

# 地球型系外惑星気候の モデリングと数値実験

石渡正樹(北大・理)、河合佑太(神大・理)、  
松田幸樹(神大・理)、高橋芳幸(神大・理)、  
中島健介(九大・理)、はしもとじょーじ(岡山大・理)、  
倉本圭(北大・理)、杉山耕一朗(松江高専)、  
小高正嗣(北大・理)、林祥介(神大・理)

[momoko@gfd-dennou.org](mailto:momoko@gfd-dennou.org)



2018年02月28日 第19回惑星圏研究会  
東北大学 理学研究科合同C棟青葉サイエンスホール



# 目次

- はじめに
  - 研究背景
  - 暴走温室状態とは
  - 研究目的
- モデル・計算設定
- 暴走温室状態に関する数値実験
  - 海惑星設定の場合
  - 陸惑星設定の場合
- まとめ

はじめに

# 研究背景

- 地球程度の質量を持つ系外惑星が多数発見

- 惑星表層に液体の水が存在できる条件は？

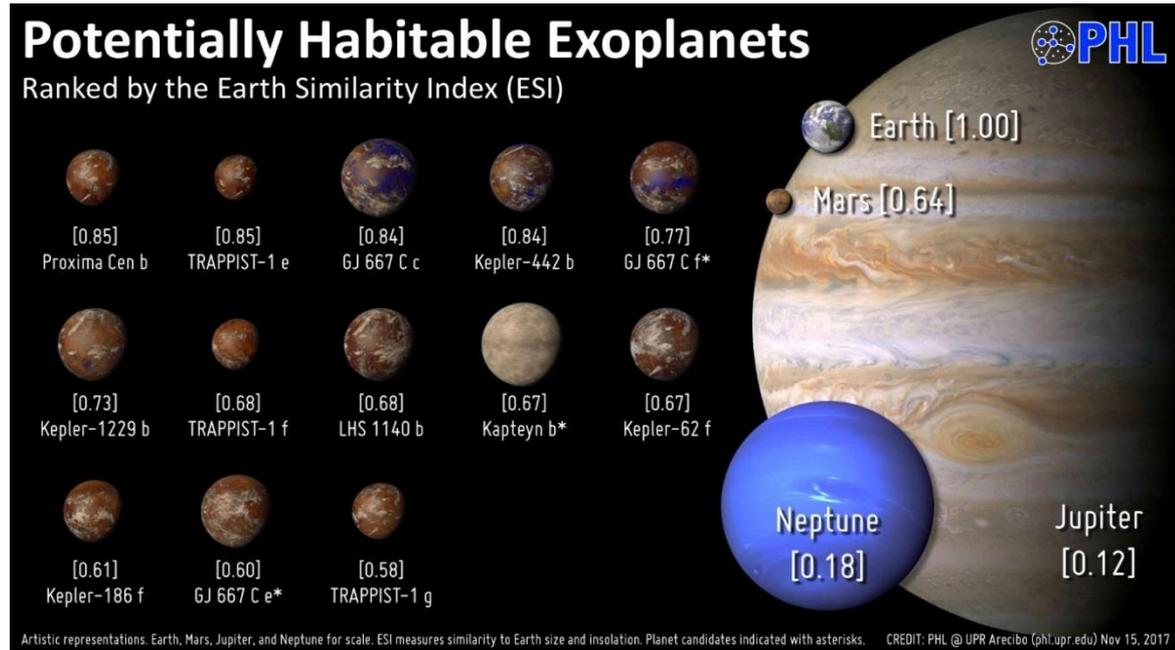
- 生命存在可能条件の考察へつなげたい

- 系外惑星は太陽系内惑星とは異なる多様な条件を持つと想像される

- 様々な場合で惑星表面に液体の水が存在できる条件は？

- 入射放射量、入射量分布、軌道要素、自転に関するパラメータ...

