

系外惑星大気を想定した理想的 (設定を用いた)大気大循環モデル実験: いろいろなことを射出限界が決める

石渡正樹⁽¹⁾,地球流体電脳倶楽部⁽²⁾

(1) 北海道大・理, <http://www.gfd-dennou.org>

CPS & ABC ワークショップ
2021年03月01日



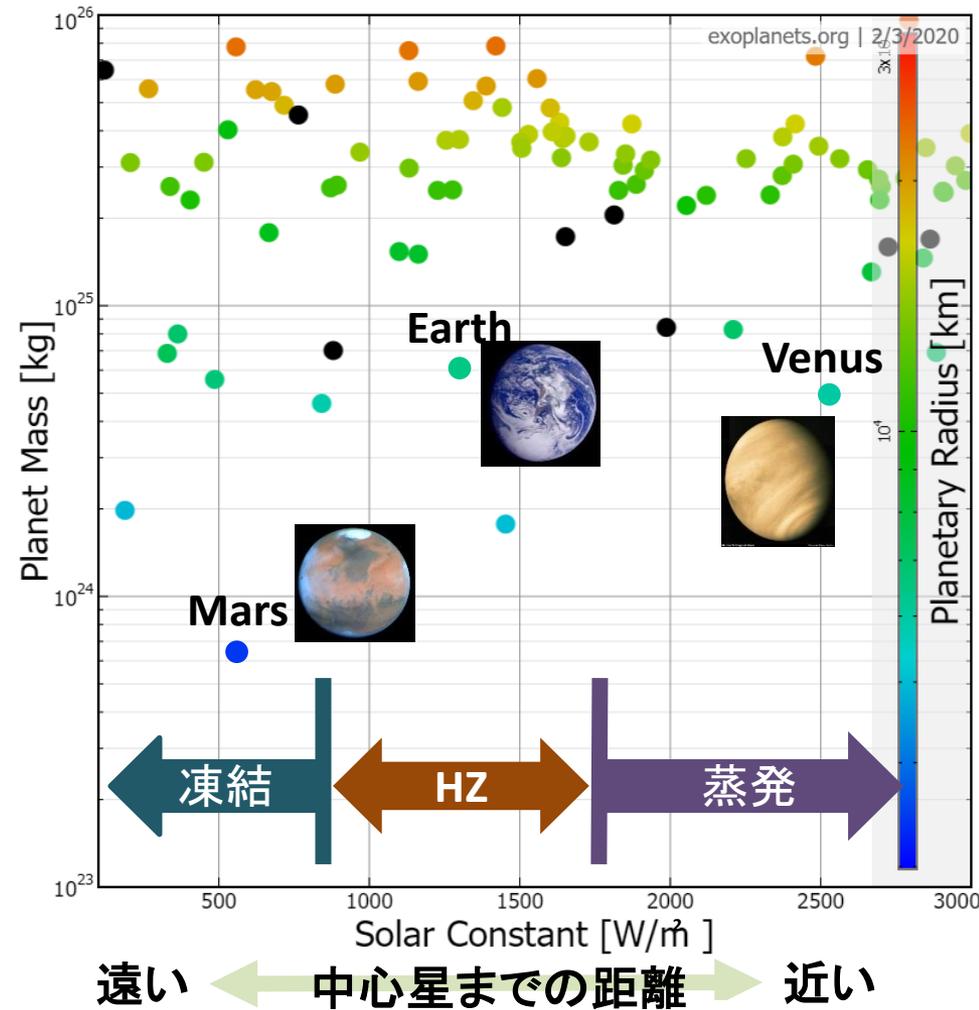
目次

- **イントロ**
 - 暴走温室状態に注目
- **モデル**
 - AGCM5.3, DCPAM
- **灰色放射大気における暴走温室状態**
 - 1次元モデル: 射出限界
 - GCMにおける暴走温室状態の発生条件
- **気候レジーム図 (この話はいれない方が良くかも)**
 - 暴走温室状態も考えたバージョン
- **同期回転惑星の気候**
 - 昼夜間熱輸送量
- **同期回転惑星気候の太陽定数依存性**
 - 暴走温室状態の発生条件
- **非灰色・雲ありの場合**
- **まとめ**

Introduction

背景・考えたい問題

- 背景：複数の「地球型」系外惑星の発見
- 究極の問い：系外惑星は生命が生まれる環境を持つか？
- 具体的な問い
 - 惑星表層に液体の水が存在できる条件は？
 - ハビタブルゾーン
Kasting et al. (1993),
Kopparapu et al. (2013)
 - 気候の多様性は？
 - 系外惑星は多様な条件下にあると想像される
 - 地球のような気候の安定性は？
 - 地球はどこまで地球か？



<http://exoplanets.org/plots>

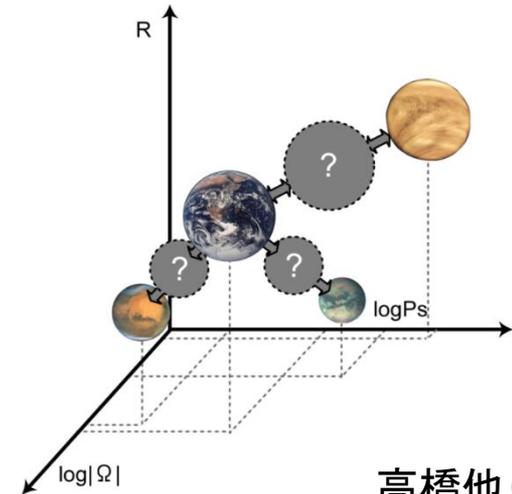
金星の図：<http://www.solarviews.com/browse/venus/venusmar.jpg>

地球の図：<http://www.solarviews.com/raw/earth/earthx.jpg>

火星の図：<http://www.solarviews.com/raw/mars/mars060.jpg>

目的

- 目的：系外惑星気候の多様性に関する数値的探索
 - 様々な仮想惑星の気候状態の数値実験
 - パラメータ空間における気候多様性の理解
- 方針：簡単なモデルと理想的な設定を用いた実験・考察
 - 特定の惑星気候の再現ではなく気候の多様性を理解するための基礎を得たい
- ここから先では水惑星の気候の太陽定数依存性に注目
 - HZの内側境界に関するものとして湿潤温室状態, 暴走温室状態
 - HZの外側境界に関するものとして全球凍結状態
- 今日の話で言いたいこと
 - いろんなことを射出限界が決めている



高橋他(2012)

モデル

モデル

- 大気大循環モデル
 - 地球流体電脳倶楽部版AGCM5, <http://www.gfd-dennou.org/library/agcm5/>
 - DCPAM5, <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>
- 理想気体, 静水圧近似 (基礎方程式:3次元球殻プリミティブ方程式)
- 大気成分
 - 水蒸気と乾燥空気のみ
 - 水蒸気、二酸化炭素、乾燥空気 (地球大気を想定)
- 離散化: 水平方向スペクトル法, 鉛直方向有限差分法
- 放射
 - 灰色放射(日射には透明, 赤外放射には灰色)
 - 地球大気用放射スキーム(水蒸気、CO₂, 雲水による吸収・射出を考慮)
- 積雲対流、地表面フラックス、鉛直乱流拡散など
 - 地球大気用パラメタリゼーションスキームを使用
- 惑星表面 : 熱容量0の海洋, 海洋の熱輸送無し
- 雲
 - 雲無し
 - 簡易雲モデル(雲水の生成、移流、乱流拡散、消滅を考慮)

灰色放射大気における 暴走温室状態

暴走温室状態の基礎概念

- 暴走温室状態とは

- 大気の射出量上限値 (射出限界) を超えた入射フラックスが与えられた状態

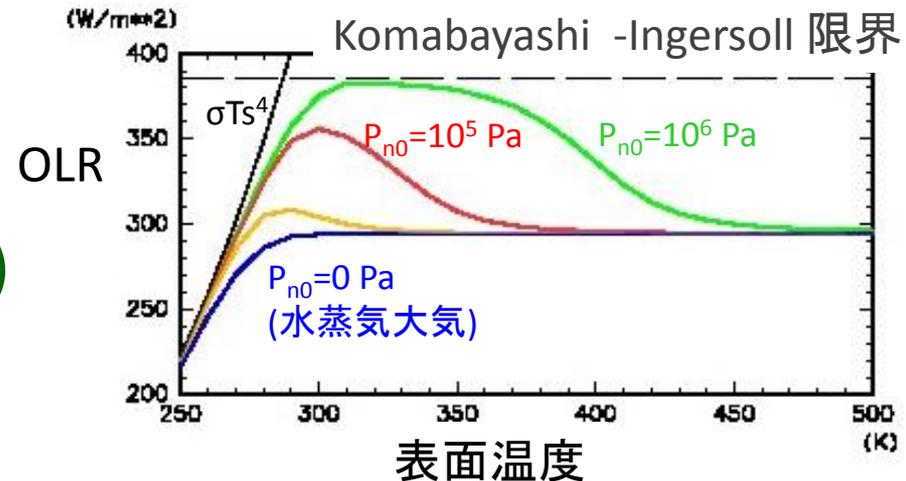
- 射出限界

- 鉛直 1 次元放射対流平衡モデル:Nakajima et al. (1992)

- 大気成分 : 水蒸気と乾燥空気
- 飽和対流圏と放射平衡成層圏
- 放射 : 日射には透明、
赤外放射には灰色 ($\kappa = 0.01 \text{ kg/m}^2$)

- 射出量上限値は複数存在

- 成層圏を通過できる赤外放射量
の上限値 (Komabayashi-Ingersoll 限界)
- 対流圏が射出できる赤外放射量
の上限値



GCMを使った3次元計算

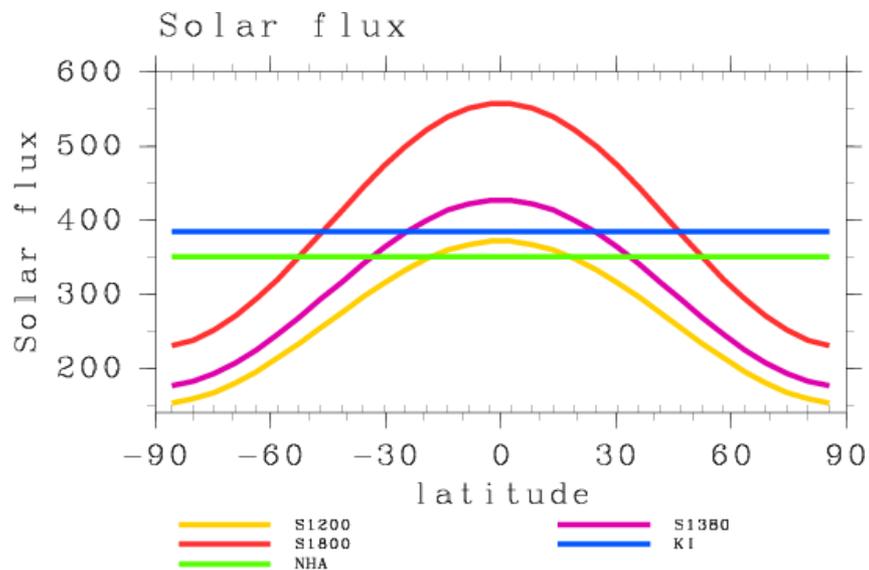
- GCMを使った3次元計算
 - 日射南北構造、循環が存在する状況でも暴走するか?
 - 「暴走限界」はどうやって決まるのか?

