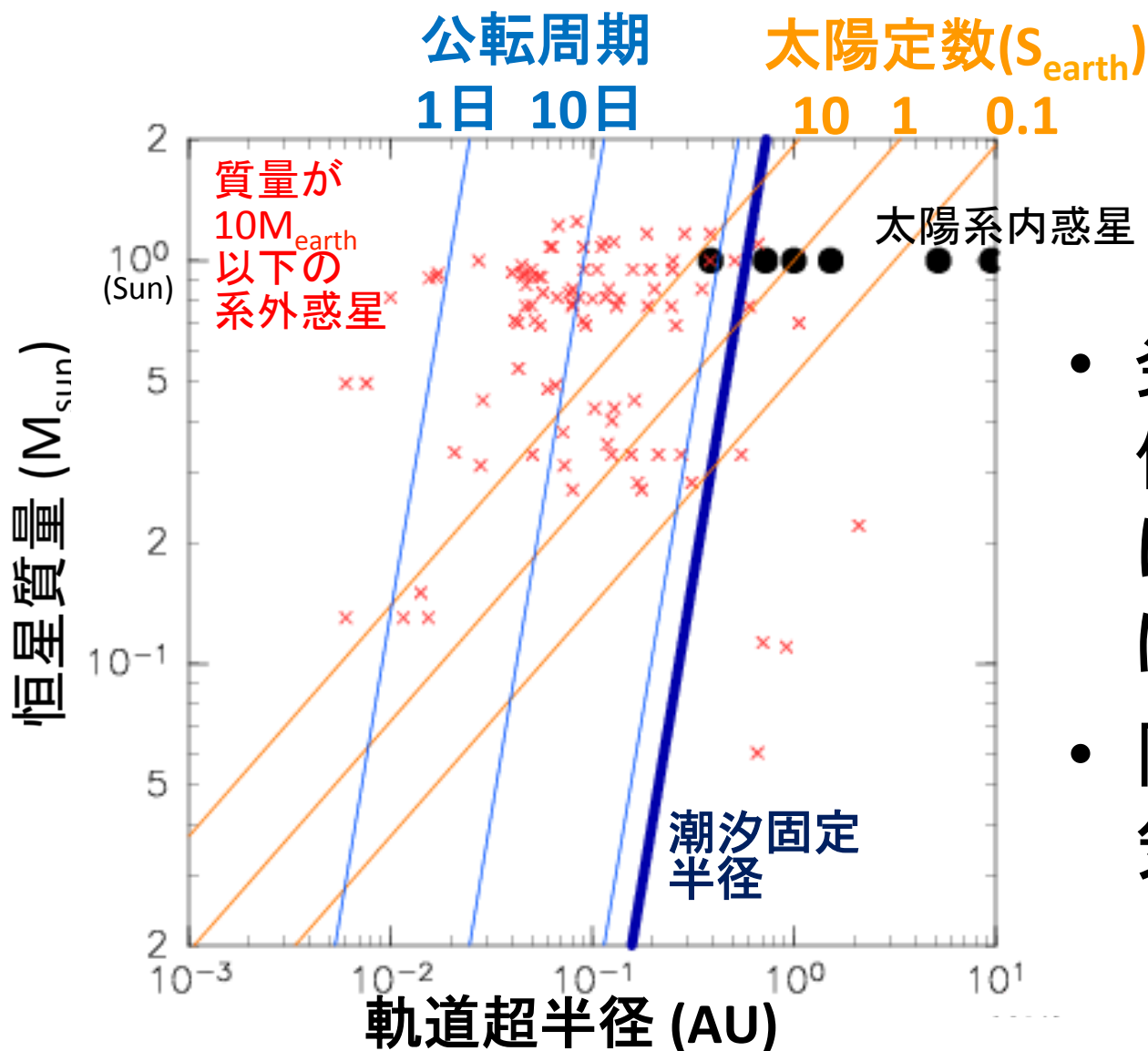


# 同期回転惑星の数値計算

石渡正樹<sup>(1,2)</sup>, 阿部豊<sup>(3)</sup>, 林祥介<sup>(2,4)</sup>, 中島健介<sup>(5)</sup>  
倉本圭<sup>(1,2)</sup>, 高橋芳幸<sup>(2,4)</sup>, 成田一輝<sup>(1)</sup>

(1) Hokkaido University (2) Center of Planetary Science (CPS)  
(3) University of Tokyo (4) Kobe University (5) Kyushu University

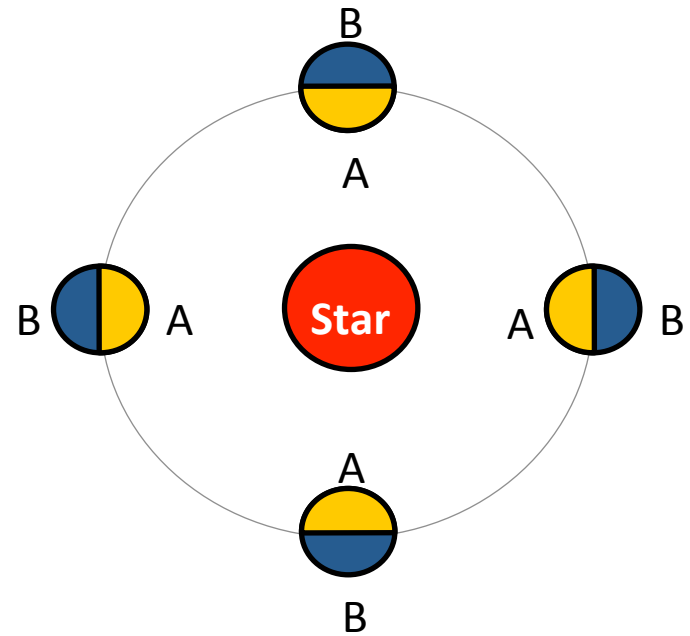
# 地球と似た系外惑星の気候は？



- 発見されている低質量系外惑星は中心星の近傍に存在
- 同期回転惑星の気候が知りたい

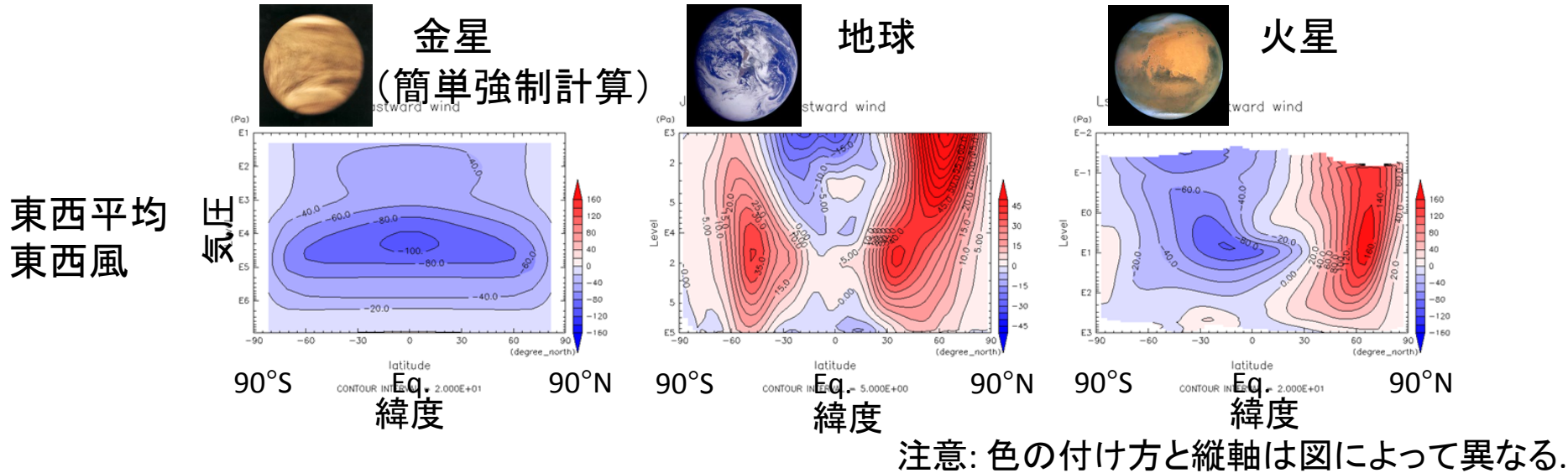
# 同期回転惑星の GCM 実験

- GCM 計算
  - Joshi et al. (1997):  
CO2 atmosphere,  $\Omega = 1/16\Omega_E$
  - Joshi (2003): aqua planet,  $\Omega/\Omega_E = 1$
  - Merlis and Schneider (2010):  
aqua planet,  $\Omega/\Omega_E = 1/365 \sim 1$
  - Edson et al. (2011):  
aqua planet,  $\Omega/\Omega_E = 1/100 \sim 1$
  - Heng and Vogt (2011): Gliese 581g
  - Noda et al. (2012):  
aqua planet,  $\Omega/\Omega_E = 0 \sim 3$ , Solar constant is also changed.
  - Yang et al. (2013)  
aqua planet,  $\Omega/\Omega_E = 1/37$ , Solar constant is also changed.
- ここでは
  - $\Omega$ と $S$ をふった同期回転惑星の気候の多様性を探る実験
  - GJ667Cc を想定した計算



# モデル

- 大気大循環モデル: dcpam5
  - <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>
- 多様な惑星を同一の枠組みで



- 基礎方程式・差分法
  - 基礎方程式: 3次元球殻中のプリミティブ方程式
  - 差分化: 水平方向スペクトル法、鉛直方向差分

# 物理過程

- 放射

- 灰色放射スキーム

- 地球放射スキーム

- 水蒸気、CO<sub>2</sub>、雲水の吸収と散乱を考慮

- Chou and Lee (1996), Chou et al (2001)

- 中心星からの短波放射は太陽のものと同じ

- 積雲対流

- Relaxed Arakawa-Schubert (Moorthi and Suarez, 1992)

- 地表面フラックス: Beljaars and Holtslag (1991)

- 鉛直乱流拡散: Mellor and Yamada (1974) level2.5

- 地表面: 熱容量 0 の海面、海洋の熱輸送無し

- 簡単雲モデル

- 移流、乱流混合、生成、消滅を考慮

$$\partial q \downarrow c / \partial t = -v \nabla v - \sigma \partial q \downarrow c / \partial \sigma + F \downarrow turb + S \downarrow c + q \downarrow c / \tau \downarrow LT$$

$S \downarrow c$  : 雲水の生成

– 大規模凝結で計算される凝結量

– RAS スキームで計算される雲頂からのデトレイン量

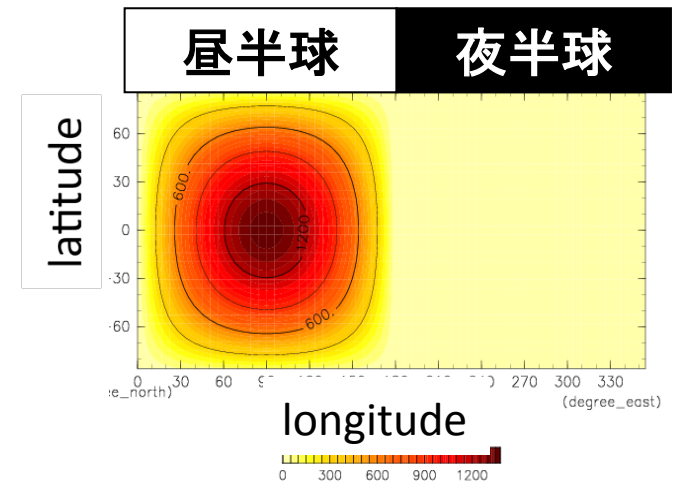
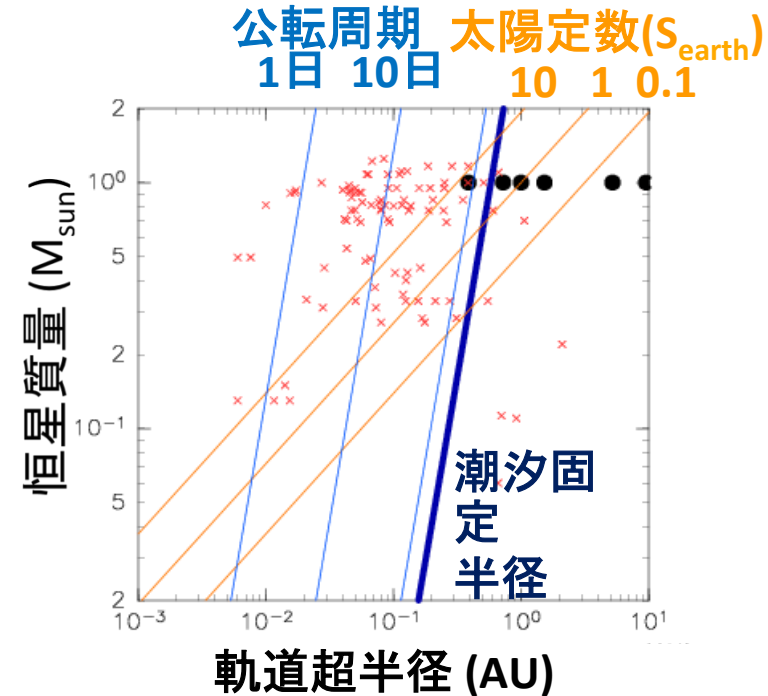
$q \downarrow c / \tau \downarrow LT$  : 雲水の消滅

地球設定計算 (T42L26) でチューニング

すると  $\tau \downarrow LT = 1500 \text{sec}$

# Ω 変更実験

- 目的
  - 昼夜間熱輸送、大気循環場のΩ依存性の調査
- 実験設定
  - 灰色放射・雲無し実験
    - $\Omega=0, \dots, 1.0$  (16 通り)
    - $S=1380\text{W/m}^2$
    - 解像度: T21L16
  - 地球放射・雲有り実験
    - $\Omega=0.0, 0.1, 0.5, 1.0$
    - $S=1366\text{W/m}^2$
    - 解像度: T42L26
    - 雲の消滅時間:  
 $\tau \downarrow LT = 0, 1.5 \times 10^3, 1.5 \times 10^6 \text{sec}$



# 灰色放射・雲無しの場合

Noda et al. (投稿準備中)

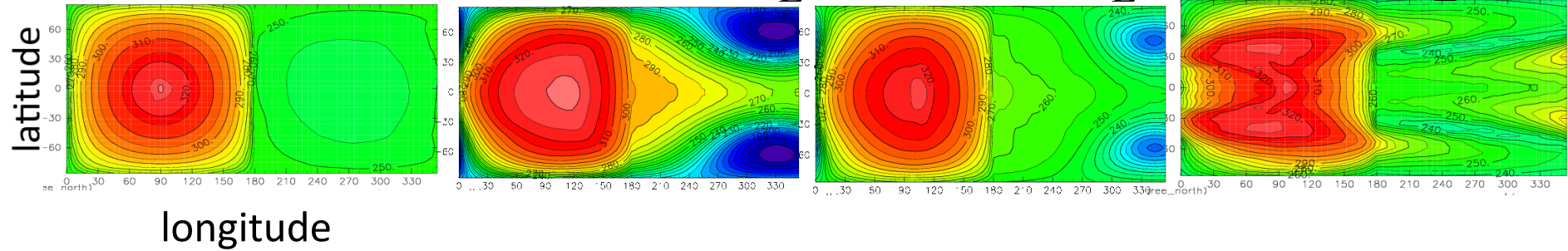
- 表面温度(1000日平均)

$\Omega = 0$

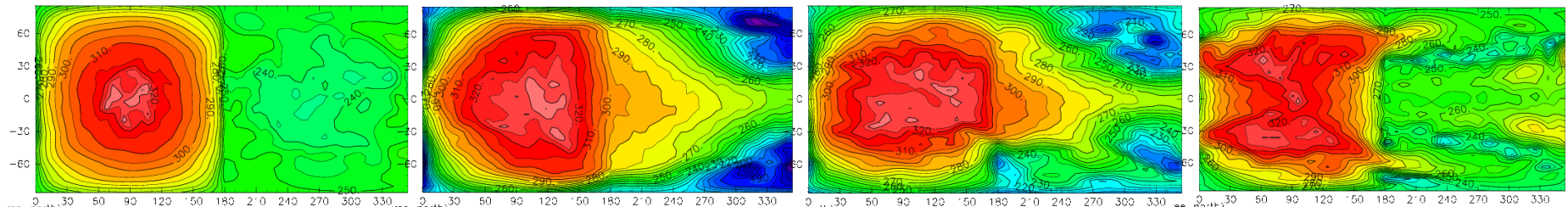
$\Omega = 0.15 \Omega_E$

$\Omega = 0.5 \Omega_E$

$\Omega = \Omega_E$



- 表面温度(スナップショット)

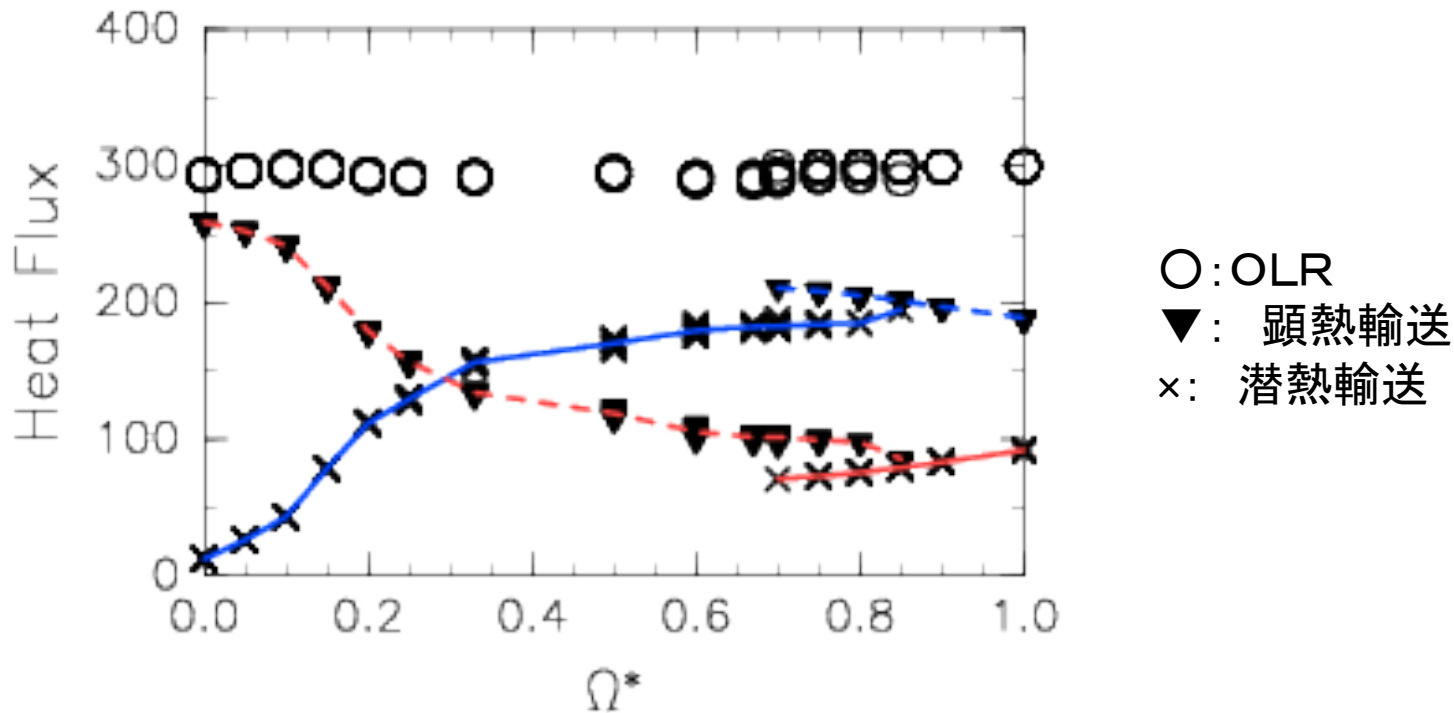


# 昼夜間熱輸送(灰色放射・雲無し)

Noda et al. (投稿準備中)