- ここでは、暴走温室状態に関して注目



<http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog/results>

# 暴走温室状態

- 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)

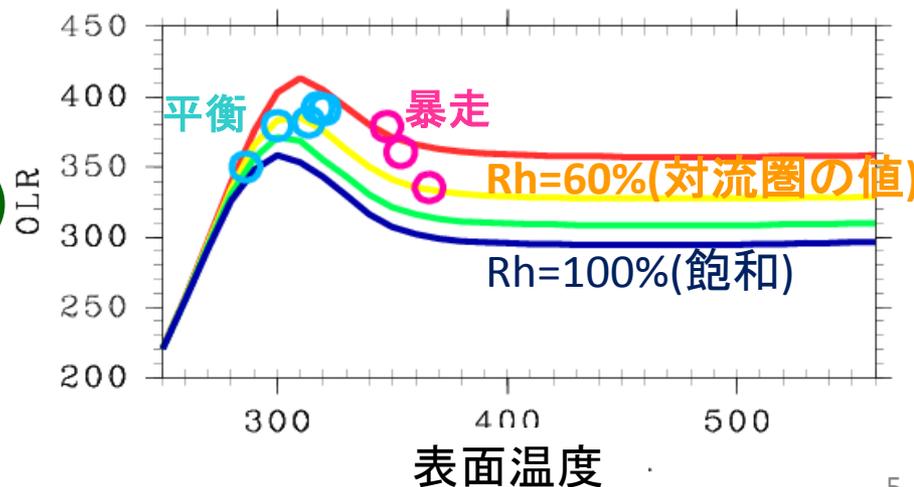
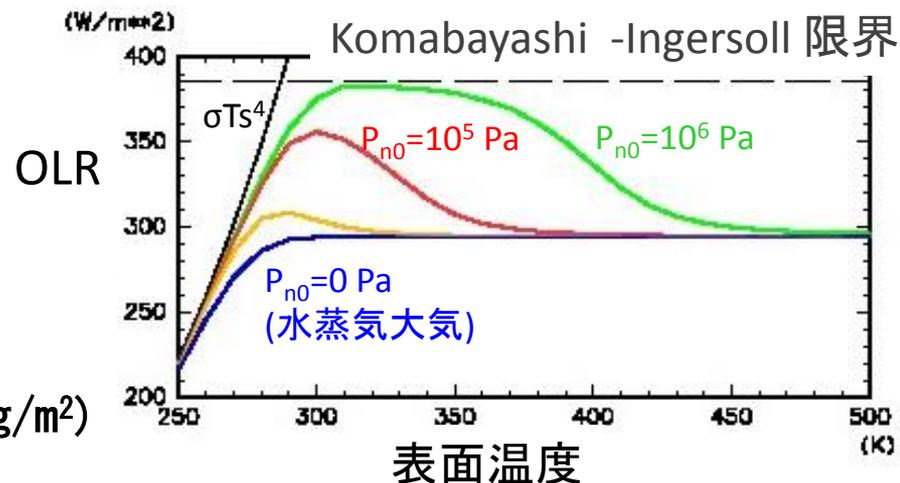
- 大気成分 : 水蒸気と乾燥空気
- 飽和対流圏と放射平衡成層圏
- 放射 : 日射には透明、赤外放射には灰色 ( $\kappa = 0.01 \text{ kg/m}^2$ )

- 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值 (Komabayashi-Ingersoll 限界)
- 対流圏が射出できる赤外放射量の上限值

- 3次元灰色大気の場合

- 灰色大気GCM:Ishiwatari et al.(2002)
- 全球平均入射量が相対湿度を考慮した射出限界を上回ると平衡状態が消失(暴走温室状態の発生)



