系外惑星大気シミュレーションモデルの開発：陸惑星の気候多様性に関する考察

（H26年度課題：系外惑星大気シミュレーションモデルの開発：雲の存在を考慮した暴走温室状態に関する考察）

石渡正樹(北大・理)、林祥介(神大・理)、中島健介(九大・理)、荻原弘尭(北大・理)

dcmodel-pamnies@gfd-dennou.org

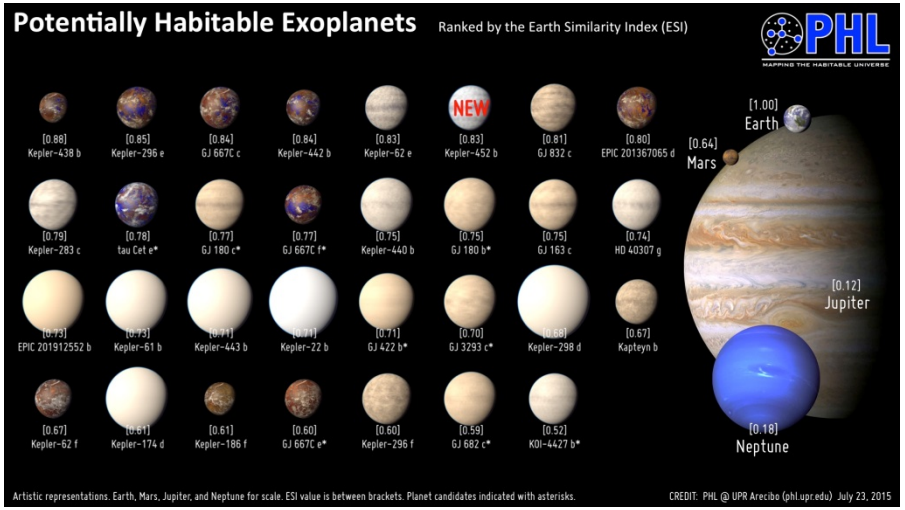
Center for Planetary Science

2015年11月30日　国立環境研究所
平成27年度スーパーコンピュータ利用研究報告会

GFD 電脳倶楽部

本研究課題の背景

- 背景:多様な系外惑星の発見
  - 気候研究対象の拡大

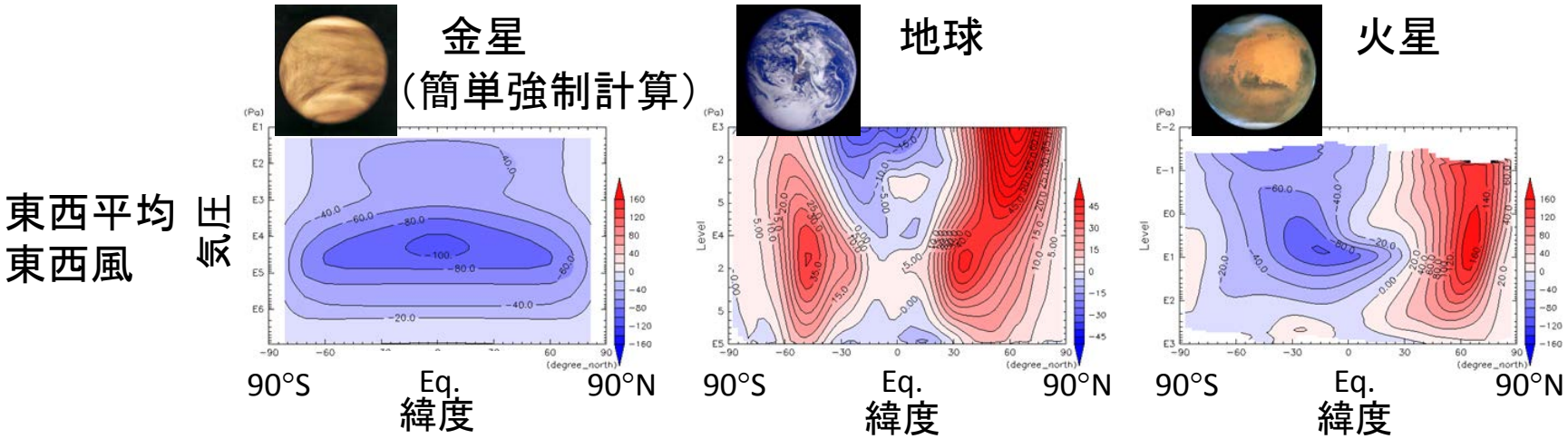


http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog/results

- これまでの研究経過
  - 地球的実験(H14-H19, H23)
    - 水惑星GCM実験、
      非静力モデル湿潤対流実験
    - 熱帯降水活動の構造の解析、
      鉛直加熱率分布に対する依存性
  - 火星モデル開発・実装実験(H24-H25)
    - GCMへのダスト過程の導入、ダスト巻き上げ実験