## • 夜半球の熱収支

(W m<sup>-2</sup>)



• 昼夜間の総熱輸送量は $\Omega$ によらない



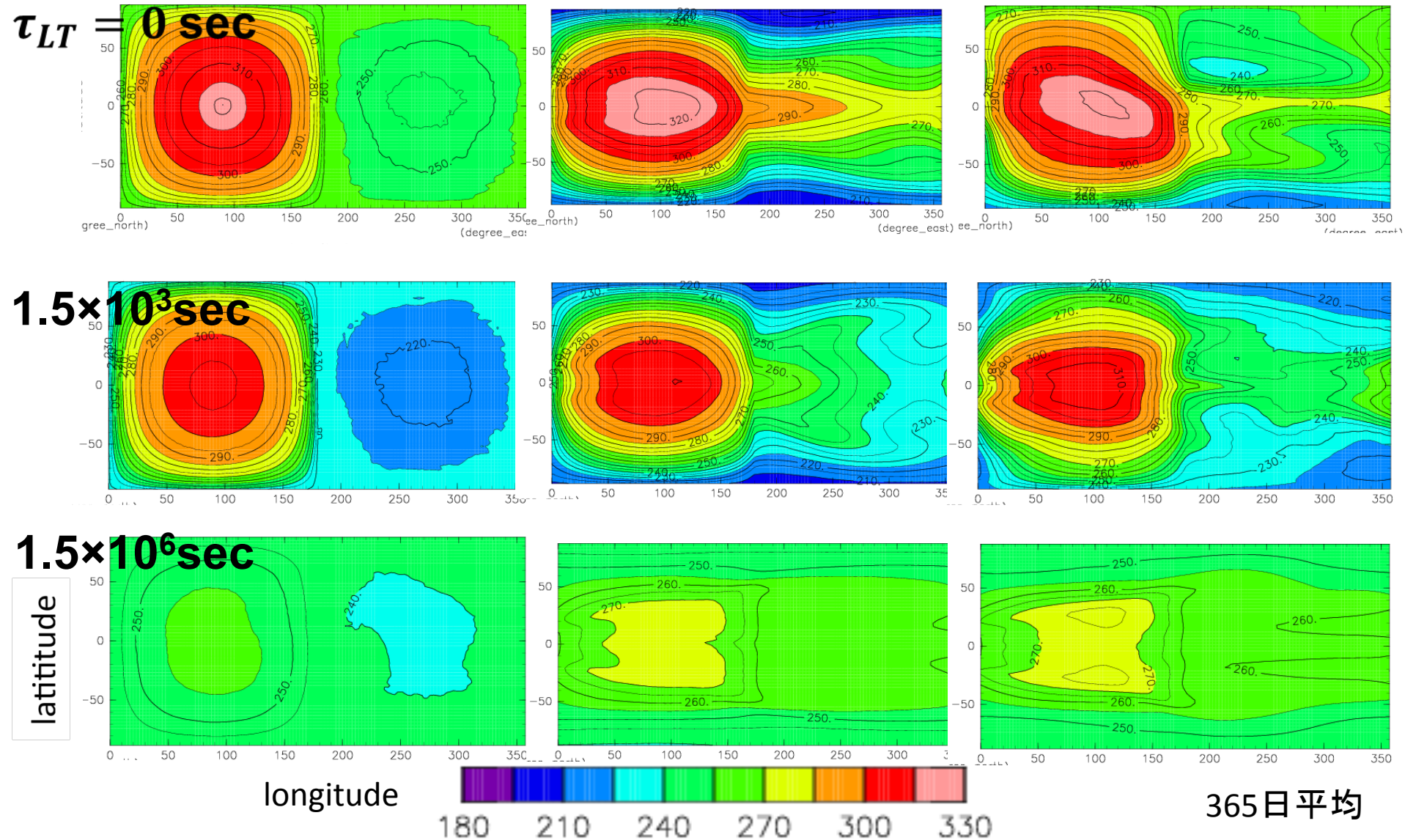
# 非灰色放射・雲有りの場合

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

$\Omega=0.0$

$\Omega=0.5$

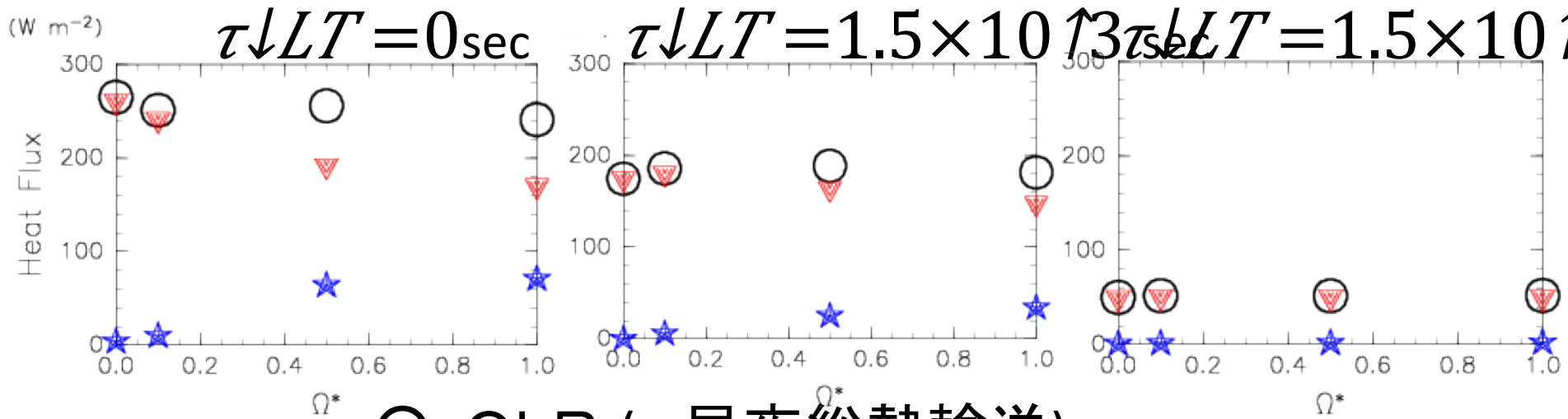
$\Omega=1$



# 昼夜間熱輸送

夜半球熱収支 (1年平均)

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



$\circ$ : OLR (= 昼夜総熱輸送)

$\blacktriangledown$ : (顕熱輸送量) /  $2\pi R^2$

$\star$ : (潜熱輸送量) /  $2\pi R^2$

- やっぱり、昼夜間熱輸送量は $\Omega$ によらない

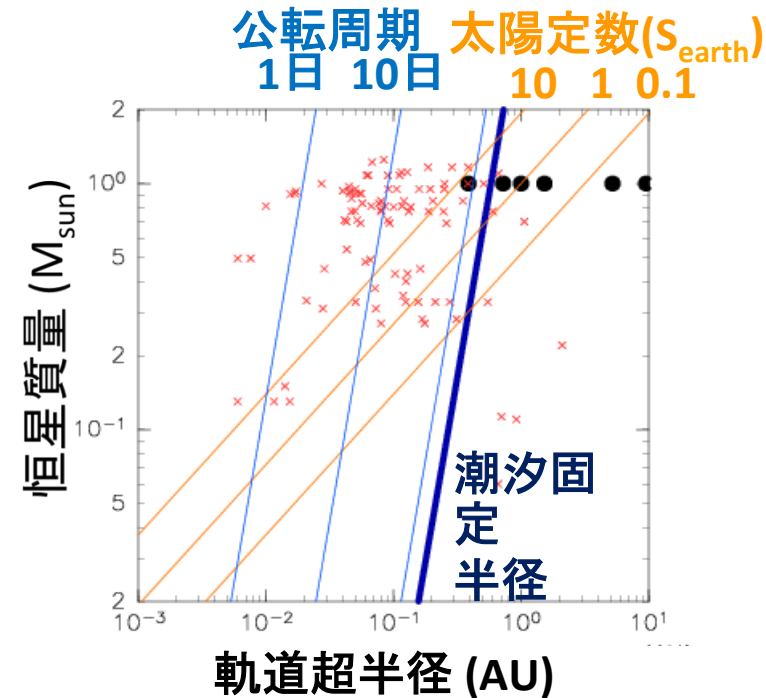
# 太陽定数依存性実験

- 目的

- 暴走温室状態の発生条件の考察(まだ途中)

- 実験設定

- $S=1366-2200\text{W/m}^2$
- $\Omega=1.0$
- 雲の消滅時間:  
 $\tau \downarrow LT=0, 1.5 \times 10^3 \text{sec}$
- 解像度: T42L26
- 積分時間: 3 地球年



# 太陽定数変更実験の現状

- 結果

|        | 同期回転<br>(雲無し) | 地球設定<br>(雲無し) | 同期回転 | 地球設定 |
|--------|---------------|---------------|------|------|
| S=1366 | ○             | ○             | ○    | ○    |
| S=1600 | ○             | ○             | ○    | ○    |
| S=1800 | ×             | ×             | ○    |      |
| S=2000 |               |               | ○?   |      |
| S=2200 |               |               | ×    |      |

○: 統計的平衡状態, ×: 暴走温室状態

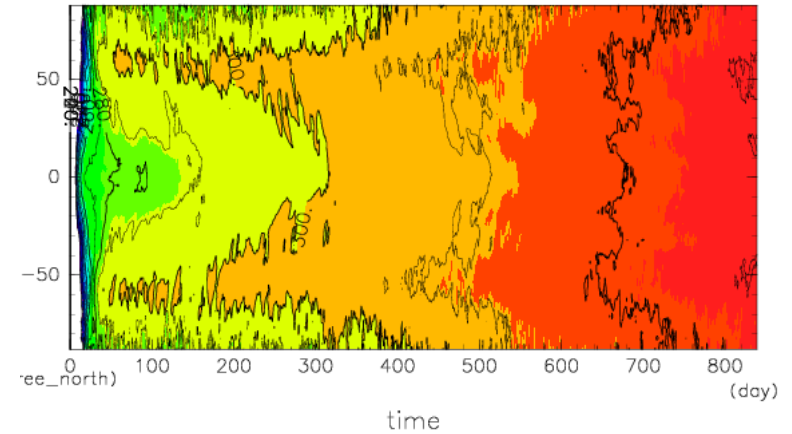
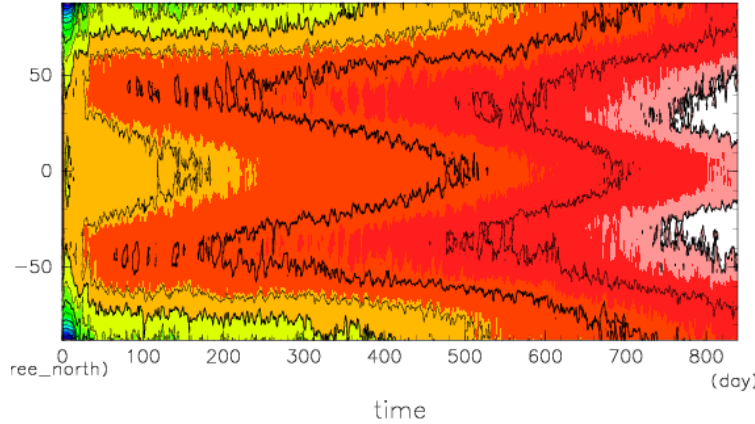
# 暴走温室状態

$$S=2200\text{W/m}^2$$

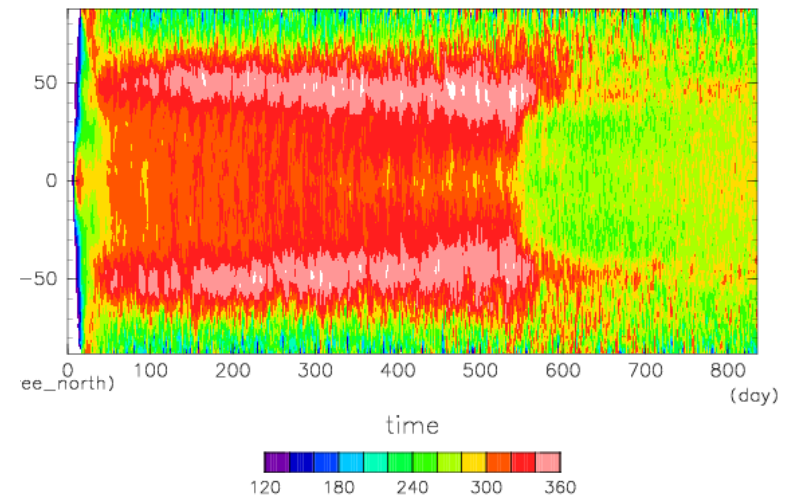
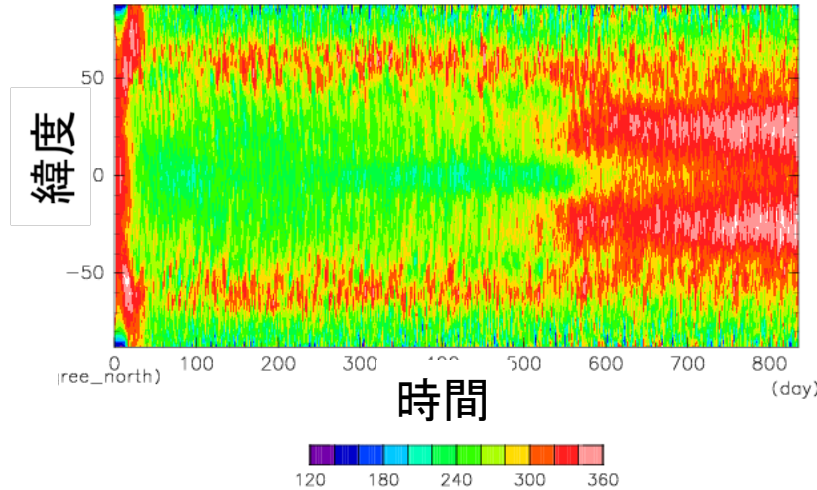
## 昼半球

## 夜半球

表面  
温度



OLR



$$\tau \downarrow L T = 1.5 \times 10^{13} \text{ sec}$$

0-10年目まで

# 特定の惑星を想定したGCM実験

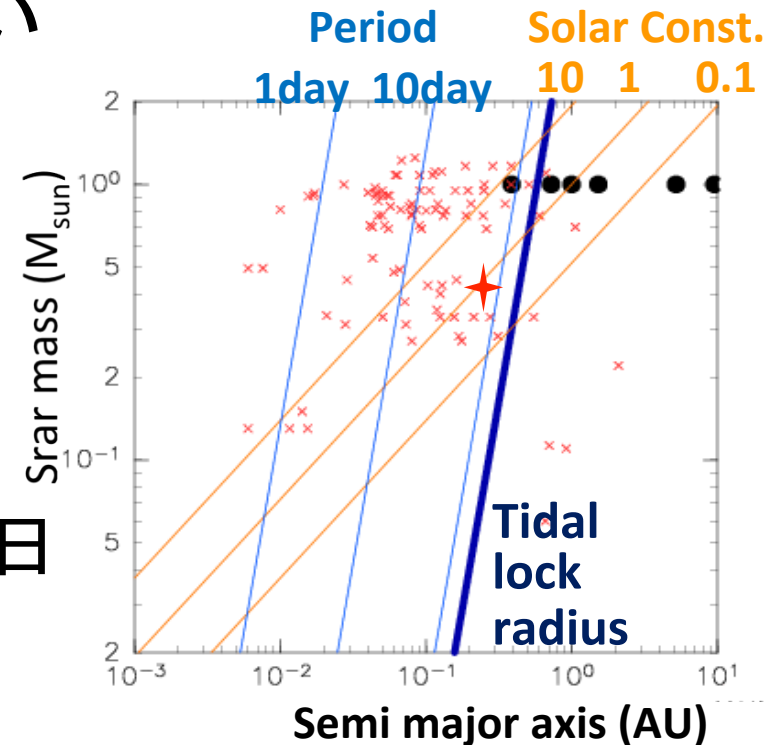
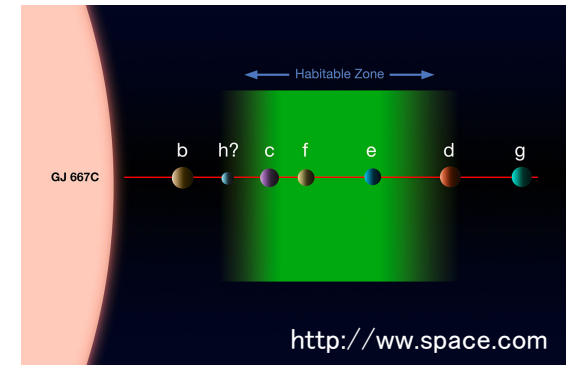
## 成田君(北大)による卒業研究

### ● 目的

- GJ667Cc の計算  
Earth Similarity Index が大きい
- 風化率、海の凝結時間の  
大雑把な見積もり

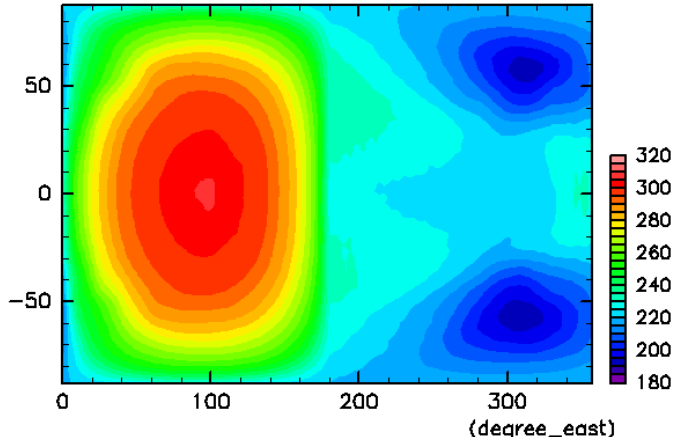
### ● 実験設定

- 太陽定数:  $1230 \text{ W/m}^2$
- $\Omega: 2.59 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$  (周期28日)
- $R=9938 \text{ km}$ ,  $g=15.3 \text{ m/s}^2$ ,  
 $P_s=3.8 \text{ atm}$
- 地表面アルベド: 0.15