# 目的

## 系外惑星を想定した条件における暴走温室状態の発生条件に関する考察

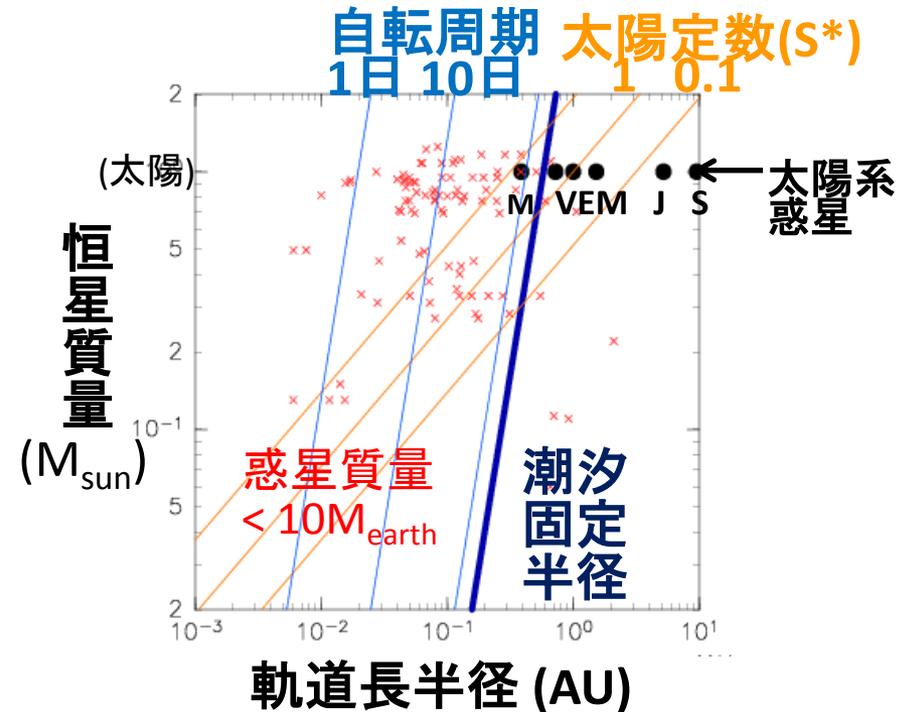
– 非灰色放射、雲を考慮

– 海惑星設定における考察

- 自転角速度と太陽定数を変えた数値実験
- 同期回転惑星および地球的日射分布を持つ惑星について考察
- 同期回転惑星：  
潮汐固定された惑星  
M型矮星の周囲に多く発見

– 陸惑星設定における考察

- 太陽定数を変えた数値実験



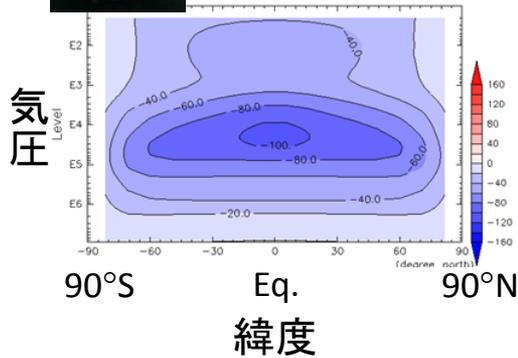
# モデル・設定

# モデル

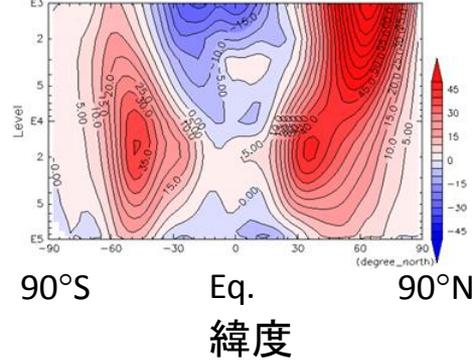
- 大気大循環モデル: DCPAM5
  - <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>
  - Takahashi et al. (2015)
- 様々な設定を同一のモデルで扱えるように



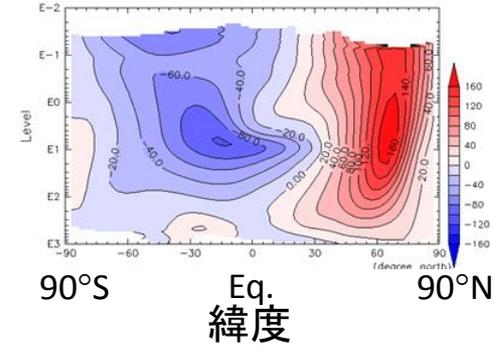
金星 (簡単化  
した放射)



地球



火星



色付け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
- 離散化: 水平方向スペクトル法、鉛直方向有限差分法

# 物理過程

- 放射
  - 地球用放射スキーム(水蒸気, CO<sub>2</sub>, 雲水による吸収・射出を考慮)  
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:
  - 海惑星実験の場合: 熱容量0の海洋, 海洋の熱輸送無し
  - 陸惑星実験の場合: バケツモデル (Manabe, 1969)
- 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トレイン量

