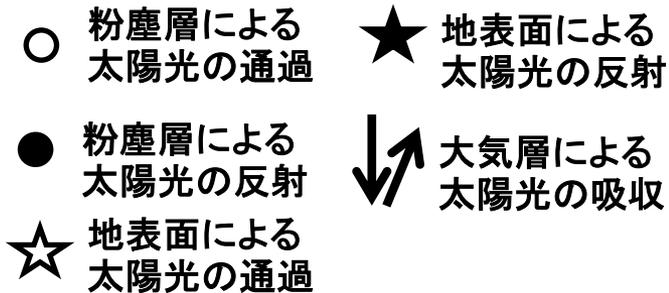
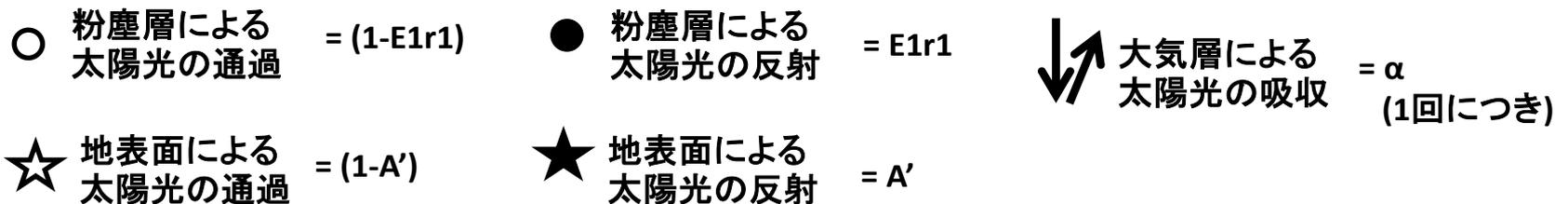


図2に太陽光の宇宙への反射イメージを示します。

- (1) 先ず始めに、粉塵層により直接的に太陽光が反射(●)される場合。
- (2) 次に、粉塵層を通過した太陽光(○)が大気層の吸収を受けない(→)で地表に到達し、地表による反射(★)を経て大気層の吸収を受けず(→)、かつ、粉塵層を通過(○)する場合。
- (3) 上記(2)を2回繰返し、粉塵層を通過(○)する場合。但し2回目で粉塵層により地表へ太陽光が反射(●)される場合。
- (4) 以上の過程が何度も繰り返されます。

以上の事を数値化する前に、読者の理解を容易にするため、各項目についての定量値を以下に示します。



## 2.4.2 太陽光の宇宙への反射 (続き)

以上の事を数値化すれば、大気層から宇宙への放出(反射)エネルギー $I_{out}$ は、以下となります。

$$\begin{aligned}
 I_{out} &= I_o \cdot \left\{ E_1 r_1 + (1 - E_1 r_1)^2 \cdot (1 - \alpha)^2 A' + E_1 r_1 \cdot (1 - E_1 r_1)^2 \cdot (1 - \alpha)^4 A'^2 + \dots \right\} \\
 &= I_o \cdot \left\{ E_1 r_1 + \frac{(1 - E_1 r_1)^2 A' (1 - \alpha)^2}{1 - E_1 r_1 A' (1 - \alpha)^2} \right\} \quad \dots(2.8)
 \end{aligned}$$