- モデル：AGCM5

- 大気成分：水蒸気と乾燥空気(分子量・比熱等しい)
- 放射過程：日射には透明, 赤外放射には灰色
- 「雲」無し
- 地表面条件：swamp ocean (熱容量が0)
- 蒸発・降水による大気量変化は考慮
- 分解能：水平 T21, 鉛直 L32
(64x32x32 グリッド)
- トリック：上層減衰層と鉛直フィルター

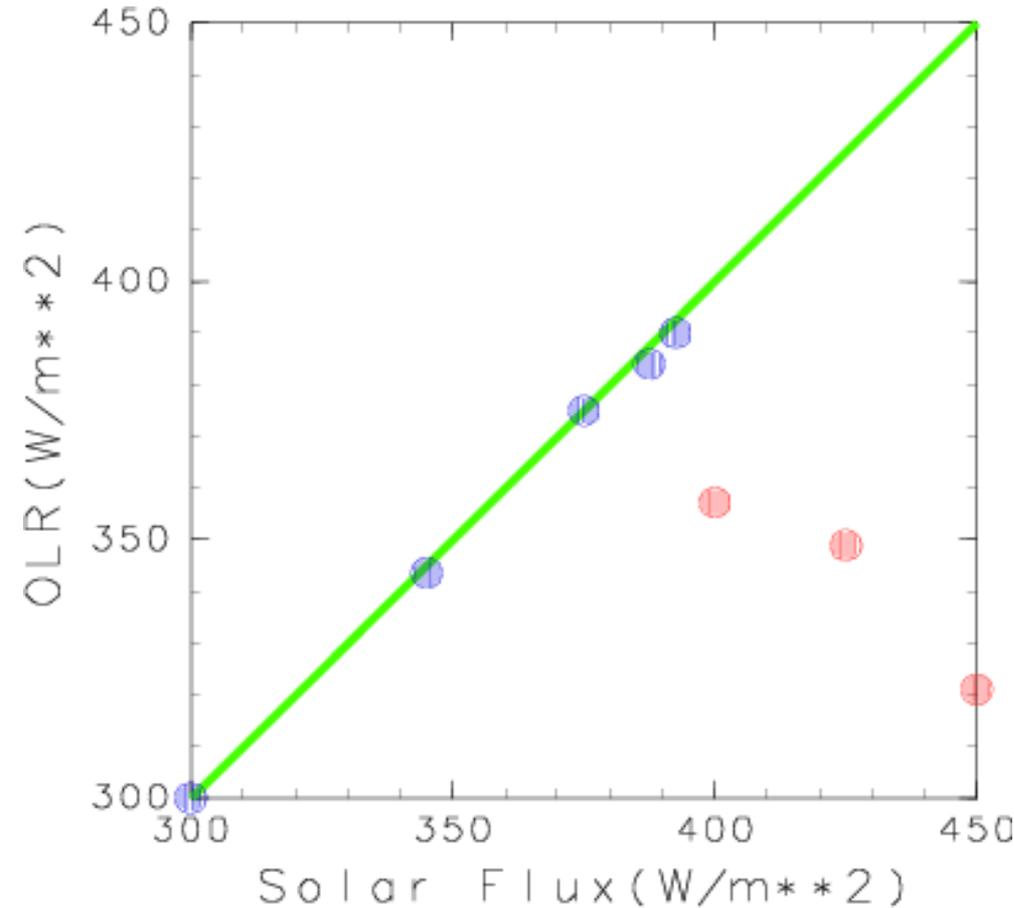
- 計算設定

- 入射太陽放射
 - 地球の軌道パラメータを使って計算した年平均・日平均分布
- 初期値：280 K の等温状態
- 積分時間：1000 ~ 2000 日



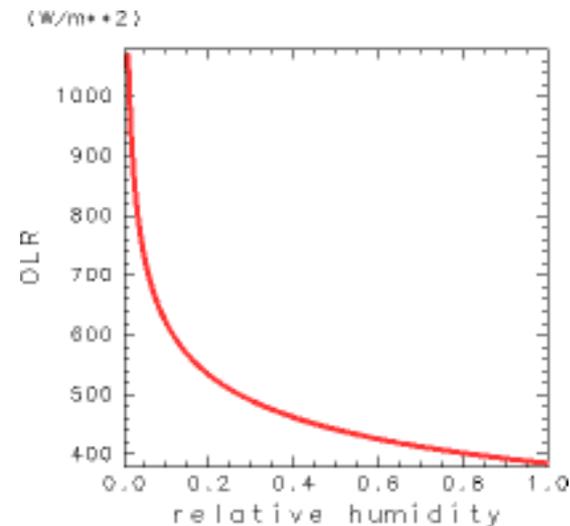
3次元系における暴走限界

入射放射 - 赤外放射の関係

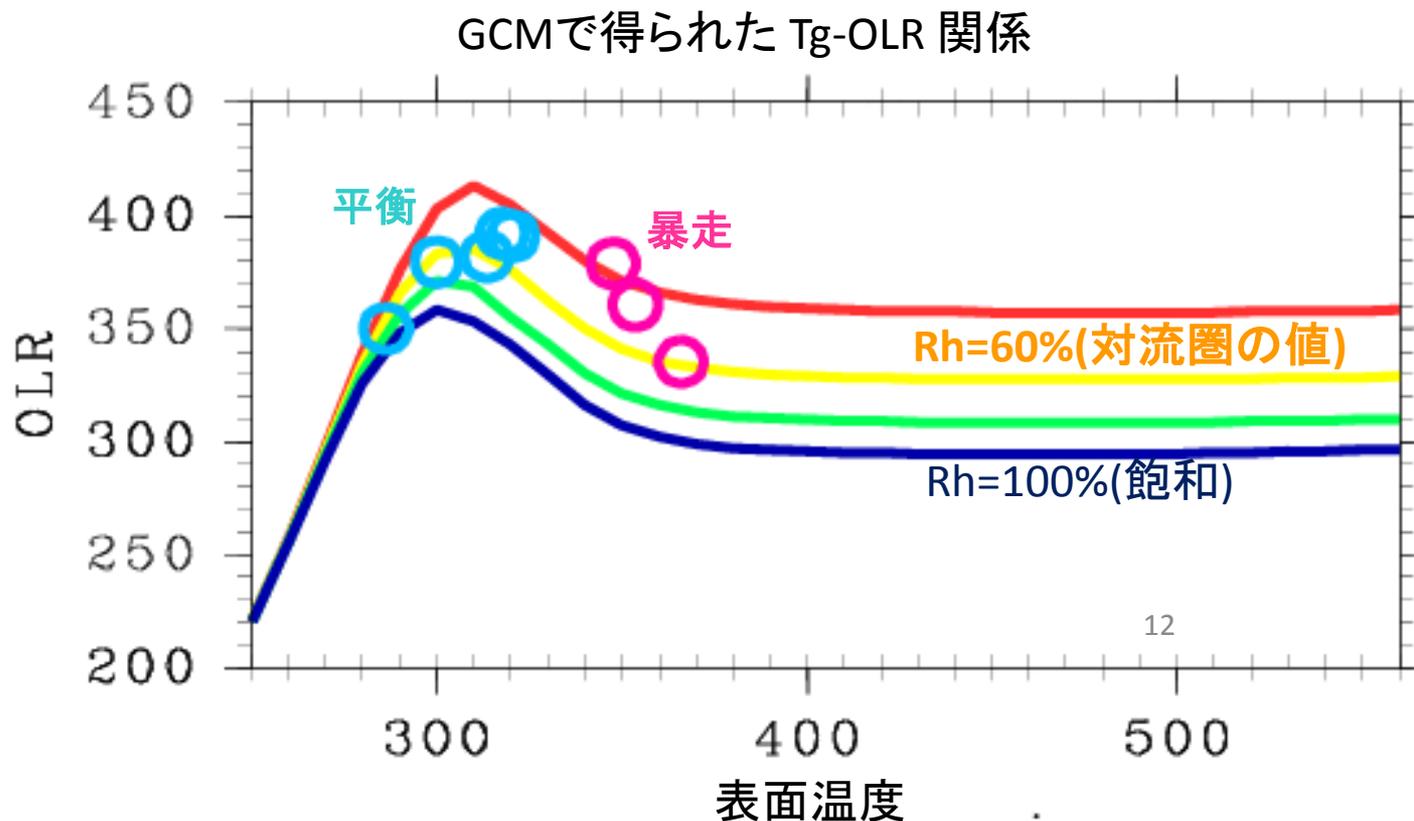


- 平均入射量が400 W/m² (Sが 1600 W/m² 以上) になると平衡状態に達することができない。
- この閾値は Komabayashi-Ingersoll 限界とは対応しない

成層圏モデルの放射量上限値
(圏界面における相対湿度を考慮した場合)