$\frac{q_c}{\tau_{LT}}$ : 消滅項

$\tau_{LT}$

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

T42L26の地球計算により選択

# 海惑星実験

# 海惑星における太陽定数変更実験

- 海惑星における暴走温室状態の発生に関する過去の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

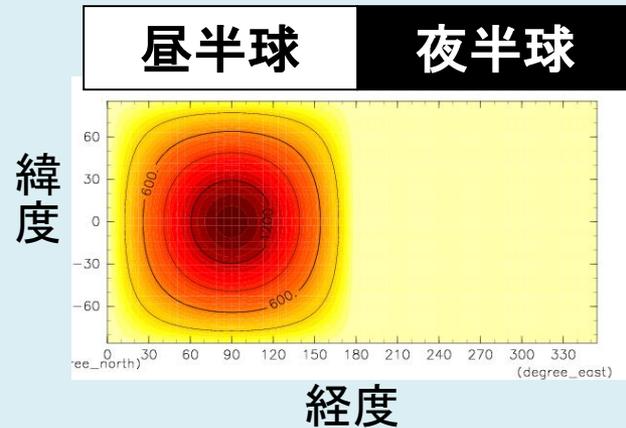
# 実験設定

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<sup>2</sup>]

自転角速度

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

雲の消滅時間

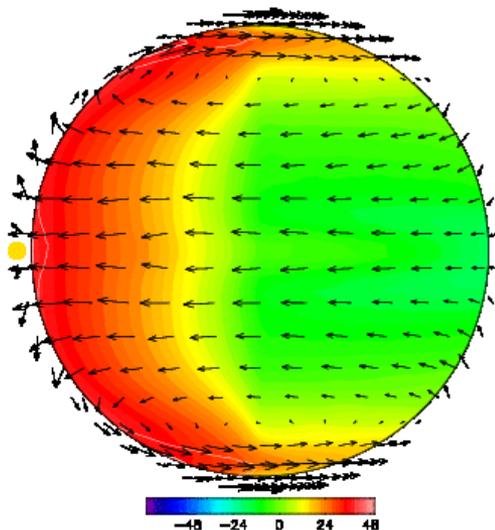
$\tau_{LT} = 0$  (no cloud), 1500 [sec]

