

# 太陽定数と地球気候

上出 洋介

京都大学生存圏研究所

Judith L. Lean

*Space Science Division, Naval Research Laboratory*

## 1. はじめに

地球システムにおいて、もっとも基本的なエネルギー入力とは太陽からの広い範囲にわたる波長の放射エネルギーである。これらのエネルギーが、時間特性をもちながら、様々な形で地球をコントロールしている。本論文では、太陽定数の要因、測定法、最近の値のレビューを行い、長期（> 100 年）にわたる地球平均気温に太陽定数、その他の自然要因、人為的要因がどれくらい影響しているかの最新の論文を紹介する。

## 2. 太陽定数は定数ではない

図1は今期（第23期）の終末期の黒点数である(SIDC)。今回の静穏期（極小期）が例外的に静穏である報告があるが、ついに次期活動度24期が始まっているかのように見える。地球全体の平均気温が太陽定数と関係づけるのは簡単であるが、太陽全体のエネルギーを正確に算出することはほとんど不可能に近い。太陽定数、あるいはTSI (Total Solar Irradiance)をステファン・ボルツマンの法則にあてはめ、太陽の実効温度を定義することは可能である。最新（2008年11月発行）の『理科年表』によれば、その値は5770Kであり、それに対応する太陽定数は $1.36 \text{ kW/m}^2$ となっている。

図2は、この30年、いろいろな人工衛星、いろいろな計測器を使って測定したTSI (Total Solar Irradiance)である。たしかに、それぞれの変動は黒点数（図の一番下の曲線）を反映しているが、絶対値が大きく異なっていることが見てとれる。 $1360 \text{ W/m}^2$ から $1375 \text{ W/m}^2$ にまで分布している。ここで問題なのは、この程度の差、すなわち $10 - 15 \text{ W/m}^2$ レベルは「とるに足らない」ものなのか、それとも地球の長期気温を議論する際無視できない量なのかということである。そこで、簡単な感度計算を行ってみた。

太陽定数、あるいはTSI (Total Solar Irradiance)、をCをすれば、ステファン・ボルツマンの法則により、太陽の実効温度と太陽半径、太陽-地球間距離を使って、図3のように表すことが出来る。そこで問題は、 $\Delta T$ と $\Delta C$ の関係であるが、これは図3の式を微分し、

諸パラメーターに現実的な値を導入して試みることである。その結果、図4に示したように、実効温度1Kの変化に対し、太陽定数、あるいはTSI (Total Solar Irradiance)、は  $1 \text{ W/m}^2$  であるという、非常に「わかりやすい」数値関係になっていることがわかる。

TSI (Total Solar Irradiance)  $1 \text{ W/m}^2$  の1太陽周期での変動に対して地球の平均気温は約0.1K変動することが経験的に知られているから、この1:1:0.1という関係は、非常に憶えやすい数値である。

では、相対値はともかく、図2に戻り、絶対値としてもっとも確からしいTSI (Total Solar Irradiance)の値はいくらなのであろうか。ごく最近、この問題について、「統一」見解が出版された(Butler et al., 2008)。これは、NASAが主導して、各衛星機器の技術者がNIST (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland) に集まり、それぞれの測定法に始まり、各測定器の設計、測定方程式、測定／計算誤差などについて徹底的に議論をしたまとめである。これによると、現在もっとも信頼出来るTSIは  $1362 \text{ W/m}^2$  に ( $=1.95 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$  太陽定数) であるという。

### 3. 地球気候を決めるのは

以下、最近の研究結果(Lean and Rind, 2008)を簡単にまとめる。使ったデータセットは、1889-2006年にわたる11太陽周期をカバーする月平均データで、the University of East Anglia Climate Research Unit (CRU)で構築されたものである。図5に黒色で示している。

同図にグリーンで表したカーブは、Lean and Rindが、次の4つの変数を使い、図6の式を用いて線形解析で再現した地球の平均気温である。

*E*: ENSO

*V*: volcanic aerosols

*S*: solar irradiance

*A*: anthropogenic forcing

なお、それぞれの変数と地球温度の間には独特の時定数があり、最適値として図6の一番下に示した値(単位は日)を使っている。WWI, WWIIはそれぞれ第1次、第2次世界大戦の期間を示しているが、この2期間以外は、全体としてこの線形解析が観測値(データセット)をよく再現していることがわかる。2つの大戦期間中は、観測地点の数が少なく、データには誤差が多いためであろう。

さらに著者らは、2つの試みを行っている。まず、189-2006年全体についての「平均」だけではなく、最近の25年(1979-2005)、50年、100年について別々に同様の分析を行い、図7を得ている。それぞれの「貢献度」が時代とともに大きく変わっていることがわかる。また、地球を1つの点としてではなく、地域性を考慮に入れた解析も行い、結果は図8に示している。当然、データ数が減り、結果が粗くなるが、図の右端に示している