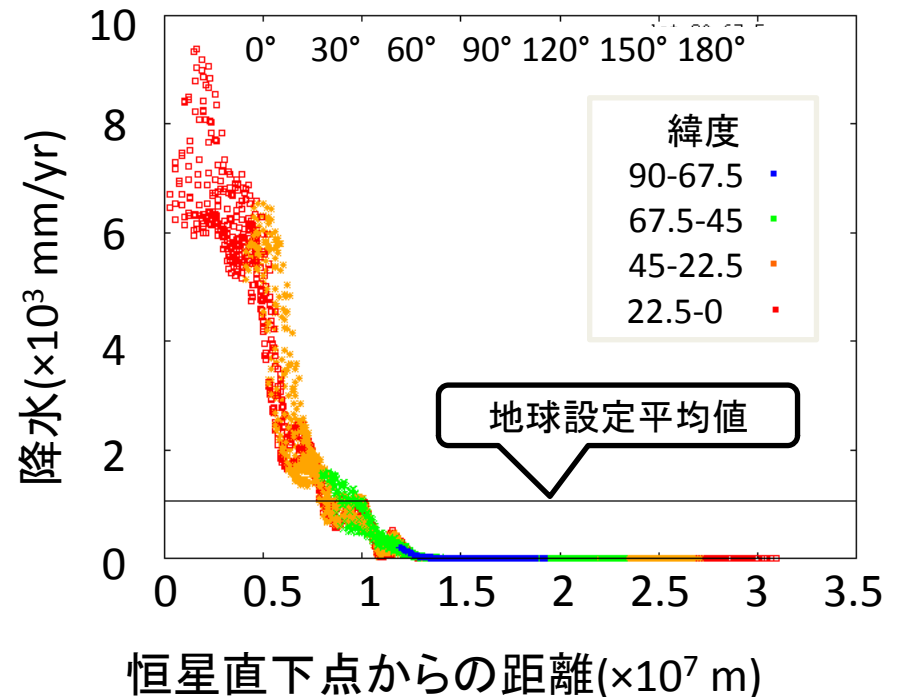
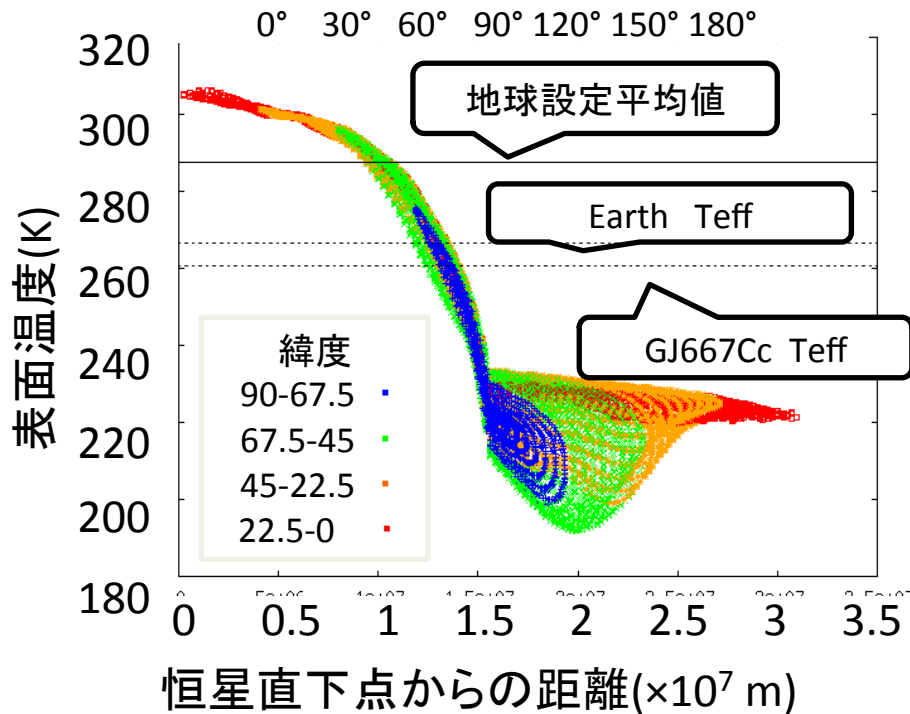
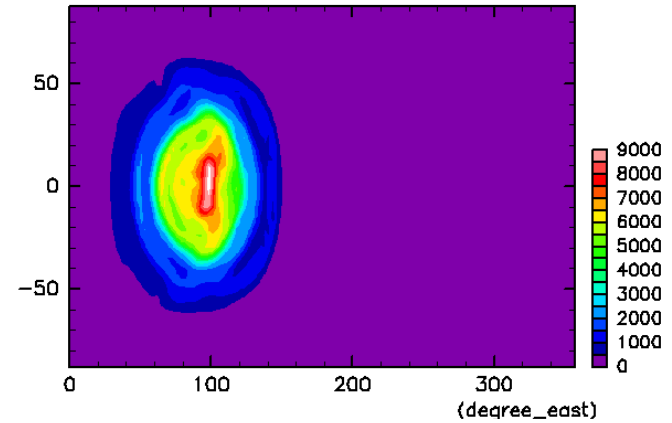


# 表面温度分布と降水分布

## 表面温度



## 降水



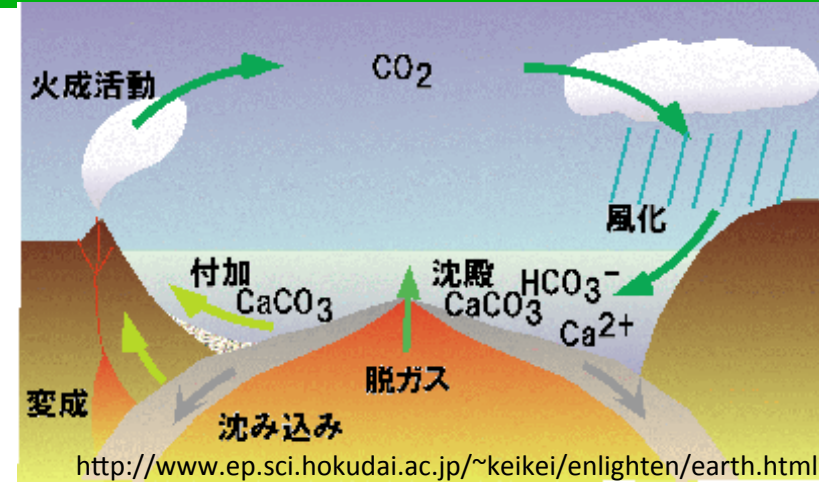
# GJ667Ccにおける風化率の見積もり

- 炭素循環における風化率 (Walker et al, 1981)

$$W \sim \text{Rain}(P_{\downarrow} \text{CO}_2)^{10.3} \exp(T_{\downarrow} - 285/17.7)$$

W: 風化率  
Rain: 降水

Ts: 表面温度  
P<sub>CO<sub>2</sub></sub>: CO<sub>2</sub> 分圧



- 見積値

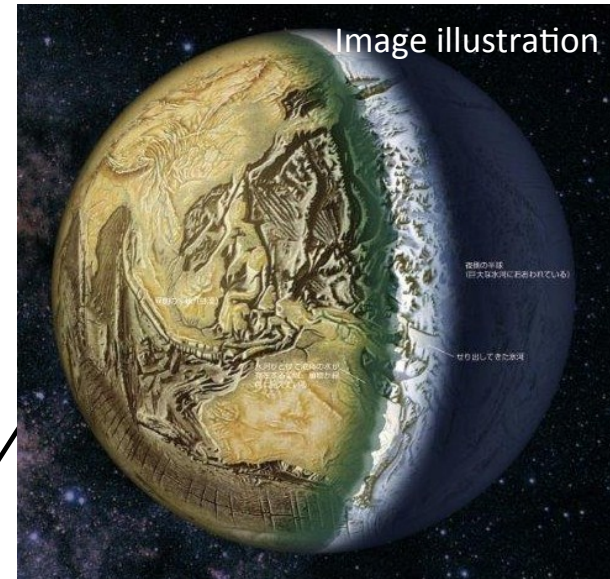
| 設定      | 風化率(mol/yr)          | [CO <sub>2</sub> ] <sub>atm</sub> /(風化率) [y] |
|---------|----------------------|--|
| GJ667Cc | 5.8×10 <sup>13</sup> | 1.1×10 <sup>4</sup>                          |
| Earth   | 1.0×10 <sup>13</sup> | 1.7×10 <sup>4</sup>                          |

- (惑星内部から大気へのCO<sub>2</sub>脱ガス率) ∝ (惑星の体積)  
と考えると、脱ガス率は3.8×10<sup>13</sup> mol/yr  
風化率の見積もり値の方が大きいので、大気中のCO<sub>2</sub>量は減少するのだろう(地球よりも低い値でバランスする)



# 海洋凝結の時間スケール

- 表層の水が夜半球に氷として凝結する時間スケール
  - 海洋質量は地球の3.8倍と仮定
  - 凝結時間スケール  $\sim \text{Rain-Evap}$   
( $s < 273\text{K}$ ,  $\text{Rain-Evap} > 0$ となる領域で)



©newton press

- 推定値

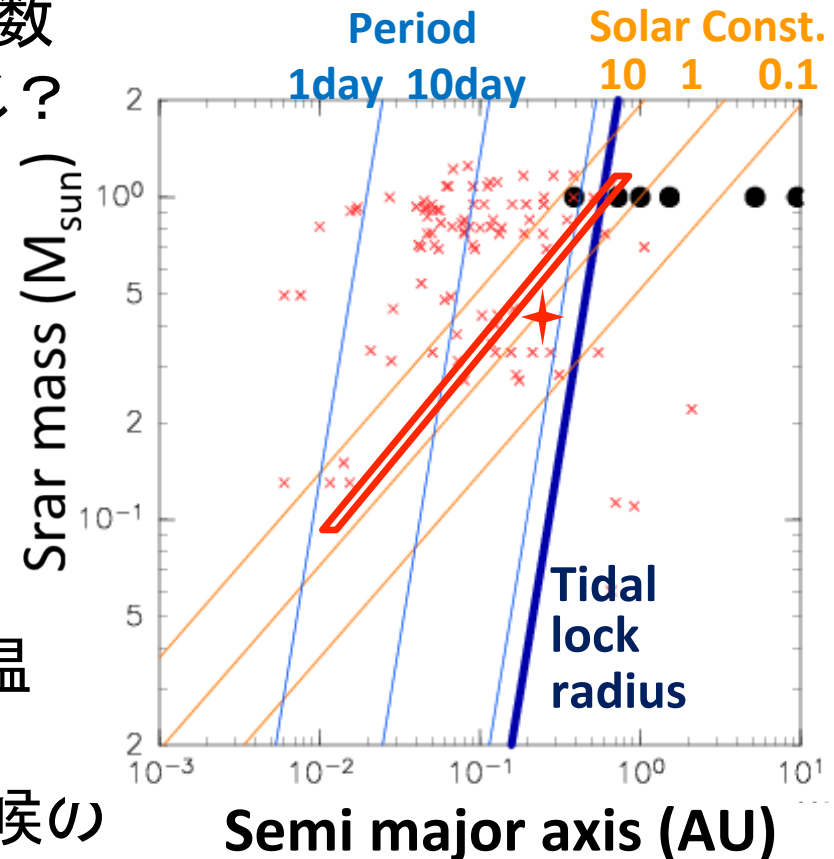
$$\text{Rain-Evap}/M_{\text{ocean}} = 5.13 \times 10^{21} \text{ kg} / 2.74 \times 10^{14} \text{ kg/y} \sim 2.0 \times 10^{7} \text{ y}$$

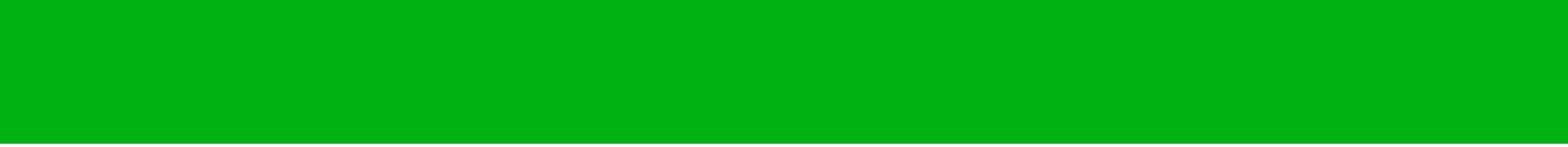
- この値はおそらく下限値。水が少なくなれば、風化率が減少する？ 温室効果も強くなる？

# まとめ

- 同期回転設定GCM でパラメータ実験を実施中

- 暴走温室状態が発生する太陽定数は地球設定の場合とほとんど同じ？ (まだ実験中)
- 昼夜間熱輸送は $\Omega$ によらない？ とすると暴走温室発生条件も $\Omega$ によらない？
- 同期回転惑星の風化率の大きさは地球程度？ (ものすごく荒い見積もりだけど) 昼半球における高温多雨が効いている。もしかして、昼夜間のコントラストは長期の気候の安定化に影響するかも

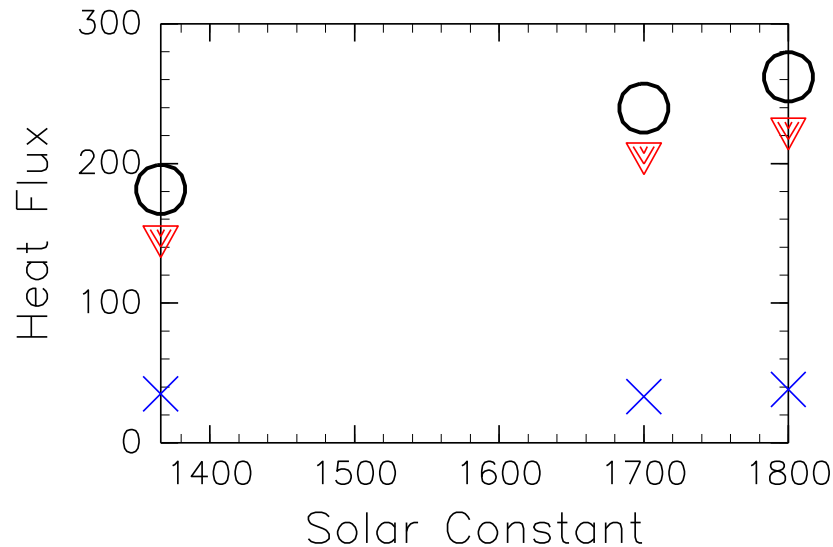




# 昼夜間熱輸送量のS依存性

## • 夜半球の熱収支

(W m<sup>-2</sup>)

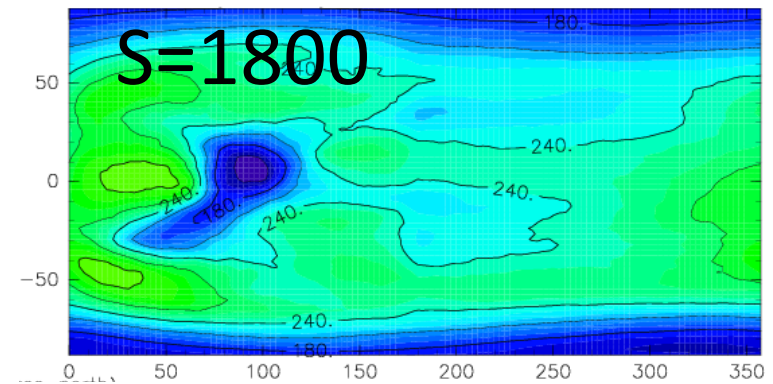
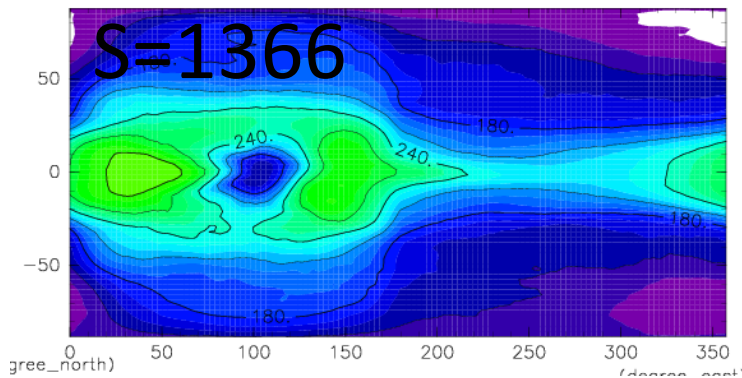


○ : OLR (= 昼夜総熱輸送)

