

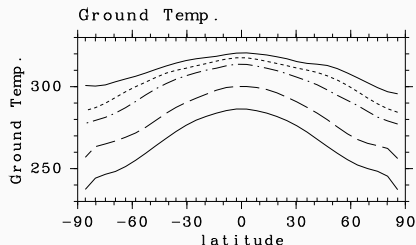
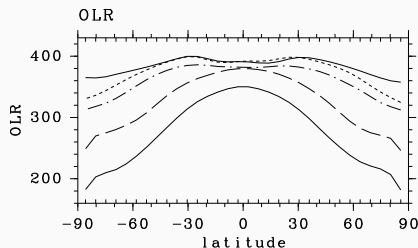
水惑星における南北熱輸送の太陽定数依存性

人見祥磨

January 6, 2022

北海道大学大学院理学院 地球流体力学研究室 M2

- 灰色 1 次元モデルでは OLR に上限が存在する（放射上限）(Nakajima *et al.* 1992)
- 灰色 3 次元モデルでも放射上限は現れる (Ishiwatari *et al.* 2002)
 - 灰色 3 次元モデルでは、太陽定数を大きくすると OLR や地表面温度の南北差が小さくなる
 - 灰色 3 次元モデルでは太陽定数が大きくなると潜熱輸送が大きくなっていた



灰色 3 次元モデルでの太陽定数と OLR の関係 ($S = 1570, 1550, 1500, 1380, 1200 \text{ W/m}^2$)
(Ishiwatari *et al.*, 2002; Fig. 4a, b)

- 非灰色の 3 次元モデルに関してはしっかりとした議論が行われていなかった
- 非灰色の 3 次元モデルで太陽定数を変えて計算する
 - 灰色の場合: 太陽定数が大きい時に南北差が小さいのが特徴
 - 南北差が小さくなるのには熱輸送が効いているはず
 - 太陽定数を大きくした場合の南北熱輸送に関して考察する
 - 非灰色でも灰色モデルと同様に太陽定数が増大するにつれて潜熱輸送も増大するのか

- 利用したモデル
 - DCPAM5
- 基礎方程式
 - 以下の3次元球殻上プリミティヴ方程式

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} + v_H \cdot \nabla_\sigma \pi = -D - \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} \quad (\text{連続の式})$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT_v}{\sigma} \quad (\text{静水圧の式})$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial V_A}{\partial \lambda} - \frac{\partial U_A}{\partial \mu} \right) + \mathcal{D}[\zeta], \quad \frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial U_A}{\partial \lambda} \right) - \nabla_\sigma^2 (\Phi + R\bar{T}\pi + KE) + \mathcal{D}[D] \quad (\text{運動方程式})$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial UT'}{\partial \lambda} + \frac{\partial VT'}{\partial \mu} \right) + T'D - \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \kappa T_v \left(\frac{\partial \pi}{\partial t} + v_H \cdot \nabla_\sigma \pi + \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \right) + \frac{Q}{C_p} + \mathcal{D}[T] + \mathcal{D}'[v] \quad (\text{熱力学の式})$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial U_q}{\partial \lambda} + \frac{\partial V_q}{\partial \mu} \right) + qD - \dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} + S_q + \mathcal{D}[q] \quad (\text{水蒸気の式})$$

φ, λ : 緯度経度; $\sigma := p/p_S$: σ 座標高度; t : 時間; $\pi := \ln[p_S]$; T : 気温; q : 比湿; a : 惑星半径;

$\zeta := (1/a)((1/(1-\mu^2))(\partial V/\partial \lambda) - \partial U/\partial \mu)$: 渦度; $\zeta := (1/a)((1/(1-\mu^2))(\partial U/\partial \lambda) + \partial V/\partial \mu)$: 発散;

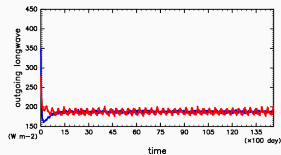
u, v : 東西・南北風速; $(U, V) := (u \cos \varphi, v \cos \varphi)$; \mathcal{D} : 水平拡散; $\mathcal{D}'[v]$: 摩擦熱;

- 水惑星
- 解像度 T42L26
- 太陽定数 S と積分時間

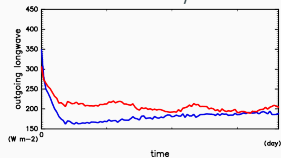
S [W/m^2]	1366	1500	1600	1800	2000
積分時間 (年)	40	3	10	10	20

- 雲あり
- 地球設定
- 初期状態
 - 地表面温度 280 K
 - 大気は静止状態

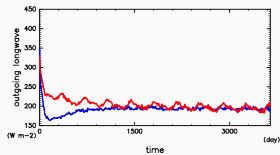
結果 (OLRA, OSRA の時間推移)



