

暴走温室状態の発生条件に関する大気大循環モデル実験

石渡正樹^(1,2), 納多哲史⁽³⁾, 中島健介⁽⁴⁾
高橋芳幸^(2,5), 竹広真一⁽³⁾, 林祥介^(2,5)

(1) 北海道大 (2) 惑星科学研究センター (CPS)
(3) 京都大 (4) 九州大 (5) 神戸大

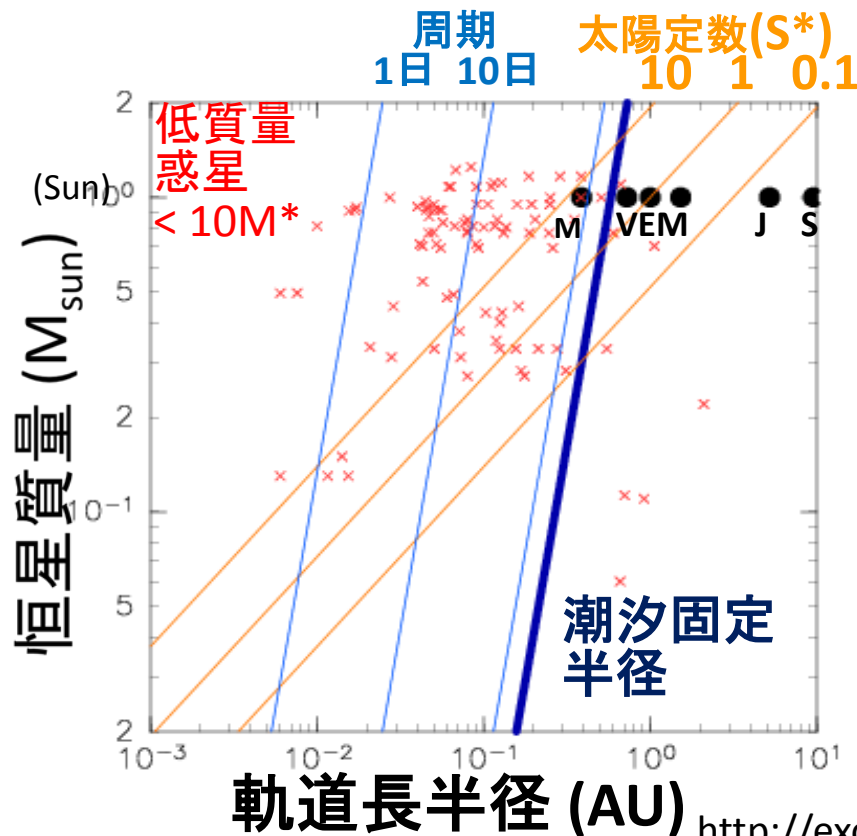


天文学会
Z3. 計算科学による
惑星形成・進化・環境変動研究の新展開
2016年3月15日

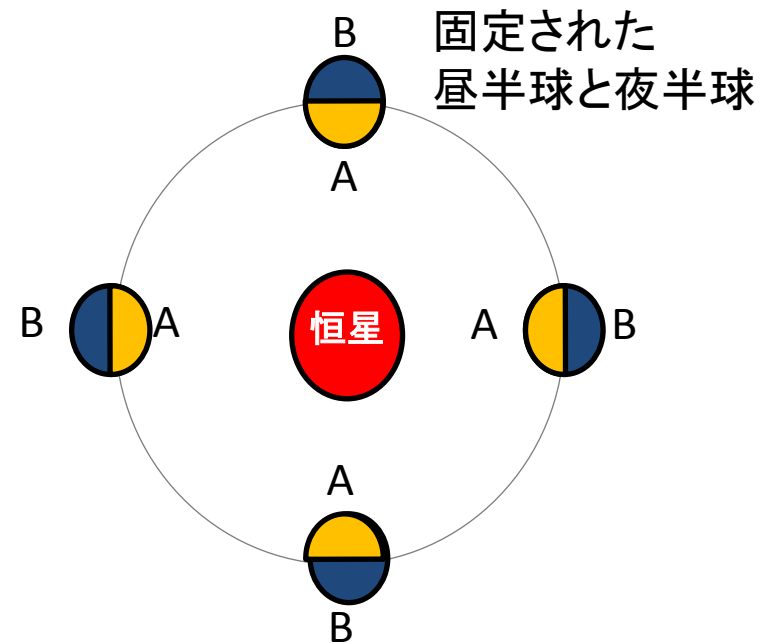


同期回転惑星

- 候補も含めて3000個以上の系外惑星が発見
- 低質量の系外惑星の多くは潮汐固定
 - 固定された昼半球と夜半球が存在する世界
- 地球型惑星が存在する可能性も
 - 新たな気候の研究対象の出現



<http://exoplanet.eu/catalog>

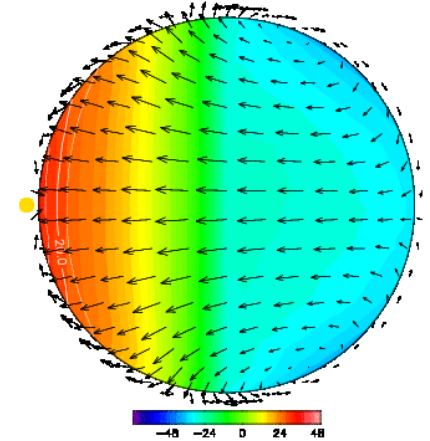
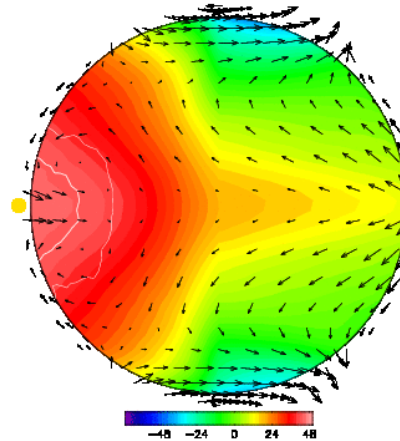
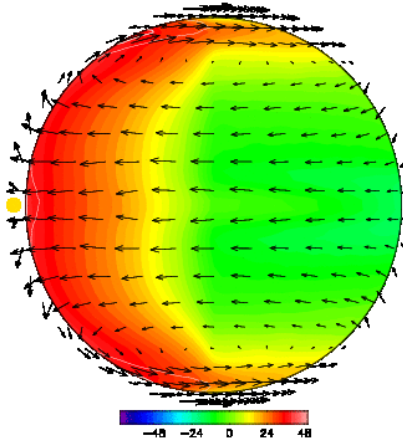