のは、緯度変化である。各変数で、独特の緯度効果があることが明らかで、地球全体の平均温度で「温暖化」、「寒冷化」を議論することの危険さを示唆している。

#### 4. まとめ

- (1) 「 $\Delta$  (太陽の有効温度) 1 K  $\rightarrow$   $\Delta$  (太陽定数) 1 W/m<sup>2</sup>  $\rightarrow$   $\Delta$  (平均気温) 0.1 度」  
という簡単なルールがある。
- (2) Empirical models capture 76% of the variance in the CRU surface temperature: as much as 0.2K from ENSO, 0.3K from Volcanic eruptions, and 0.1K from solar cycle.
- (3) The rate of these influences does change in terms of space and time.

**謝辞：** 本稿を準備中、電子メールにより、多くのことを教えてくださった Jack Eddy に感謝いたします。

e e e es

Solar Influences Data Analysis Center (SIDC)

[http://sidc.oma.be/sunspot-index-graphics/sidc\\_graphics.php](http://sidc.oma.be/sunspot-index-graphics/sidc_graphics.php)

J. J. Butler, B. C. Johnson, J. P. Rice, E. L. Shirley, and R. A. Barnes, Sources of differences in on-orbit total solar irradiance measurements and description of a proposed laboratory intercomparison, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 113, 187-203, 2008.

Lean, J. L., and D. H. Rind, How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L18701, doi:10.1029/2008GL034864, 2008.