- 乾燥空気量: 表面気圧で $10^5$ Pa, 地表アルベド: 0.15
- 解像度: T42L26, 積分時間: 3年

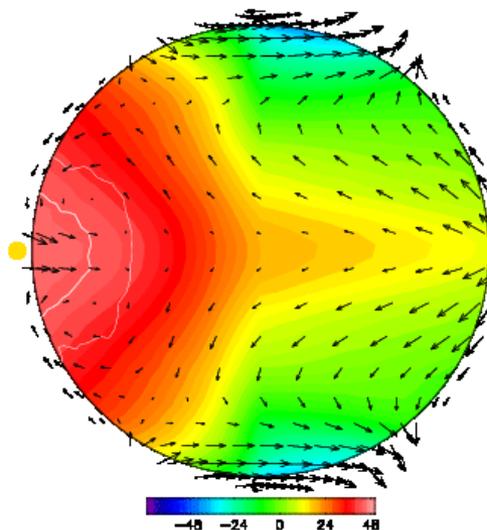
# 同期回転惑星の大気状態の例

恒星からの距離を変えた場合(365 日平均) 視点を変更

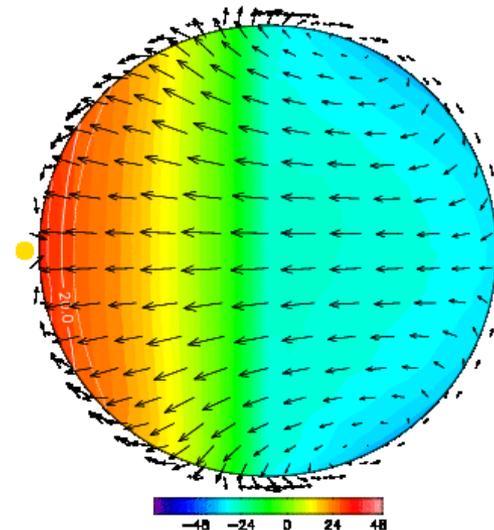
$\Omega^*=1.0, S^*=1.46$



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



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



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

大

太陽定数:  $S$

小

大

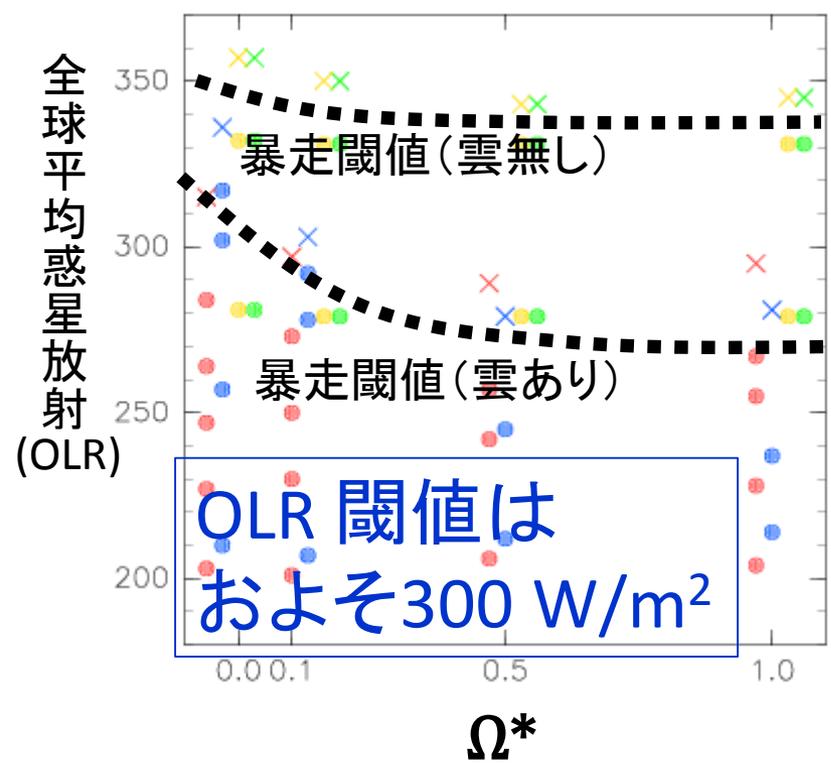
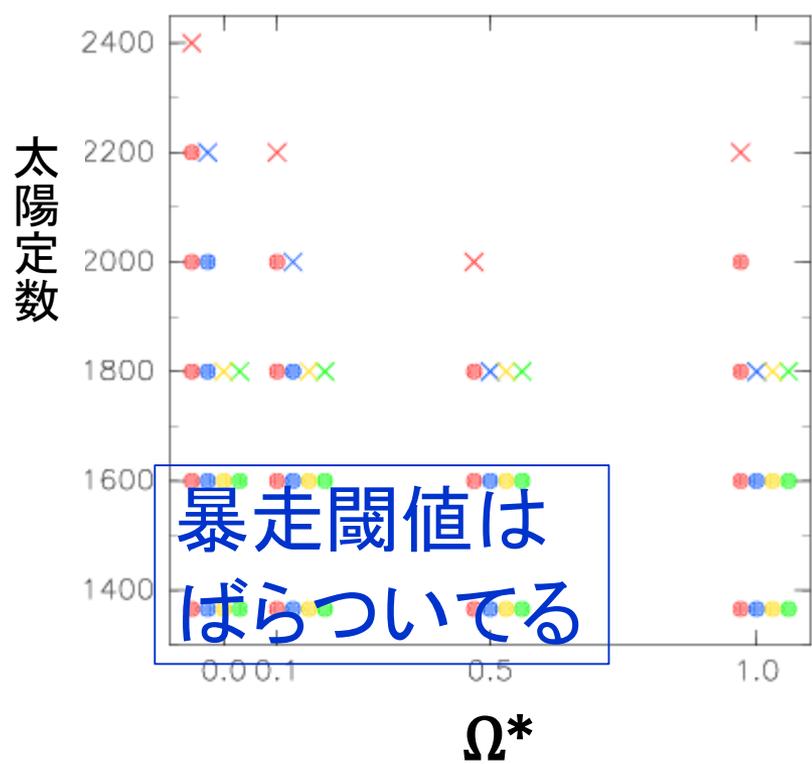
自転角速度:  $\Omega^*$