大気状態の例

$\Omega^*=1.0, S^*=1.46$

$\Omega=0.5, S^*=1.17$

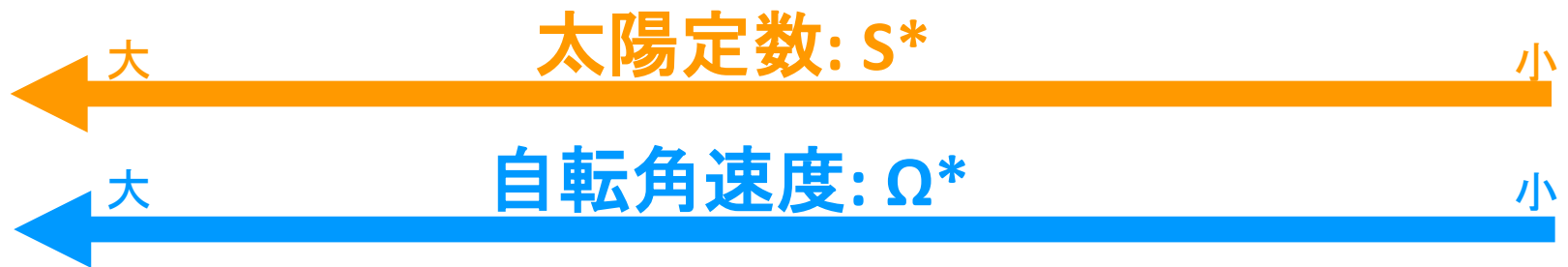
$\Omega=0.1, S^*=1.0$



365日平均場

黄色丸:
恒星直下点

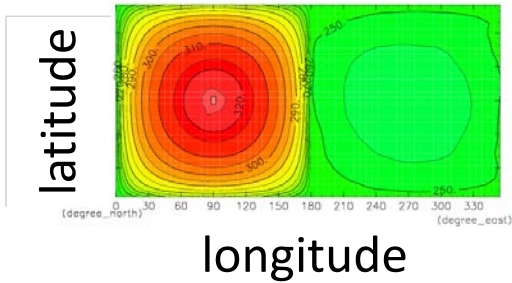
色: 表面温度
矢印: 大気最下層水平風
等値線: 降水



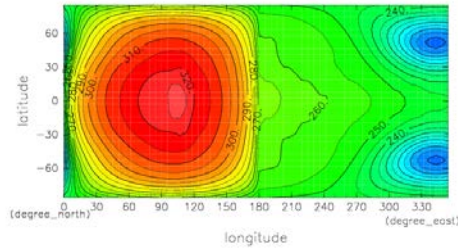
気候状態は自転角速度と太陽定数の2パラメータに依存

Ω^* 依存性: 表面温度(灰色大気)