▼ : (顕熱輸送量) /  $2\pi R^2$

★ : (潜熱輸送量) /  $2\pi R^2$

## • OLR 水平分布

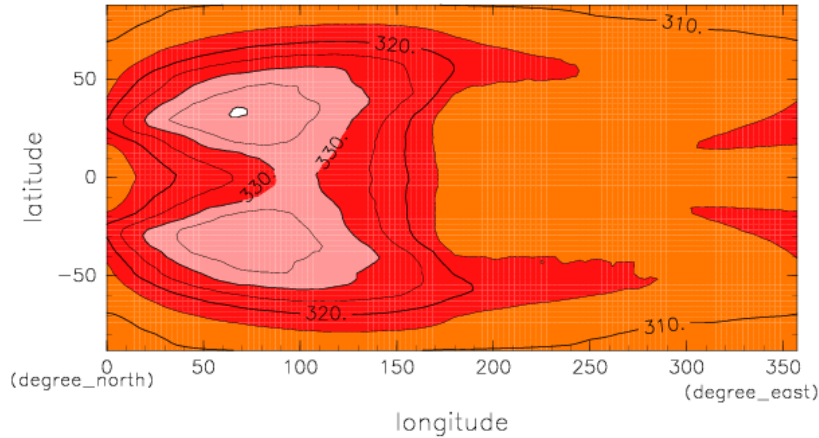


# 暴走温室状態

$$S=2200\text{W/m}^2$$

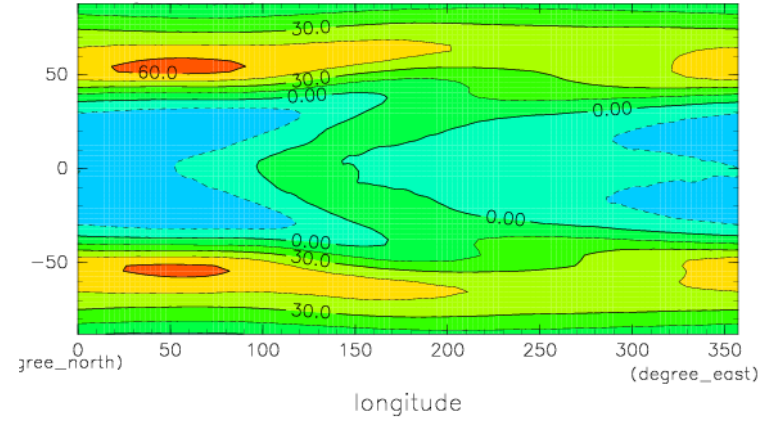
## 表面温度水平分布

surface temperature



CONTOUR INTERVAL = 5.000E+00  
180 225 270 315

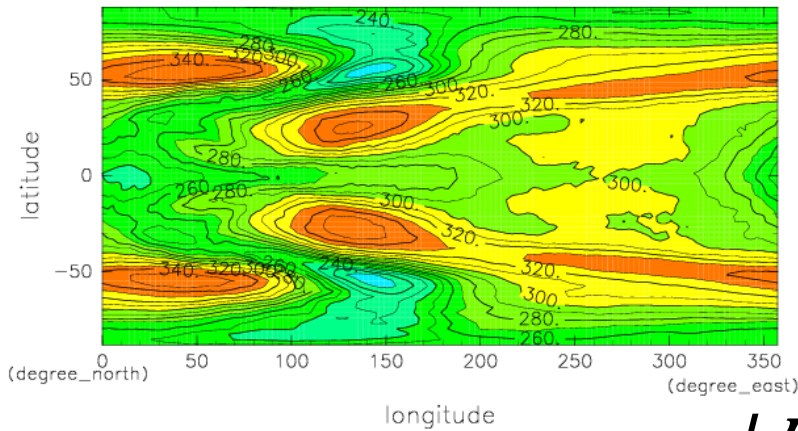
## 東西風 $\sigma=0.1$



CONTOUR INTERVAL = 1.500E+01  
-45 0 45 90

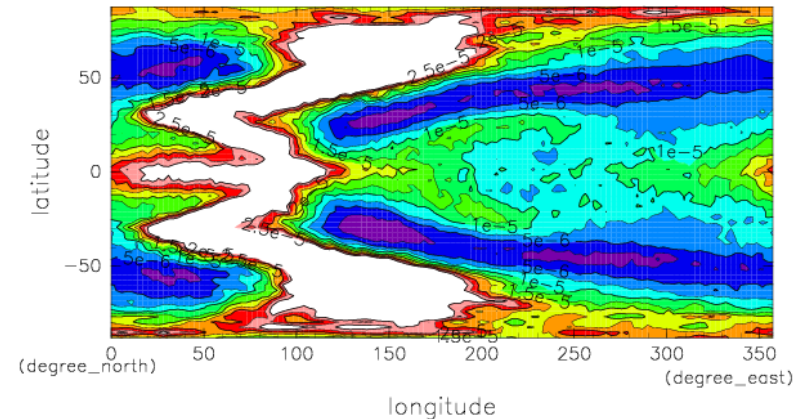
## OLR水平分布

outgoing longwave



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01  
100 180 270 360

## 鉛直積分雲水量 $20\text{Liq}$



CONTOUR INTERVAL = 2.500E-06  
0 5e-6 1e-5 1.5e-5 2e-5 2.5e-5

$$\tau \ll T = 1.5 \times 10^7 \text{ sec}$$

$\Omega = 1.0$ , 2年目の365日平均

# 東西風 ( $\sigma=0.1$ )

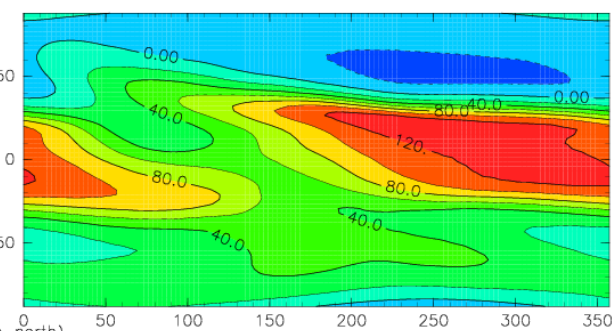
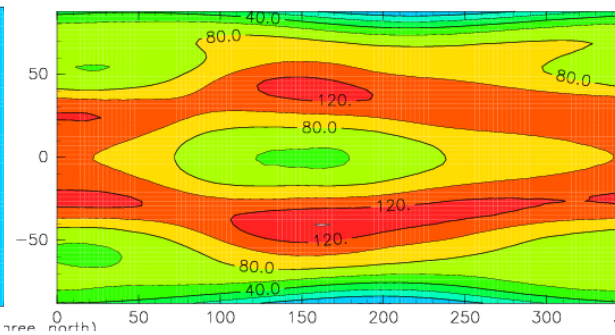
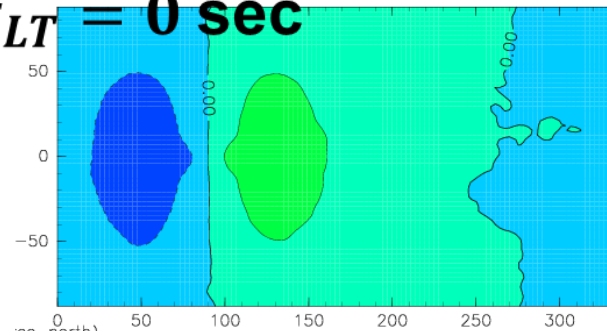
$S=1366\text{W/m}^2$   
 $\Omega=1$

$\Omega=0.0$

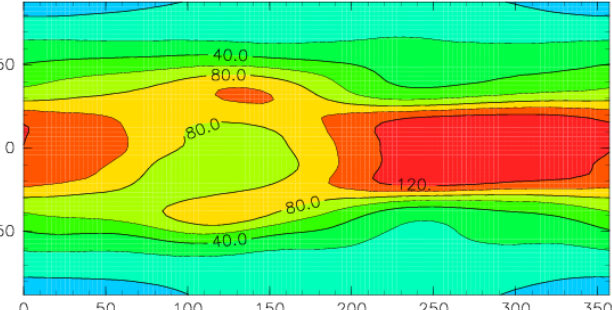
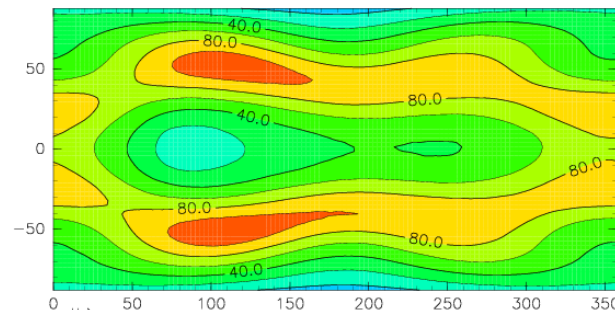
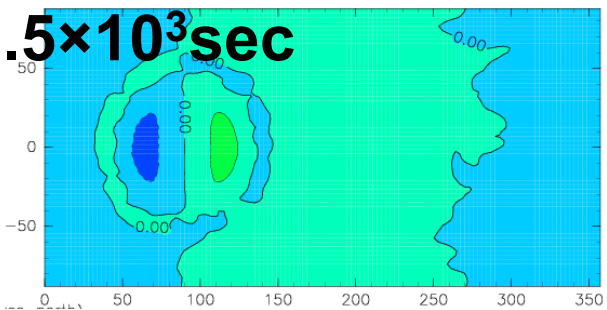
$\Omega=0.5$

$\Omega=1$

$\tau_{LT} = 0 \text{ sec}$

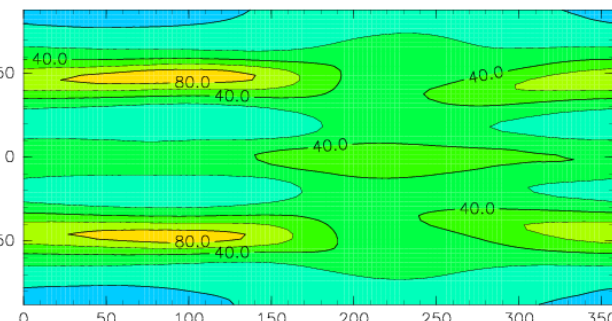
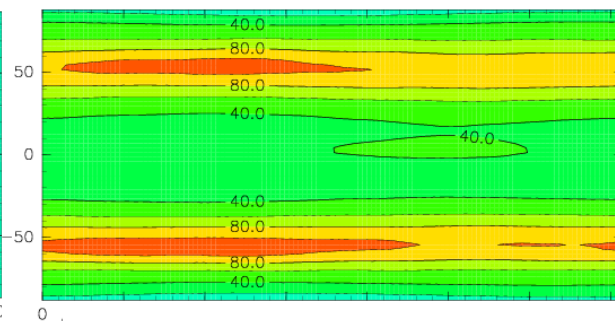
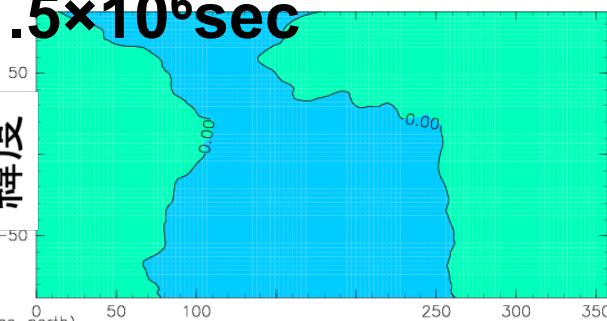


$1.5 \times 10^3 \text{ sec}$



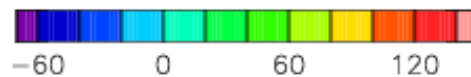
$1.5 \times 10^6 \text{ sec}$

緯度



經度

CONTOUR INTERVAL = 2.000E+01



365日平均

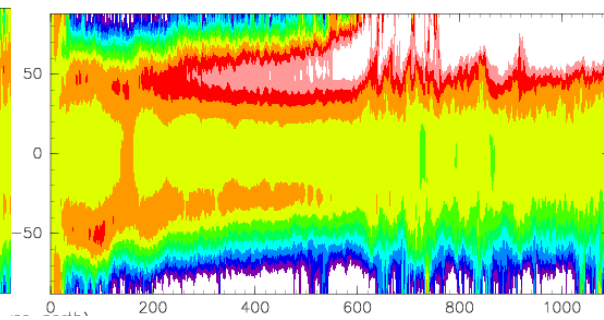
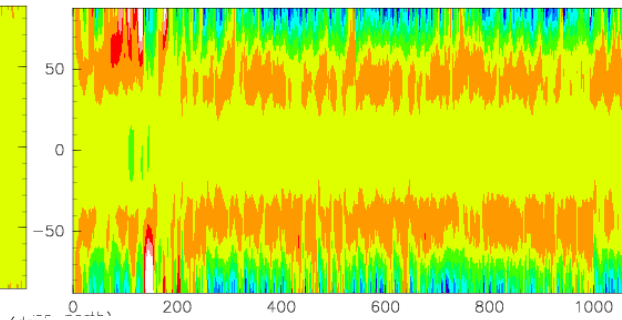
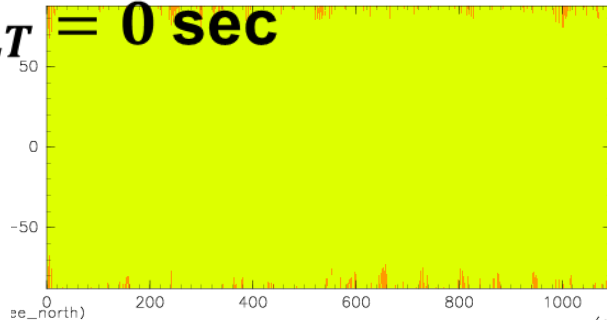
# 表面気圧時間変化

$\Omega=0.0$

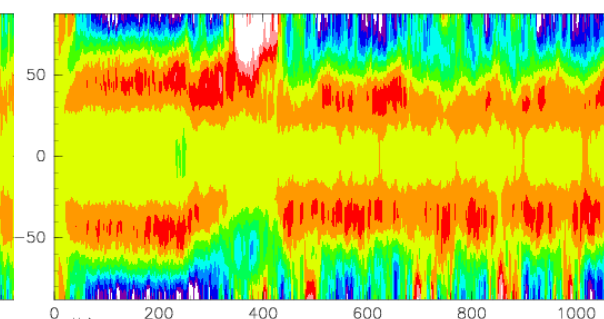
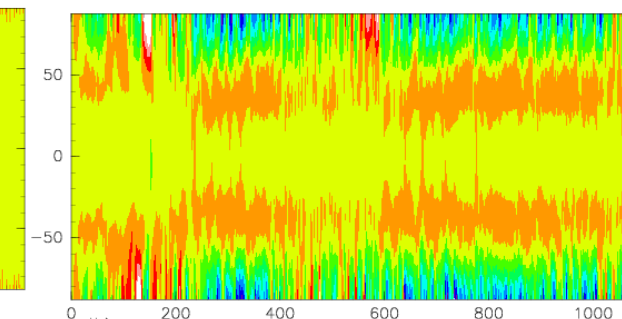
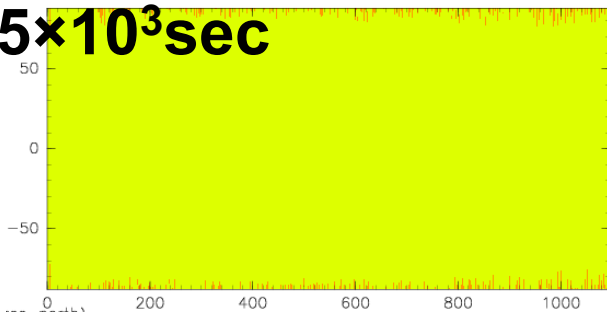
$\Omega=0.5$

$\Omega=1$   $S=1366\text{W/m}^2$

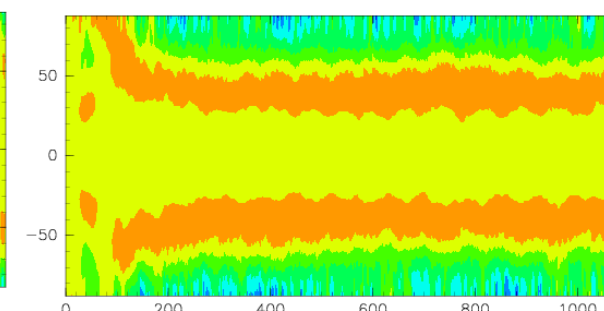
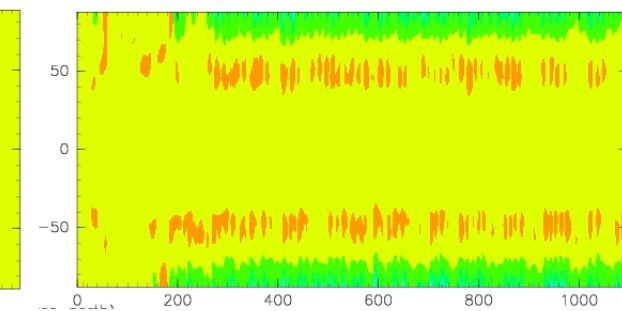
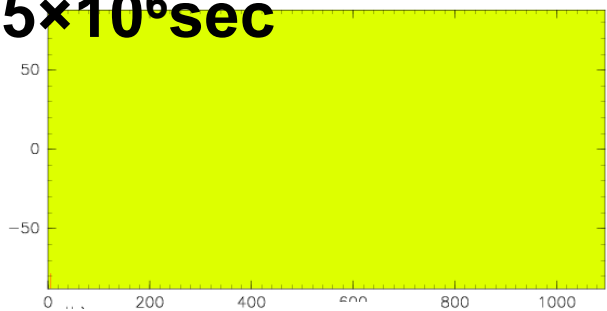
$\tau_{LT} = 0 \text{ sec}$



$1.5 \times 10^3 \text{ sec}$



$1.5 \times 10^6 \text{ sec}$



緯度

時間

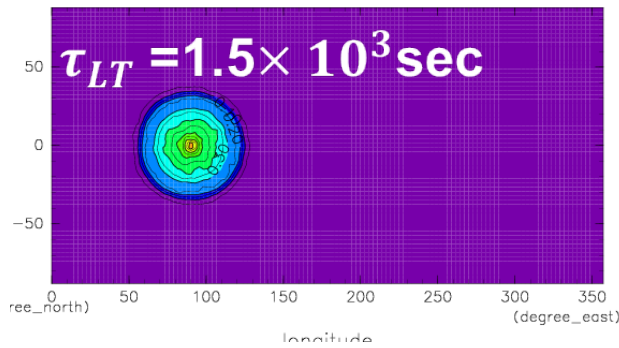


365日平均

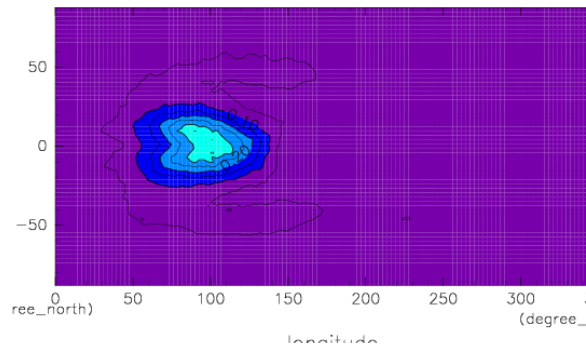
# 鉛直積分雲水量

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

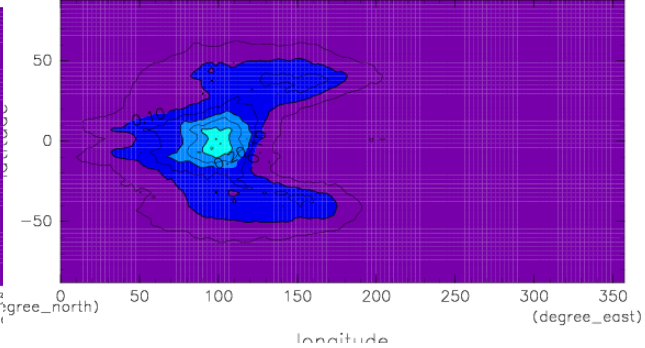
$\Omega=0.0$



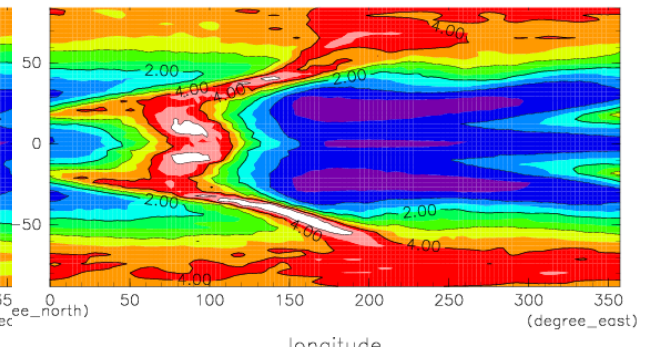
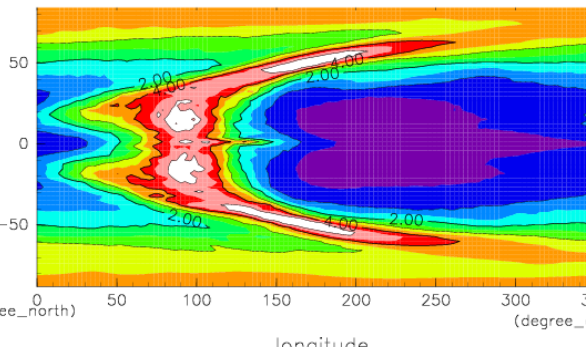
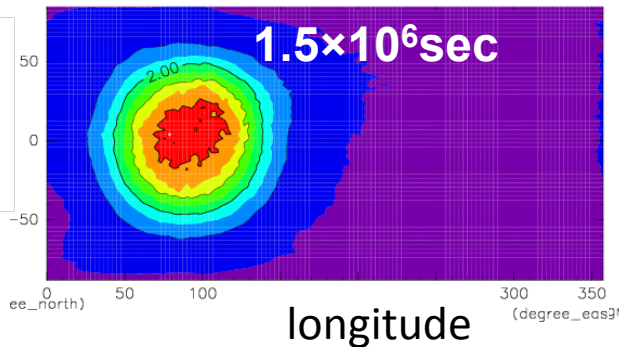
$\Omega=0.5$