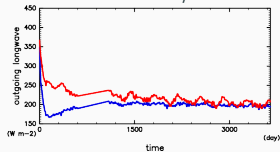
$$S = 1366 \text{ W/m}^2$$



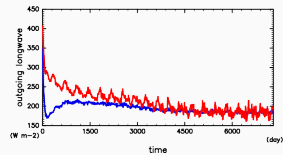
$$S = 1500 \text{ W/m}^2$$



$$S = 1600 \text{ W/m}^2$$

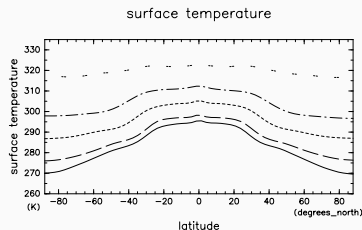


$$S = 1800 \text{ W/m}^2$$



$$S = 2000 \text{ W/m}^2$$

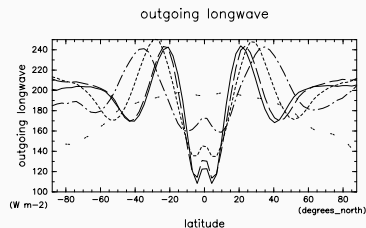
結果（地表面温度と OLR; 計算終了年での平均）



(mean) time:14235..14600
(mean) lon:0..357.188

/var/sls/gslw 2022-01-04

S1366/_40y/SurfTemp.nc@SurfTemp,time=14235:14600



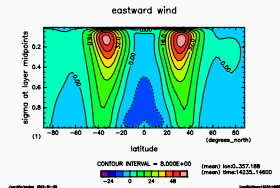
(mean) time:14235..14600
(mean) lon:0..357.188

/var/sls/gslw 2022-01-04

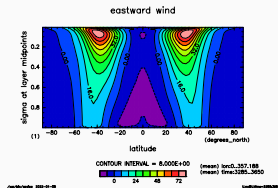
S1366/_40y/OLR.nc@OLR,time=14235:14600

実線: S1366; 破線: S1500; 点線: S1600; 一点鎖線: S1800; 二点鎖線: S2000;

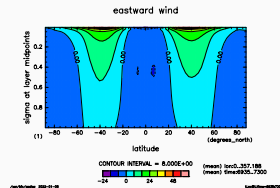
結果（東西風；計算終了年での平均）



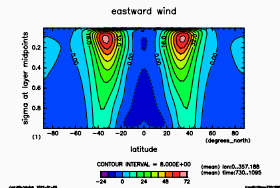
$$S = 1366 \text{ W/m}^2$$



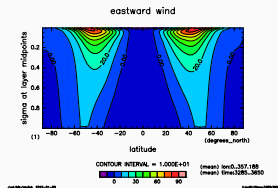
$$S = 1600 \text{ W/m}^2$$



$$S = 2000 \text{ W/m}^2$$



$$S = 1500 \text{ W/m}^2$$



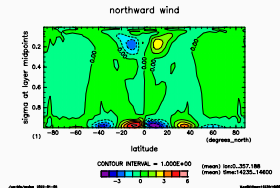
$$S = 1800 \text{ W/m}^2$$

$$\text{latentEnFlxLat} = \int Lq v dp \quad (\text{潜熱輸送})$$

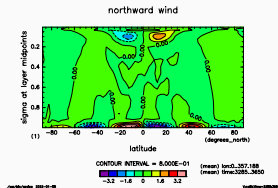
$$\text{dryStatEnFlxLat} = \int (C_p T + gh) v dp \quad (\text{乾燥静的エネルギー})$$

$$\text{moistStatEnFlxLat} = (\text{dryStatEnFlxLat} + \text{latentEn}) \quad (\text{湿潤静的エネルギー})$$

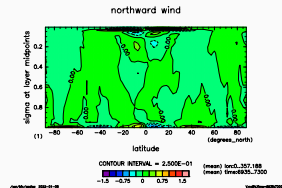
結果（南北風；計算終了年での平均）



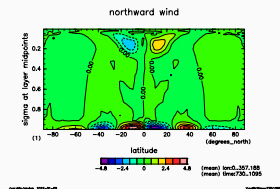
$$S = 1366 \text{ W/m}^2$$



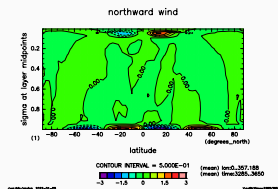
$$S = 1600 \text{ W/m}^2$$



$$S = 2000 \text{ W/m}^2$$

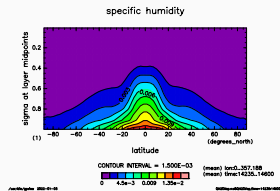


$$S = 1500 \text{ W/m}^2$$

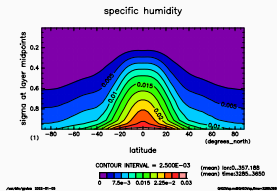


$$S = 1800 \text{ W/m}^2$$

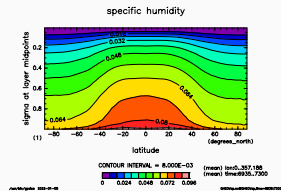
結果 (比湿; 計算終了年での平均)