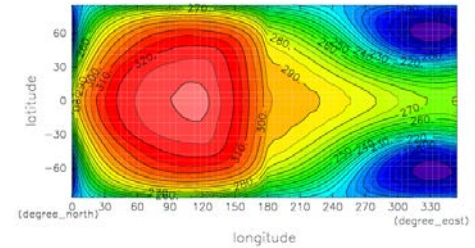
$$\Omega^* = 0$$



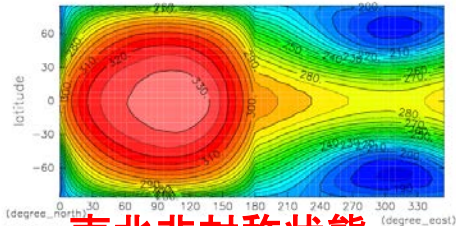
$$\Omega^* = 0.05$$



$$\Omega^* = 0.15$$

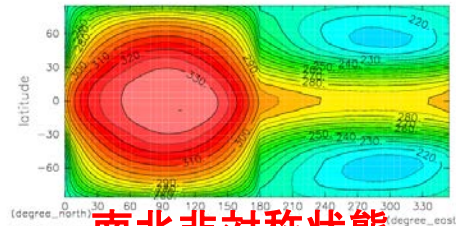


$$\Omega^* = 0.25$$



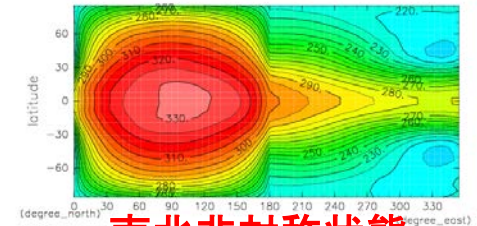
南北非対称状態
が反転を繰り返す

$$\Omega^* = 0.33$$



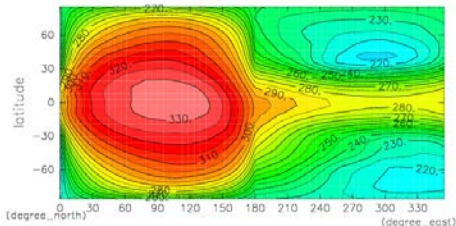
南北非対称状態
が反転を繰り返す

$$\Omega^* = 0.5$$



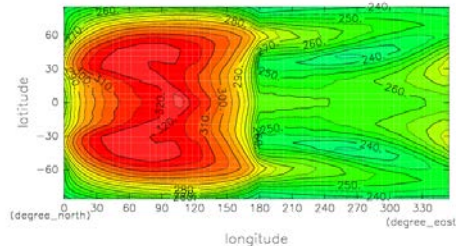
南北非対称状態
が反転を繰り返す

$$\Omega^* = 0.67$$

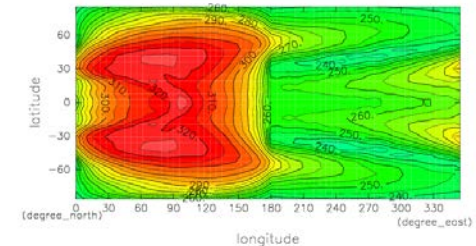


南北非対称状態
が反転を繰り返す

$$\Omega^* = 0.8$$

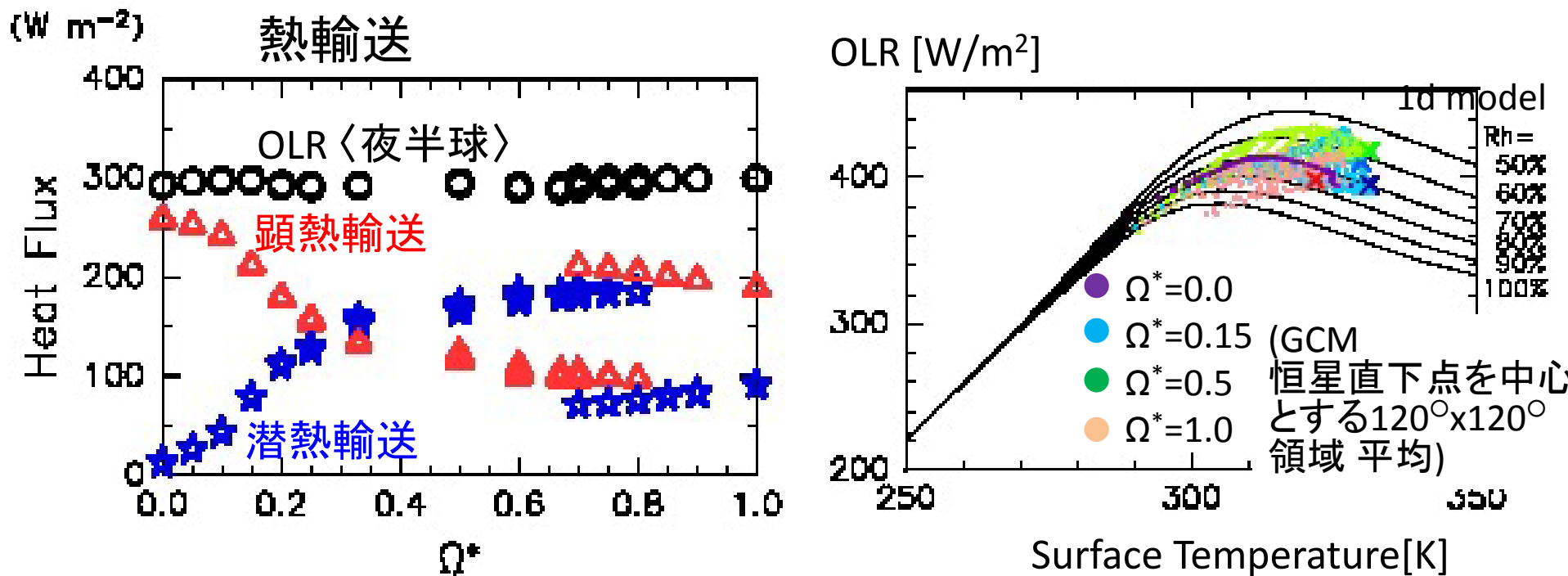


$$\Omega^* = 1.0$$



1000-2000日平均

Ω^* 依存性:熱輸送(灰色大気)



- 昼夜間熱輸送量は Ω^* に依らない
- 熱輸送量は射出限界により規定される
 - 射出限界: Nakajima et al. (1992), Ishiwatari et al. (2002)
- (熱輸送) = (入射量) - (射出限界)

本発表で考察する問題:太陽定数依存性

- 暴走温室状態の発生条件はどのように決まるのか？
- 暴走温室状態に関する最近の研究

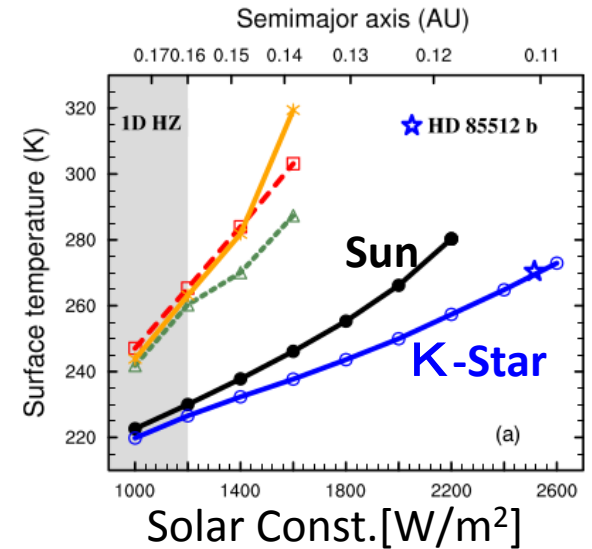
- 同期回転惑星設定 (Yang et al., 2013)

- 大気海洋結合モデル
- 平衡状態は $S=2200 \text{ W/m}^2$ まで
- 厚い雲の形成が重要と指摘

- 地球設定 (e.g., Leconte et al., 2013)

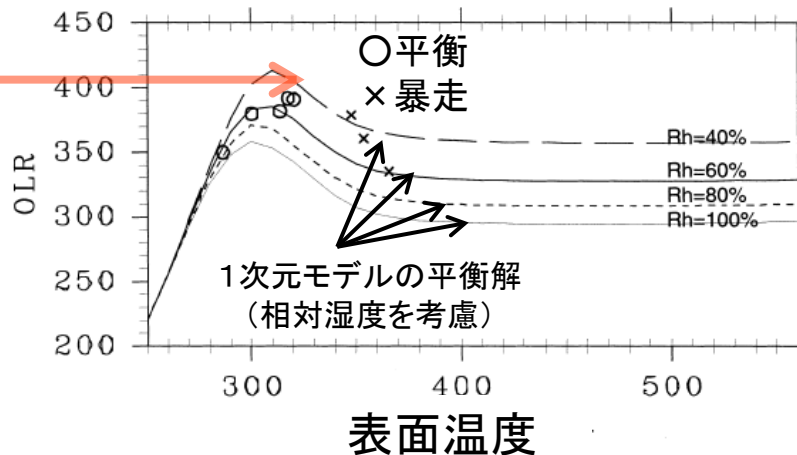
- 大気大循環モデル
- 平衡状態は $S \sim 1500 \text{ W/m}^2$ まで
- 亜熱帯域の乾燥化が重要と指摘

- 我々の想像: 暴走条件はもっと簡単に決まるのでは？



Yang et al. (2013)