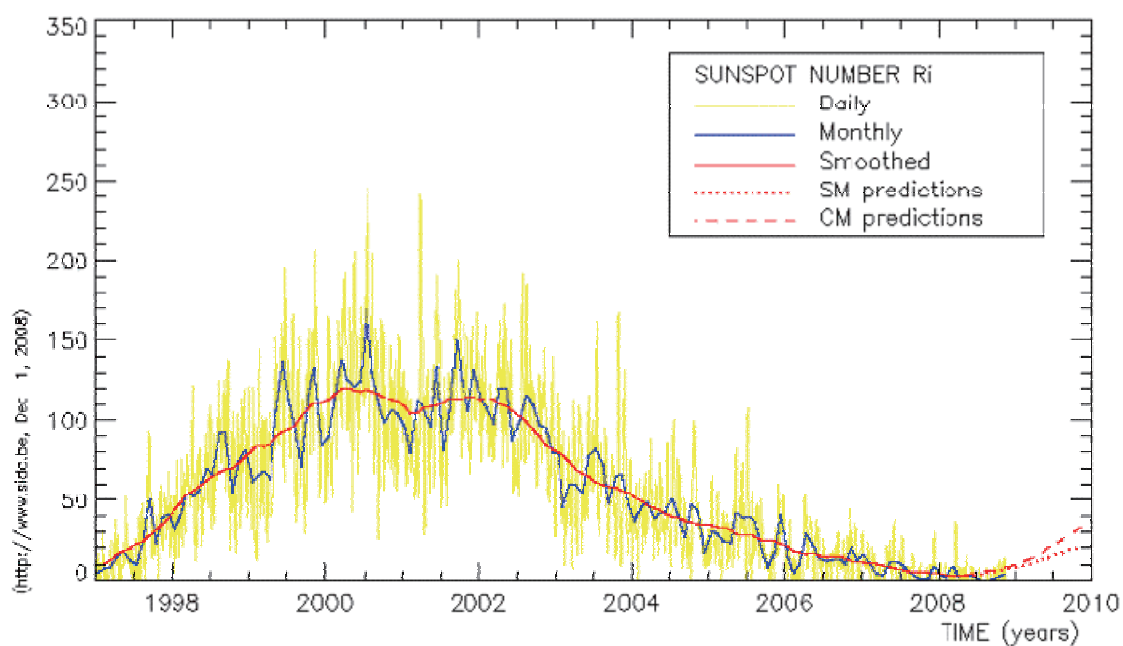


図 1

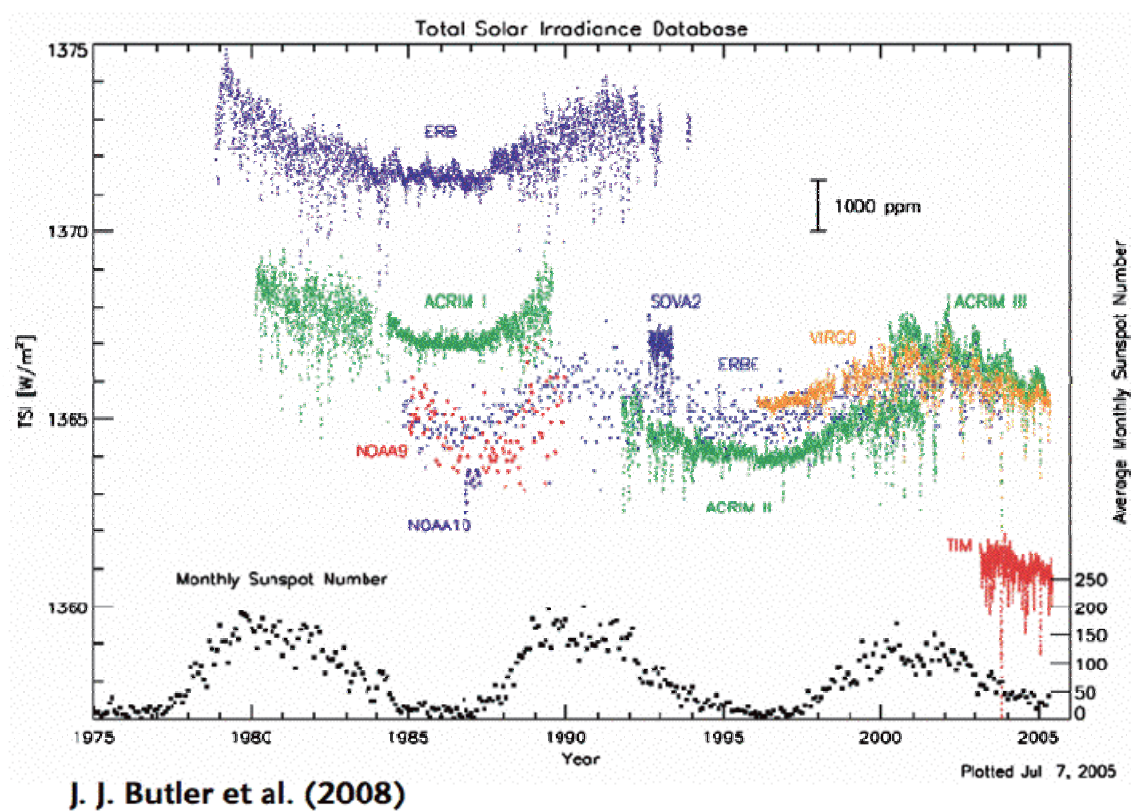


図 2

$$C = \sigma T^4 (4\pi R_S^2 / 4\pi R^2) = \sigma T^4 (R_S / R)^2$$

where

$\sigma$ : Stefan-Boltzmann constant =  $5.67 \times 10^{-8}$  (J/m<sup>2</sup> sec K<sup>4</sup>)

$T$ : Effective temperature of the Sun (~5770 K)

$R_S$ : Sun's radius (~ $6.96 \times 10^8$  m)

$R$ : Sun-Earth distance (~ $1.495 \times 10^{11}$  m)

図 3

$$\begin{aligned} \Delta C \text{ (W/m}^2\text{)} &= 4 \sigma T^3 \Delta T (R_S / R)^2 \\ &= 9.42 \times 10^{-1} \Delta T \text{ (K)} \end{aligned}$$