## 2.4.3 太陽光の地表への吸収

図3に太陽光の地表への吸収イメージを示します。

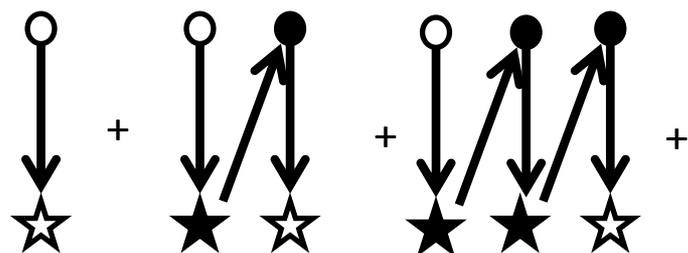


図3 太陽光の地表への吸収イメージ

- (1) 粉塵層を通過した太陽光(O)が大気層の吸収を受けない(→)で地表に到達し、反射されずに吸収(☆)される場合。
- (2) 次に、粉塵層を通過した太陽光(O)が大気層の吸収を受けない(→)で地表に到達し、地表による反射(★)を経て大気層の吸収を受けず(→)、かつ、粉塵層に反射(●)され、大気層の吸収を受けず(→)地表に到達し、反射されずに吸収(☆)される場合。
- (3) 上記(2)を2回繰返し、粉塵層に反射されて地表に吸収される場合。但し2回目で地表により太陽光が反射(★)される場合。
- (4) 以上の過程が何度も繰り返されます。

## 2.4.3 太陽光の地表への吸収 (続き)

以上の事を数値化すれば、太陽光の地表への吸収エネルギー $I_{in}$ は、以下となります。

$$\begin{aligned} I_{in} &= I_o \cdot \left\{ (1 - E_1 r_1) \cdot (1 - \alpha) A' + E_1 r_1 \cdot (1 - E_1 r_1) \cdot (1 - \alpha)^3 A' (1 - A') \right. \\ &\quad \left. + (E_1 r_1)^2 \cdot (1 - E_1 r_1) \cdot (1 - \alpha)^5 A'^2 (1 - A') + \dots \right\} \\ &= I_o \cdot \left\{ \frac{(1 - E_1 r_1)(1 - A')(1 - \alpha)}{1 - E_1 r_1 A' (1 - \alpha)^2} \right\} \end{aligned} \quad \dots(2.9)$$

## 2.4.4 エネルギーバランス

以上の事を考慮したエネルギーバランスは以下となります。

### (1) 大気－宇宙間バランス

$$I_o = I_{out} + I_a = I_o \cdot \left\{ E_1 r_1 + \frac{(1 - E_1 r_1)^2 A' (1 - \alpha)^2}{1 - E_1 r_1 A' (1 - \alpha)^2} \right\} + I_a \quad \dots(2.10)$$

### (2) 大気－地表間バランス

$$I_g = I_{in} + I_a = I_o \cdot \left\{ \frac{(1 - E_1 r_1)(1 - A')(1 - \alpha)}{1 - E_1 r_1 A' (1 - \alpha)^2} \right\} + I_a \quad \dots(2.11)$$

## 2.4.4 エネルギーバランス (続き)

式(2.10)及び(2.11)より、 $I_a$  が以下の様に求められます。

$$\begin{aligned}
 I_a &= I_o \cdot \left\{ 1 - E_1 r_1 - \frac{(1 - E_1 r_1)^2 A' (1 - \alpha)^2}{1 - E_1 r_1 A' (1 - \alpha)^2} \right\} \\
 &= I_o \cdot (1 - E_1 r_1) \left\{ \frac{1 - A' (1 - \alpha)^2}{1 - E_1 r_1 A' (1 - \alpha)^2} \right\} = I_o \cdot (1 - E_1 r_1) \left\{ \frac{1 - A_b}{1 - E_1 r_1 A_b} \right\} \quad \dots(2.12)
 \end{aligned}$$

又、式(2.12)を式(2.11)に代入することより、 $I_g$  が以下の様に求められます。

$$\begin{aligned}
 I_g &= I_o \cdot \left\{ 1 - E_1 r_1 - \frac{(1 - E_1 r_1)^2 A' (1 - \alpha)^2}{1 - E_1 r_1 A' (1 - \alpha)^2} + \frac{(1 - E_1 r_1)(1 - A')(1 - \alpha)}{1 - E_1 r_1 A' (1 - \alpha)^2} \right\} \\
 &= I_o \cdot \frac{(1 - E_1 r_1)(2 - \alpha)[1 - (1 - \alpha)A']}{1 - E_1 r_1 A' (1 - \alpha)^2} = I_o \cdot \frac{(1 - E_1 r_1)(2 - \alpha) \left[ 1 - \frac{A_b}{(1 - \alpha)} \right]}{1 - E_1 r_1 A_b} \quad \dots(2.13)
 \end{aligned}$$