暴走温室状態が
発生する太陽定数
の値は射出限界
によって規定される



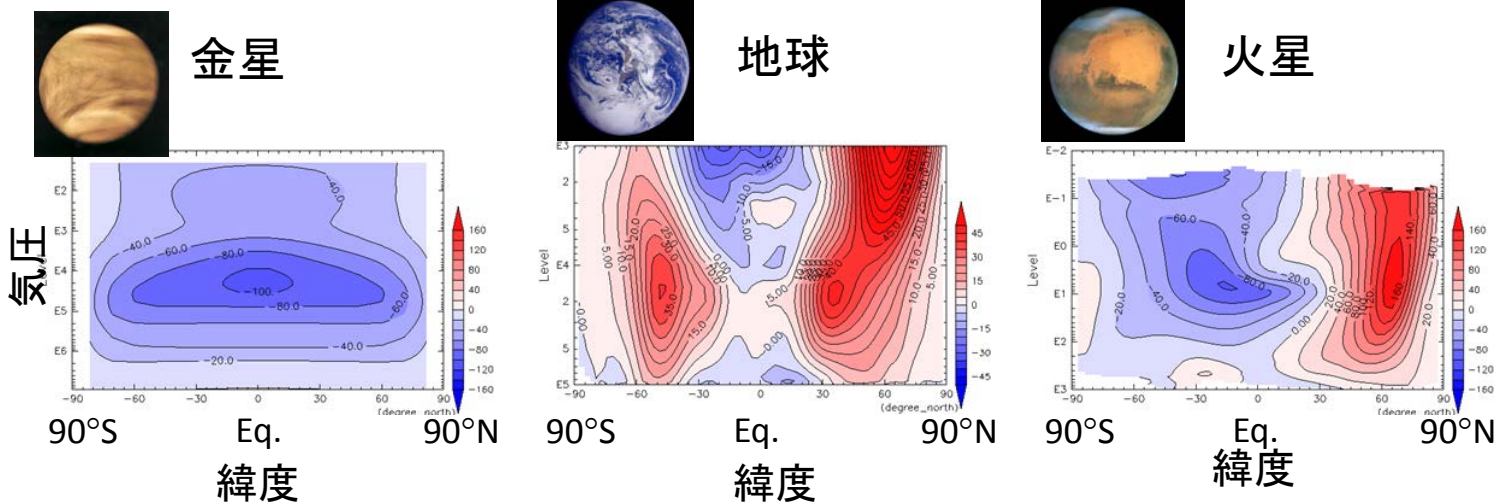
雲無し灰色
大気GCM

Ishiwatari et al. (2002)

モデル

- 大気大循環モデル: DCPAM5
 - <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>
- 同一の枠組みで様々な設定の実験

東西平均
東西風



トーンパターンは図によって異なる

- 基礎方程式: 3次元球殻プリミティブ方程式
- 差分化: スペクトル法(水平方向),
有限差分法(鉛直方向)

物理過程

- 放射
 - 水蒸気、CO₂, 雲水による吸収・射出
Chou and Lee (1996), Chou et al (2001)
 - Δ-Eddington 近似: Toon et al. (1989)
 - 恒星放射は太陽を想定
- 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
- 惑星表面: 熱容量 0 の海洋, 海洋の熱輸送無し
- 簡易雲モデル
 - 雲水の生成、移流、乱流拡散、消滅を考慮

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} = -v \cdot \nabla v - \sigma \frac{\partial q_c}{\partial \sigma} + F_{turb} + S_c + \frac{q_c}{\tau_{LT}}$$

S_c : 雲水生成項

–大規模凝結スキームによる凝結量

–RAS scheme で計算される雲頂からのドレイン量

$\frac{q_c}{\tau_{LT}}$: 消滅項

$\tau_{LT} = 1500\text{sec}$

T42L26の地球計算により選択

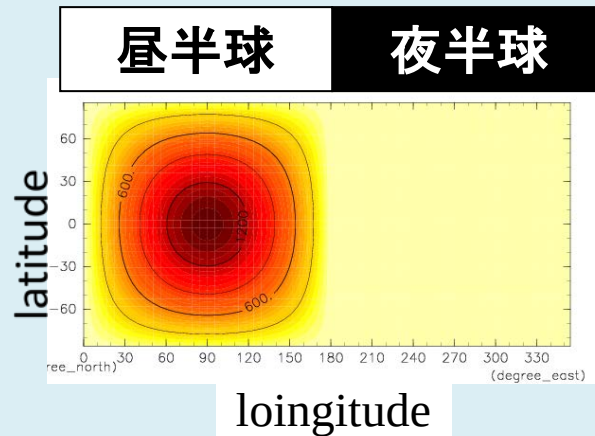
実験設定

日射分布

同期回転惑星設定

非同期設定(地球の設定)

日変化・季節変化あり



太陽定数

$S=1366, 1600, 1800, 2000, 2200$ [W/m^2]

自転角速度

$\Omega^*=0, 0.1, 0.5, 1.0$

雲の消滅時間

$\tau_{LT}=0$ (no cloud), 1500 [sec]

- 乾燥空気量: 表面気圧で 10^5Pa , 地表アルベド: 0.0
- 解像度: T42L26, 積分時間: 3 年

惑星放射平面分布

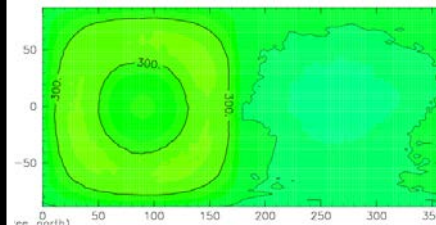
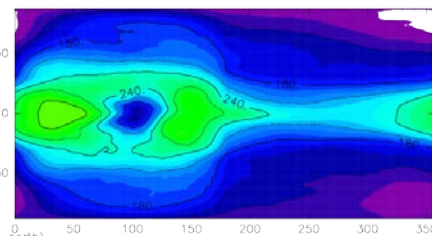
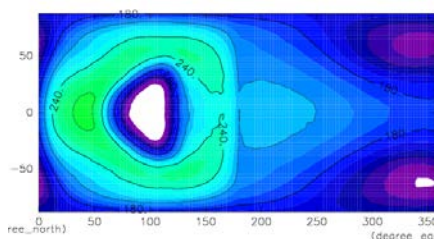
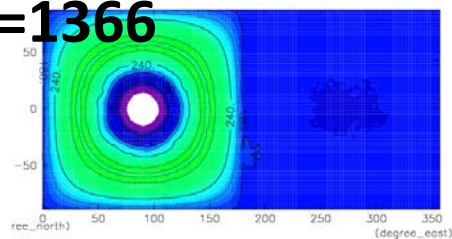
$\Omega=0.0$

$\Omega=0.1$

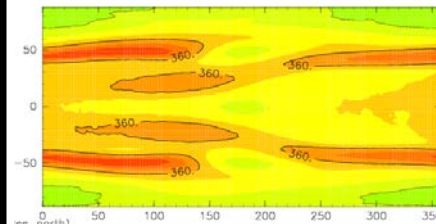
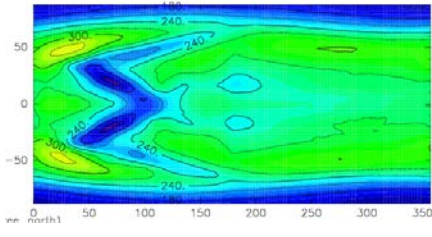
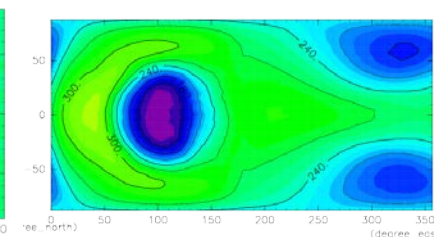
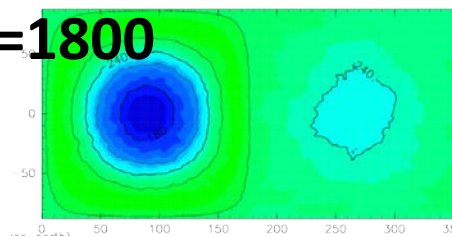
$\Omega=1.0$