3次元系暴走限界の決まり方

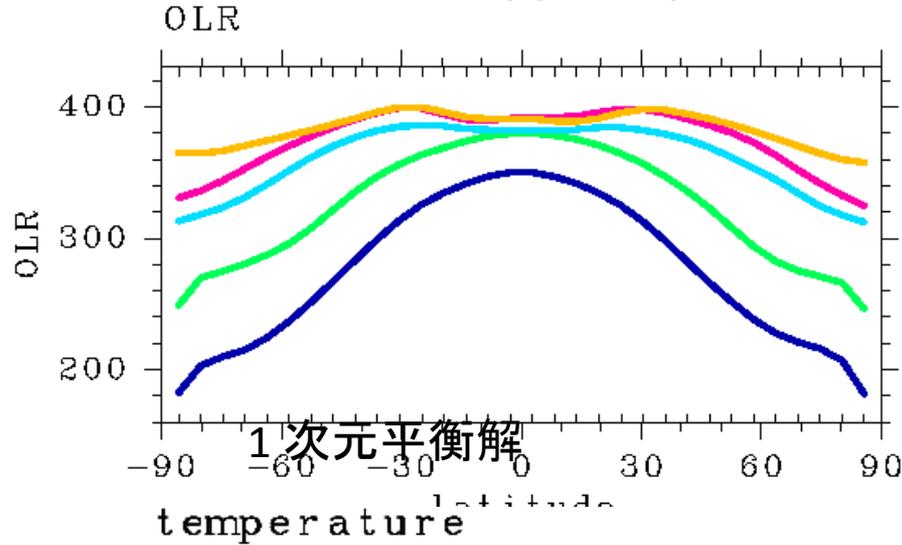


- 「暴走限界」は相対湿度を考慮した1次元放射対流平衡解の放射量上限値に対応する。

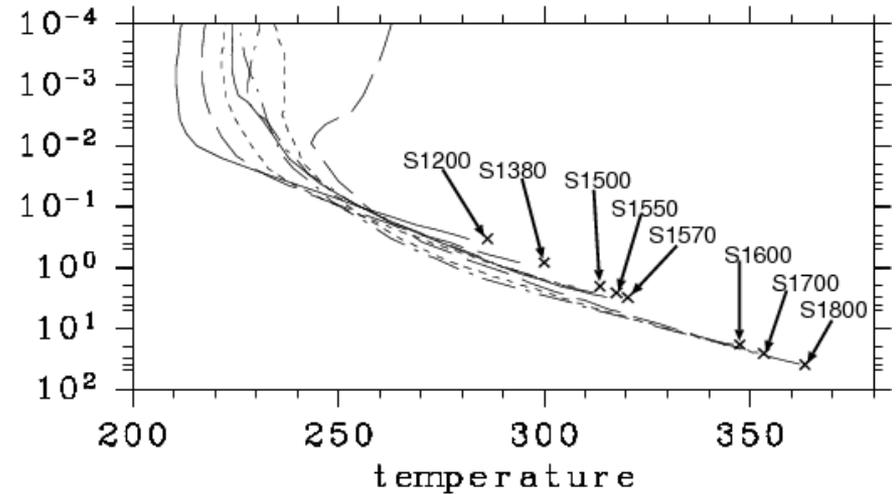
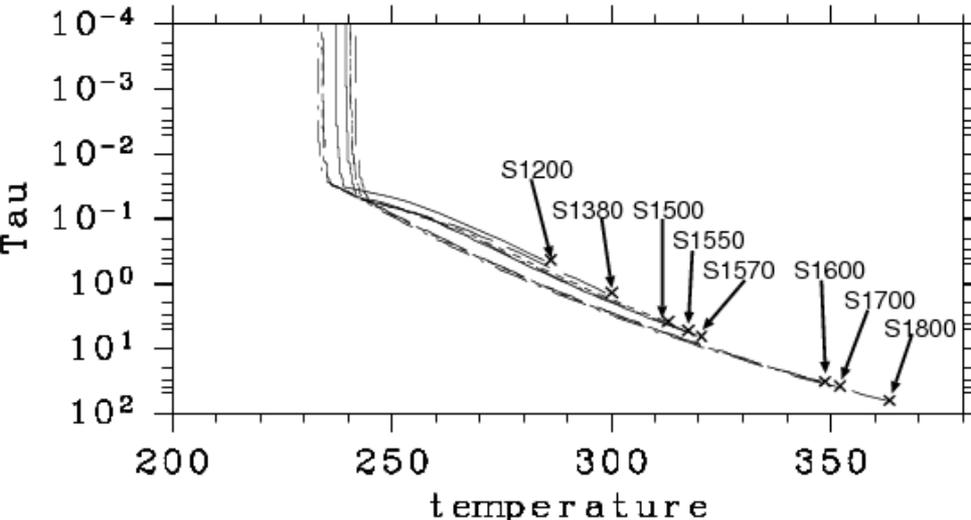
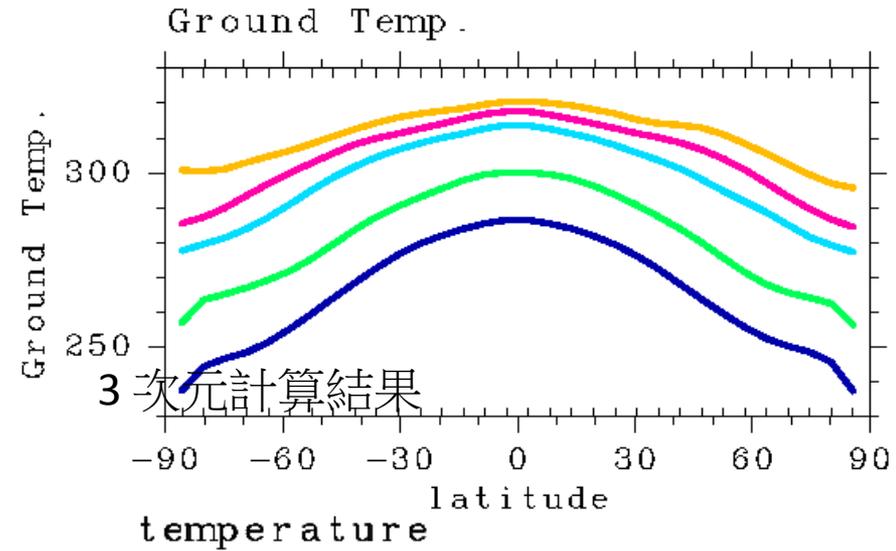
暴走温室状態に至る大気構造

Ishiwatari et al. (2002)

OLR の南北分布



表面温度の南北分布



気候レジーム図

気候の太陽定数依存性と言えばEBM

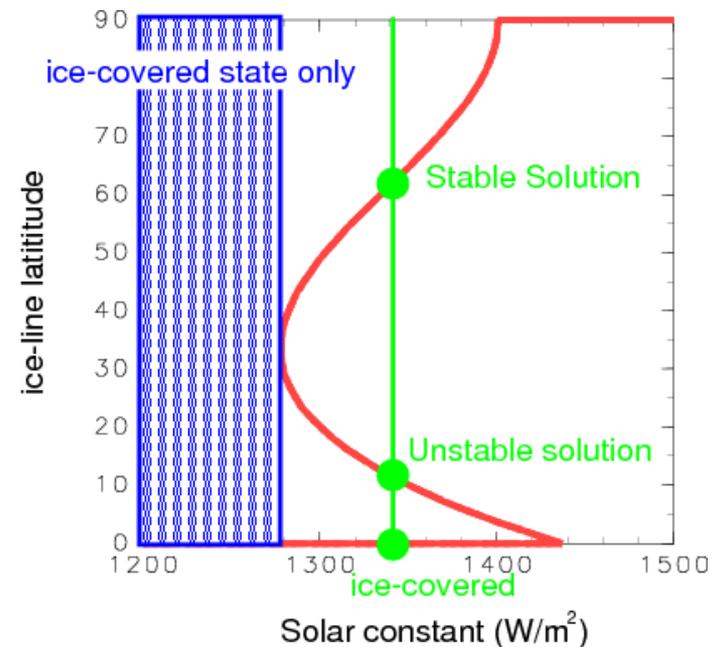
- 南北 1次元エネルギーバランスモデル(EBM)

- Budyko (1969), Sellers (1969) など

$$C \frac{\partial T_s}{\partial t} = -(a + bT_s) + S - \gamma(T_s - \bar{T}_s)$$

- Budyko, Sellers のEBMに暴走温室状態を「組み込む」

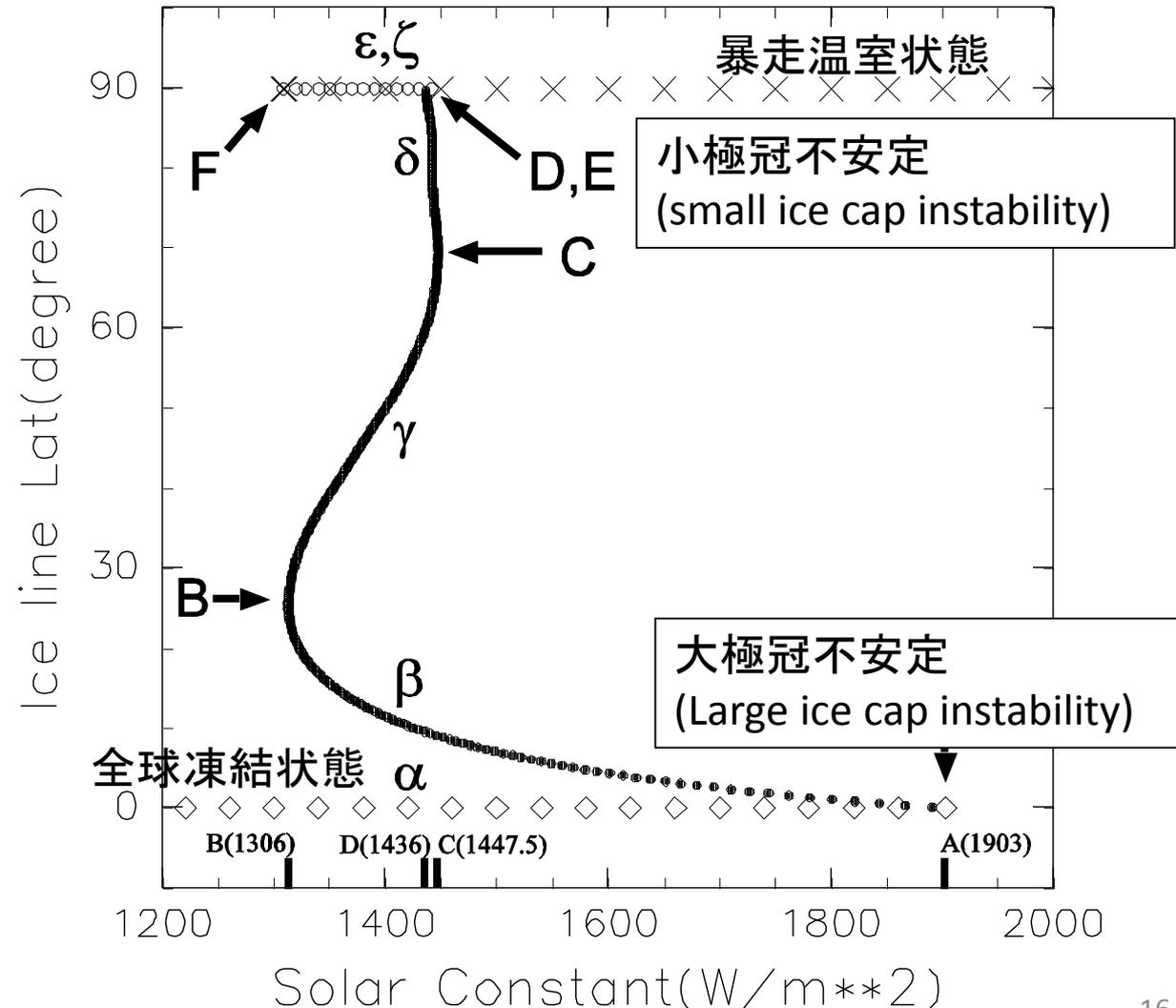
- 放射はちゃんとした灰色。
Nakajima et al. (1992)のスキーム
- 入射太陽放射は地球の年平均
- エネルギー輸送スキーム
- 拡散型
- 熱拡散係数は GCM の結果に合うように決定。
- 氷無し・ $S=1380 \text{ W/m}^2$ の場合で GCM と似た南北温度差となるように決定。