$\Omega=1$



latitude



365日平均

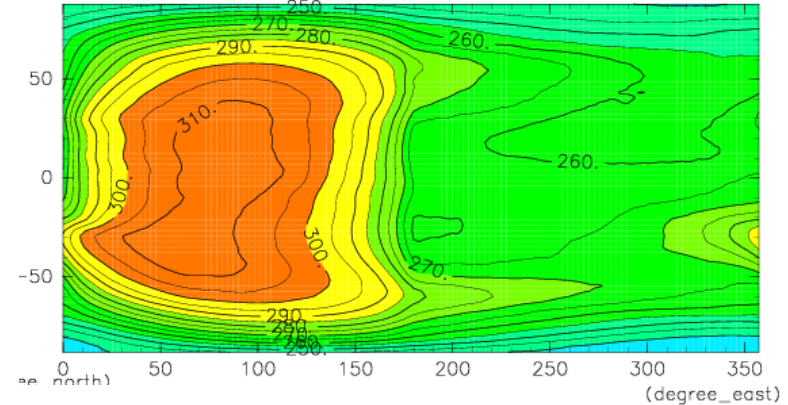
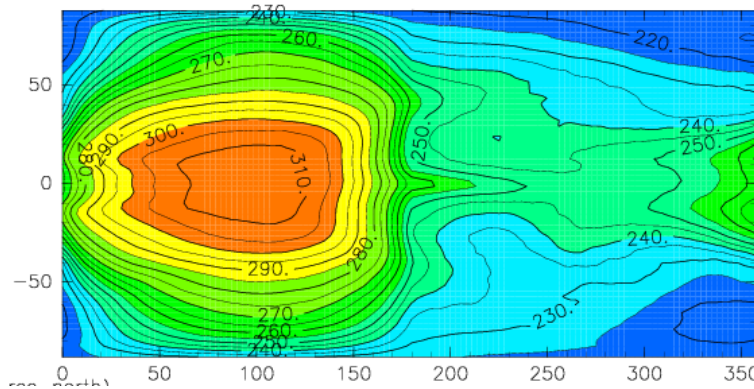


# 太陽定数増大時の状態

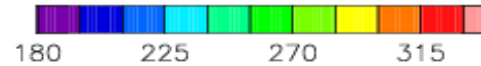
$S=1366\text{W/m}^2$

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

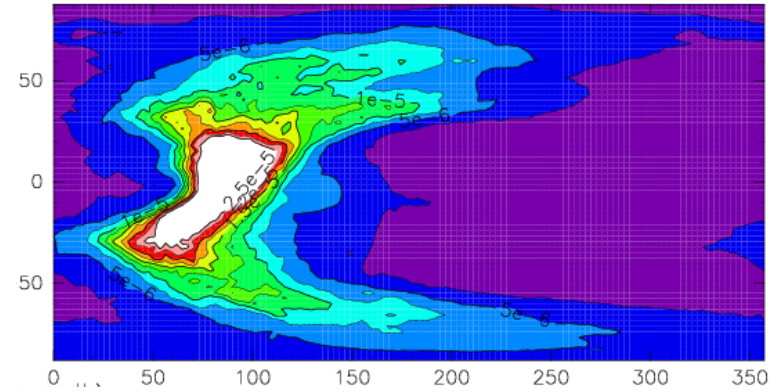
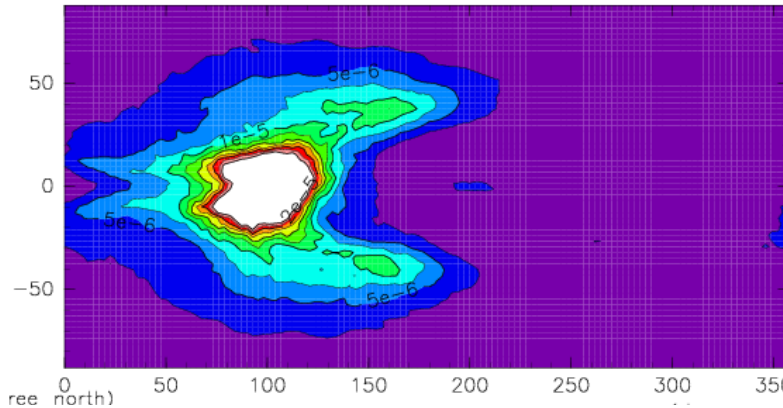
表面  
温度



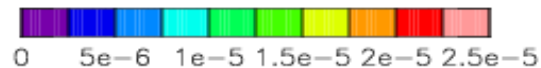
CONTOUR INTERVAL = 5.000E+00



鉛直  
積分  
雲水量

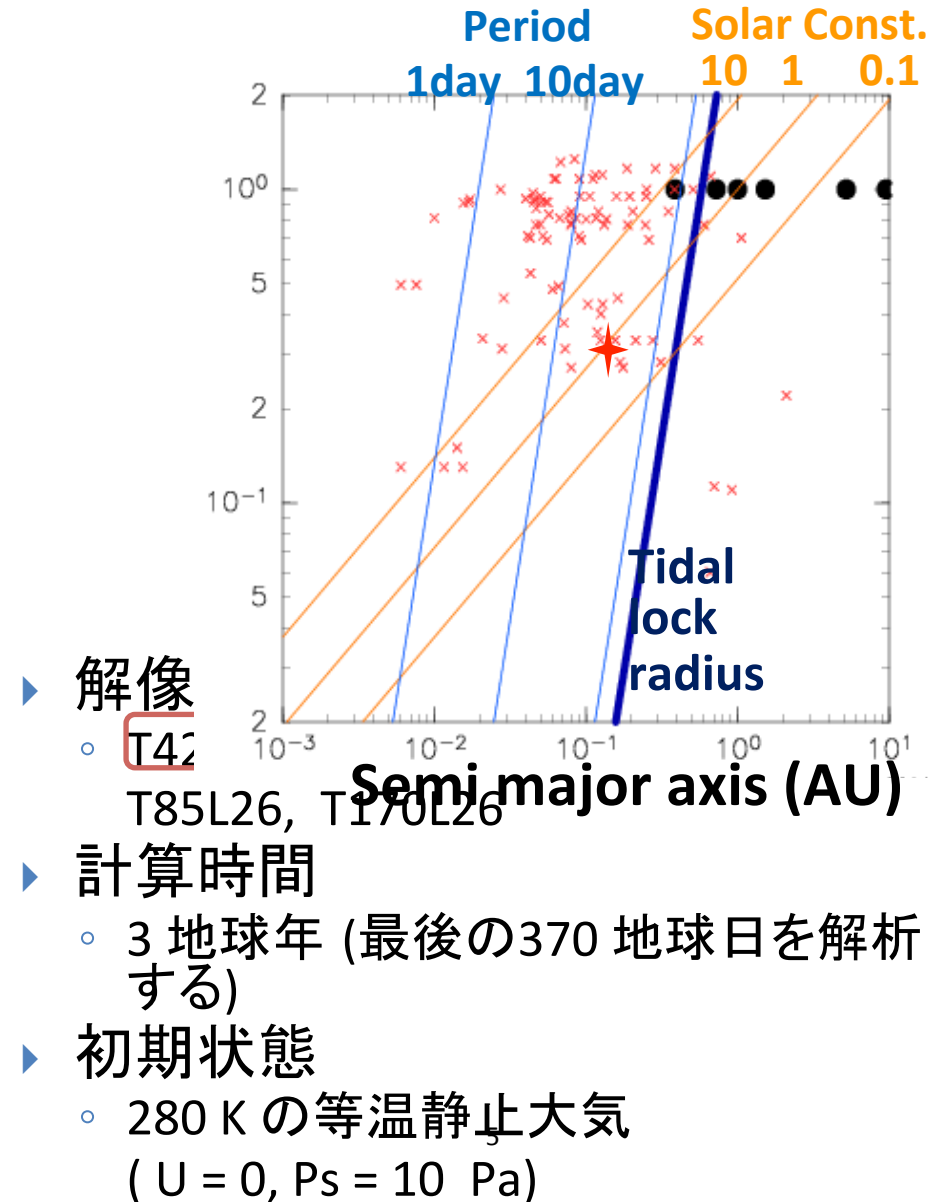


CONTOUR INTERVAL = 2.500E-06



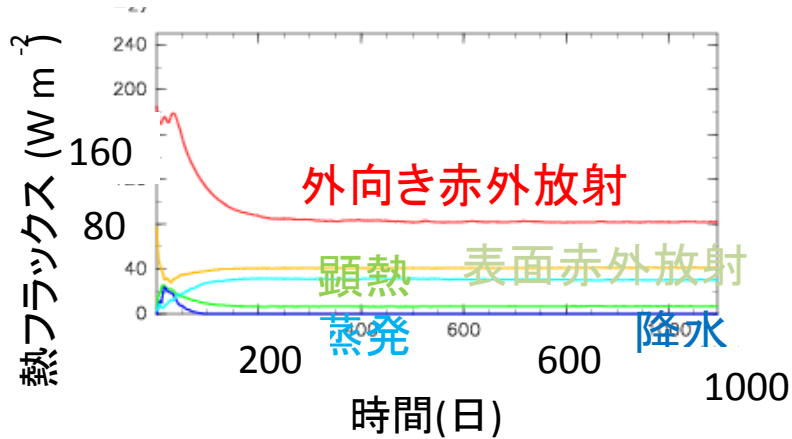
# 半径依存性

- パラメータ
  - 太陽定数 1366 W/m<sup>2</sup>
  - 自転角速度:
    - 1.989×10<sup>-6</sup> s<sup>-1</sup> (約 37 地球日周期)
      - ※Gliese 581g の予測値
- 重力加速度( 2 通り)
  - 1.0 , 1.46 g
- 惑星半径( 10 通り)
  - 0.5, 1.0, 1.25, 1.46, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 12.0, 16.0 Re
- 雲消失時間
  - 1500 s

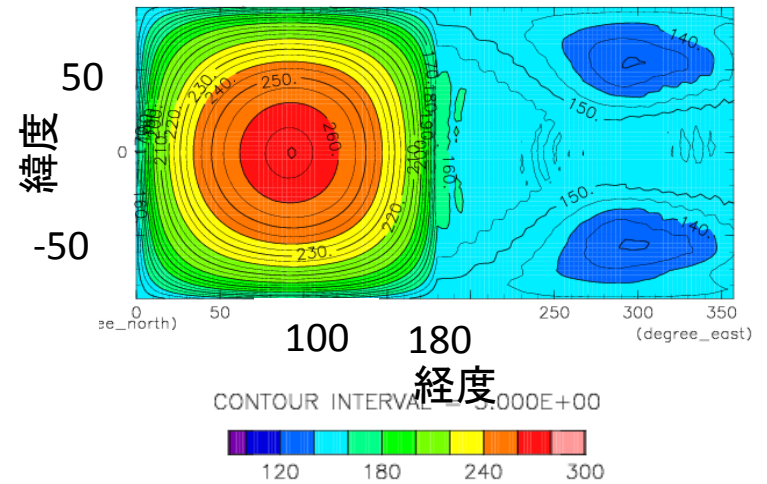


# 1.46 Re の場合の計算結果

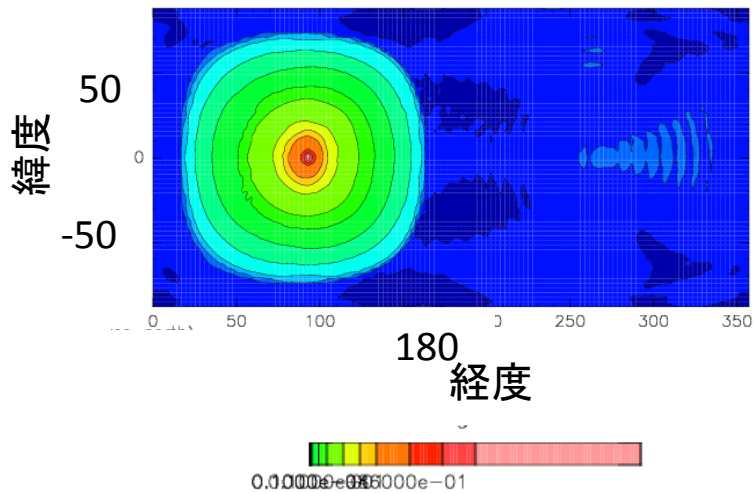
## 熱フラックス時間発展



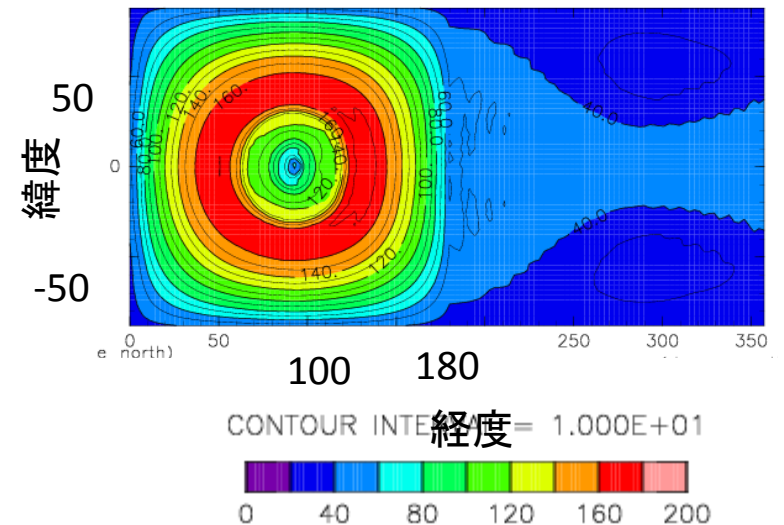
## 表面温度分布(370日平均)



## 雲水分布(370日平均)



## 外向き赤外放射分布(370日平均)



# 各惑星半径での表面温度分布

370 日平均.