$\Omega=1.0$
(雲無し)

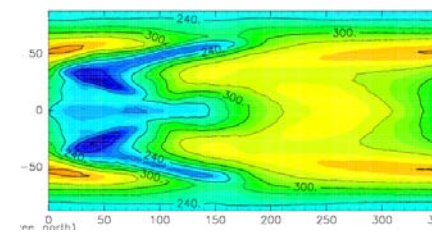
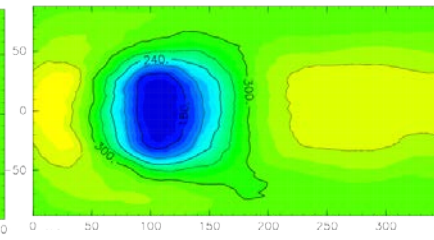
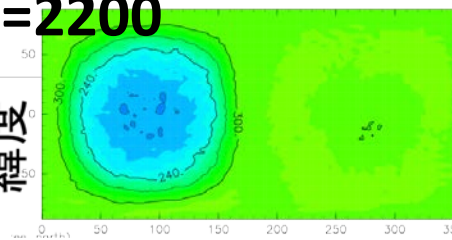
S=1366



S=1800

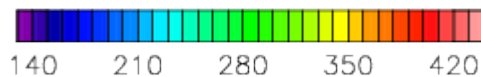


S=2200



経度

CONTOUR INTERVAL = 3.000E+01



365 日平均

雲水量

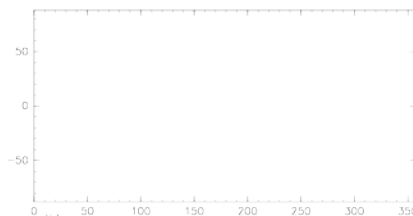
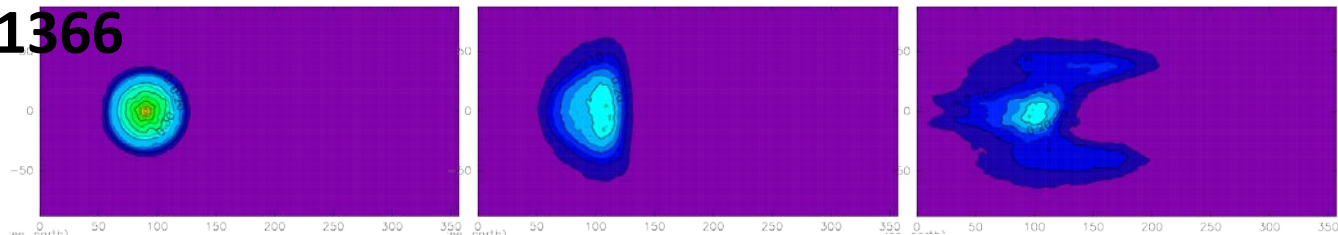
$\Omega=0.0$

$\Omega=0.1$

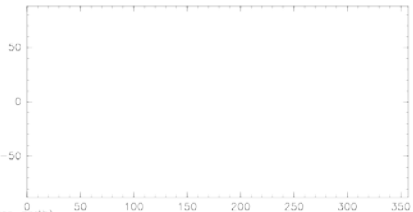
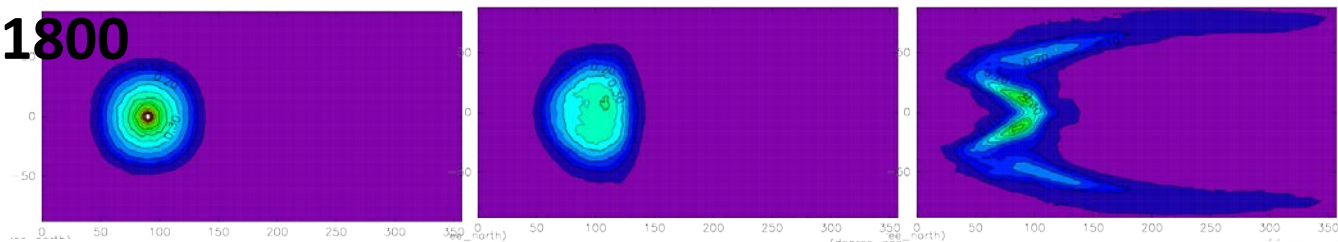
$\Omega=1.0$

$\Omega=1.0$
(雲無し)

S=1366

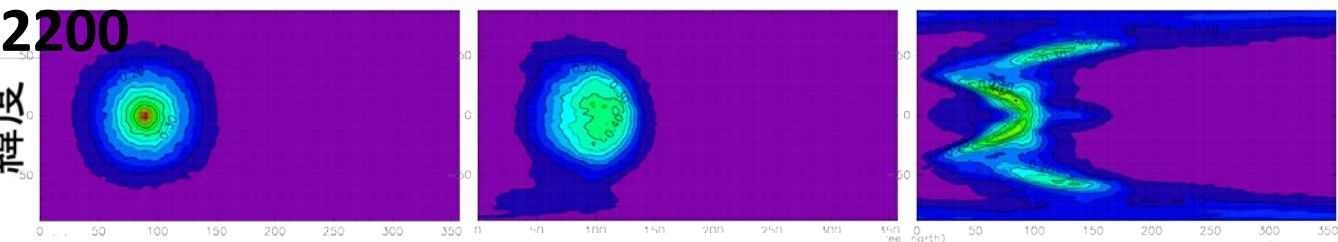


S=1800



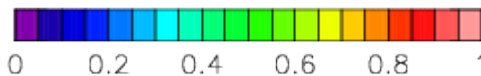
S=2200

緯度



経度

CONTOUR INTERVAL = 5.000E-02



365 日平均

上層の水平風

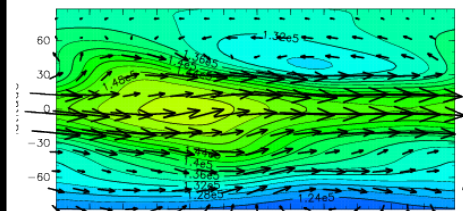
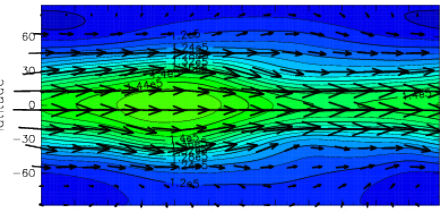
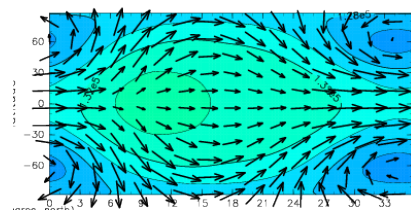
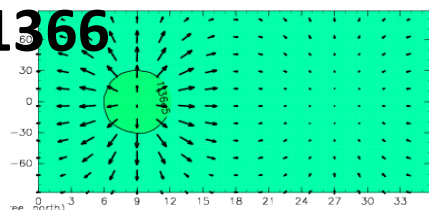
$\Omega=0.0$

