

## 再解析気象データ大気上端正味放射量の利用可能性について

田口彰一（産業技術総合研究所、環境管理技術研究部門、大気環境評価研究グループ）

### 1. はじめに

地球の気候系は、異なる熱容量を持つ大気、海洋、陸域から構成されるが、これらの構成要素は吸収した太陽放射を別々に赤外放射として宇宙空間に放出するのではなく、相互に交換しながら長い時間をかけて放出している。十年規模の大気と海洋の変動もその一部と考えられる。例えばある年の夏に、森林地帯が好天に恵まれ葉が通常より多めに有機物を作り、広めの年輪が幹に刻まれたとしよう。その過剰な有機物が分解されてエネルギーが解放されるには長い時間を要する。同様に、太陽エネルギーが大気中水蒸気や海水温に多めに変換されたとして、それが宇宙空間に戻るのに要する時間には無限に広い幅がある。要素の間の相互作用は、独特のリズムを生むことがある。関連する全ての要素の関係が分からない段階では、見かけ上の発生順から因果関係と見誤る恐れがあり注意が必要である。

もし気候系が平衡状態に達すれば吸収する太陽放射(ASR)と放出する赤外放射(OLR)は等しくなるが、実際には海洋貯熱量や衛星で観測された海面高度の変動(Purkey & Johnson, 2010)から大気上端正味放射(NET=ASR+OLR)は  $0.64 \pm 0.11 \text{ Wm}^{-2}$  程度の加熱(Lyman *et al.*, 2010)と考えられている。この値は大気上端の平均太陽放射  $341 \text{ Wm}^{-2}$  の四桁めに過ぎない。衛星観測は時間経過を高い精度で追跡できるようになったものの、平均値の精度はこの加熱を確認できるほど高くない。最新の衛星資料(CERES\_Ed2.7)でも海洋貯熱量によって調整している(<http://ceres.larc.nasa.gov>)。ヨーロッパ中期予報センターの再解析気象データ

ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011)の NET も海洋貯熱量とは一致していない(Chiodo & Haimberger, 2010, Berrisford *et al.*, 2011, Trenberth & Fasullo, 2013)。

海面水温(SST)は OLR に大きな役割を持つが ERA-Interim では 2001 年までは ERA-40 用に解析された値、その後は米国国立環境予測センター(NCEP)現業解析値に変更された(Dee *et al.*, 2011)。この変更後の SST は他の SST 資料と食い違う事が指摘されている(Simmons *et al.*, 2010)。

放射の計算は二酸化炭素の経年変化とエロゾルの季節変動を考慮しているが、火山灰等のエロゾルの年々変動は考慮していない(Dee *et al.*, 2011)。

ERA-Interim の相関解析の結果を示す。

### 2. 用いた資料

ERA-Interim の毎日二回の 12 時間予報の積算値(ASR, OLR)、6 時間間隔の海面水温初期値(SST)を 1979 年から 2012 年まで  $1.125$  度の水平解像度で利用した。

### 3. 結果

面積の重みをかけて全球平均した毎日の値を暦日ごとに 34 年間平均し、日別気候値を作成した。毎日の値からこの気候値を差引いた値に全期間の平均値を加えた値を作成し、さらに月平均した値として図 1 に示す。ASR(a)と OLR(b)は地球が吸収する量を正としている。NET(c)の平均は  $1.53 \text{ Wm}^{-2}$  の冷却となるが、推定されている  $0.64 \text{ Wm}^{-2}$  の加熱の場合は下側破線がゼロ線。低緯度の OLR の時系列を別に作り衛星資料(Loeb *et al.*, 2012a)と比較すると違いが見られ、例えば 1984 年以前は衛星で