0.5 Re

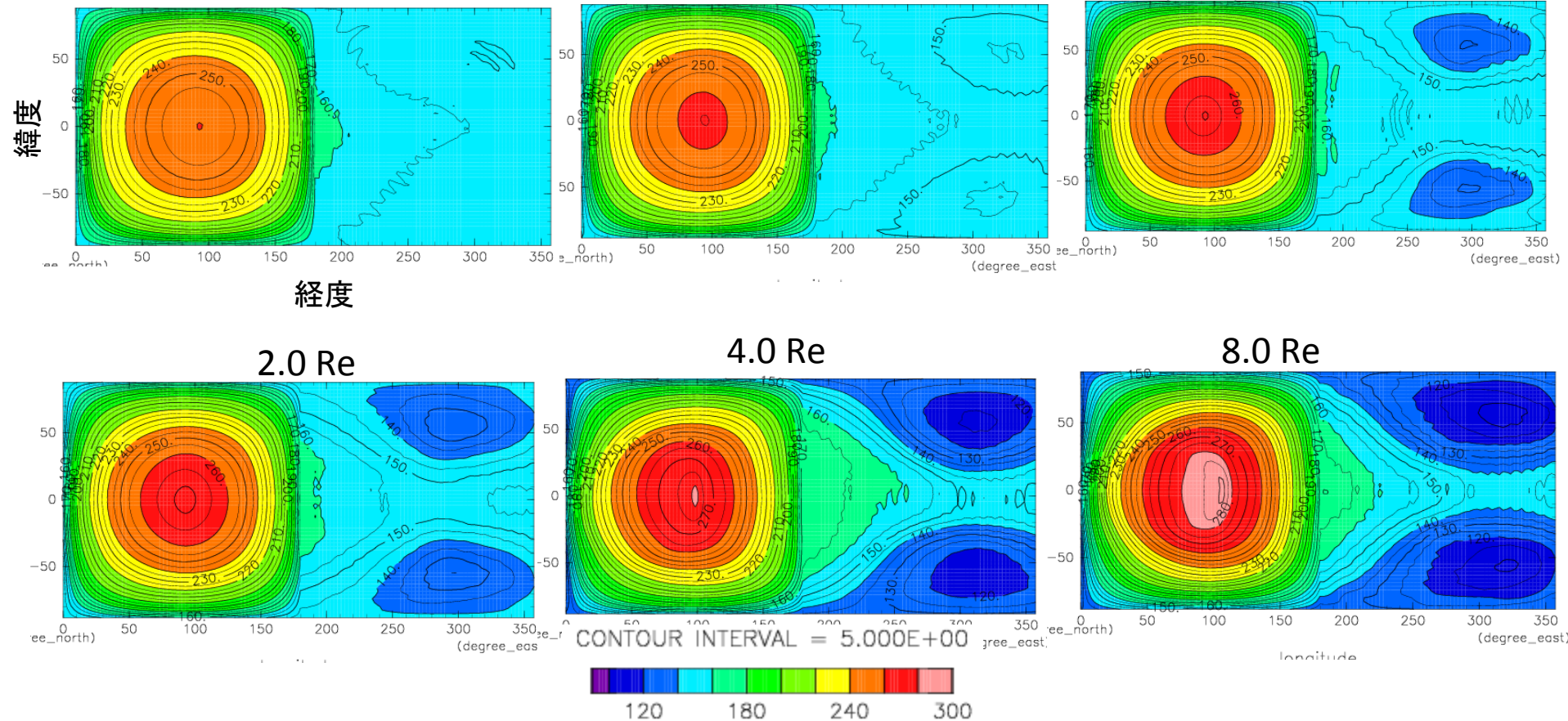
1.0 Re

1.46 Re

2.0 Re

4.0 Re

8.0 Re

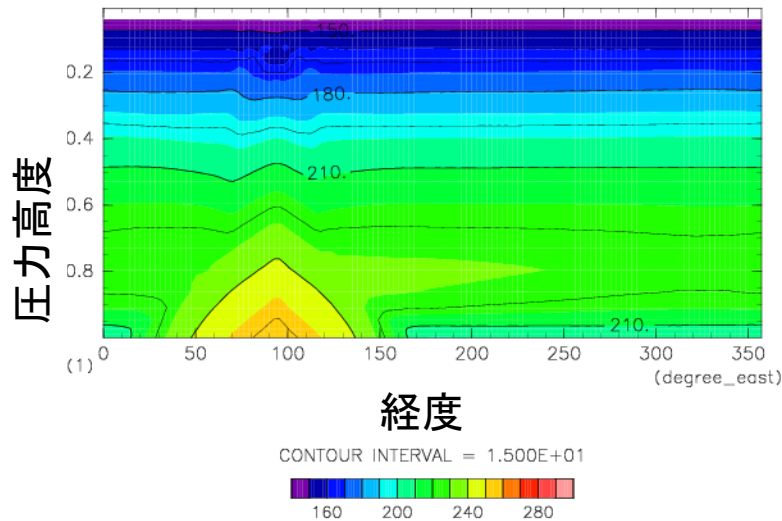


半径を大きくしていくにつれて夜半球の高緯度側で温度が下がっていく

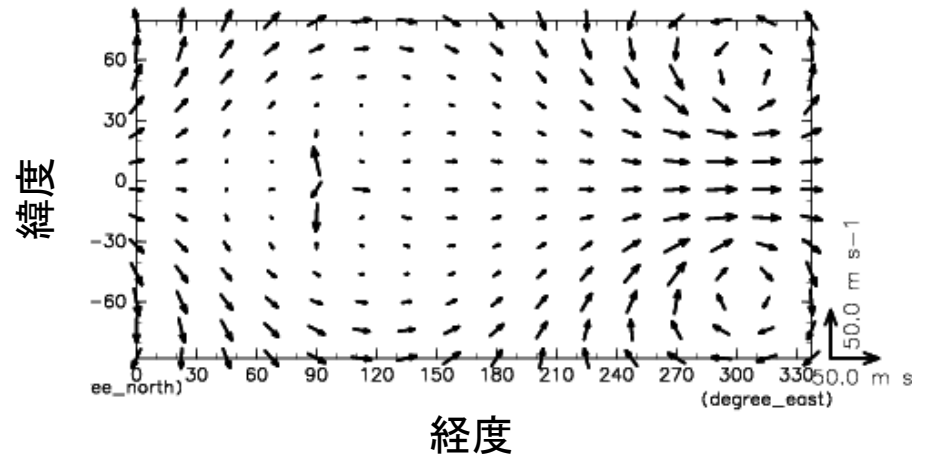
# 赤道断面における温度分布と水平風の特徴

- 1.46 Re の場合

赤道断面における温度分布



対流圏界面( $\sigma=0.2$ )における水平風

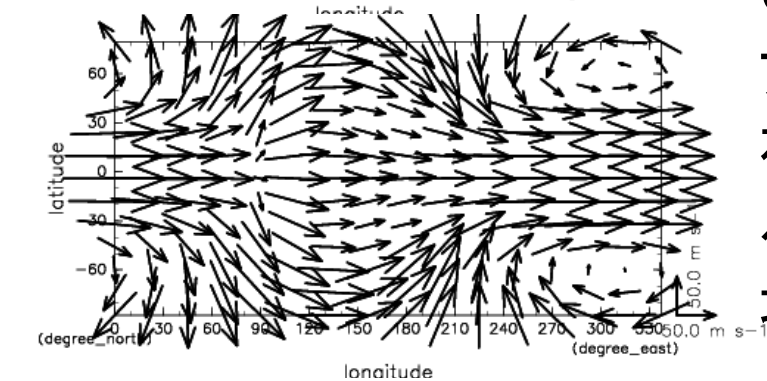
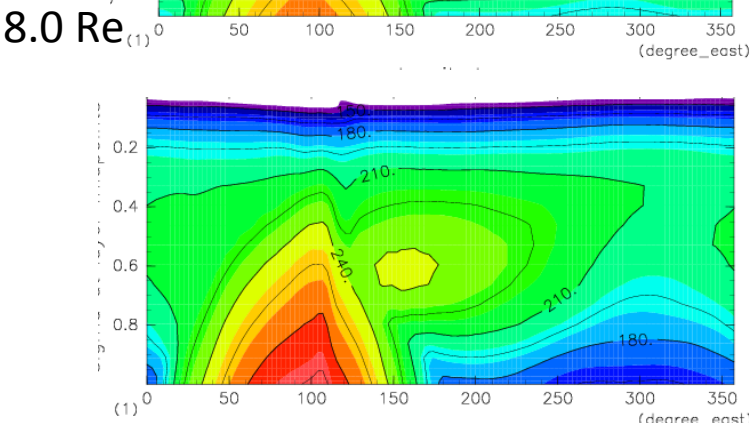
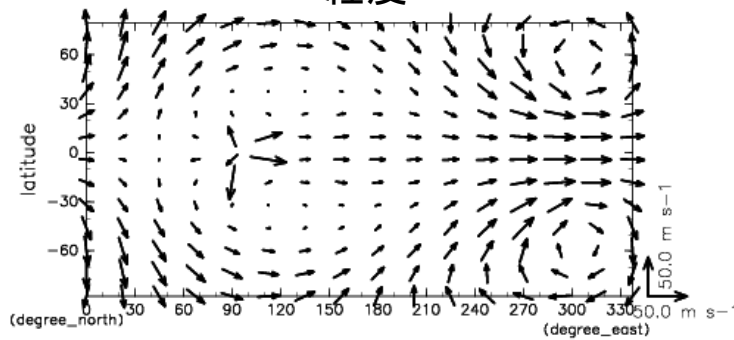
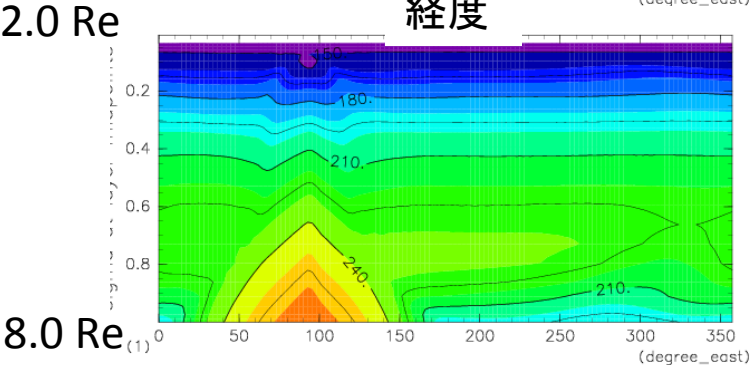
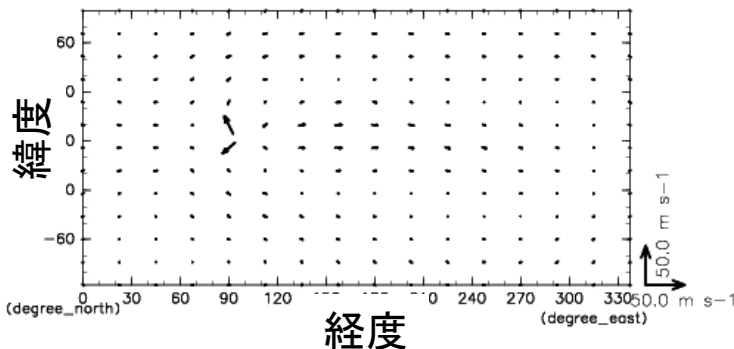
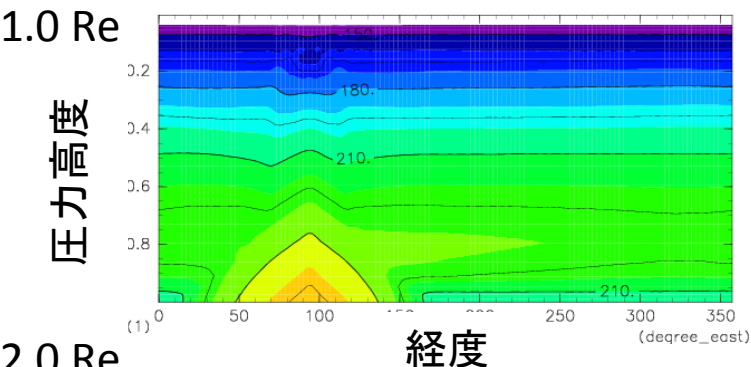


- 高温域が夜半球側に伸びる.
- 夜半球では下層での温度が低いま

- 夜半球では極渦ができる.
- 夜半球高緯度の温度は低緯度高緯度間の混合具合によって決まると思われる.

# 惑星半径を変えた場合の結果

赤道断面における温度分布 対流圏界面( $\sigma=0.2$ )における水平風

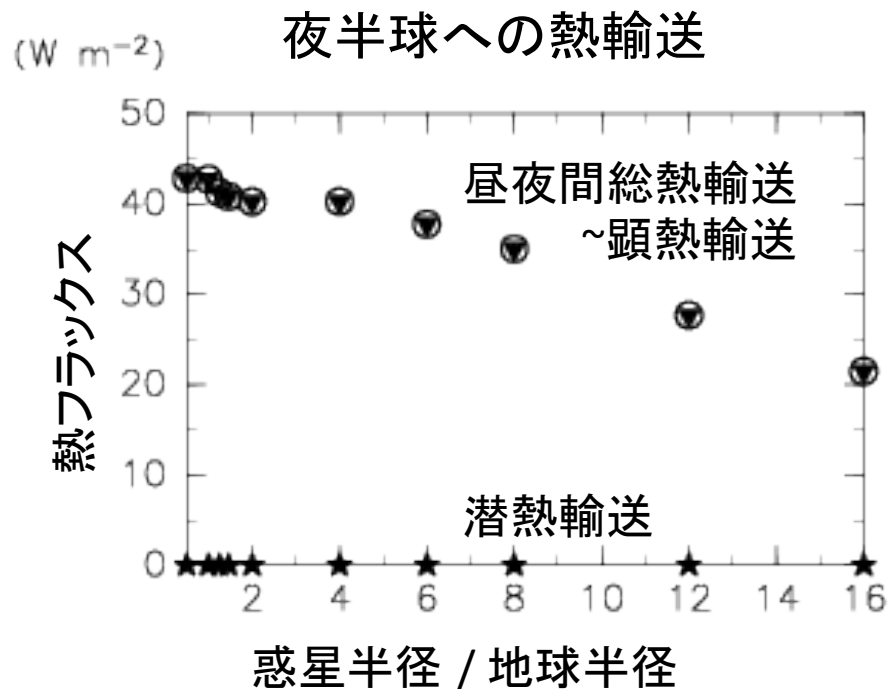
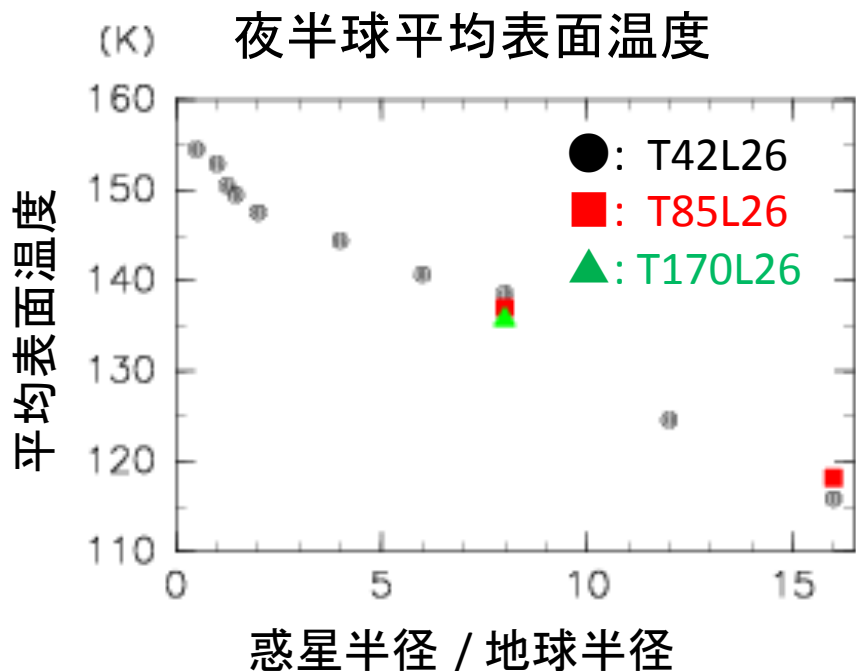


●温度：  
上層で増加  
下層で減少

●循環場：  
極渦強化

●エネルギー  
フラックス：  
夜から昼へ戻  
るフラックスが  
増加

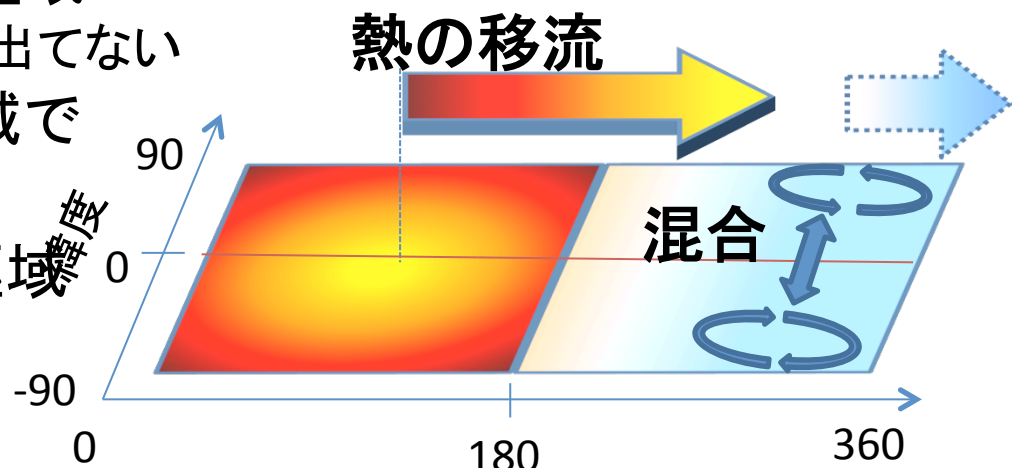
# 夜半球の平均表面温度と熱輸送



半径を大きくするにつれて平均温度は下がる。  
同時に夜半球への熱輸送も減っている。

# まとめ

- 同期回転惑星で半径を変えた計算を行った。
- 全体的な傾向
  - 夜半球の高緯度側に低温域
    - Heng and Vogt (2011)には出てない
  - 昼夜熱輸送は主に赤道域で起こる。
  - 夜半球内では赤道域と極域での混合が重要。
- 半径が大きくなった場合
  - 夜半球から戻るエネルギーフラックスが増える
  - 極渦が強化: 混合が弱くなる。
- 夜半球の表面温度は半径が大きくなるにつれて減少する。





# 統計的平衡状態に達している

## ことの確認

熱フラックス時間変化

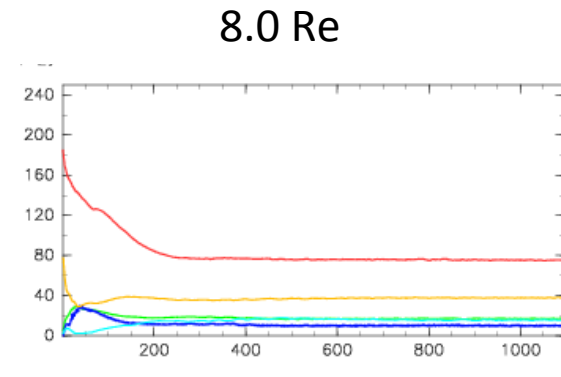
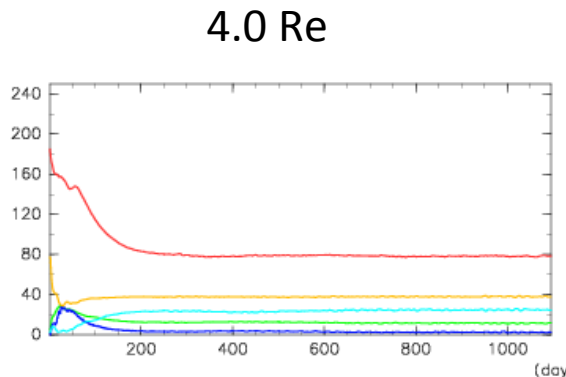
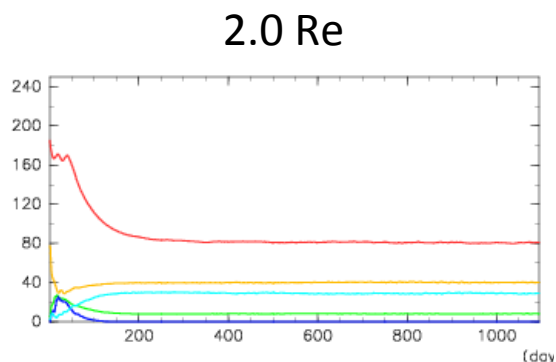
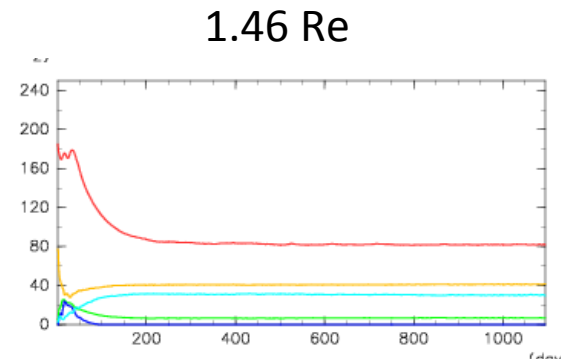
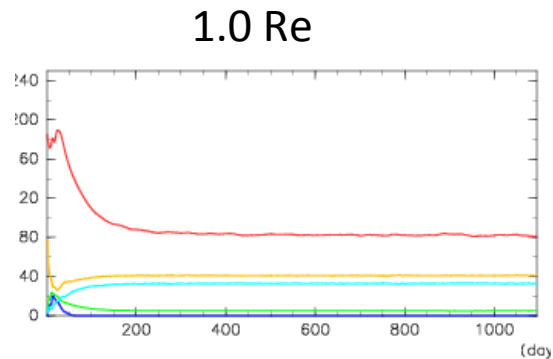
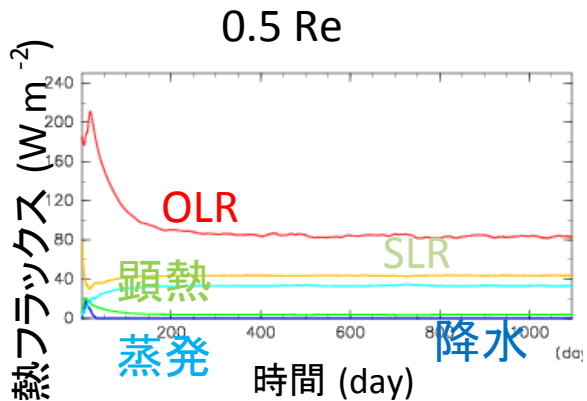
赤: OLR

黄: SLR

青: 降水

緑: 顕熱

水色: 蒸発



いずれも200日ほどで統計的平衡状態に達した。

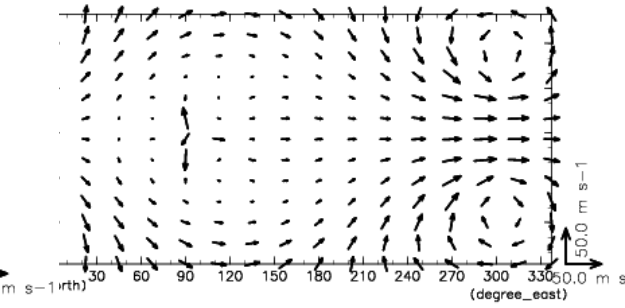
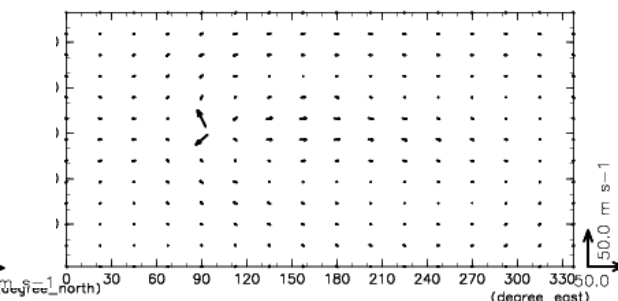
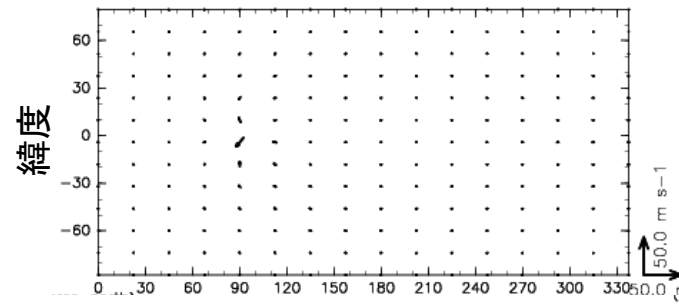
# 対流圏界面付近( $\sigma=0.2$ )での水平風

370 日平均.