$\Omega=0.1$

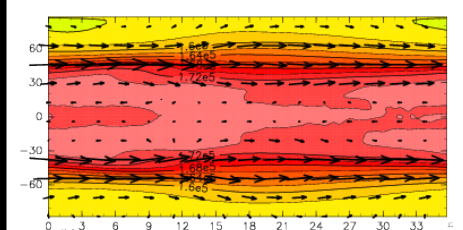
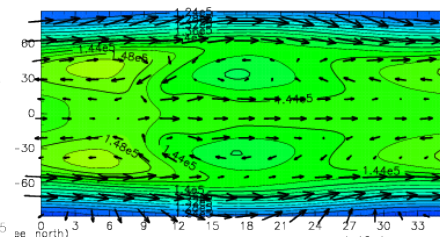
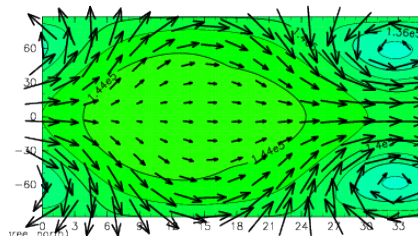
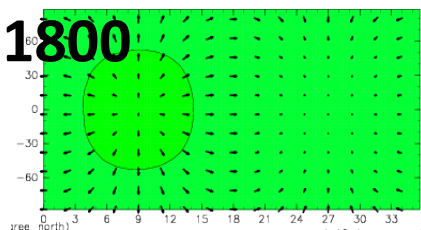
$\Omega=1.0$

$\Omega=1.0$
(雲無し)

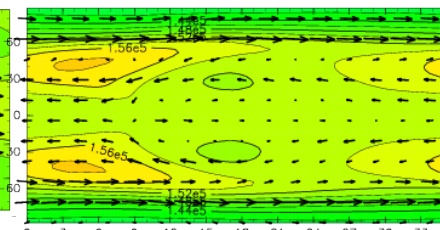
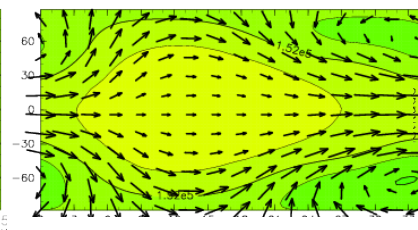
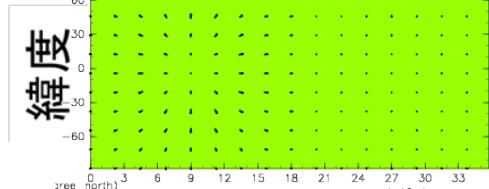
$S=1366$



$S=1800$

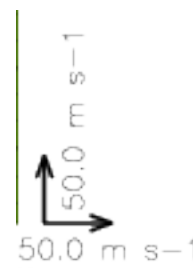


$S=2200$



緯度

経度



365 日平均

表面温度

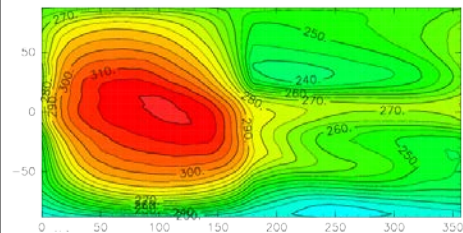
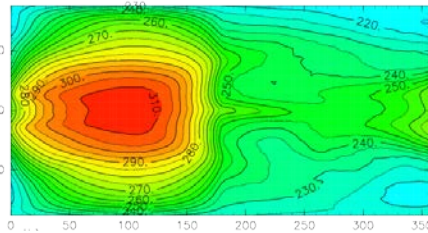
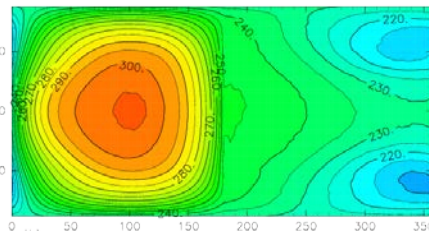
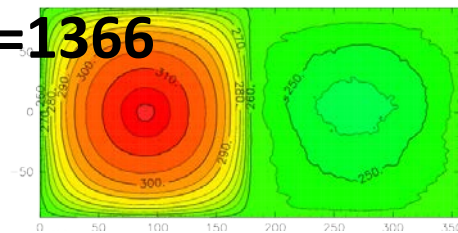
$\Omega=0.0$

$\Omega=0.1$

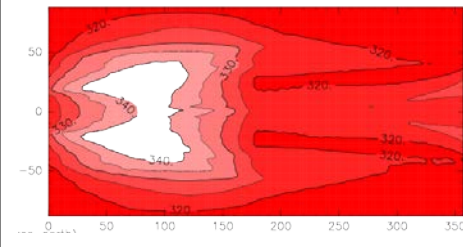
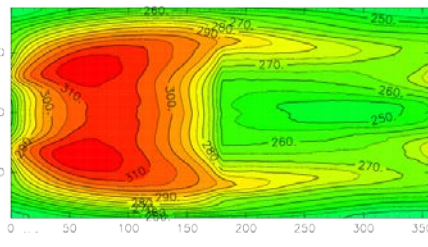
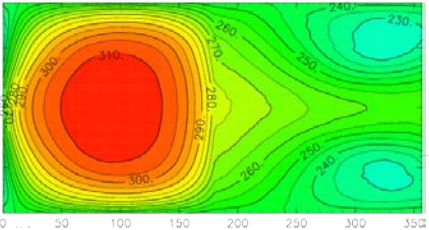
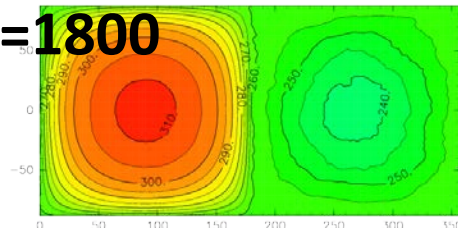
$\Omega=1.0$

$\Omega=1.0$
(雲無し)