暴走温室状態を考慮したEBM

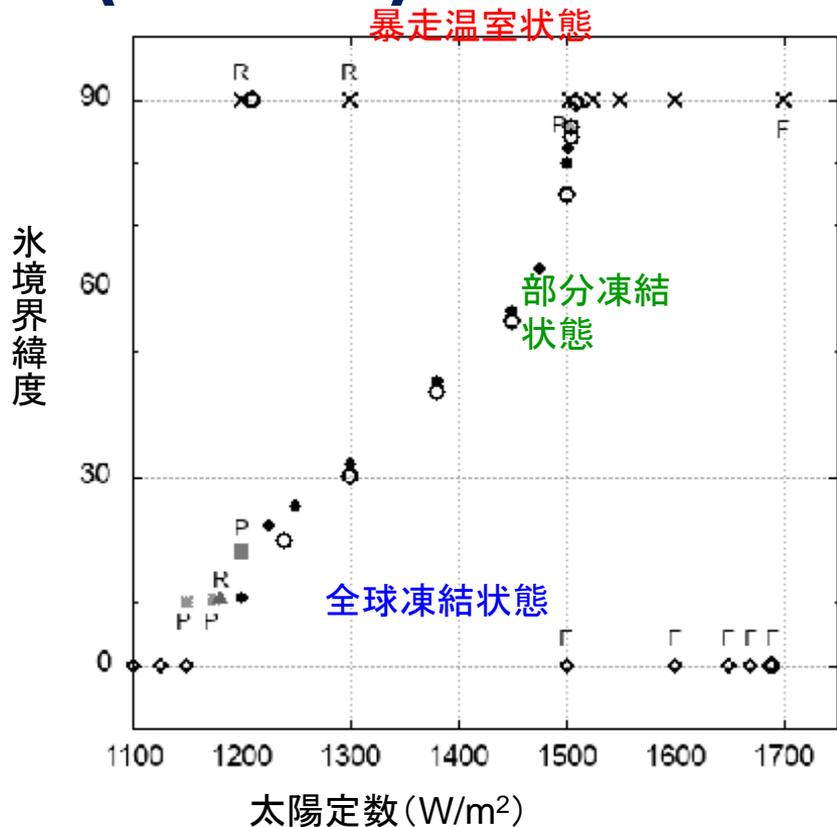
Ishiwatari et al. (2007)

- 入射太陽放射は地球の年平均分布
- エネルギー輸送スキームは拡散型
- 熱拡散係数はGCM結果に合うように決定。
 - 氷無し、 $S=1380 \text{ W/m}^2$ の場合でGCMと似た南北温度差となるように決定
- アルベド
 - 0 ($T_g > 263 \text{ K}$)
 - 0.5 ($T_g < 263 \text{ K}$)

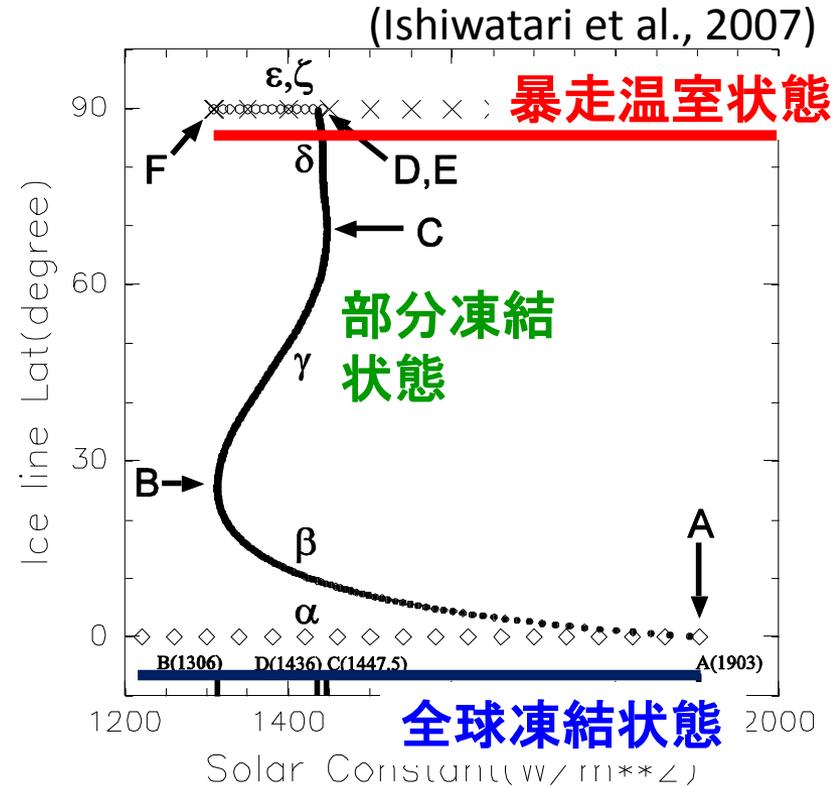


ちなみにGCMでも同様になる

GCM (DCPAM)



EBM



- 分解能：水平T21, 鉛直L32
- 地表面条件：swamp ocean

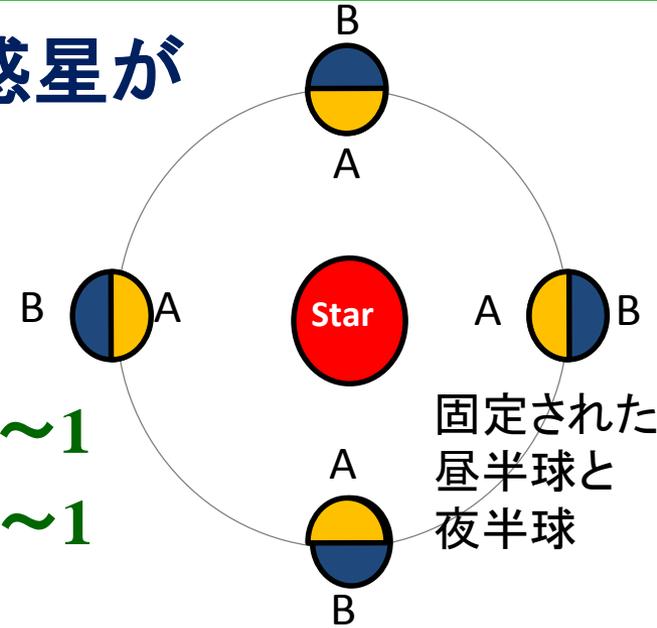
- 両モデルの結果とも、暴走温室状態・全球凍結状態・部分凍結状態が共存

同期回転惑星 の気候

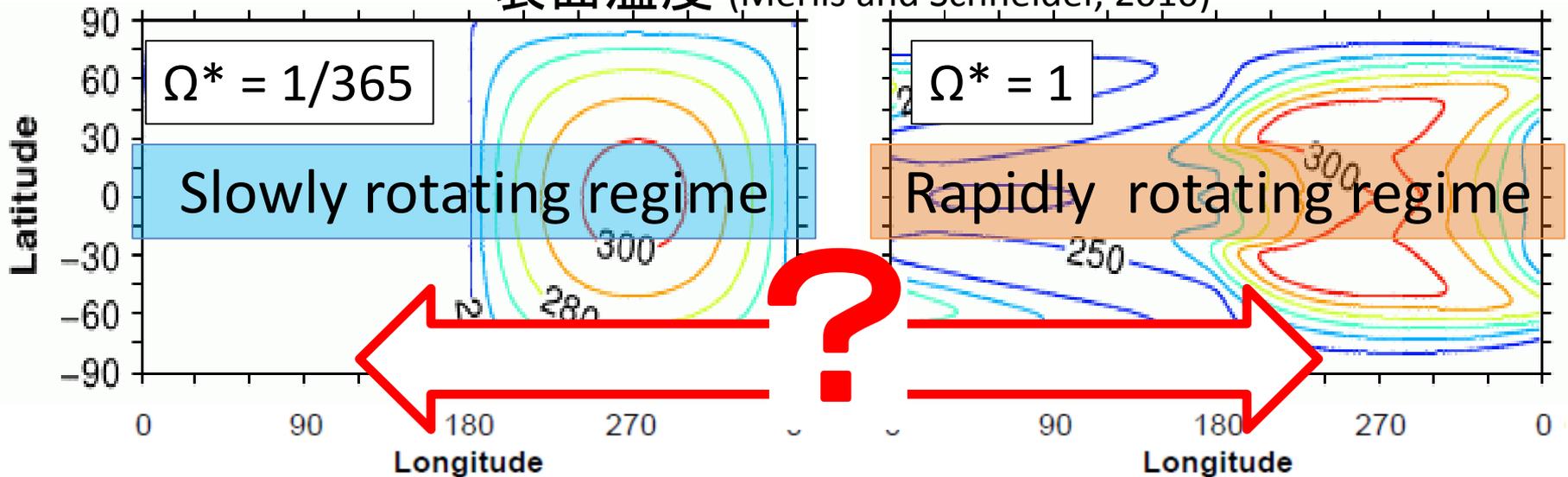
同期回転惑星

- これまでに発見された多くの系外惑星が同期回転惑星（潮汐固定惑星）
- 他の研究グループによる計算

- Joshi (2003): $\Omega^*=1$
 - Merlis and Schneider (2010): $\Omega^*=1/365\sim 1$
 - Edson et al. (2011): $\Omega^*=1/100\sim 1$
- (Ω^* : 自転角速度、地球の値で規格化)



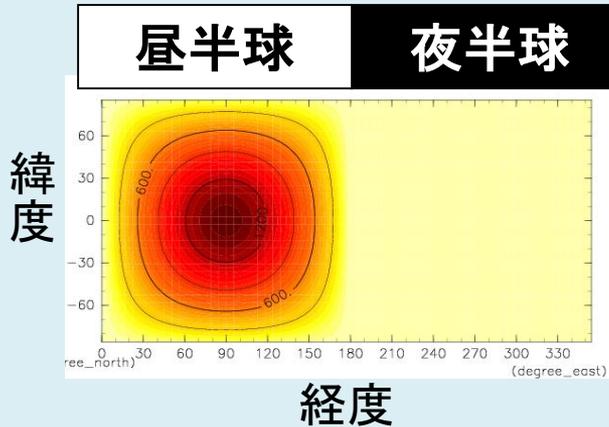
表面温度 (Merlis and Schneider, 2010)



モデルと実験設定

- モデル : DCPAM
- 大気成分 : 水蒸気と乾燥空気
- 放射 : 短波に対して透明、長波に対して灰色
- 地表における乾燥空気分圧: 10^5 Pa, 表面アルベド : 0.0, 表面swamp
- 解像度: T21L16, Integration Period: 2000 days
- 初期状態 : 等温 (280K) 静止+異なる初期ノイズ (10 メンバー)