0.5 Re

1.0 Re

1.46 Re



緯度

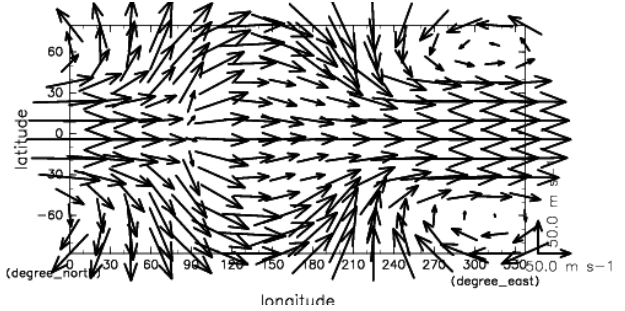
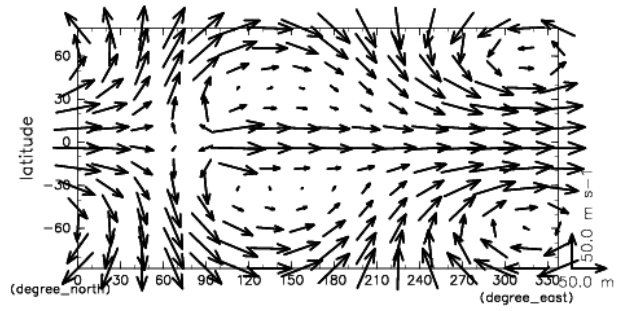
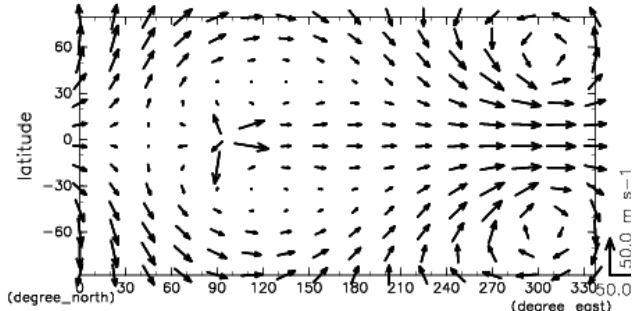
longitude

longitude

2.0 Re

4.0 Re

8.0 Re



経度

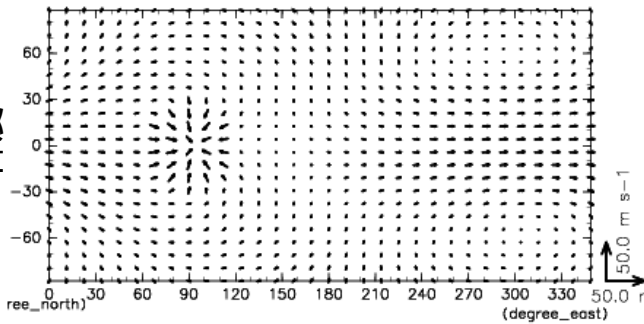
longitude

longitude

熱源からの放射にともなう波が見え, 半径を大きくすると強くなる

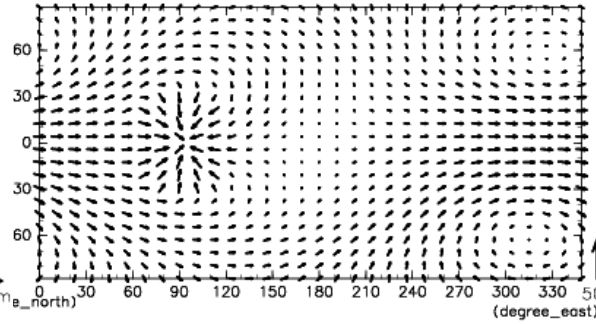
# Sigma=0.8 での水平風

0.5 Re



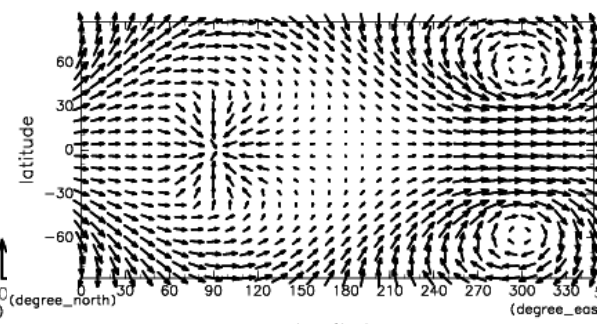
経度

1.0 Re



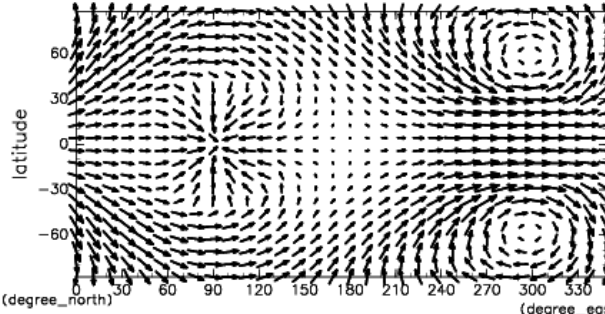
longitude

1.46 Re



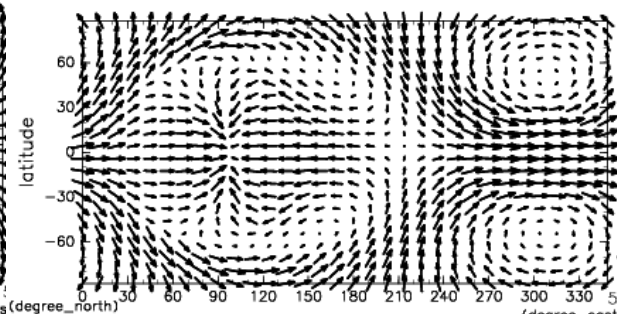
longitude

2.0 Re



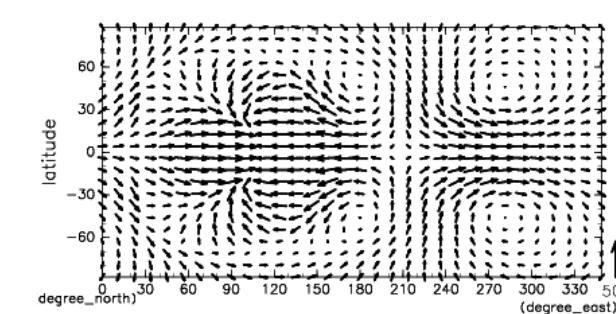
longitude

4.0 Re



longitude

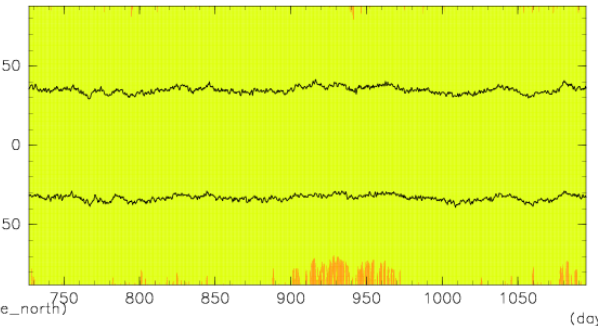
8.0 Re



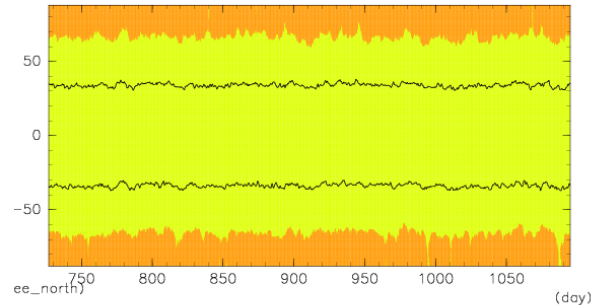
longitude

# 表面気圧時間発展

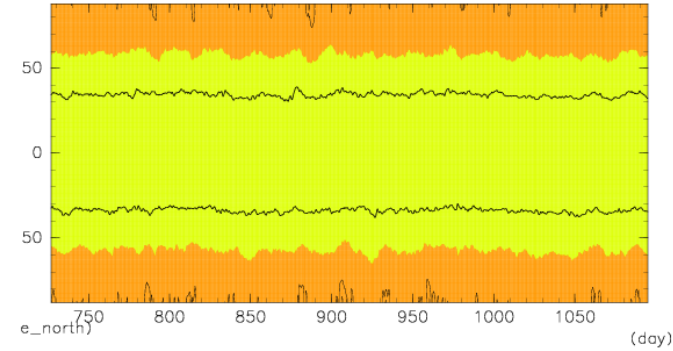
1.0 Re



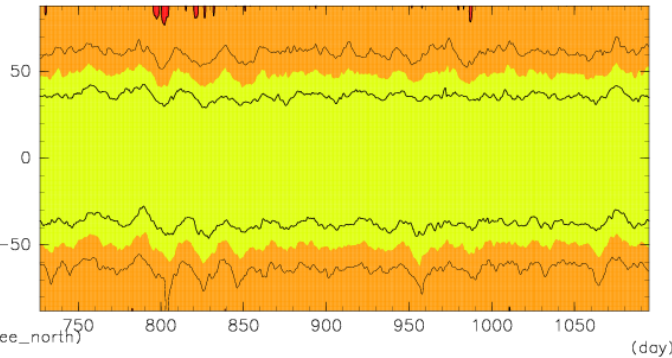
1.46 Re



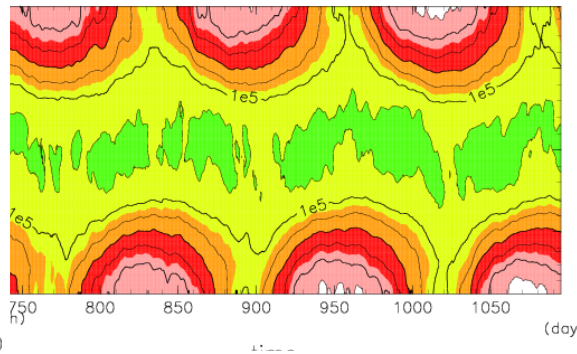
2.0 Re



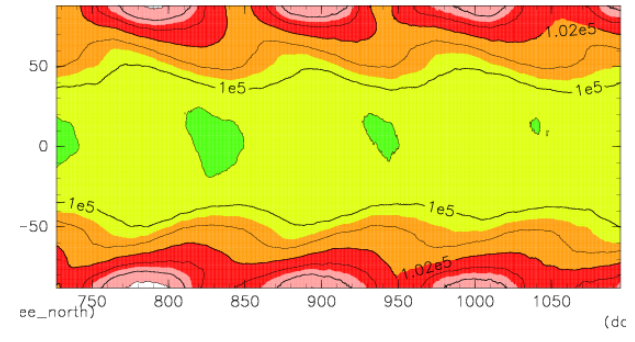
4.0 Re



8.0 Re

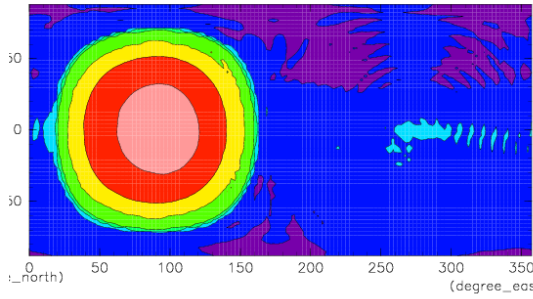


16.0 Re

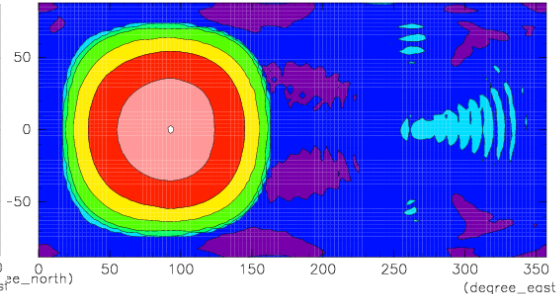


# 降水平面分布

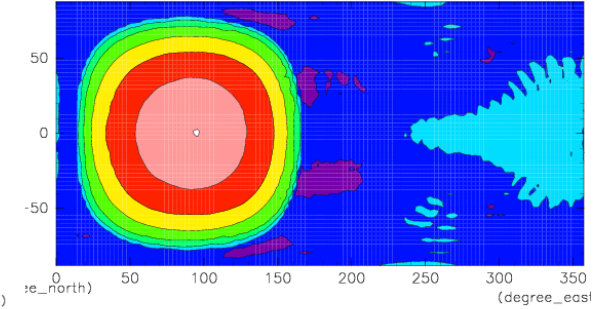
1.0 Re



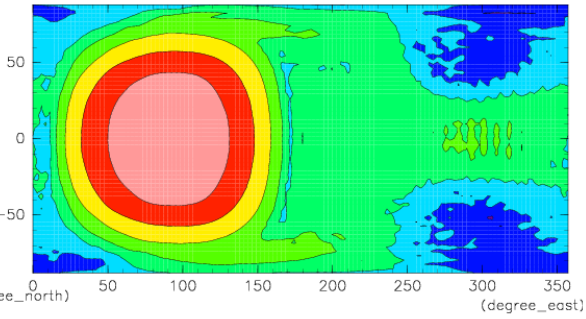
1.46 Re



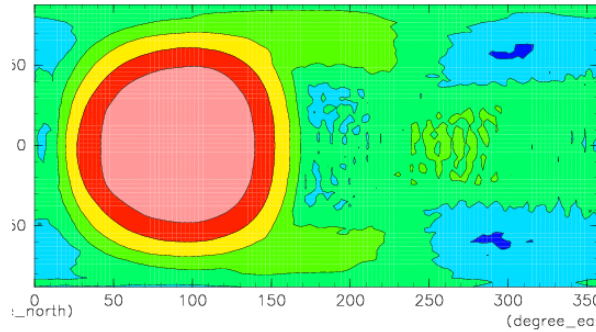
2.0 Re



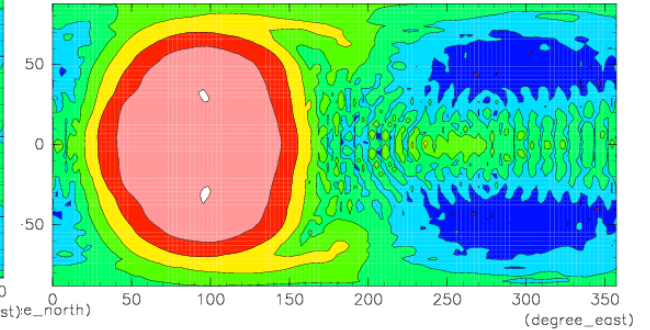
4.0 Re



8.0 Re

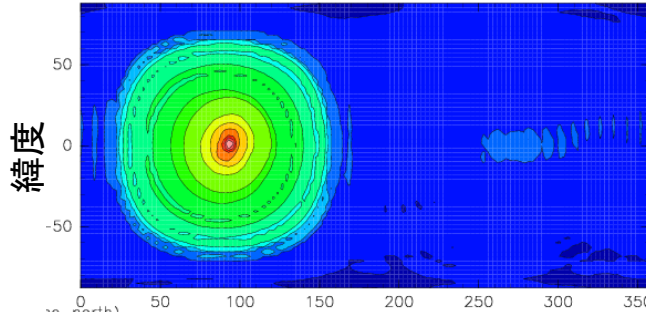


16.0 Re

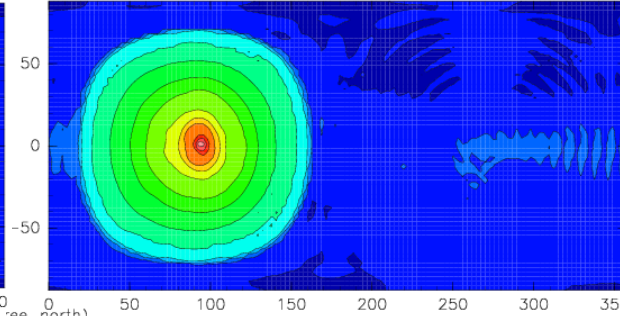


# 雲水分布

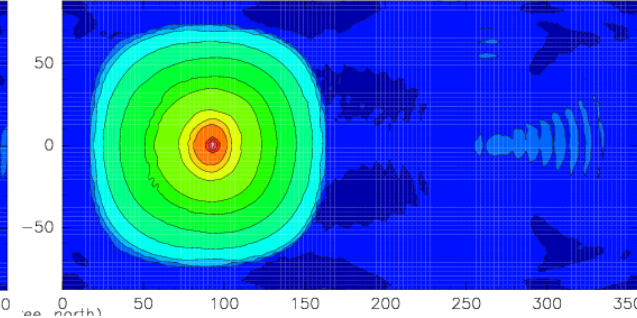
0.5 Re



1.0 Re

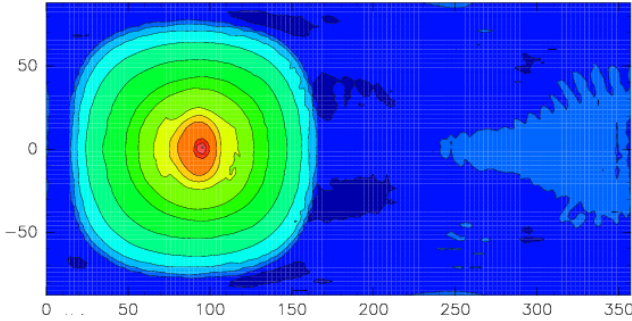


1.46 Re

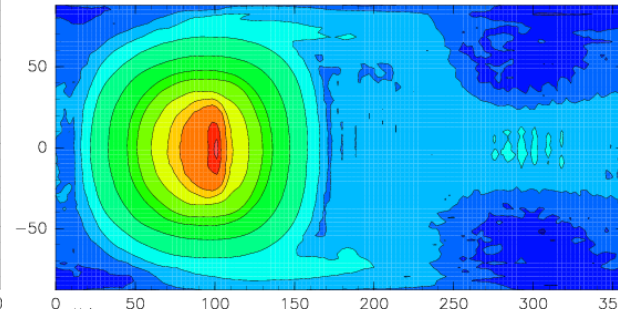


經度

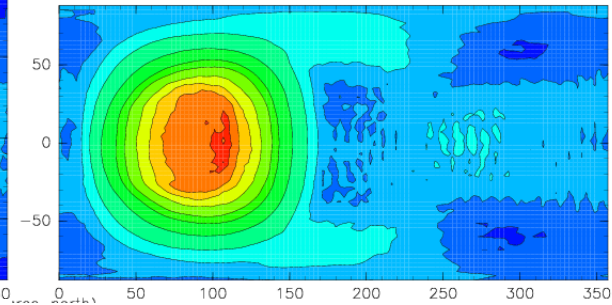
2.0 Re



4.0 Re



8.0 Re



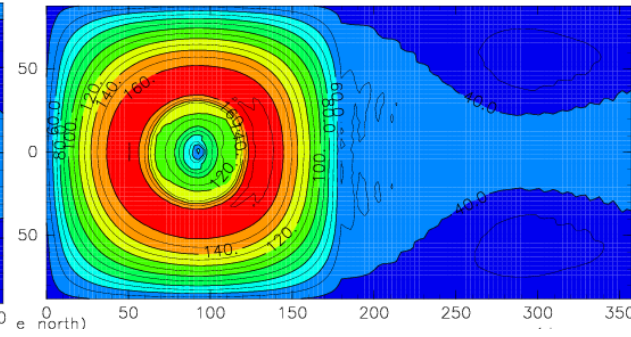
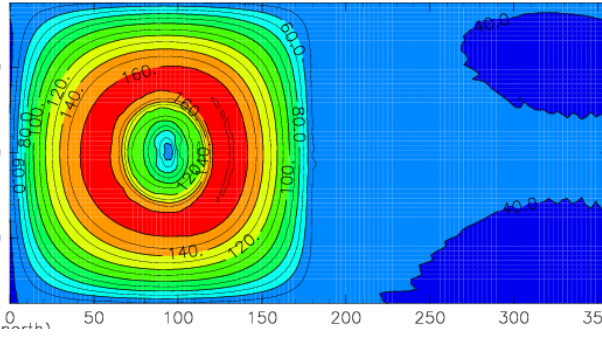
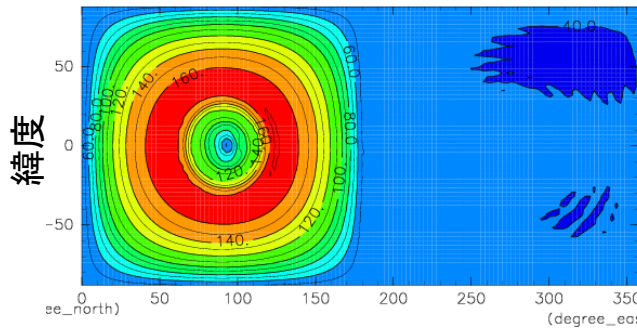
# OLR 分布

370 日平均.