S=1366

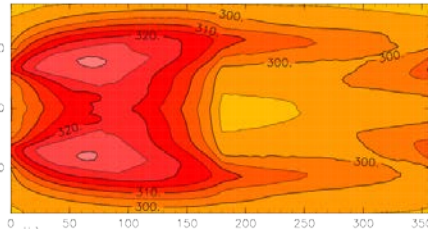
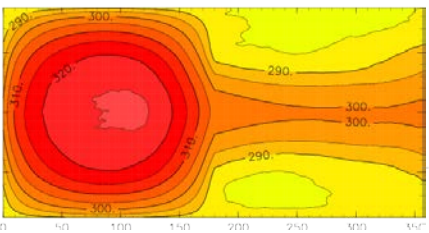
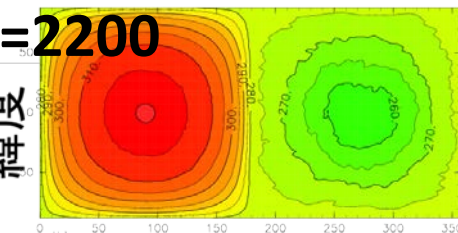


S=1800



S=2200

緯度



経度

CONTOUR INTERVAL = 5.000E+00



365 日平均

全球平均値時間変化($\Omega^*=1.0$)

同期回転設定

地球の設定

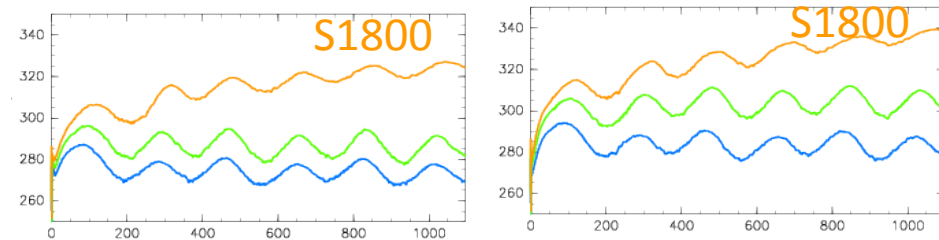
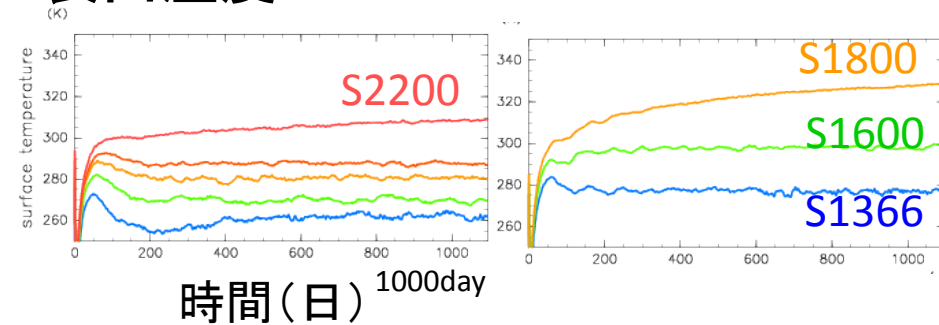
雲有り

雲無し

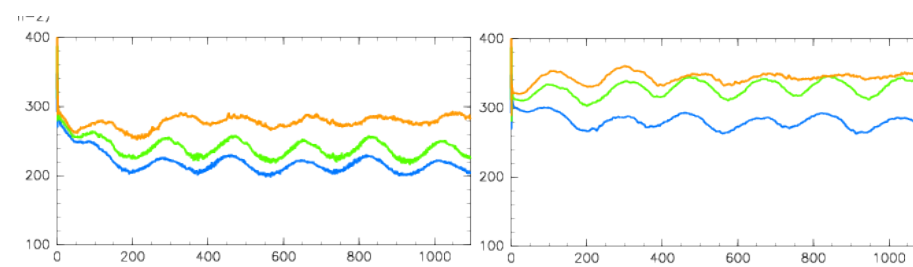
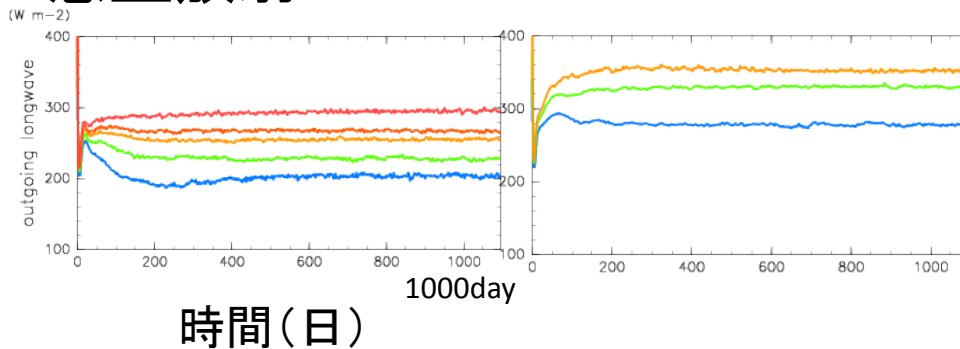
雲有り

雲無し

表面温度



惑星放射



各図の一番上の線は暴走温室状態が発生した場合の結果

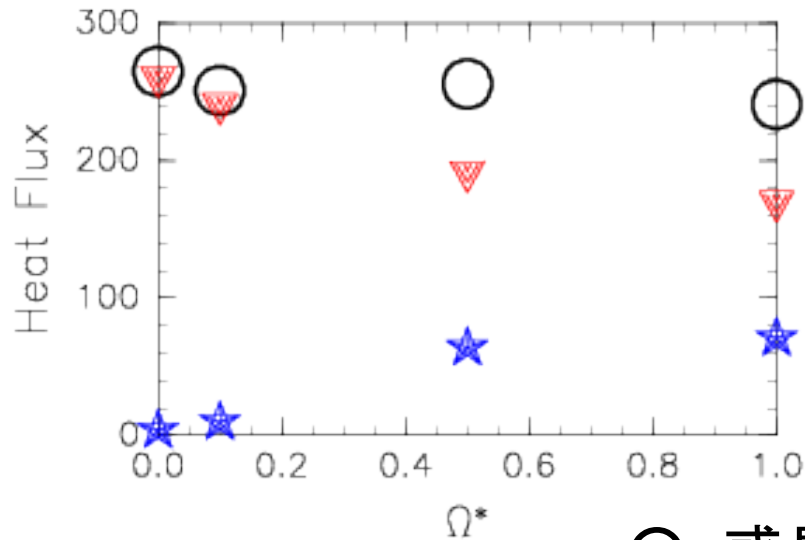
全球平均値($\Omega^*=1.0$)