小



# 海惑星実験結果：暴走状態発生閾値

## 暴走温室状態発生の閾値の $\Omega^*$ 依存性



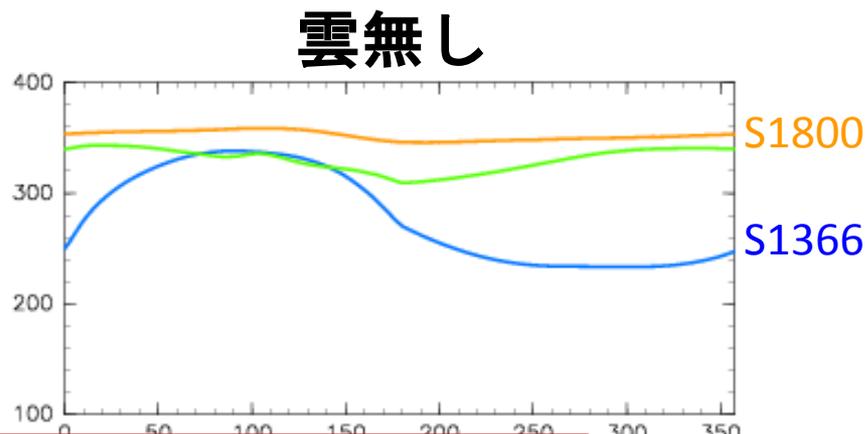
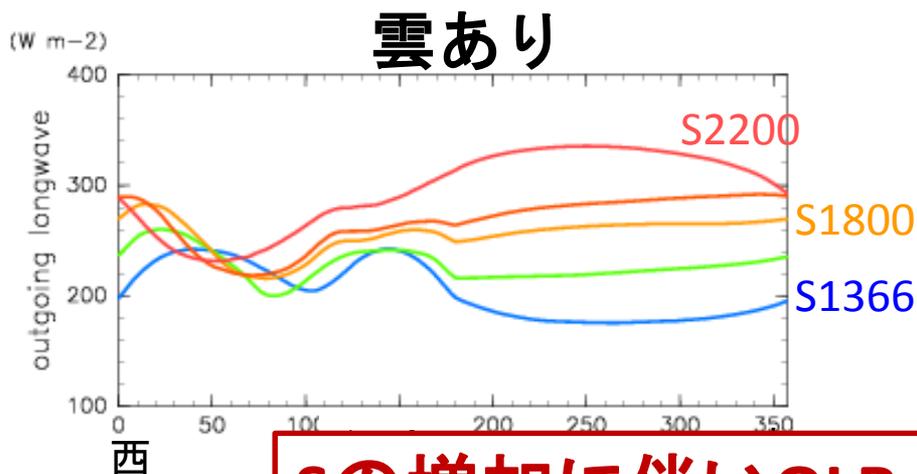
- 統計的平衡状態
- : 同期回転(雲あり)
  - : 地球放射(雲あり)
  - : 同期回転(雲無し)
  - : 地球放射(雲無し)

- 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)

# 海惑星実験結果: OLR水平分布

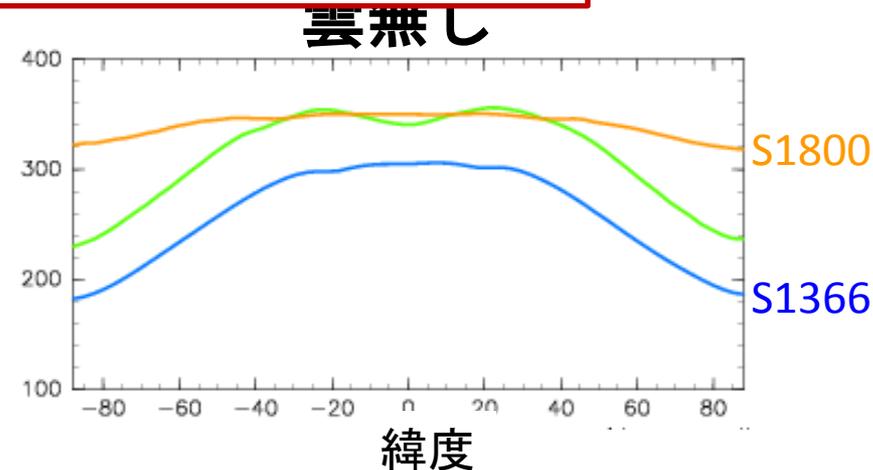
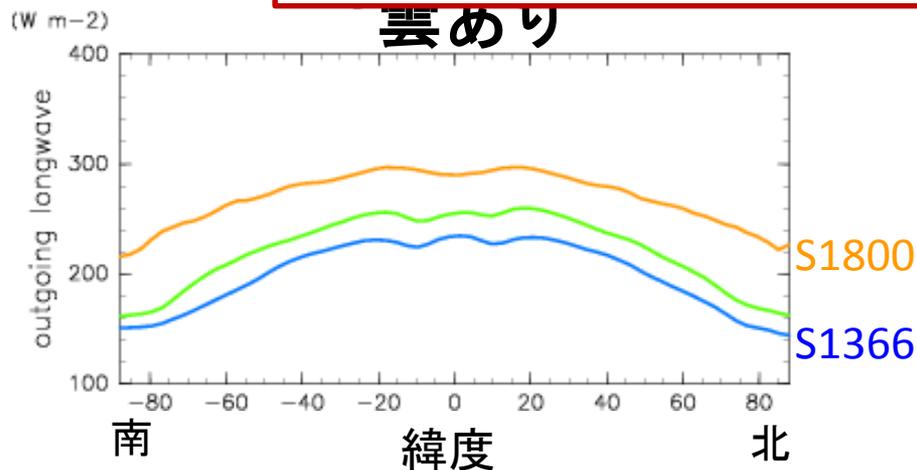
$$\Omega^* = 1.0$$