0.5 Re

1.0 Re

1.46 Re

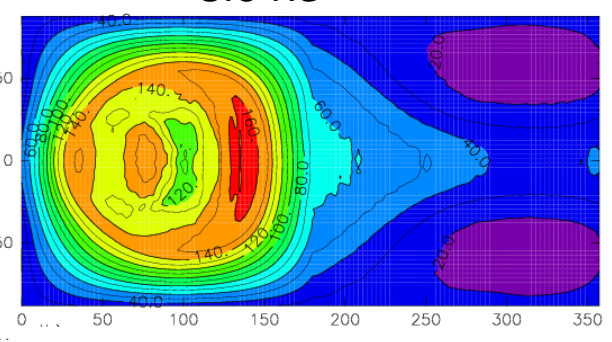
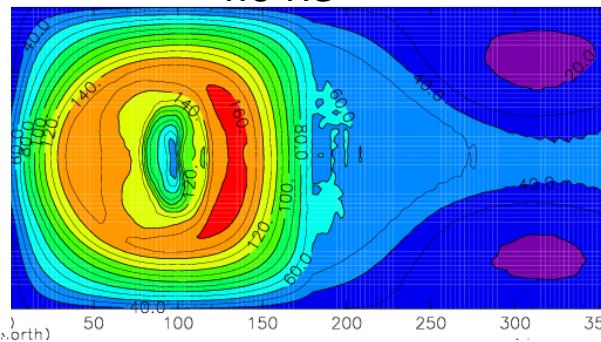
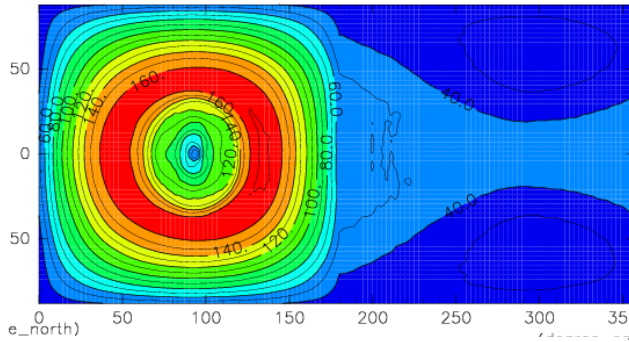


經度

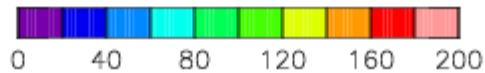
2.0 Re

4.0 Re

8.0 Re



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01



# 夜半球への温度輸送

- 各惑星半径において同じ温度(230 K, 225 K)が夜半球へどの程度しみだせるかを調べた。

| 惑星半径 (Re) | 230K の熱が到達できた経度 | 夜半球へ到達できた昼夜半球境界(経度180度)からの実距離 (km) |
|-----------|-----------------|------------------------------------|
| 1.0       | 240             | 6700                               |
| 1.46      | 270             | 14700                              |
| 2.0       | 260             | 17872                              |
| 4.0       | 190             | 4468                               |
| 8.0       | 220             | 26808                              |
| 16.0      | 180             | 0                                  |

| 惑星半径 (Re) | 225K の熱が到達できた経度 | 夜半球へ到達できた昼夜半球境界(経度180度)からの実距離 (km) |
|-----------|-----------------|------------------------------------|
| 1.0       | -               | 全球                                 |
| 1.46      | -               | 全球                                 |
| 2.0       | 320             | 31276                              |
| 4.0       | 240             | 26808                              |
| 8.0       | 230             | 44680                              |
| 16.0      | 200             | 35744                              |

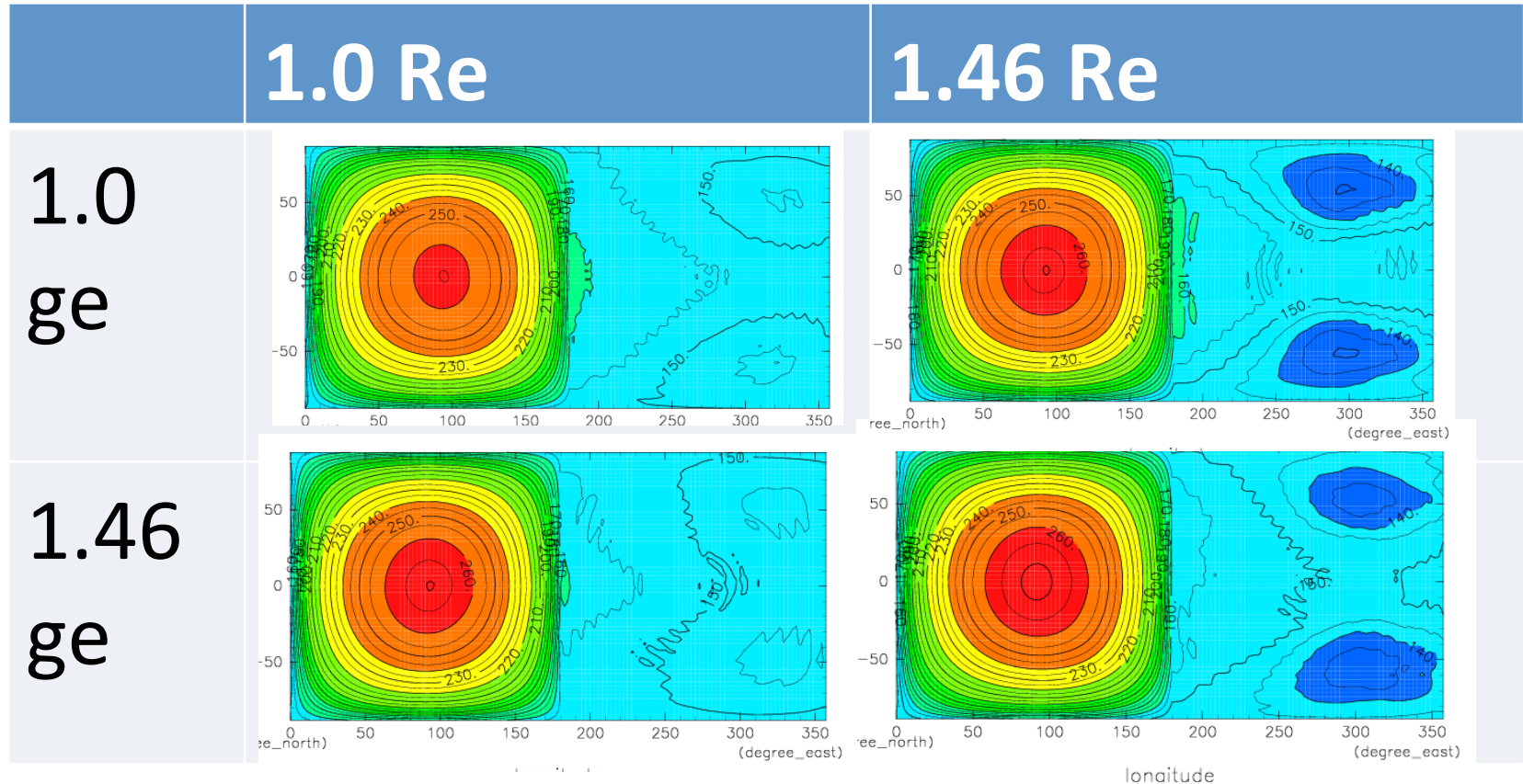
有意な相関性は見られない。  
同じ温度で比べてもあまり意味がなさそうだ。



# 重力加速度の影響

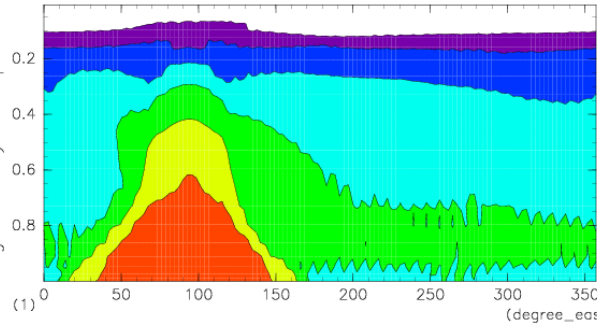
– 重力加速度の影響は惑星半径に比べて小さい

表面温度の水平分布

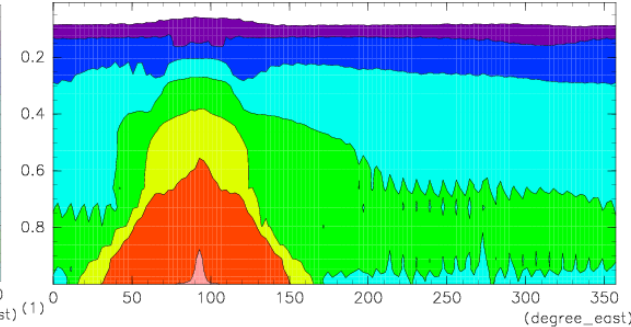


# 赤道断面における比湿

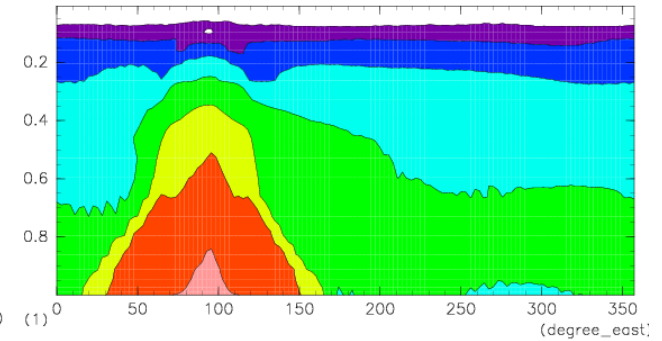
1.0 Re



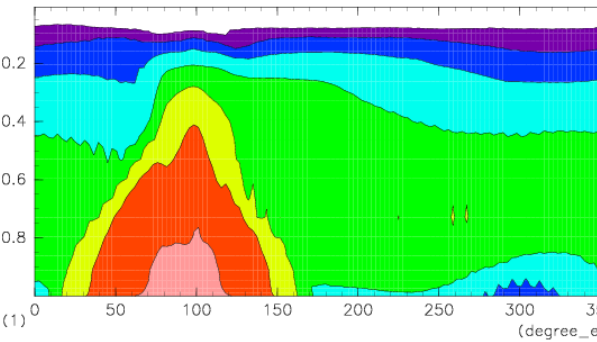
1.46 Re



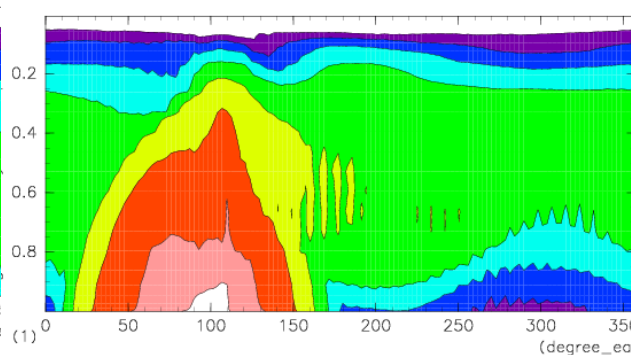
2.0 Re



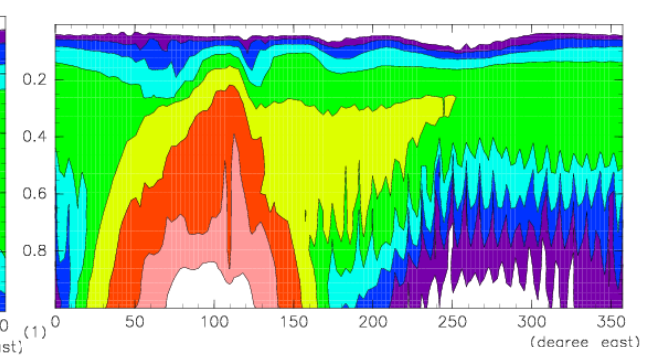
4.0 Re



8.0 Re



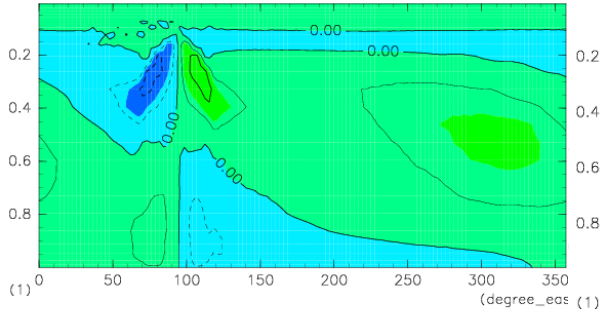
16.0 Re



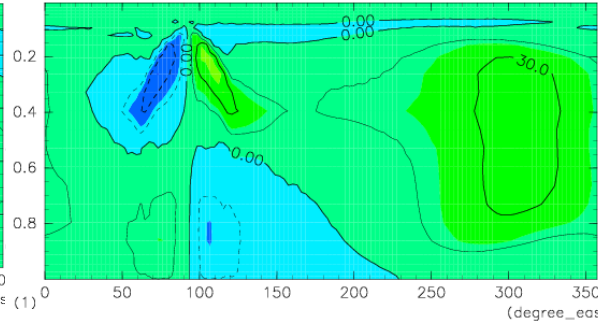
温度分布との相関がある

# 赤道断面：東西風速

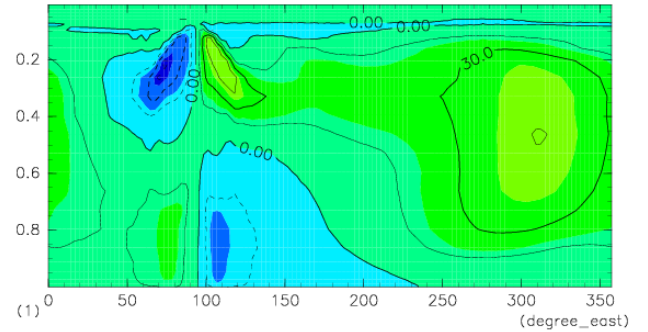
1.0 Re



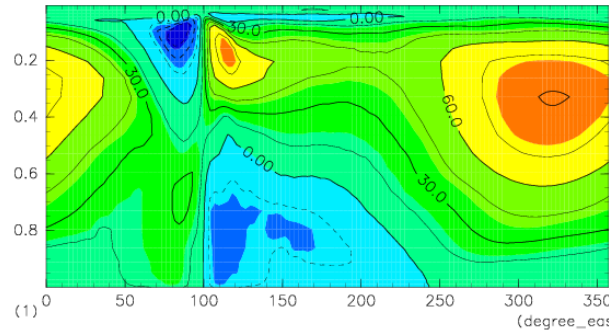
1.46 Re



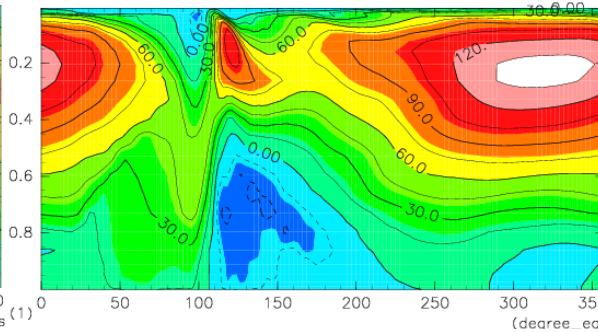
2.0 Re



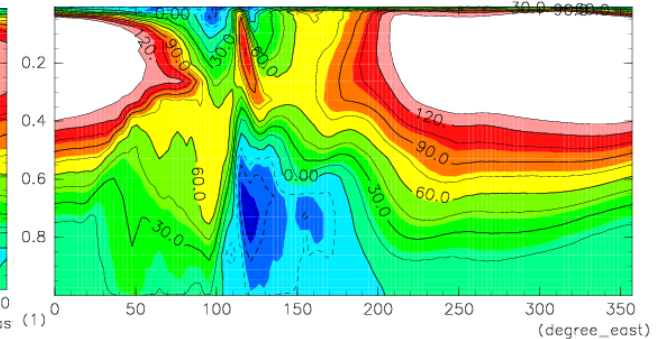
4.0 Re



8.0 Re



16.0 Re



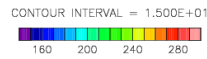
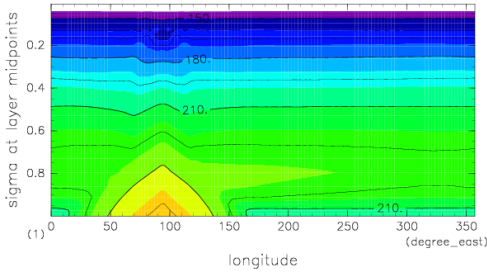
CONTOUR INTERVAL = 1.500E+01



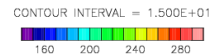
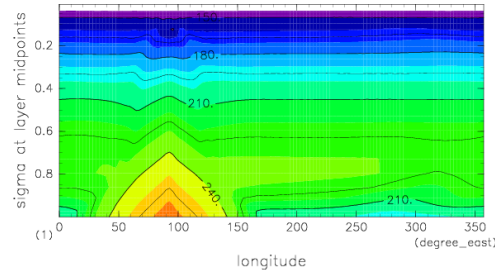
夜半球に強い東西風が吹いている

# 赤道断面における温度分布

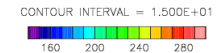
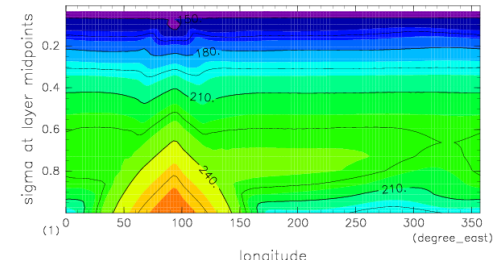
1.0 Re  
temperature



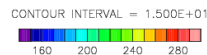
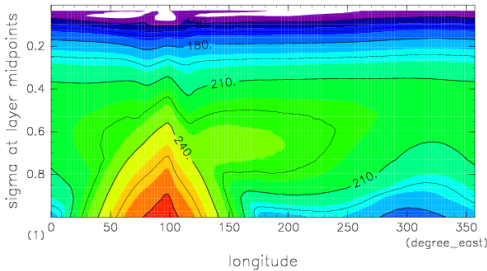
1.46 Re  
temperature



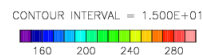
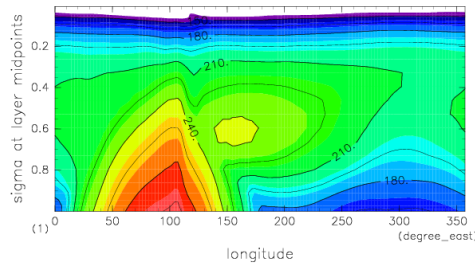
2.0 Re  
temperature



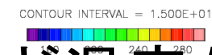
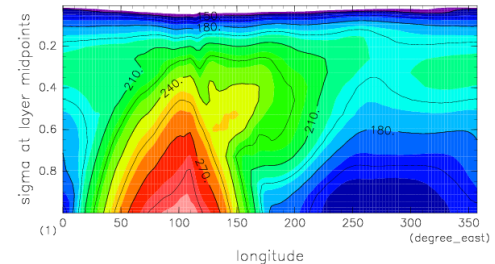
4.0 Re  
temperature



8.0 Re  
temperature



16.0 Re  
temperature



恒星直下点では30 Kほど温度が高くなっている。経度方向の輸送が弱くなっているように見える。