

# 水惑星における南北熱輸送の太陽定数への依存性

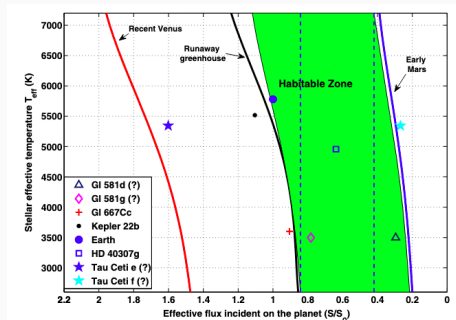
---

人見祥磨

January 5, 2022

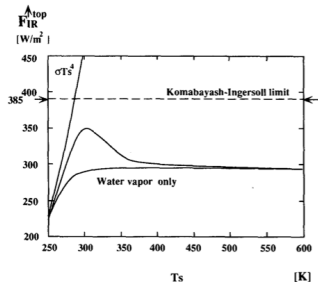
北海道大学大学院理学院 地球流体力学研究室 M2

- 系外惑星に生命が存在するためには、惑星表面に液体の水があることが重要だと考えられる (Kopparapu *et al.*, 2013)
- 惑星表面に液体の水が存在しうる領域は、ハビタブルゾーン (HZ) と呼ばれる
- HZ より内側では、水が蒸発しきってしまうほど太陽定数が大きいと考えられる
- ここでは太陽定数を増やした時に気候がどう変化するかに着目する

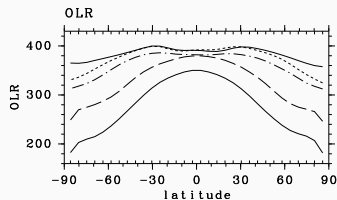


様々な中心星の有効温度ごとに、雲がない場合の HZ を示したもの。(Kopparapu *et al.*, 2013; Fig. 8)

- HZ の内側境界を決定する重要な概念として、暴走温室状態がある
  - 灰色 1 次元モデルでは惑星大気が射出できる放射に上限が存在する（放射上限）
  - 放射上限を超えて恒星放射の入射がある状態が暴走温室状態である (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)
- 非灰色の 3 次元モデルでは暴走温室に関する議論は学会発表程度しかなかった



灰色 1 次元放射対流平衡モデルでの  
地表面温度と OLR の関係  
(Nakajima *et al.*, 1992; Fig. 4)



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

- 非灰色の 3 次元モデルで太陽定数を変えて計算する
- 南北熱輸送に関して考察する

- 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

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

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

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

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

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

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

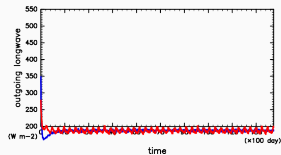
$\zeta := (1/a)((1/(1-\mu^2))(\partial V/\partial \lambda) - \partial U/\partial \mu)$ : 渦度;  $\zeta := (1/a)((1/(1-\mu^2))(\partial U/\partial \lambda) + \partial V/\partial \mu)$ : 発散;

$u, v$ : 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;

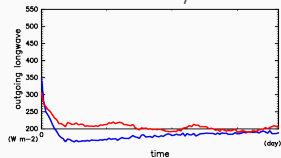
- 水惑星
- 解像度 T42L26
- 太陽定数  $S$  と積分時間

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

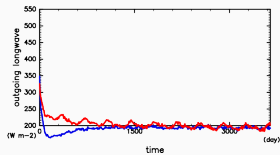
## 結果 (OLRA の時間推移)