すなわち、 $T$ を1度上げると、約1ワット/m<sup>2</sup>  
太陽定数上がる

図 4

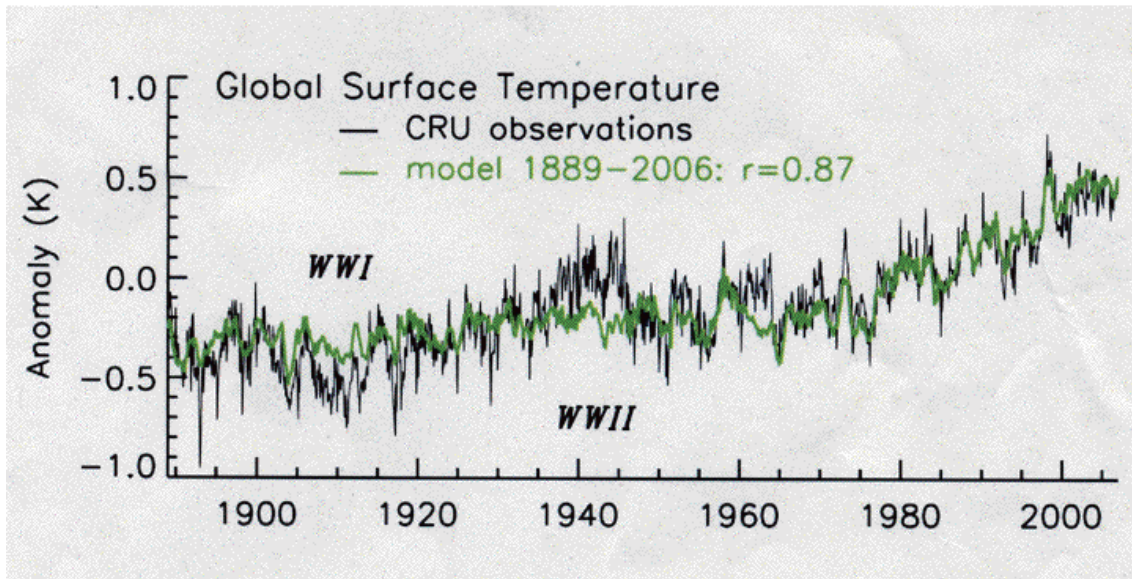


図 5

$$T_R(t) = c_0 + c_E E(t - \Delta t_E) + c_V V(t - \Delta t_V) + c_S S(t - \Delta t_S) + c_A A(t - \Delta t_A)$$

where

$T_R$ : monthly mean temperature anomalies

$E$ : ENSO

$V$ : volcanic aerosols

$S$ : solar irradiance

$A$ : anthropogenic forcing

$$\Delta t_E = 4, \Delta t_V = 6, \Delta t_S = 1, \Delta t_A = 120$$

図 6



Period	ENSO	V	S	Anthr.
1889-2006	0.0015	-0.0009	0.007	0.050
1905-2005	0.0028	-0.0029	0.007	0.059
1955-2005	0.0150	0.001	0.002	0.136
1979-2005	-0.007	0.018	-0.004	0.199

図 7

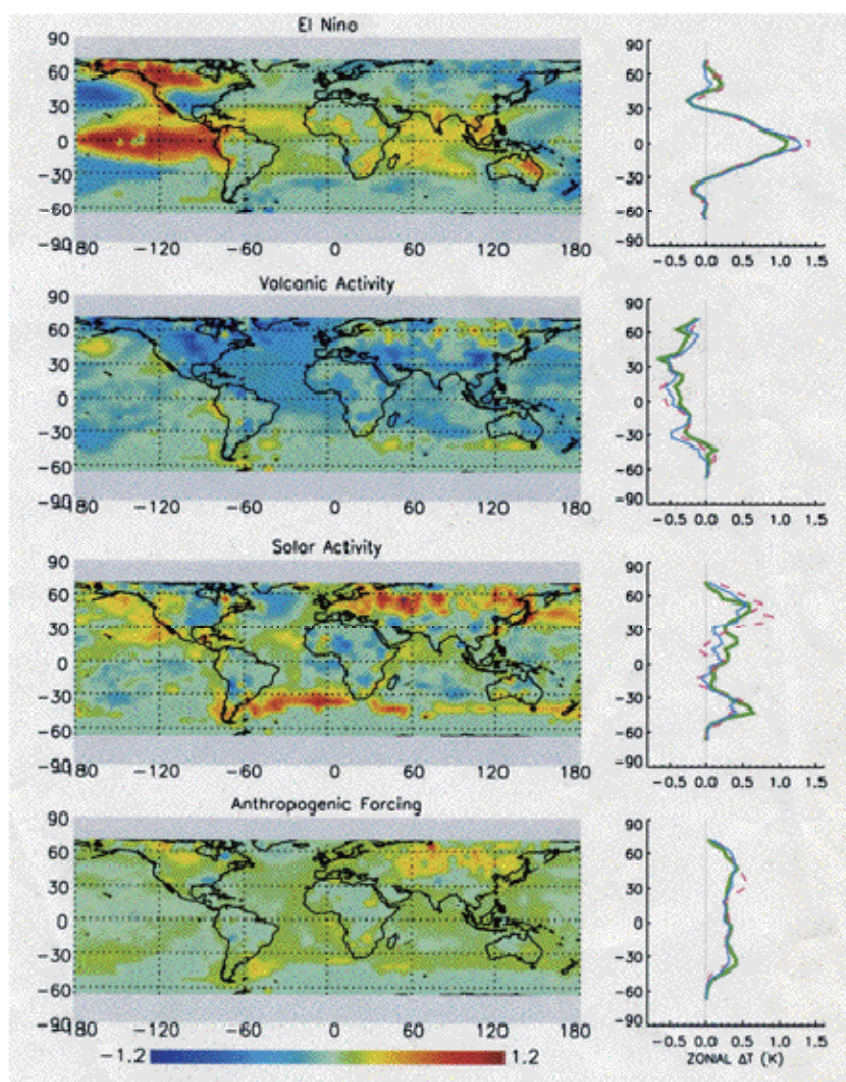


図 8