## 2.4.5 地表面及び大気の温度

単位面積当たりのエネルギー  $I$  を放射する物体の温度  $T$  は、式(2.6) で与えられます。これを式(2.12) 及び (2.13) に適用すると、大気温度  $T_a$  及び地表温度  $T_g$  は以下で与えられます。

$$\begin{aligned}
 T_a &= \left( \frac{I_a}{\sigma} \right)^{1/4} = \left( \frac{I_o}{\sigma} \right)^{1/4} \left[ \frac{(1 - E_1 r_1)(1 - A_b)}{1 - E_1 r_1 A_b} \right]^{1/4} \\
 &= T_{earth-EX} \left[ \frac{(1 - E_1 r_1)(1 - A_b)}{1 - E_1 r_1 A_b} \right]^{1/4} \\
 &= 278.63 \cdot \left[ \frac{(1 - E_1 r_1)(1 - A_b)}{1 - E_1 r_1 A_b} \right]^{1/4}
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned}
 T_g &= \left( \frac{I_g}{\sigma} \right)^{1/4} = \left( \frac{I_o}{\sigma} \right)^{1/4} \left\{ \frac{(1 - E_1 r_1)(2 - \alpha) \left( 1 - \frac{A_b}{1 - \alpha} \right)}{1 - E_1 r_1 A_b} \right\}^{1/4} \\
 &= 278.63 \cdot \left\{ \frac{(1 - E_1 r_1)(2 - \alpha) \left( 1 - \frac{A_b}{1 - \alpha} \right)}{1 - E_1 r_1 A_b} \right\}^{1/4}
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

## 3. 地表面及び大気の温度試算

### 3.1 粉塵層が無い場合

#### 3.1.1 基本ケース

1995年に日本気象学会に投稿された東北大学理学部大気海洋変動観測研究センターの早坂忠裕氏の資料「大気は太陽放射をどれだけ吸収するのか？」に拠れば、大気の太陽光吸収率  $\alpha$  は、**従来は約 0.2 が一般的に用いられてきたが、最近の観測では 0.26~0.27**であるとのことでした。

このため、**計算には  $\alpha = 0.2$  を使用し、 $\alpha$  の変化をパラメータサーベイとして影響をみました。**又、観測値のアルベド  $A_b = 0.306$  と、大気の太陽光吸収率  $\alpha = 0.2$  より、 $A' = A_b / (1 - \alpha)^2$  で与えられる定数を**(0.478125)**としました。

基本ケースの場合の各温度は以下の通りです。

地表温度 = 12.9 °C (286.1 K)

大気温度 = -18.8 °C (254.3 K)

2017年の理科年表(P333, 1976, U.S. 標準大気)による高度 0 m の気温は288.15 K (15°C)で、計算値は約2°C低く推定していますが、大気層内の対流や対流圏と成層圏とのエネルギーの熱伝導等を考慮しない一点近似の簡単なモデルですが、簡単な割には良い推定値であると思います。

2017年の理科年表による大気温度の高度依存は図7及び図8に示す通りです。

推定値の $-18.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ は、高度約5kmの気温に相当します。