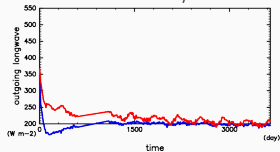
$$S = 1366 \text{ W/m}^2$$



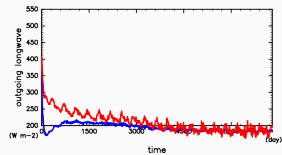
$$S = 1500 \text{ W/m}^2$$



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

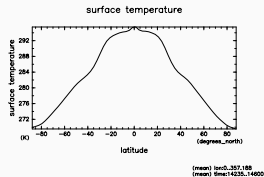


$$S = 1800 \text{ W/m}^2$$



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

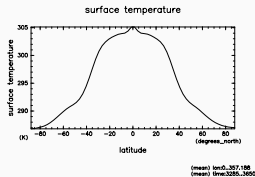
# 結果（地表面温度；計算終了年での平均）



/usr/lib/gnuplot 2020-01-08

surface temperature from 1366.000

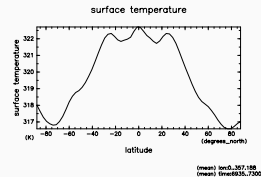
$$S = 1366 \text{ W/m}^2$$



/usr/lib/gnuplot 2020-01-08

surface temperature from 1600.000

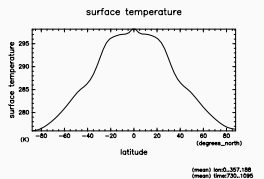
$$S = 1600 \text{ W/m}^2$$



/usr/lib/gnuplot 2020-01-08

surface temperature from 2000.000

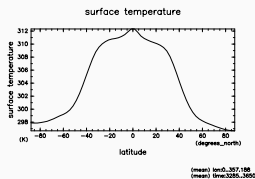
$$S = 2000 \text{ W/m}^2$$



/usr/lib/gnuplot 2020-01-08

surface temperature from 1500.000

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



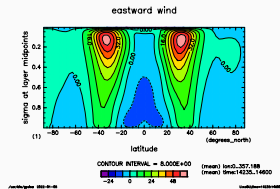
/usr/lib/gnuplot 2020-01-08

surface temperature from 1800.000

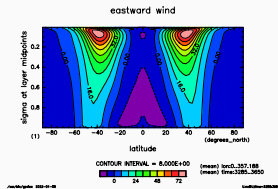
$$S = 1800 \text{ W/m}^2$$



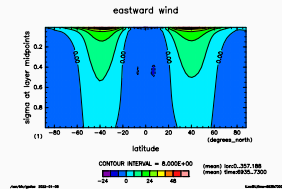
# 結果（東西風；計算終了年での平均）



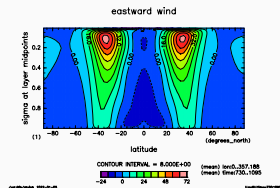
$$S = 1366 \text{ W/m}^2$$



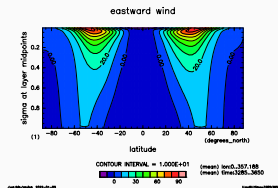
$$S = 1600 \text{ W/m}^2$$



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



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



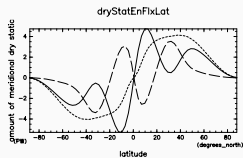
$$S = 1800 \text{ W/m}^2$$

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

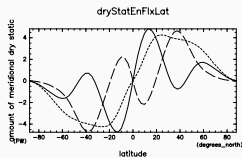
$$\text{dryStatEnFlxLat} = \int (C_p T + gh) v \, dp \quad (\text{乾燥静的エネルギー})$$