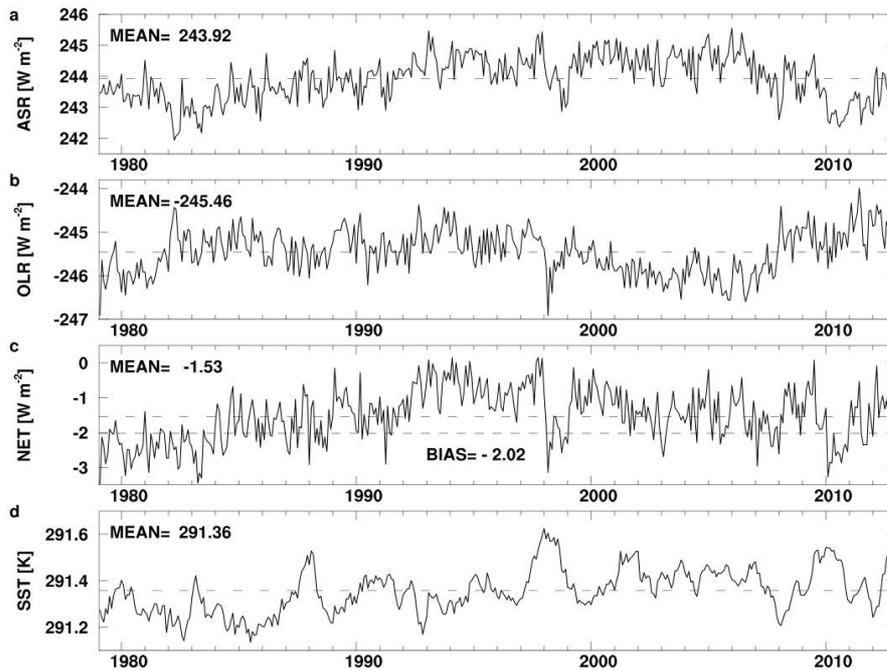


図1. ヨーロッパ中期予報センターの再解析から計算された全球平均大気上端放射量と海面水温。吸収された太陽放射(ASR)、外向き赤外放射(OLR)、正味放射(NET)、海面水温(SST)の月平均偏差。1979-2012。

は平均以上でERA-Interimは以下だった。2000年以降のNET(c)の年々の変動は衛星資料と一致している(Loeb *et al.*, 2012b)が月ごとの値(Trenberth & Fasullo, 2012)とは一致しない。

図1のNETとSSTを比べると1988, 1998, 2010年のSST高温期にNETが低く冷却が起こり、逆相関を持つように見える。所が、NETとSSTの日ごとの値で相関を計算すると同時相関はほとんどゼロで、NETを先行させた場合に数ヶ月から数年の範囲で低い正相関、

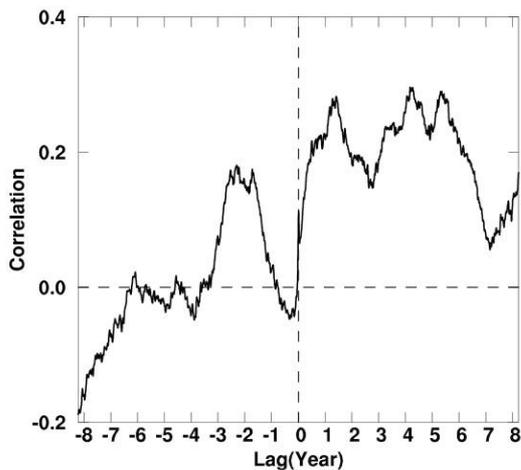


図2. 正味の放射と海面水温のラグ相関。放射が先行する場合を正。単位は年。

SSTを先行させるとゼロに近い期間が一年近くみられた(図2)。従ってSSTの変動からNETを説明することは出来ない。

同時相関がゼロとなり、その前後で符号が反転する点に着目し、NETの平均値からの偏差の年平均と海面温度の変化傾向(次の年のSSTの年平均からその年の年平均を差引いた値)を求め図3に示した。ピナツボ山の噴火の影響が出ていた年、海面水温資料の変更が行なわれた年は除いて処理した。この図の縦軸と横軸の間には半年の時間差がある点に注意が必要である。1998年以降に限ると相関係数は0.74でこの回帰直線を用いて次の年の全球平均SSTを予測すると標準偏差は0.06Kとなった。

図3に示した値と緯度別に平均した値の年々変動を1998年以降について図4に示した。緯度別のNETとSSTの相関係数も示した。例えば1998年のNETの緯度分布をみると両半球の亜熱帯で冷却、それに対してSSTは熱帯で冷却し、その相関係数は0.086と低い。他の年も概ね同様で正味放射の偏差は何かに変

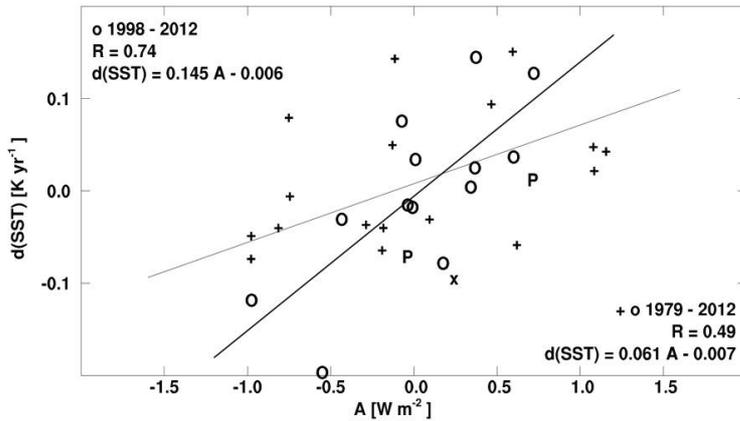


図 3. 全球平均した年平均正味放射偏差と年平均海面水温の変化傾向との関係。1979-2012 の期間と1998-2012 の期間について別々に回帰直線を示す。P はピナツボ山の噴火時、x は海面水温資料変更時。