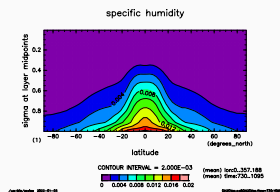
$$S = 1366 \text{ W/m}^2$$



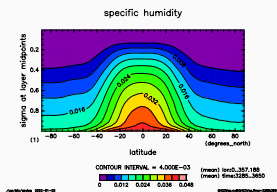
$$S = 1600 \text{ W/m}^2$$



$$S = 2000 \text{ W/m}^2$$

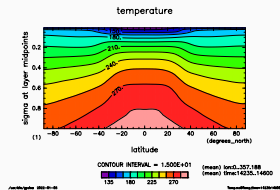


$$S = 1500 \text{ W/m}^2$$

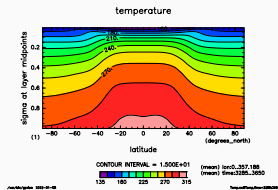


$$S = 1800 \text{ W/m}^2$$

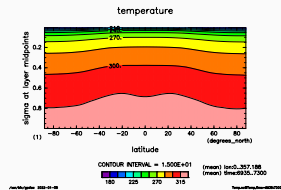
結果（気温；計算終了年での平均）



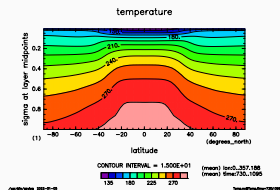
$$S = 1366 \text{ W/m}^2$$



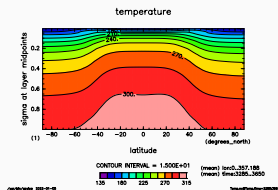
$$S = 1600 \text{ W/m}^2$$



$$S = 2000 \text{ W/m}^2$$

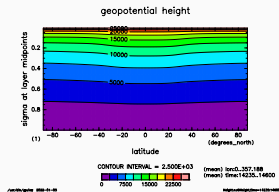


$$S = 1500 \text{ W/m}^2$$

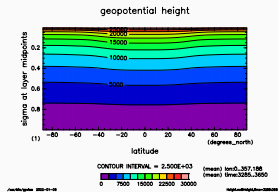


$$S = 1800 \text{ W/m}^2$$

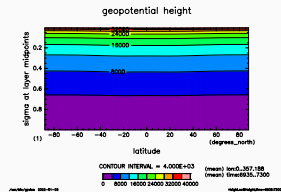
結果 (ジオポテンシャル高; 計算終了年での平均)



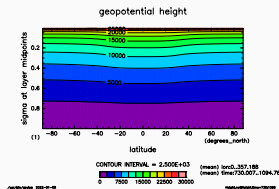
$$S = 1366 \text{ W/m}^2$$



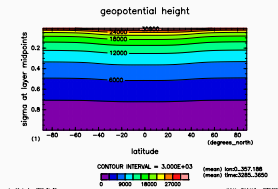
$$S = 1600 \text{ W/m}^2$$



$$S = 2000 \text{ W/m}^2$$

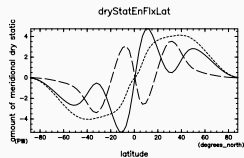


$$S = 1500 \text{ W/m}^2$$

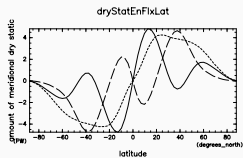


$$S = 1800 \text{ W/m}^2$$

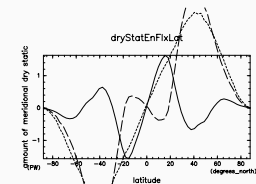
結果（南北熱輸送；計算終了年での平均）



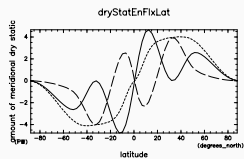
$$S = 1366 \text{ W/m}^2$$



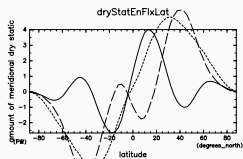
$$S = 1600 \text{ W/m}^2$$



$$S = 2000 \text{ W/m}^2$$



$$S = 1500 \text{ W/m}^2$$



$$S = 1800 \text{ W/m}^2$$

実線: dryStatEnFlxLat; 破線: latentEnFlxLat; 鎖線: moistStatFlxLat;

- 非灰色でも、太陽定数が増大した時に潜熱輸送も増大する事がわかった
- 今後の課題
 - 潜熱輸送を大きくしているのは何?
 - 地表面温度の差が小さくなるのに、どうして輸送量は増えるのか?