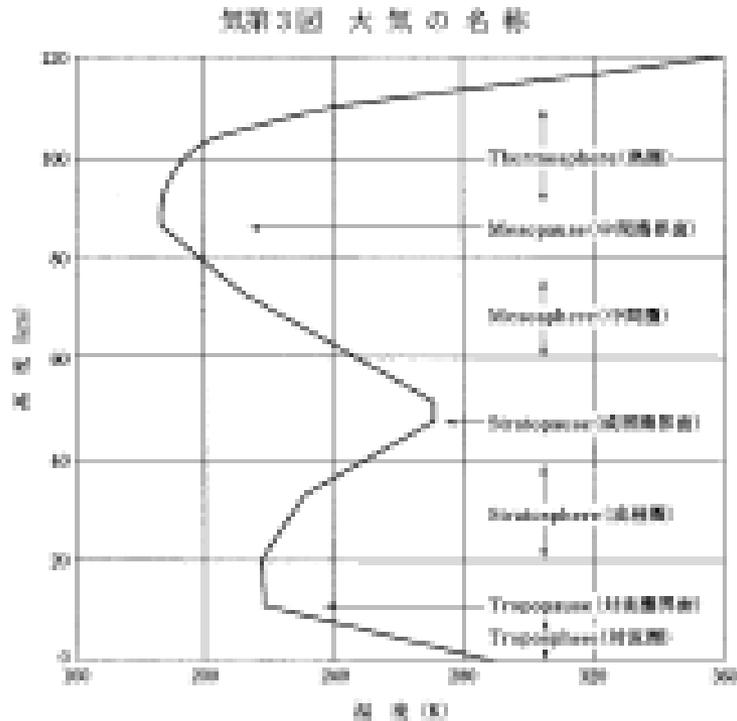


図7 大気温度の高度依存  
(理科年表 気154(332)より引用)

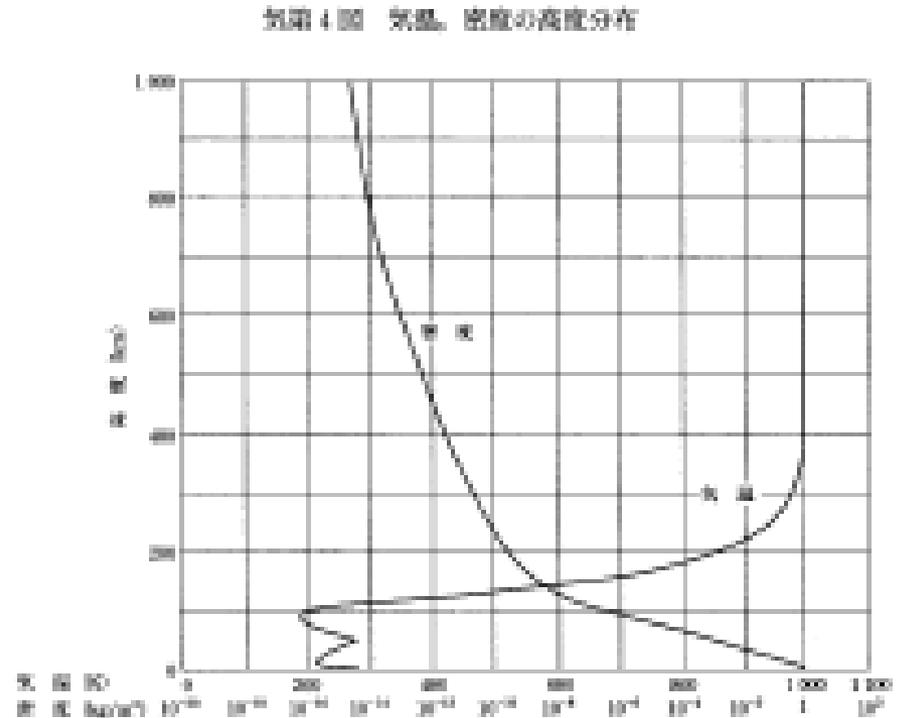


図8 大気温度の高度依存  
(理科年表 気156(334)より引用)