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

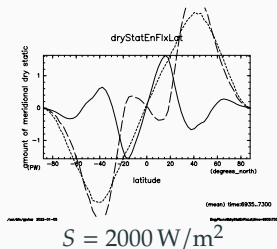
# 結果（南北熱輸送；計算終了年での平均）



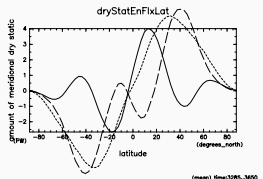
$$S = 1366 \text{ W/m}^2$$



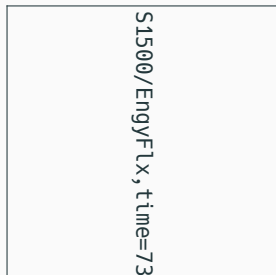
$$S = 1600 \text{ W/m}^2$$



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



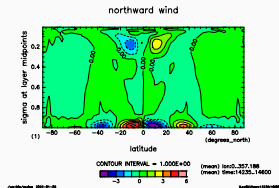
$$S = 1800 \text{ W/m}^2$$



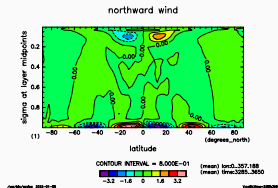
$$S = 1500 \text{ W/m}^2$$

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

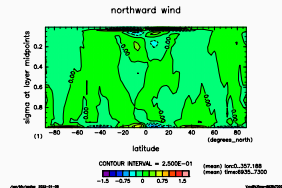
# 結果（南北風；計算終了年での平均）



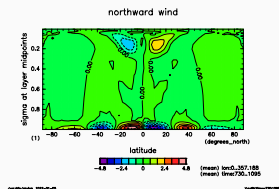
$$S = 1366 \text{ W/m}^2$$



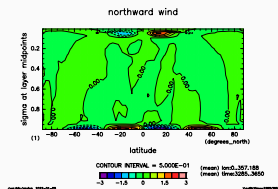
$$S = 1600 \text{ W/m}^2$$



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

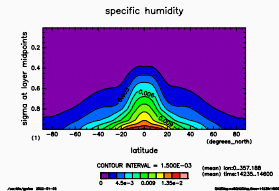


$$S = 1500 \text{ W/m}^2$$

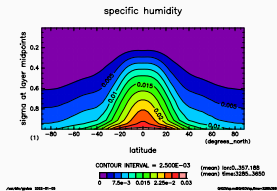


$$S = 1800 \text{ W/m}^2$$

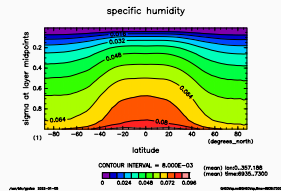
# 結果 (比湿; 計算終了年での平均)



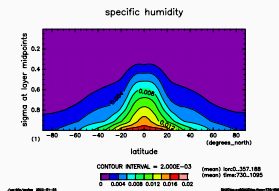
$$S = 1366 \text{ W/m}^2$$



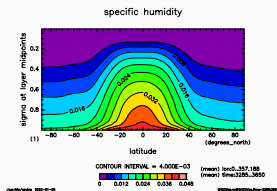
$$S = 1600 \text{ W/m}^2$$



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

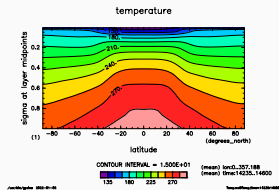


$$S = 1500 \text{ W/m}^2$$

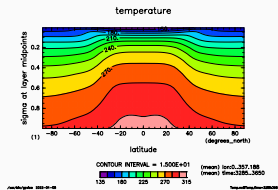


$$S = 1800 \text{ W/m}^2$$

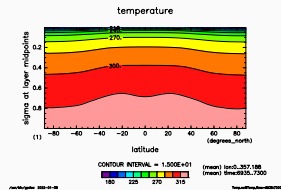
# 結果（気温；計算終了年での平均）



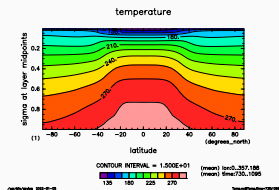
$$S = 1366 \text{ W/m}^2$$



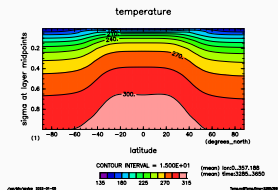
$$S = 1600 \text{ W/m}^2$$



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

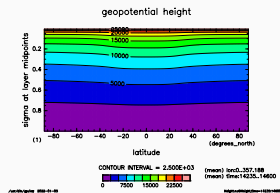


$$S = 1500 \text{ W/m}^2$$

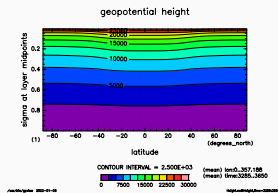


$$S = 1800 \text{ W/m}^2$$

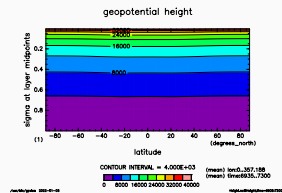
# 結果 (ジオポテンシャル高; 計算終了年での平均)



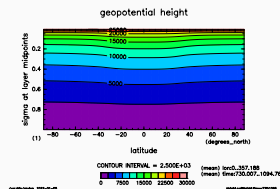
$$S = 1366 \text{ W/m}^2$$



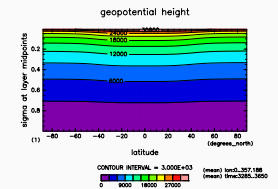
$$S = 1600 \text{ W/m}^2$$



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



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



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