換された後、その一部が次の年に別の場所の海面水温として姿を現しているように見える。

この海面水温の変動がどのような深さの海に対応するかを調べた。大気や陸地の熱容量は海洋に比べると小さいので無視する。降水

#### 4. 考察

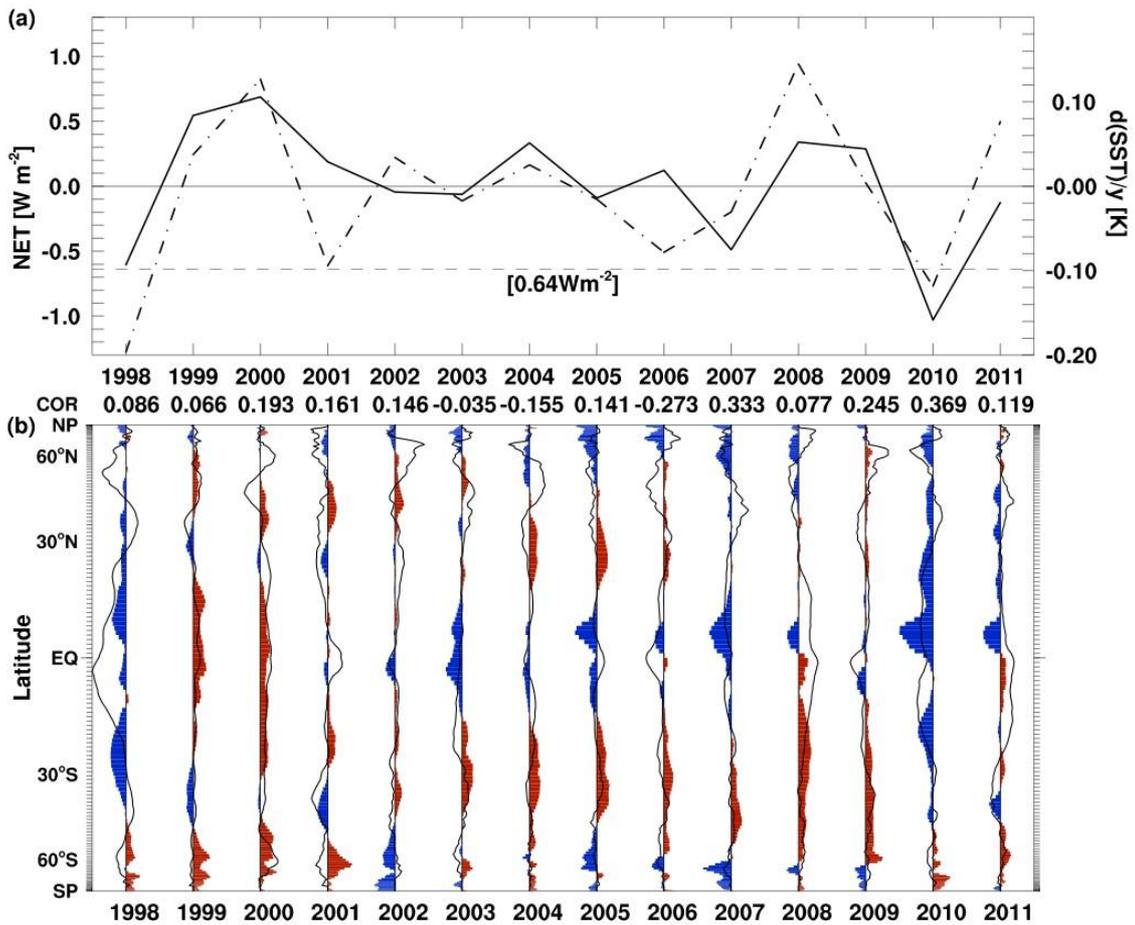


図 4. 年平均した正味放射偏差と海面水温変化傾向の年々変動。全球(a)および緯度分布(b)。全球平均正味放射(実線)は平均からの偏差で示した。0.64Wm<sup>-2</sup>の平均加熱を仮定した場合のゼロ線を点線で示す。海面水温変化傾向は破線。緯度分布(b)では、赤が加熱、青は冷却。実線は海面水温変化傾向。上部の数値は放射偏差と海面水温変化傾向の緯度分布の相関。1998-2011年。

