

# 地球型惑星における南北熱輸送

## その太陽定数への依存性

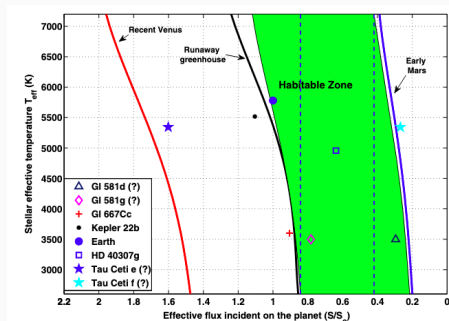
---

人見祥磨

December 28, 2021

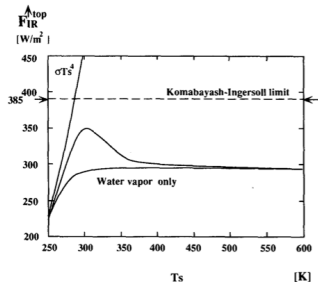
北海道大学大学院理学院 地球流体力学研究室 M2

- 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する条件は、惑星の表面温度が水の融点から沸点の間にあることである
- 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
- ここでは HZ の内側の比較的高温な領域で起こる現象に着目する

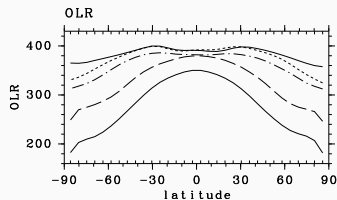


様々な中心星の有効温度ごとに、雲がない場合の HZ を示したものの。(Kopparapu *et al.*, 2013; Fig. 8)

- 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ブ方程式
- 解像度 T42L26

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

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

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

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

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

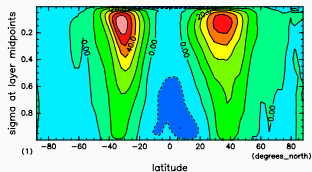
$\varphi, \lambda$ : 緯度経度;  $\sigma := p/p_S$ :  $\sigma$  座標高度;  $t$ : 時間;  $\pi := \ln[p_S]$ ;  $T$ : 気温;  $q$ : 比湿;  $a$ : 惑星半径;

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

結果  $S = 1366 \text{ W/m}^2$  30 年目

eastward wind

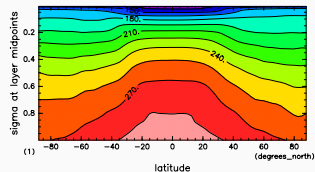


CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01  
time=10950 day  
(mean) lon:0.357,188