- 同期回転: 東西分布 (南北平均)



Sの増加に伴いOLRの水平偏差は減少  
OLR上限値が存在するように見える

- 非同期



# 陸惑星実験

# 陸惑星における太陽定数変更実験

- 陸惑星とは：地球に比べ表層の水量が非常に少ない惑星
- 過去のGCM実験

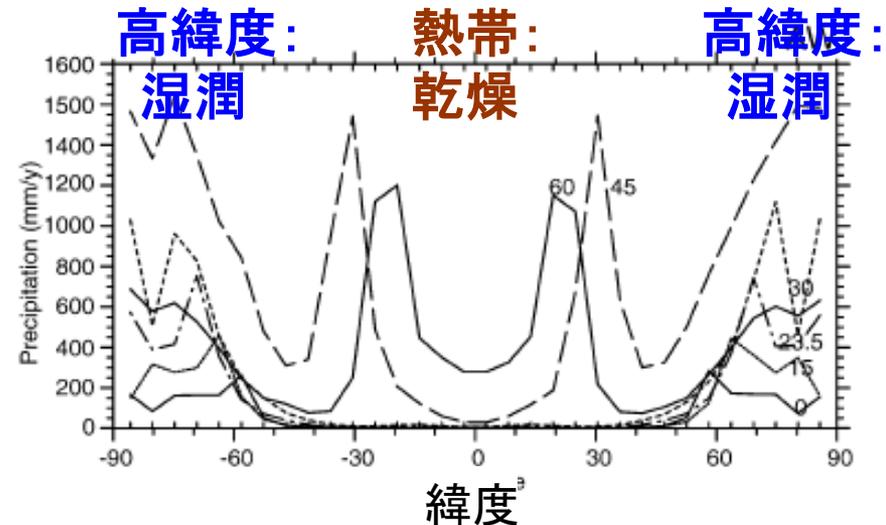
## – Abe et al. (2005)

- 低緯度乾燥領域と高緯度湿潤領域が形成

## – 新田ら(2014)

- 水惑星と比べ暴走温室状態発生の太陽定数は大きい
- 湿潤境界緯度におけるOLRが射出限界に達した場合に暴走温室状態が発生

時間平均・東西平均降水量(Abe et al., 2005)