入射太陽放射
水平分布



太陽定数

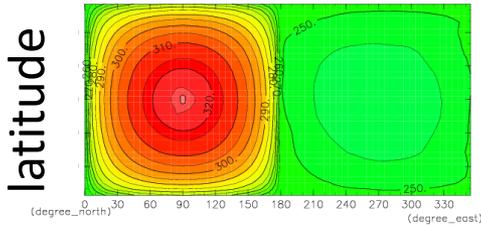
$S=1380$ (Earth's value)– 1700 [W/m^2]

自転角速度

$\Omega^*=0, \dots, 1.0$ (18 cases)

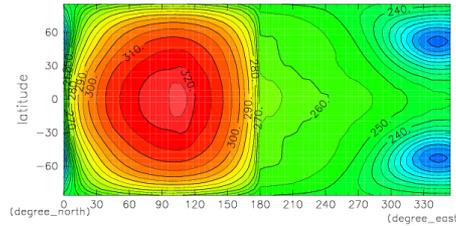
Ω^* 依存性: 表面温度

$\Omega^* = 0$



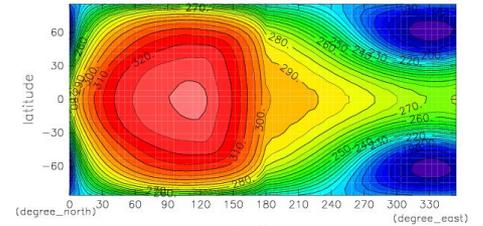
longitude

$\Omega^* = 0.05$



longitude

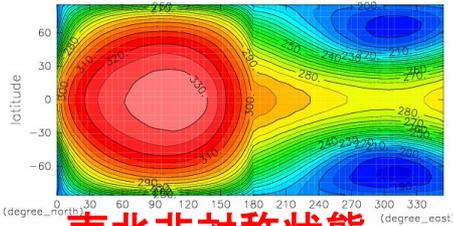
$\Omega^* = 0.15$



longitude

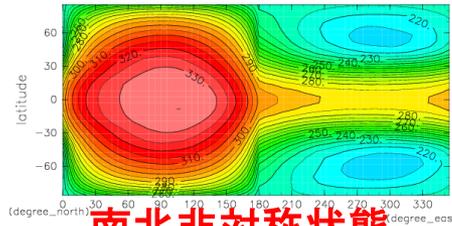
CONTOUR INTERVAL = 5.000E+00

$\Omega^* = 0.25$



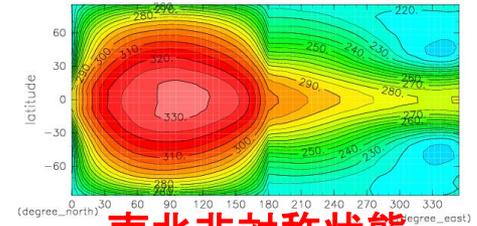
南北非対称状態
が反転を繰り返す

$\Omega^* = 0.33$



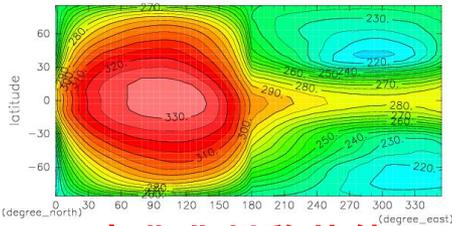
南北非対称状態
が反転を繰り返す

$\Omega^* = 0.5$



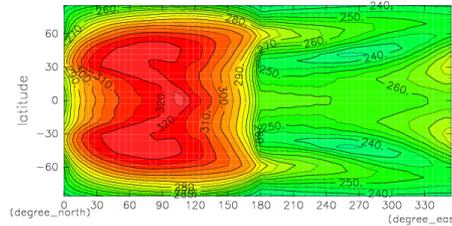
南北非対称状態
が反転を繰り返す

$\Omega^* = 0.67$



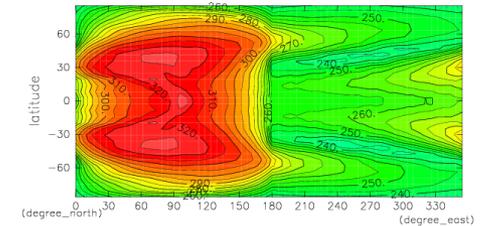
南北非対称状態
が反転を繰り返す

$\Omega^* = 0.8$



longitude

$\Omega^* = 1.0$

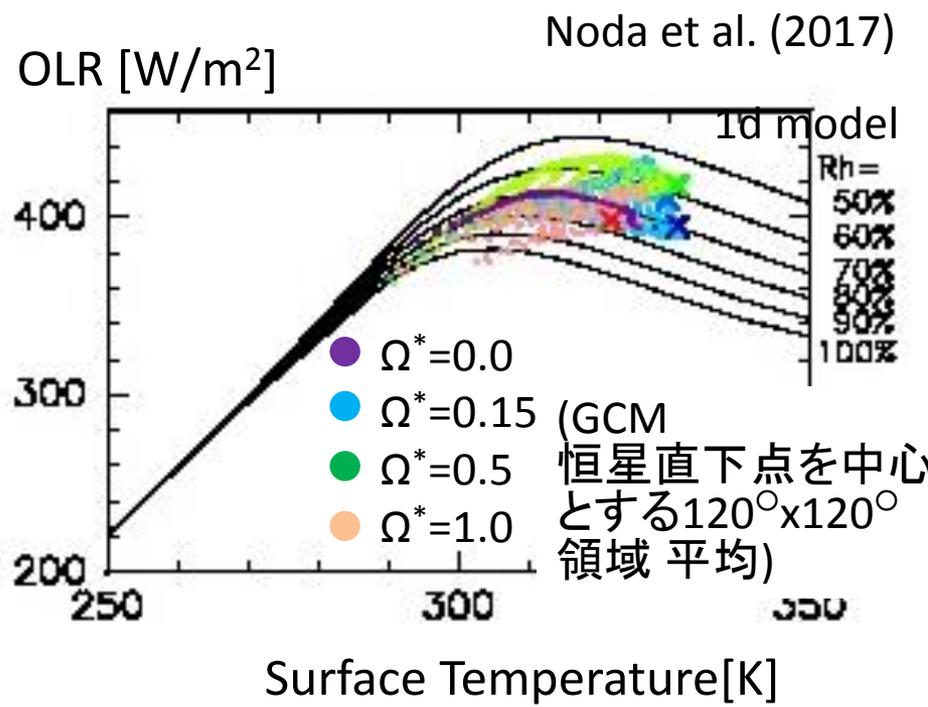
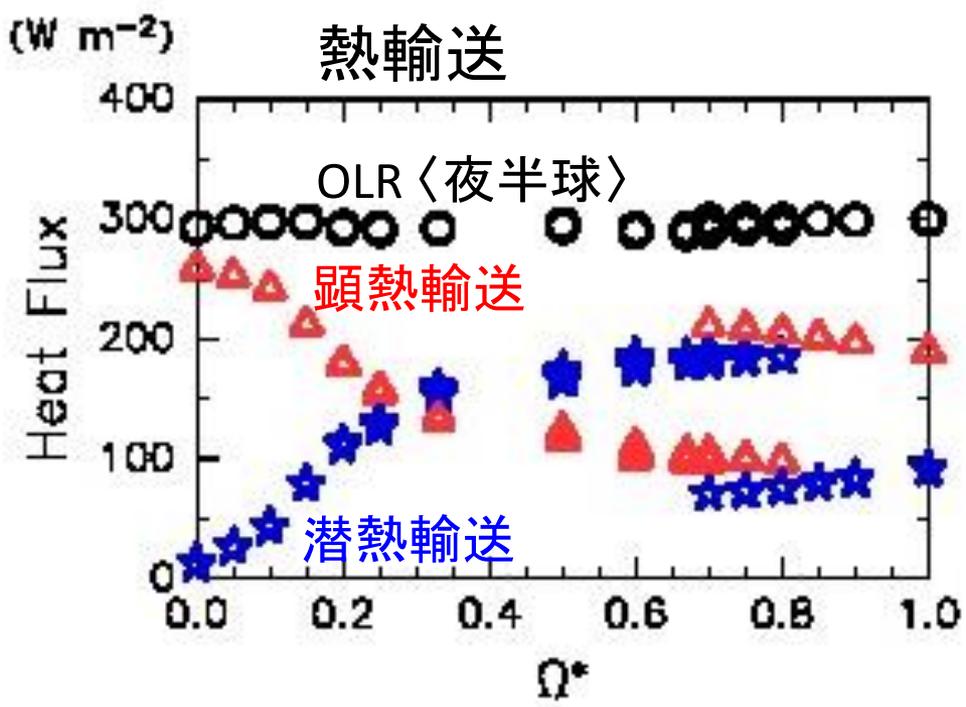


longitude



160 200 240 280 320

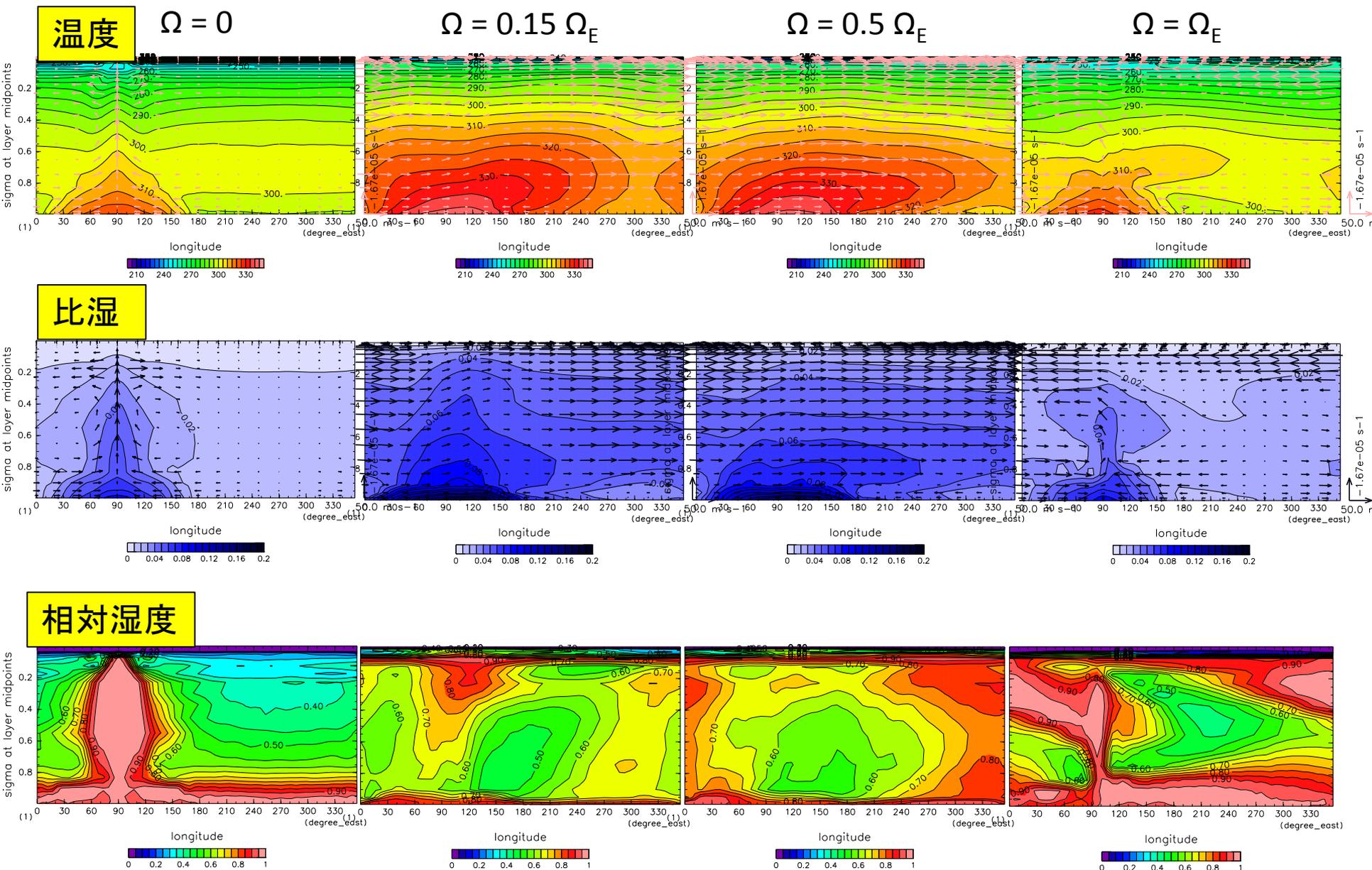
Ω^* 依存性:熱輸送(灰色大気)