/usr/sh/gis/ps 2021-12-25

Unit@Umean=10000

temperature

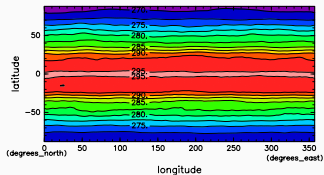


CONTOUR INTERVAL = 1.500E+01  
time=10950 day  
(mean) lon:0.357,188

/usr/sh/gis/ps 2021-12-25

Temp.at@Temp,0mean=10000

surface temperature

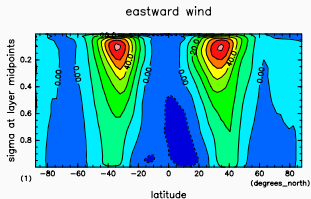


CONTOUR INTERVAL = 2.500E+00  
time=10950 day

/usr/sh/gis/ps 2021-12-25

SurfTemp.at@SurfTemp,0mean=10000

### 結果 $S = 1500 \text{ W/m}^2$ 3 年目

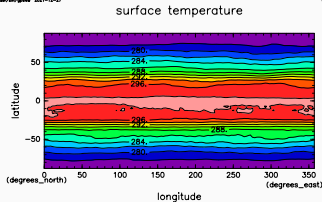


CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01

time=1095 day  
(mean) lonc0...357.188

/usr/bin/grep 2021-12-27

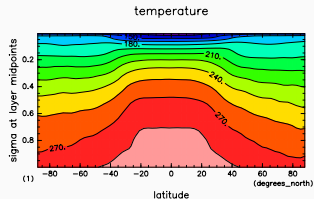
© 2004 Blackwell Publishing Ltd



CONTOUR INTERVAL = 2.000E+00

time=1095 day

./usr/lib/zypp 2020-12-27

SurfTemp,  $\text{m}^2/\text{s}^2$  SurfTemp,  $\text{km}^2/\text{s}^2$  = 1.021

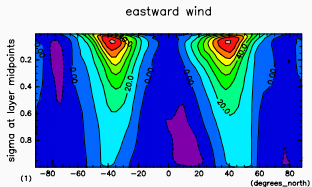
CONTOUR INTERVAL = 1.500E+01

time=1095 day  
(mean) lon:0...357.188

./usr/bin/gvim 2021-12-23

Temp. at 25°C Temp. Error = 1.0°C

**結果  $S = 1600 \text{ W/m}^2$  10 年目**

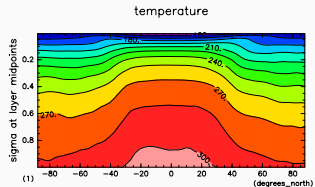


CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01

```
time=3650 day
(mean) lonc0..357.188
```

/usr/bin/gzip 2021-12-28

Unobscured time=3455

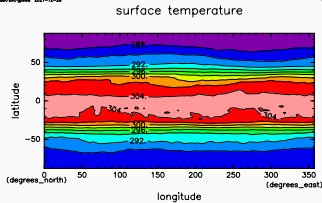


CONTOUR INTERVAL = 1.500E+01

time=3650 day  
(mean) lon:0...357.188

Accepted: 2021-12-29

Temp. at 50°C Temp. at 50°C = 34.00



CONTOUR INTERVAL = 2.000E+00

time=3650 day

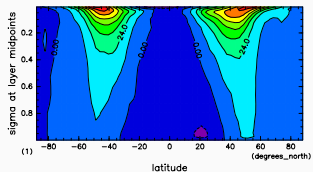
./usr/bin/gzip 2020-12-29

SurfTemp,  $\pm 0.5$  SurfTemp,  $\delta$  max = 30.00



# 結果 $S = 1800 \text{ W/m}^2$ 10 年目

eastward wind



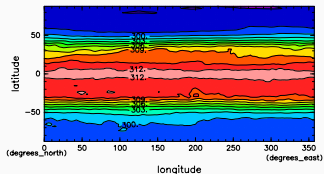
CONTOUR INTERVAL = 1.200E+01  
time=3650 day  
(mean) lon0...357.188



/usr/vis/gpslee 2021-12-27

lon0000=3600

surface temperature



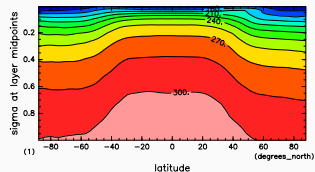
CONTOUR INTERVAL = 1.500E+00  
time=3650 day



/usr/vis/gpslee 2021-12-27

SurfTemp=0000000000

temperature



CONTOUR INTERVAL = 1.500E+01  
time=3650 day  
(mean) lon0...357.188



/usr/vis/gpslee 2021-12-27

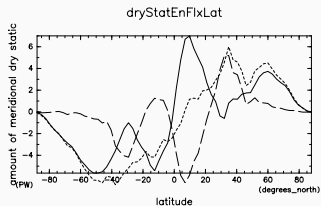
Temp=0000000000

結果  $S = 2000 \text{ W/m}^2$  10 年目

$$\text{moistStatEnFlxLat} = (\text{dryStatEnFlxLat} + \text{latentEn}) \frac{v}{\rho}$$

$$\text{latentEnFlxLat} = \text{latentEn} \frac{v}{\rho}$$

$$\text{dryStatEnFlxLat} = \text{dryStatEn} \frac{v}{\rho}$$



time=10950 day

/var/ftp/pub/ 2021-12-28

EngFlx.mDryStatEnFlxLat.time=10950

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

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