- ここでは暴走温室状態の発生条件に関して検討

## – もともとの問題意識は

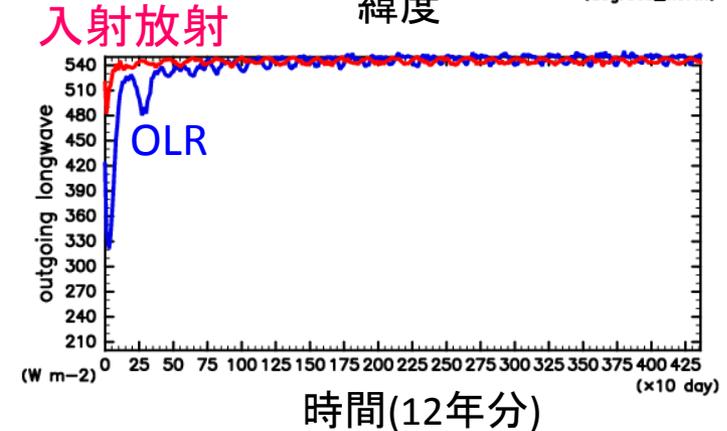
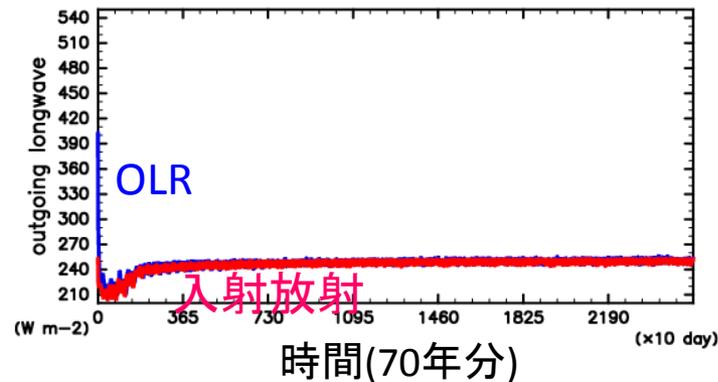
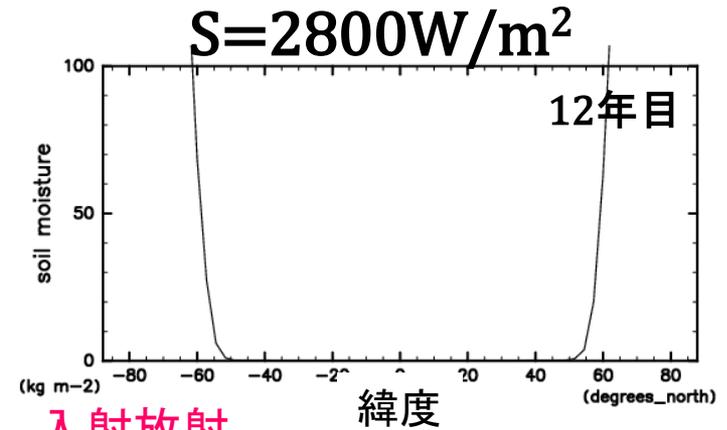
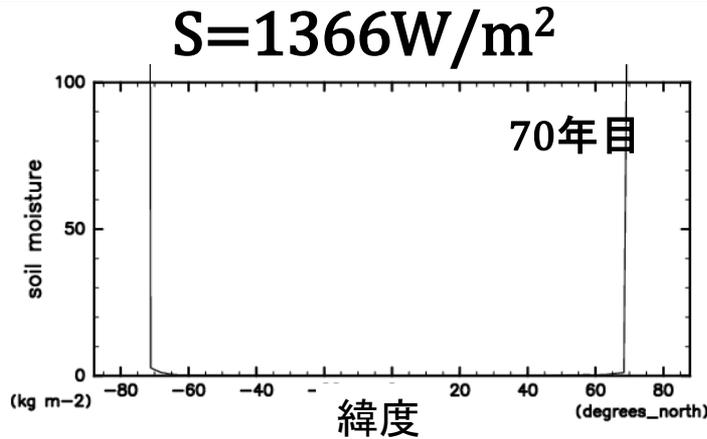
「暴走温室状態の発生条件の $\Omega$ 依存性を考えたい」

## – モデル設定

- 地表面：バケツモデル (Manabe, 1969)
- 自転角速度・赤道傾斜角は地球の値
- 太陽定数は $1366\text{W}/\text{m}^2 \sim 2800\text{W}/\text{m}^2$

# 陸惑星実験結果

土壤水分  
緯度分布  
(365日平均)



- 太陽定数によらず水は極域に局在
- 暴走温室状態発生 of 太陽定数閾値は未決定
  - $S=2800\text{W/m}^2$  の場合でも平衡状態に至る？
  - 新田ら(2014)は $S=2200\text{W/m}^2$  で平衡状態が消失すると議論

# まとめ

- **大気大循環モデルを用いた暴走温室状態に関する数値実験**
  - 海惑星実験でOLR上限値の存在を確認。「暴走温室状態の発生条件は入射量平均値がOLR上限値を超えること」で良さそう
  - 陸惑星は暴走しずらい？
- **研究的課題**
  - 気候レジームダイアグラムの作成(全球凍結状態に関する考察)
    - 現在、河合さん(神戸大学)が大気海洋結合モデルを用いた研究を遂行中
  - 観測と結びつける議論
    - 気候状態・惑星パラメータと光度曲線の関係づけ等  
中川さん(東大)に期待
- **モデル開発的課題**
  - 放射スキーム(一般的なH<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>大気にも)、雲モデルの改良
  - 3次元海洋モデルの開発
  - 太陽系内の惑星の数値実験を通じたモデル検証も必要