Noda et al. (2017)

- 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)

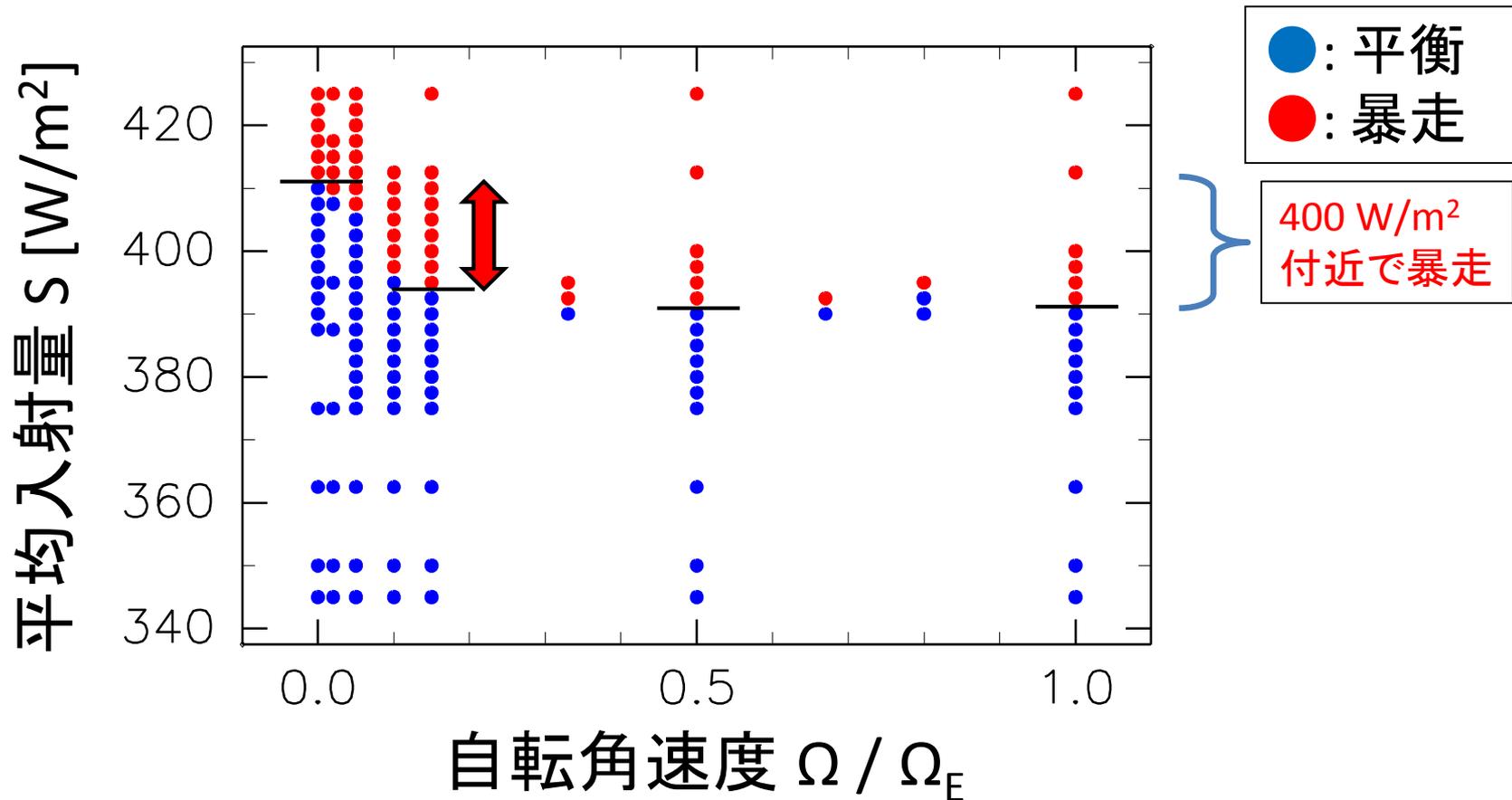
赤道断面分布 (納多, 2013, 博士論文)



同期回転惑星気候の 太陽定数依存性

平衡・暴走温室状態の分類結果一覧

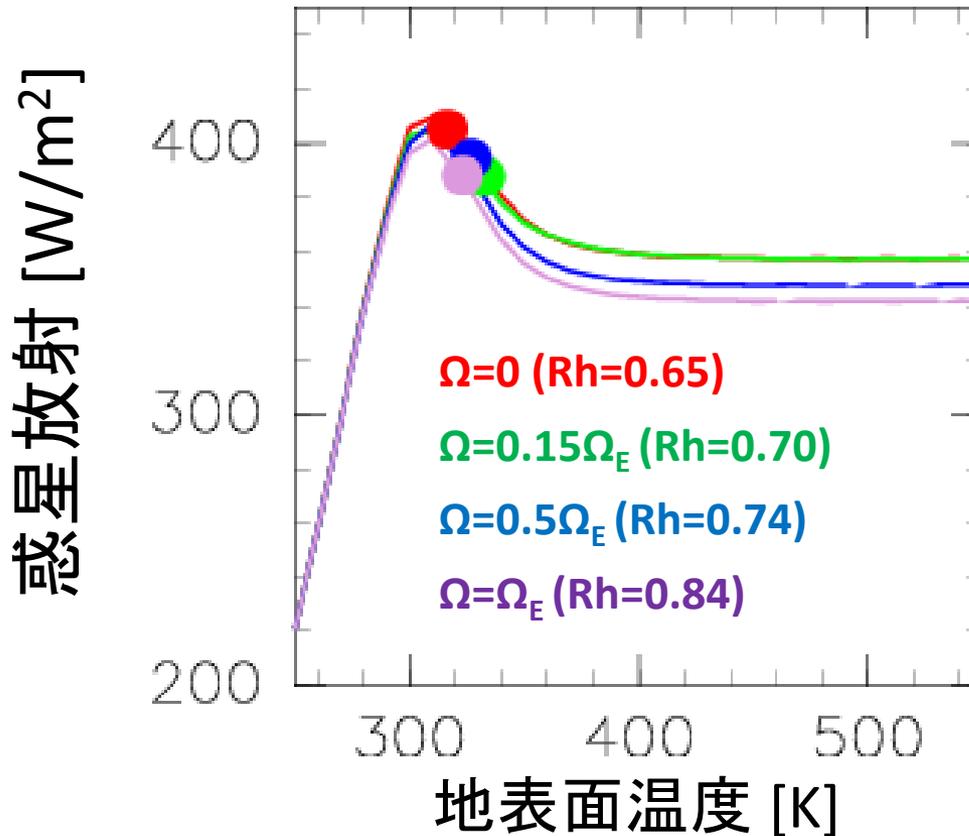
納多(2013, 博士論文)



- ・いずれも平均入射量 400 W/m² 付近で暴走
- ・小さい自転角速度では比較的大きい平均入射量で暴走

暴走寸前における 昼平均地表面温度と惑星放射の関係

納多(2013, 博士論文)

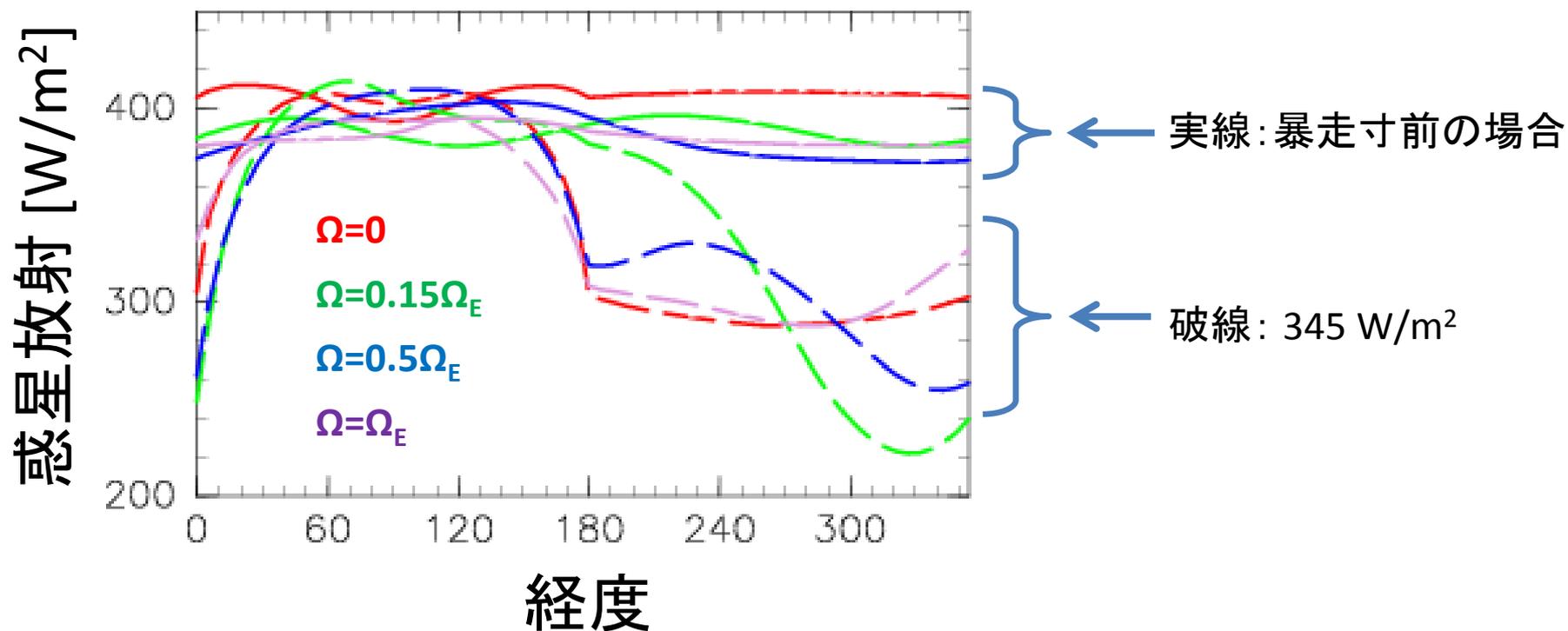


- 暴走寸前の惑星放射量は 1次元系の最大射出量と 20 W/m² 程度の誤差で対応

平均入射量増加に伴い 惑星放射は平坦化するか？

惑星放射(南北平均, 500 日平均)