### 3.1.2 粉塵層が無い場合のパラメータサーベイ

#### a) 太陽光の吸収率 $\alpha$ と地表温度 $T_g$ の関係

近年、地球温暖化の一因として、炭酸ガスによる太陽光の吸収が話題に上ります。このため、太陽光の吸収率  $\alpha$  をパラメータサーベイしました。

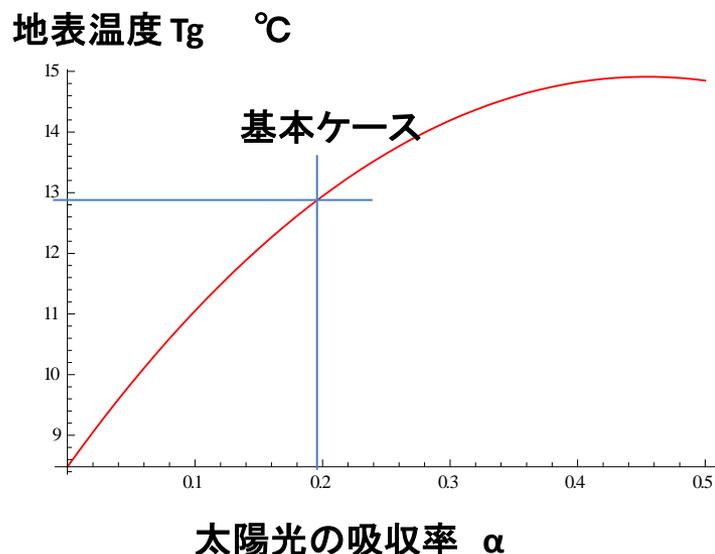


図9 太陽光の吸収率変化による地表温度の変化

太陽光の吸収率 $\alpha$ が大きくなれば、地表に到達する太陽光のエネルギーが少なくなり、地表温度 $T_g$ が低くなることは予想されます。

一方、太陽光を吸収することにより、大気層が昇温し、それにより地表へ大気層からエネルギーが放射され、地表が加温されます。

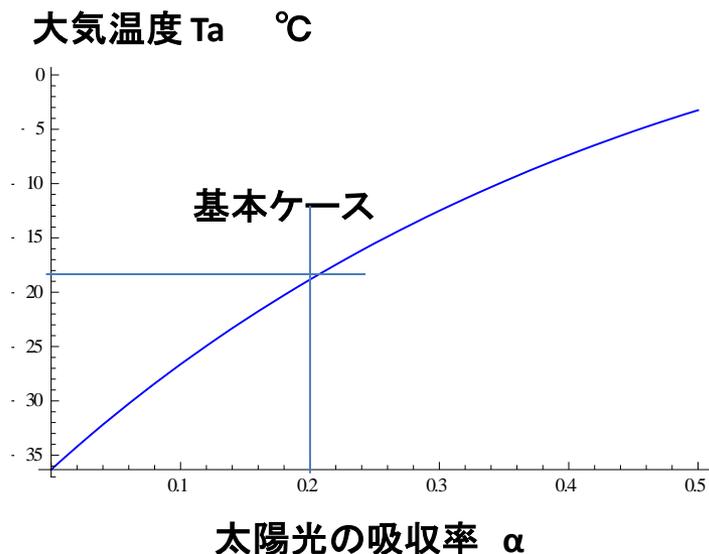
従って、地表温度 $T_g$ を最大にする吸収率 $\alpha$ の値が存在する様に思います。

結果は図9に示すものです。大気層による太陽光の吸収率 $\alpha$ の増加により、地表温度が上昇し、 $\alpha=0.46$ の 때가地表温度がピークで、 $T_g=14.91^\circ\text{C}$ と推定しています。

ちなみに、 $\alpha=0$ 、即ち吸収が無い場合は、地表温度が $8.47^\circ\text{C}$ と推定しています。この温度は、大気層がない場合の地表温度 $5.48^\circ\text{C}$ より約 $3^\circ\text{C}$ 高いものです。

前出の早坂忠裕氏の論文では、大気による太陽光の吸収率の観測値が20%ではなく、26~27%との事ですので、約 $13.8^\circ\text{C}$ の地表温度になります。

## b) 太陽光の吸収率 $\alpha$ と大気温度 $T_a$ の関係



次に太陽光の吸収率 $\alpha$  変化に対する大気温度  $T_a$  の変化を示したのが、図10です。

大気層による太陽光の吸収率 $\alpha$ の増加により、パラメータサーベイ区間の0~0.5には、大気温度は単調増加しています。これは、粉塵層が無い場合、式(2.14)は以下の様になり、アルベドに関する $A'$ への係数が $\alpha$ が増大するに従って、減少するためです。