	同期回転設定		地球の設定		
	雲有り	雲無し	雲有り	雲無し	
$S^*=1.0$ (1366W/m ²)	○ 0.42 204W/m ²	○ 0.18 278W/m ²	○ 0.36 214W/m ²	○ 0.15 279W/m ²	アルベド OLR
$S^*=1.17$ (1600W/m ²)	○ 0.44 228W/m ²	○ 0.18 331W/m ²	○ 0.40 237W/m ²	○ 0.17 331W/m ²	
$S^*=1.32$ (1800W/m ²)	○ 0.42 255W/m ²	× 0.16 352W/m ²	× 0.33 281W/m ²	× 0.13 345W/m ²	
$S^*=1.46$ (2000W/m ²)	○ 0.44 267W/m ²				
$S^*=1.61$ (2200W/m ²)	× 0.44 295W/m ²				○: 平衡 ×: 暴走

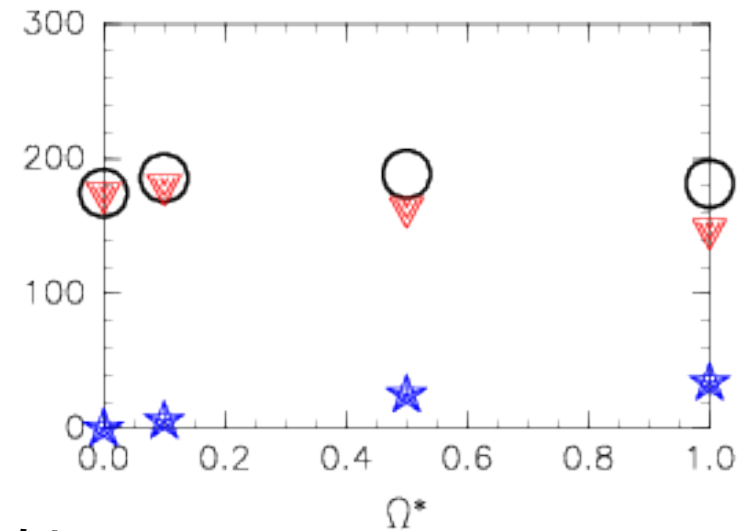
昼夜間熱輸送

$S=1366\text{W/m}^2$ の場合、365日平均

(W m^{-2}) 雲有り ($\tau_{LT} = 0\text{sec}$)



雲無し ($\tau_{LT} = 1500\text{sec}$)



○: 惑星放射

▼: (顕熱輸送)/ $2\pi R^2$

★: (潜熱輸送)/ $2\pi R^2$

- 昼夜間熱輸送量は自転角速度にほとんど依存しない (灰色大気の場合と同様)

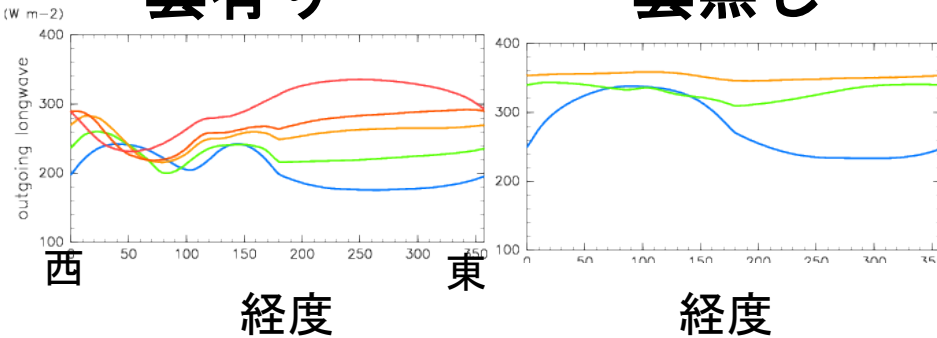
OLRの最大値($\Omega^*=1.0$)

• OLRの水平分布

東西分布(**同期回転**)

雲有り

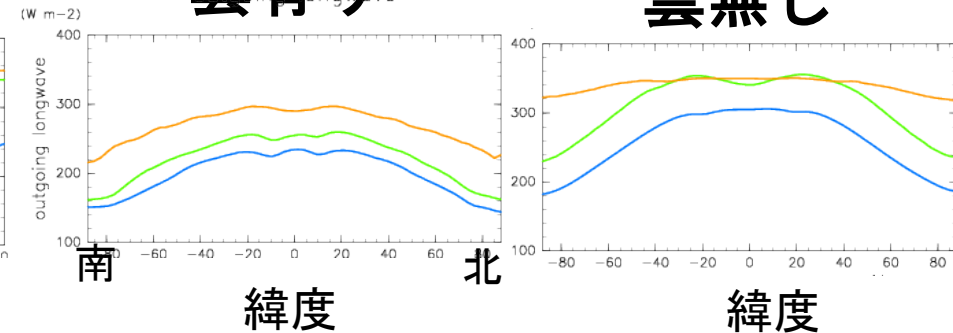
雲無し



南北分布(**地球的**)

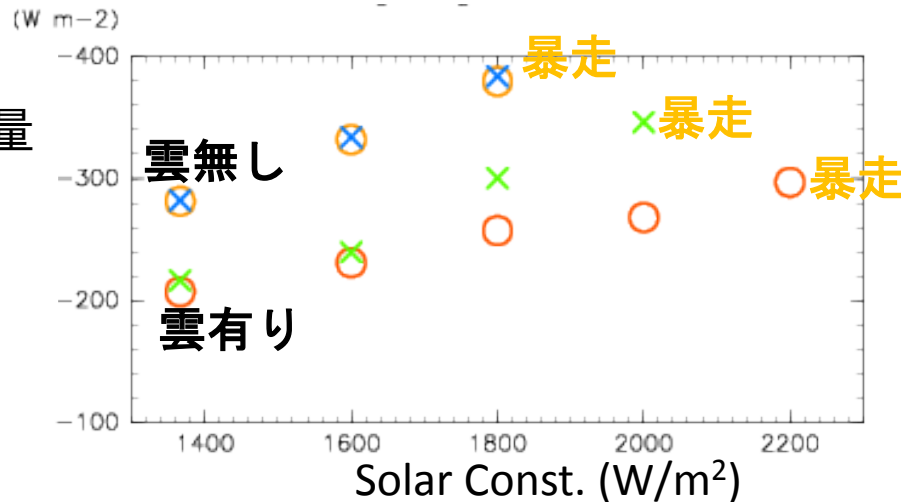
雲有り

雲無し



• 日射吸収量

全球平均
日射吸収量



○ ○ : 同期回転
× × : 地球的

まとめ

- 大気大循環モデルにより同期回転水惑星上の大気状態のパラメータ実験を実施
- 太陽定数が増加しても循環パターンの種類は変わらない
- 暴走状態が発生する太陽定数:
地球的設定に比べて同期回転設定の方が大きい
- OLR 最大値はおよそ 300 W/m^2 (設定によって 50 W/m^2 程度の差)
- 暴走状態の発生条件は「全球平均日射吸収量が OLR 最大値を超えること」となっているように見える