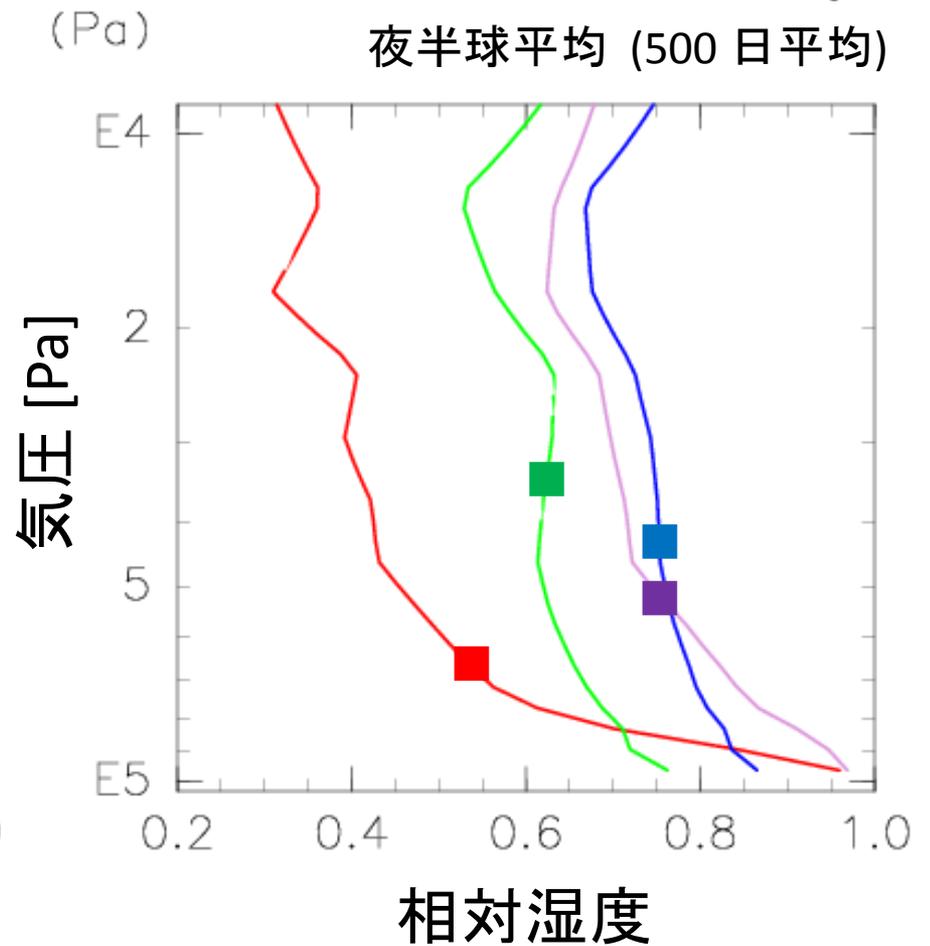
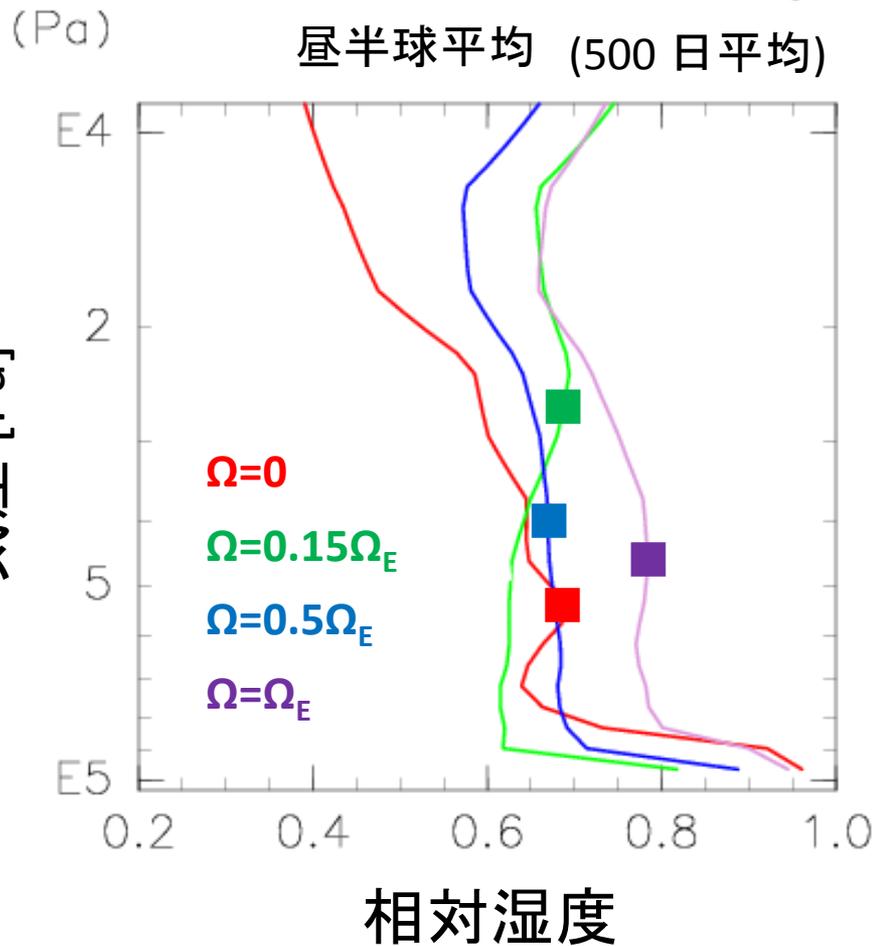
納多(2013, 博士論文)



- ・平均入射量増大時において平坦化
- ・およそ $400 W/m^2$ で頭打ち

相对湿度の鉛直分布

納多(2013, 博士論文)



非灰色放射・ 雲有りの場合

非灰色放射の太陽定数変更実験

- 暴走温室状態の発生に関する比較的最近のGCM実験

- 複数のプロセスについて議論がある

設定	同期回転設定	非同期(地球的日射分布)
暴走温室状態発生の太陽定数閾値	$S=2200\text{W/m}^2$	$S\sim 1500\text{W/m}^2$
議論されている事項 (reference) モデル	雲によるアルベド増加 (Yang et al., 2013) 大気海洋結合モデル	亜熱帯における乾燥化 (Leconte et al., 2013) 大気大循環モデル

- しかし、話はもっと分かりやすいのでは？

- OLR上限値が存在し、暴走条件を規定しているはずだ

- 同期回転v.s.非同期回転、雲有りv.s.雲無し

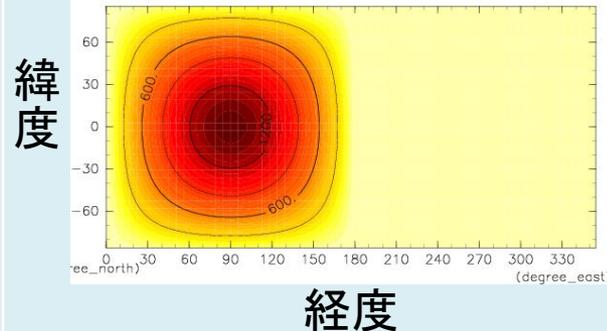
実験設定

- モデル : DCPAM
- 放射 : 地球用放射スキーム
- 雲 : 簡易雲モデル
- 地表における乾燥空気分圧: 10^5Pa , 表面アルベド : 0.15, 表面swamp
- 解像度: T42L26, 積分時間 : 3年
- 初期状態 : 等温 (280K) 静止+異なる初期ノイズ (10メンバー)