$$T_a = 278.63\{1-A'(1-\alpha)^2\}^{1/4}$$

図10 太陽光の吸収率変化による大気層温度の変化

## c) 太陽光の増加と地表温度の関係

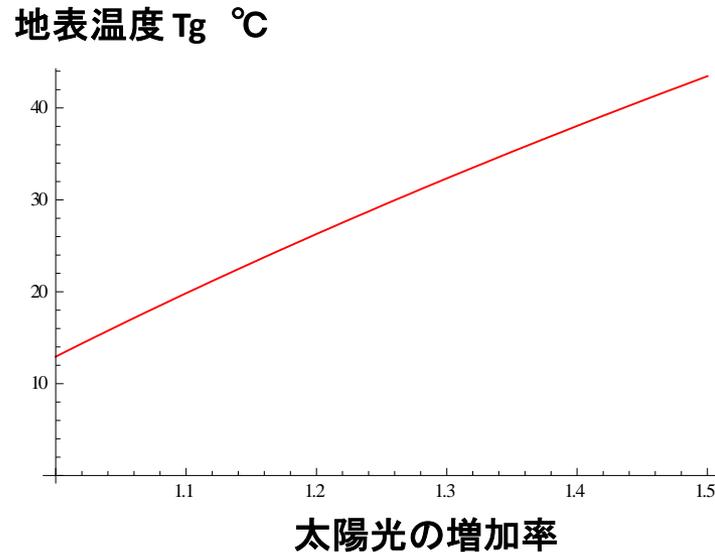


図11 太陽光の増加による  
地表温度の変化

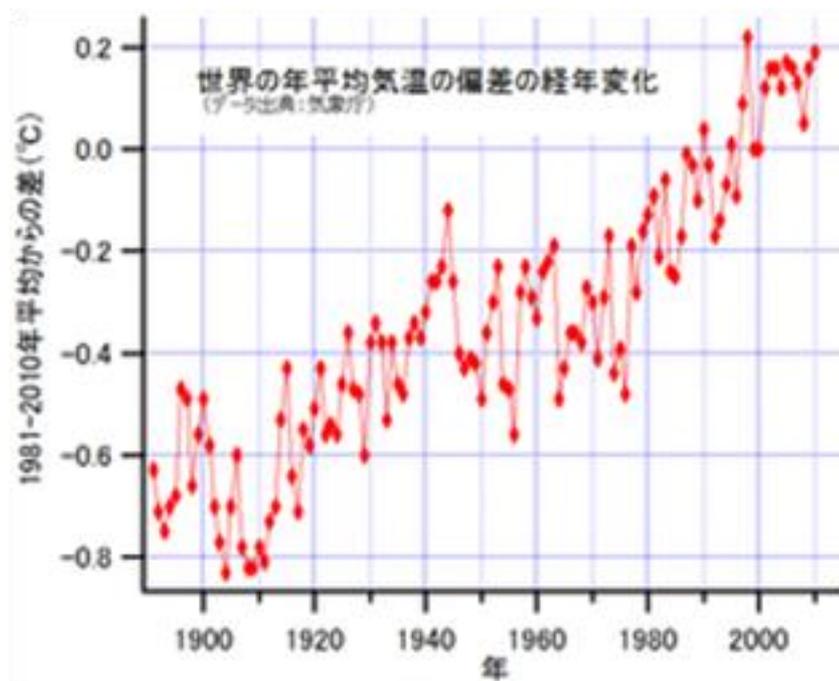
愈々、1章で疑問に思っていた人間活動によるエネルギーの放出に着いて見て見ました。人間活動によるエネルギーの放出を、太陽光の増加として捕らえ、それによる地表温度を推定しました。

地球に入射する太陽光が増加すれば、地表温度が高くなることは容易に予想されます。

結果は図11に示すものですが、1.1倍になった場合は温度が19.84°C、1.2倍になった場合は温度が26.28°Cとなります。プロツェンコ氏が述べた20%の結果は現状値から13.34°Cの温度上昇をもたらし、地球環境に非常に大きな影響を及ぼします。その一例が、南極大陸の氷河が溶け出して、先進工業国の都市部を水没させたり、海水温の上昇による海面の上昇により赤道付近の群島の水没の可能性が大きいからです。

