

# 固定アンビル温度仮説の上層雲サイズへの依存性

\*野田 暁<sup>1</sup>, 清木達也<sup>1</sup>, 佐藤正樹<sup>2,1</sup>, 山田洋平<sup>1</sup>

<sup>1</sup>海洋研究開発機構, <sup>2</sup>東大大気海洋研究所

## 1. はじめに

Hartmann and Larson (2002)は上層雲の温暖化応答の制約の1つとして固定アンビル温度(Fixed Anvil Temperature)仮説を提唱した。すなわち雲頂気温の変化は小さいためにOLRの変化に重要ではない。FAT仮説によれば地表面気温の増加に依らず熱帯上層雲の雲頂温度はほぼ一定に保たれる。このため温暖化大気においても地球大気は上層雲に伴う赤外放射(OLR)量の増加は大きく抑制されることになる。しかし、どの程度の雲頂気温変化を”小さい”と見做すことが出来るのかは曖昧にされてきた。実際、CMIP3の結果では上層雲の雲頂気温はわずかに上昇しており、少なからずOLRの変化に寄与している。本研究では全球非静力学モデル(NICAM)を用いてOLRの変化が起こる要因を定量的に評価することでFAT仮説の適応可能性について調べる。

## 2. 数値実験と雲サイズの定義

用いたモデルはNICAMである。全球ではほぼ均一な7km格子を用いて現在気候と将来気候実験を行った。現在気候実験の時間積分は2004年6月1日から1年間行った。将来気候実験はCMIP3のA1Bシナリオ実験による海面温度上昇量を上乘せして与えた。そして2004年5月1日のNCEP解析値を初期場として1ヵ月間スピナップし、6月1日から1年間積分した結果を比較した。CO<sub>2</sub>濃度を全球一様に2倍にした。6時間毎に出力したデータを低緯度域(30°S–30°N)について解析した。詳細な実験設定はNoda et al. (2014)を参照して欲しい。OLRが210W m<sup>-2</sup>以下の領域を上層雲域とした。

## 3. OLRの診断

どの要素がOLRの変化に寄与しているのか調べるために、まずOLR,  $F$ , を

$$\begin{aligned} F &\cong \sigma \varepsilon T_{CT}^4 + F_{CB} \\ &\cong \sigma \varepsilon T_{CT}^4 + (1 - \varepsilon) F^{CLR} \end{aligned} \quad (1)$$

で診断する。ここで、 $F_{CB}$ と $F^{CLR}$  (W m<sup>-2</sup>)はそれぞれ上層雲の雲底高度からの上向き長波放射と晴天大気を仮定した上向き長波放射、 $\sigma (= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4})$ はステファンボルツマン定数である。雲の上向き射出率 $\varepsilon$ は

$$\varepsilon = 1 - \exp(-a\tau), \quad (2)$$

で与える。ここで、 $a = 0.79$ ,  $\tau$ は雲の光学的厚さである。 $F$ の温暖化応答 $\Delta F$ は式1を用いて、

$$\begin{aligned}\Delta \bar{F}^{(i)} &\cong \left( \frac{\partial F}{\partial \varepsilon} \right)_{T_{CT}, F^{CLR}} \Delta \varepsilon^{-(i)} + \left( \frac{\partial F}{\partial T_{CT}} \right)_{\varepsilon, F^{CLR}} \Delta T_{CT}^{-(i)} + \left( \frac{\partial F}{\partial F^{CLR}} \right)_{\varepsilon, T_{CT}} \Delta F^{CLR(i)} \\ &\equiv F_{\varepsilon} \Delta \varepsilon^{-(i)} + F_T \Delta T_{CT}^{-(i)} + F_F \Delta F^{CLR(i)},\end{aligned}\quad (4)$$

ここで、

$$F_{\varepsilon} = \sigma \left( \overline{T_{CT}^{(i)}} \right)^4 - \overline{F^{CLR(i)}}, \quad (5)$$

$$F_T = 4\varepsilon^{-(i)} \sigma \left( \overline{T_{CT}^{(i)}} \right)^3, \quad (6)$$

$$F_F = 1 - \varepsilon^{-(i)}. \quad (7)$$

であり、オーバーバーと $(i)$ は $i$ 番目の雲域の平均値を意味する。OLRの診断式(式4)を用いることで $\varepsilon$ 、 $T_{CT}$ 、 $F^{CLR}$ の変化のOLRの変化への寄与を定量的に評価出来る。

#### 4. 結果

図1は式4の各項を上層雲半径( $r$ )の関数で示している。各項の寄与の大きさを比較するとOLRは $r > 50\text{km}$ では $1.0 - 3.5\text{W m}^{-2}$ 程度変化している。3つの項のOLRの変化の寄与は雲のサイズに依存して変化している。雲射出率の変化は $r = 90\text{km}$ 付近でもっとも大きい。 $T_{CT}$ の変化の寄与は雲半径とともに増加する。そして、 $r > 340\text{km}$ では $T_{CT}$ の寄与は $\varepsilon$ の寄与とほぼ同程度となる。対照的に、 $F^{CLR}$ の寄与は非常に小さく、OLRを減少させるように寄与している。従って、FAT仮説が成り立つか否かはどのサイズの雲の出現頻度が高いかに大きく依存することになるが、雲の出現頻度は小さいサイズほど指数関数的に大きくなるため(Inoue et al. 2008; Noda et al. 2014)、 $T_{CT}$ の変化の寄与は2次的であり、むしろ $\varepsilon$ の変化の寄与が重要となる。以上より、FAT仮説は有用であることがわかる。

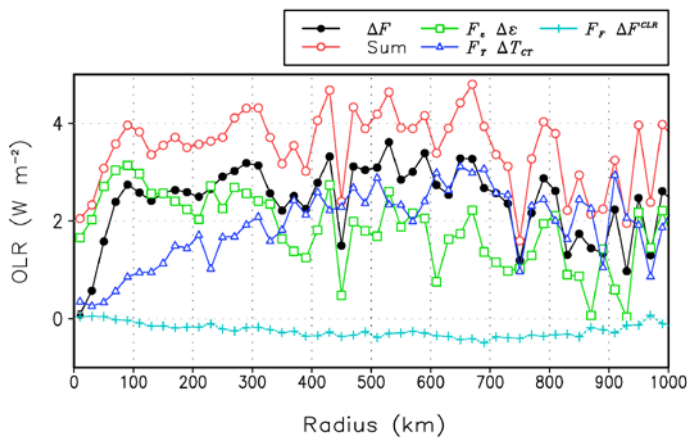


図1 温暖化によるOLR変化の収支解析(式4)。雲半径(横軸)のビンサイズは20km。

#### 参考文献

- Hartmann and Larson (2002), GRL, 29.  
Inoue et al. (2008), JMSJ, 86A, 1-15.  
Noda et al. (2014), JCLI, 27, 7753-7768.

#### 謝辞

この研究は文部科学省推進事業であるリスク情報創生プログラムと戦略分野3の補助を受けて行われた。数値実験とデータ処理はスーパーコンピュータ京と地球シミュレータを用いて行われた。