日射分布

同期回転惑星設定

昼半球 夜半球



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

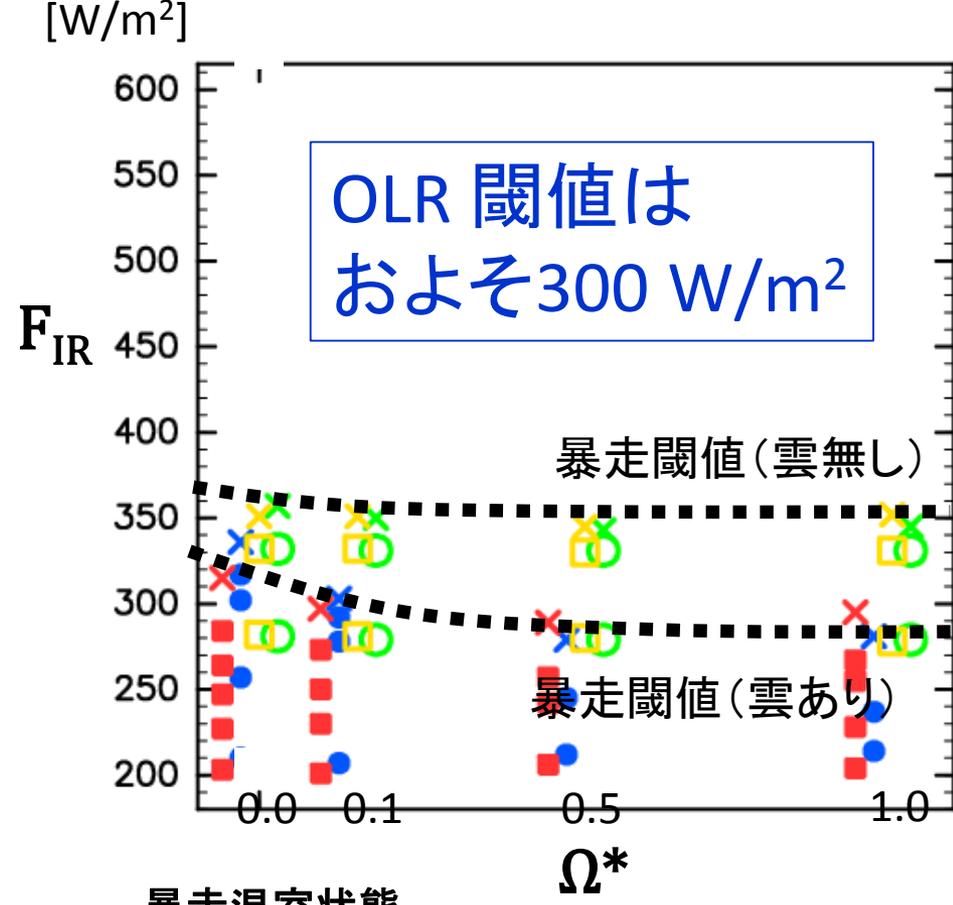
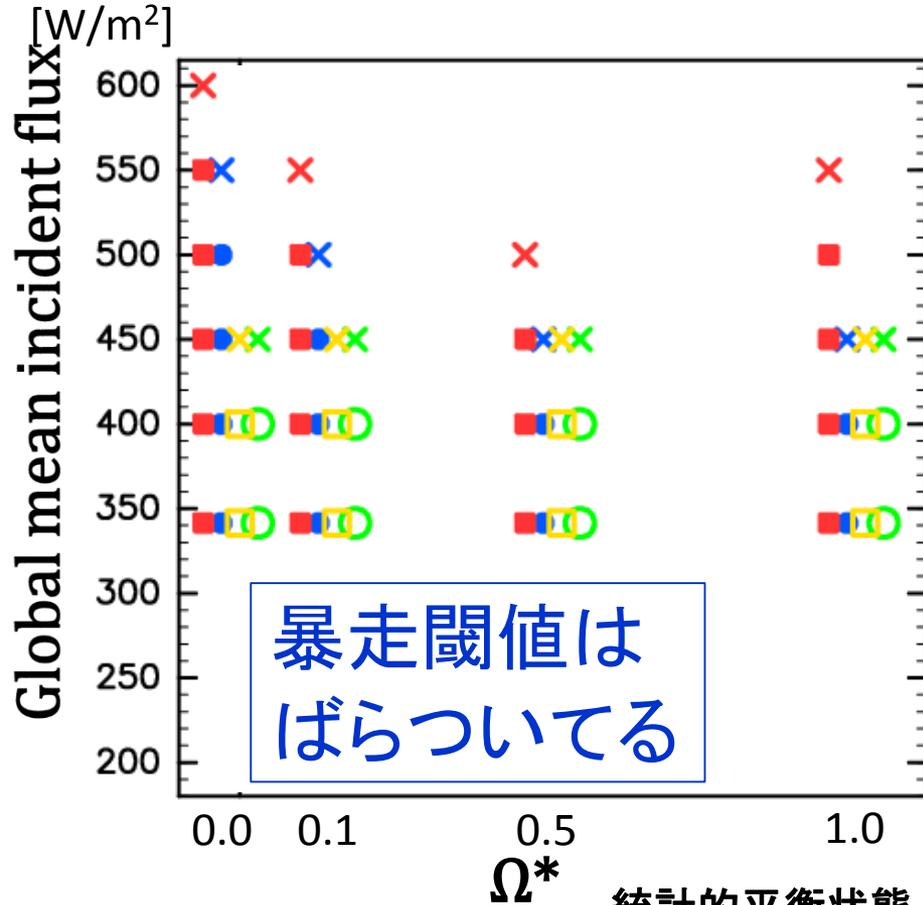
$\Omega^* = 0, 0.1, 0.5, 1.0$ ($\Omega_{\text{earth}} = 7.29 \times 10^{-5}$ [sec^{-1}]で規格化)

雲の消滅時間

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

暴走状態発生閾値の Ω 依存性

地球大気用放射スキームと簡単雲モデルを用いた場合



統計的平衡状態

- : 同期回転(雲あり)
- : 地球放射(雲あり)
- : 同期回転(雲無し)
- : 地球放射(雲無し)

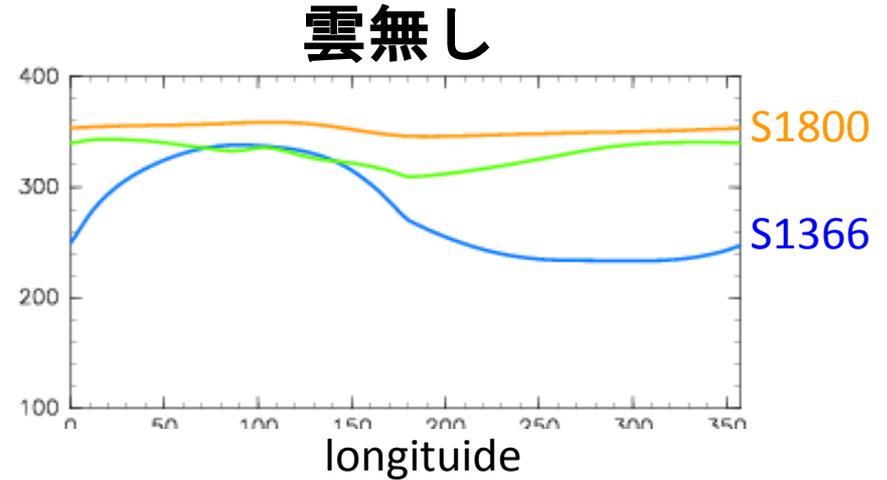
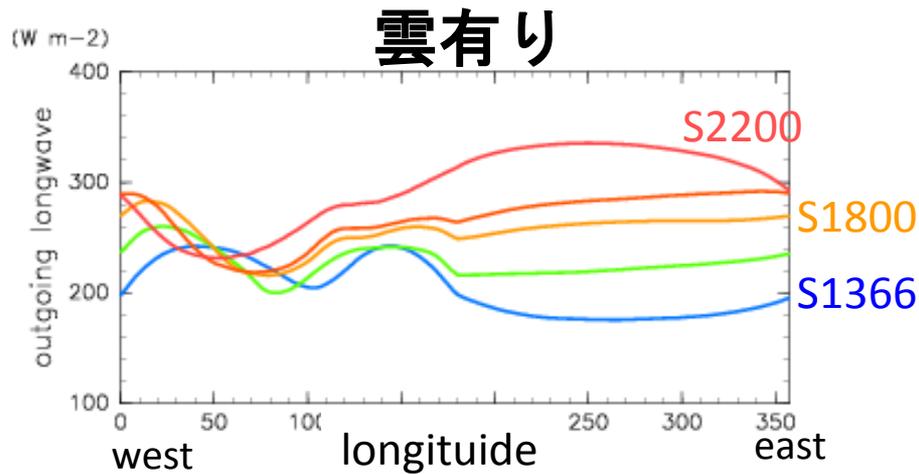
暴走温室状態

- ×: 同期回転(雲あり)
- ×: 地球放射(雲あり)
- ×: 同期回転(雲無し)
- ×: 地球放射(雲無し)

OLR水平分布

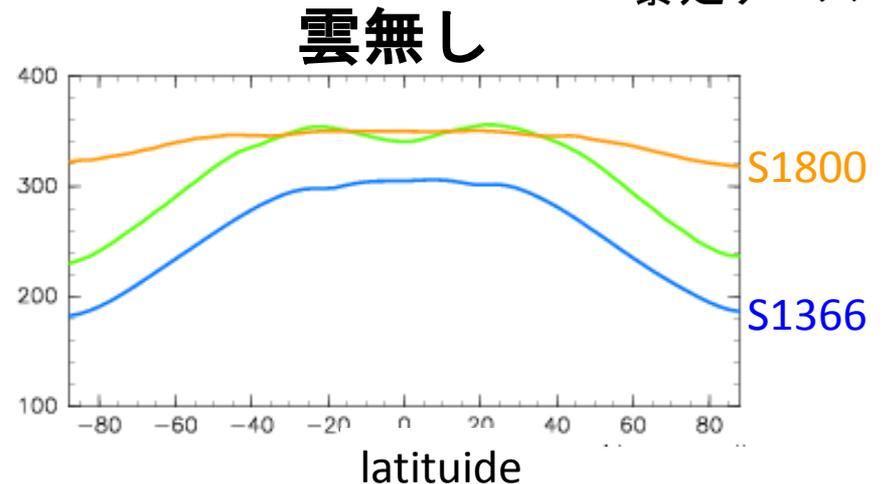
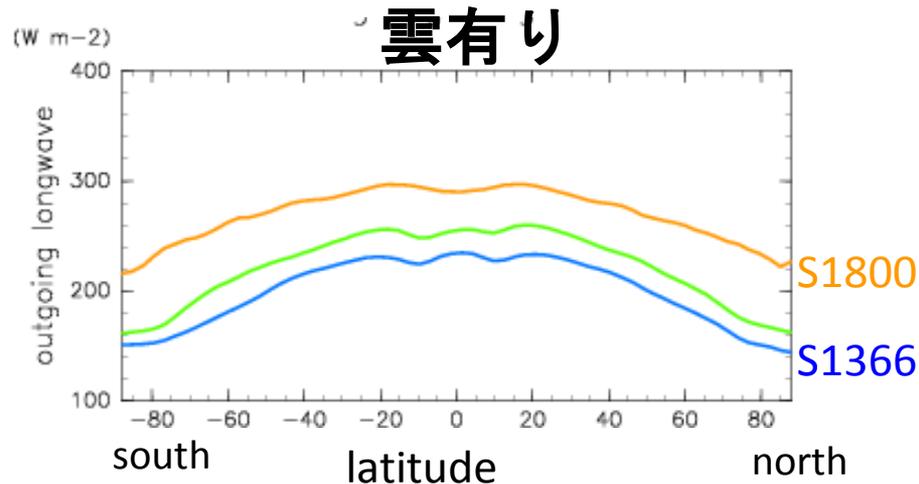
- 同期回転惑星設定: 経度分布 (緯度平均)

$$\Omega^* = 1.0$$



- 非同期回転設定: 緯度分布 (東西平均)

一番上の線が
暴走ケース



まとめ

まとめ

- 簡単な設定（海惑星）を用いた大気大循環モデルによるパラメータ実験を実施
 - 地球的な日射分布、同期回転惑星日射分布
 - 太陽定数依存性、自転角速度依存性
 - 灰色放射、非灰色放射(地球大気用放射スキーム)
- 放射スキーム、雲の有無、自転角速度によらずOLR上限値(射出限界)は存在するようだ
- 同期回転惑星における南北熱輸送量：
(昼半球入射量) - (OLR上限値)
 - 自転角速度に依存しない
- 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
 - が、要検討な問題がいくつも。
 - 雲がある場合のOLR上限値はどのように決まるのか？
 - 相対湿度問題