又、山賀氏が言う10%の場合でも、現状値から6.90°Cの温度上昇をもたらします。Wikipediaの情報に拠れば、1891～2010年の世界の年平均気温の偏差の経年変化は図12に示すものです。図に示す様に、地球の平均気温は1906年から2005年の100年間で0.74°C上昇しているとの事です。

## c) 太陽光の増加と地表温度の関係 (続き)



0.74°C/100年で将来も平均気温が上昇すると仮定しますと、太陽光エネルギーが現状の10%増加に対応する**現状値から6.90°Cの温度上昇には、約930年掛かります**。地球が駄目にならないためにも、省エネ製品の開発・使用、節電の励行、森林の回復・創造等、世界が手を打つ必要があると考えます。

図12 世界の年平均気温の偏差の経年変化  
(Wikipediaより引用)

## 3.2 粉塵層が有る場合

6,550万年前に恐竜が絶滅した原因は、巨大な隕石がメキシコのユカタン半島に衝突したためだと言われています。この衝突により、チクシュルーブ・クレーターが出来、また発生した火災と衝突時に巻き上げられた塵埃が太陽光を遮ることで、全地球規模の気温低下及び光合成の不良に拠る植生の枯渇を引き起こし、生物の大量絶滅につながったというものです。

### 3.2.1 基本ケース

粉塵層の太陽光反射率は、層の厚さに依存するものと考えられます。どの位のものであるかインターネットを調べたところ、鹿児島大学農学部の論文「植物の分光反射率におよぼす桜島降灰の影響」(昭和54年8月20日、団野et.al)が有りました。これによれば、「火山灰の分光特性として、太陽光の400--1050 nmの波長の範囲内で反射率は、測定波長全領域にわたって20—35%という値を示し、ほぼ一定であった」との報告が有ります。このため、反射率  $E_1 = 0.3$ 、存在率  $r_1 = 1$  と設定しました。

基本ケースの場合の各温度は以下の通りです。

地表温度 =  $-5.09\text{ }^{\circ}\text{C}$  (268.1 K)

大気温度 =  $-34.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  (238.3 K)

上記地表温度は、粉塵層が無い場合に比べて、約  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$  低いものです。又、理科年表によるグリーンランドのNUUK (Godthaab)の年平均気温  $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  よりも約  $3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  低いものです。NUUKの7月の平均気温は  $6.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、2月の平均気温は  $-8.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  ですので、動物が夏場を生存する可能性は有りますが、矢張り急激な温度変化は動物にとっては危機的状況であったと考えられます。