量と蒸発量は熱収支では主要な項(Trenberth & Dai, 2007, Boeing *et al.*, 2012, Stephens, *et al.*, 2012) だが簡単のため省略する。加熱冷却が起こる海の深さは時間変動するが一定と仮定する。全球で一年間積分した放射エネルギー

$$A_g \int_0^t (NET(t) - B) dt = E$$

が全て次の年の

$$E = A_o \rho C_p \delta T(t) \delta z$$

表層海水温度に変換されたとすると  $E = A_o \rho C_p \delta T(t) \delta z$  が成り立つ。ここで地球の表面積を  $A_g$  ( $5.09 \times 10^{14} \text{ m}^2$ )、正味放射量を NET, 正味放射量に含まれる偏差を B, 海洋の表面積を  $A_o$  ( $3.39 \times 10^{14} \text{ m}^2$ )、海水の密度を  $\rho$  ( $1025 \text{ kg m}^{-3}$ )、海水の単位体積の比熱を  $C_p$  ( $3990 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )、水深を  $\delta z$  (m) とした (Trenberth *et al.*, 2002)。1998 年以降に限ると、図 3 の場合は 80m、 $0.64 \text{ Wm}^{-2}$  の加熱を仮定した場合は 90m と計算された。

## 5. 結論

再解析(ERA-Interim)正味放射量は正味放射量そのものとは言えない。しかし見かけ上とはいえ今年の再解析正味放射量は来年の海面水温の情報を持っている。熱帯の海面水温と中高緯度大気や海洋の関係は大気の架け橋 (Trenberth *et al.*, 1998, Alexander *et al.*, 2002) と呼ばれているが、正味放射の偏差からも同様の架け橋がありそうにも見える。但し、因果関係を示すのか、相互作用が生みだしたリズムによる関係かは今後の検討課題である。

## 参考文献

Alexander, M. A., *et al.*, The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans, *J. Climate*, 15, 2205-2231, (2002).  
 Berrisford, P., *et al.*, Atmospheric conservation properties in ERA-Interim, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 1381-1399, (2011).  
 Boeing, C. *et al.*, The 2011 *La Niña*: So strong, the oceans fell, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L19602,

(2012).  
 Chioldo, G. and Haimberger, L., Interannual changes in mass consistent energy budget from ERA-Interim and satellite data, *J. Geophys. Res.*, 115, D02112, (2010).  
 Dee, D. P., *et al.*, The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 553-597, (2011).  
 Loeb, N. G., *et al.*, Advances in understanding top-of-atmosphere radiation variability from satellite observations, *Surv. Geophys.*, 33, 359-385, (2012a).  
 Loeb, N. G., *et al.*, Observed changes in top-of-the-atmosphere radiation and upper-ocean heating consistent within uncertainty, *Nature Geoscience*, 5, 110-113, (2012b).  
 Lyman, J. M., *et al.*, Robust warming of the global upper ocean, *Nature*, 465, 334-337, (2010).  
 Purkey, S. G., and G. C. Johnson, Warming of global abyssal and deep southern ocean waters between the 1990s and 2000s: Contributions to global heat and sea level rise budgets, *J. Climate*, 23, 6336-6351, (2010).  
 Simmons, A. J., *et al.*, Low-frequency variation in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inference from reanalyses and monthly gridded observational data set, *J. Geophys. Res.*, 115, D01110, (2010).  
 Stephens, G. L., *et al.*, An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations, *Nature Geoscience*, 5, 691-696, (2012).  
 Trenberth, K., E., *et al.*, Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical seasurface temperatures, *J. Geophys. Res.*, 103, 14291-14324, (1998).  
 Trenberth, K. E., Caron, J. M., Stepaniak, D. P., Worley, S., Evolution of *El Niño*-Southern oscillation and global atmospheric surface temperatures, *J. Geophys. Res.*, 107, 4065, (2002).  
 Trenberth, K. E., and Dai, A., Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L15702, (2007).  
 Trenberth, K. E. and Fasullo, J. T., Tracking Earth's energy: from *El Niño* to global warming, *Surv. Geophys.*, 33, 413-426, (2012).  
 Trenberth, K., E. and Fasullo, J. T., Regional energy and water cycles: Transport from ocean to land, *J. Climate*, 20, 7837-7851, (2013).