### 3.2.2 粉塵層の太陽光反射率のパラメータサーベイ

地表温度  $T_g$  °C

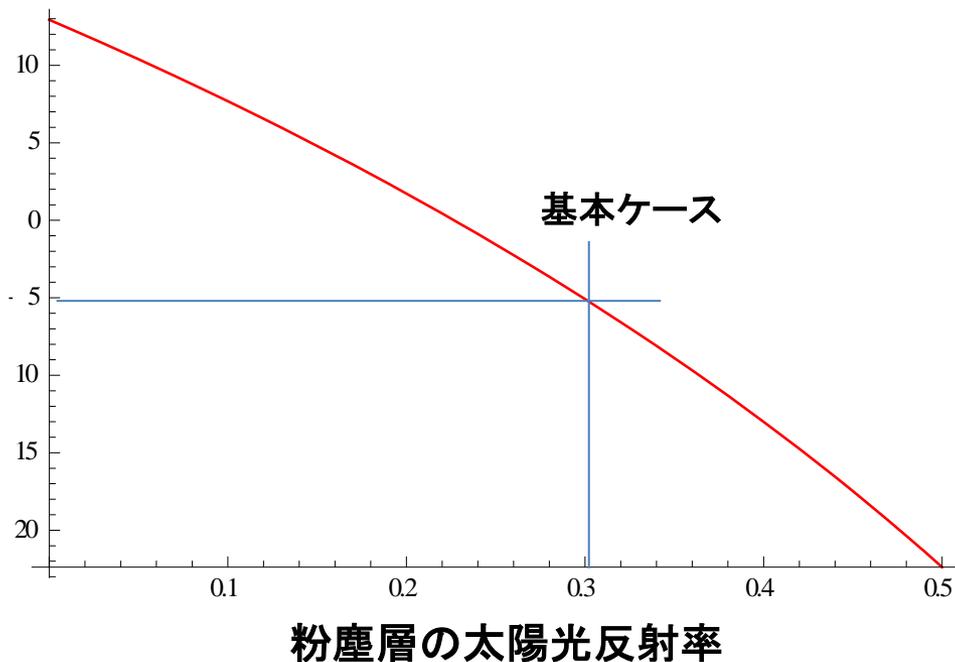


図13 粉塵層の太陽光反射率変化による  
地表温度の変化

粉塵層の太陽光反射率をパラメータとした場合の地表温度の結果は、図13に示すものです。

噴火等の規模が小さい場合は、粉塵層が薄く、太陽光の反射率は小さいものとなります。0.0~0.1間の地表温度の推定値は以下に示すものです。

0.00	⇒12.94°C	(粉塵層無し)
0.01	⇒12.44°C	
0.02	⇒11.94°C	0.03 ⇒11.43°C
0.04	⇒10.91°C	0.05 ⇒10.39°C
0.06	⇒9.86°C	0.07 ⇒9.32°C
0.08	⇒8.78°C	0.09 ⇒8.23°C
0.1	⇒7.68°C	

### 3.2.2 粉塵層の太陽光反射率のパラメータサーベイ (続き)

噴火の規模を示す指標として、火山爆発指数(VEI: Volcanic Explosivity Index)が有ります。これは爆発的噴火の噴出量に着目して噴火の規模を分けたもので、噴出物が $10^4\text{m}^3$ 以下から $10^{12}\text{m}^3$ 以上の噴火を0～8までの9段階に区分したものです。

仮に、噴出物が $10^{12}\text{m}^3$ とした場合、地球表面積  $S$  が $5.11 \times 10^{14} \text{m}^2$  ですので、積もる高さは単純に $h = 1.96 \times 10^{-3}\text{m}$  と計算されます。即ち、約 2 mm となります。

この内、0.1%が大気上層に噴出され大気を覆うと仮定した場合、地上相当で層の厚さは $2\mu\text{m}$ になります。理科年表による噴煙高度の約40t～51km (1815年、インドネシアのタンボラ噴火では40km)で、空気の密度は $9.07 \times 10^{-4} \text{kg}/\text{m}^3$ 、一方、地上の空気密度は $1.22 \text{kg}/\text{m}^3$ です。このため、密度の比が約1000倍です。このため、先程の $2\mu\text{m}$ は上空51kmでは約2mmの厚さに相当するものと思われれます。

この粉塵層の厚さはどの位の存在率  $r_1$ になるのか分かりませんが、前出、タンボラ噴火(VEI = 8相当)では飢饉により8万人が死亡したと言われています。このため、全世界的な気候変動ではなく、局所的に大きな気候変動が起こったものと考えられます。

## 4. 考察

今回、人間活動による大気へのエネルギー放出を、太陽光エネルギーの変動と捕らえ、どの位の活動になれば地表温度がどの様に変化するかを検討しました。  
その結果、以下の知見が得られました。

- ①太陽光エネルギーの10%に相当する量を人間の生産活動として放出すると、現状値から6.90℃の温度上昇をもたらします。0.74℃/100年で将来も平均気温が上昇すると仮定すると、6.90℃の温度上昇には、約930年掛かります。地球が駄目にならないためにも、省エネ製品の開発・使用、節電の励行、森林の回復・創造等、世界が手を打つ必要があると考えます。
- ②20%に相当する量を放出すると、現状値から13.34℃の温度上昇をもたらし、地球環境に取り返しの付かない非常に大きな影響を及ぼします。
- ③6550万年前に発生した大規模な隕石衝突は、壊滅的な気候低下を及ぼしたと考えられ、地表温度は粉塵層が無い場合に比べて、約18℃低いものと推定されました。
- ④最大考えられる噴火の場合でも、地球規模の温度低下には至らず、局所的な温度低下をもたらすものと考えられます。