  - 系外惑星的設定の実験(H12-H14, H16-H18, H22,H24)
    - 太陽定数変更実験：暴走温室状態、全球凍結状態発生条件
    - 同期回転惑星大気の数値実験（灰色放射・雲無し）

研究目標

- 系外惑星も対象に含めた気候多様性の考察
  - 気候多様性・惑星ハビタビリティに関する考察
  - 多様な設定における数値計算実行・相互比較
- 地球型惑星大気大循環モデルの開発
  - DCPAM5 (http:www.gfd-dennou.org/library/dcpam/)
  - 開発方針：多様な惑星を同一の枠組みで
  - 地球モデルの各種スキーム、ノウハウに関する再検討
  - 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



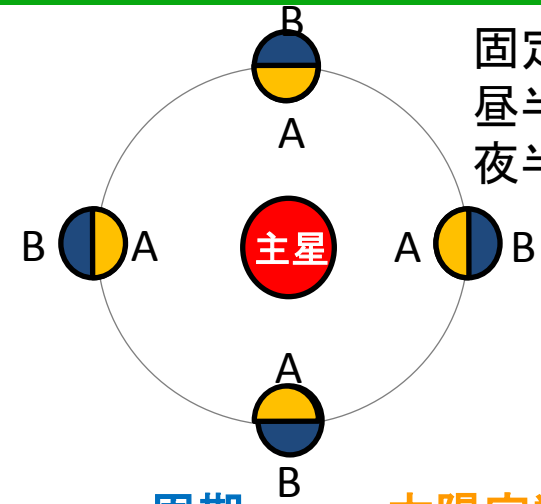
注意: 色の付け方と縦軸は図によって異なる.

昨年度課題の結果

課題名：系外惑星大気シミュレーションモデルの開発：雲の存在を考慮した暴走温室状態に関する考察

昨年度研究課題の研究対象

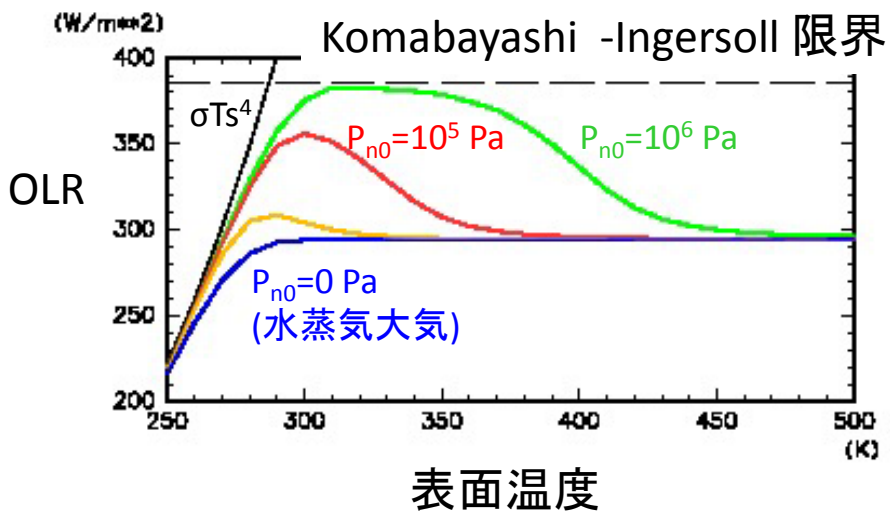
- **同期回転惑星**
  - 自転周期と公転周期が等しい
  - 多くの系外惑星が同期回転

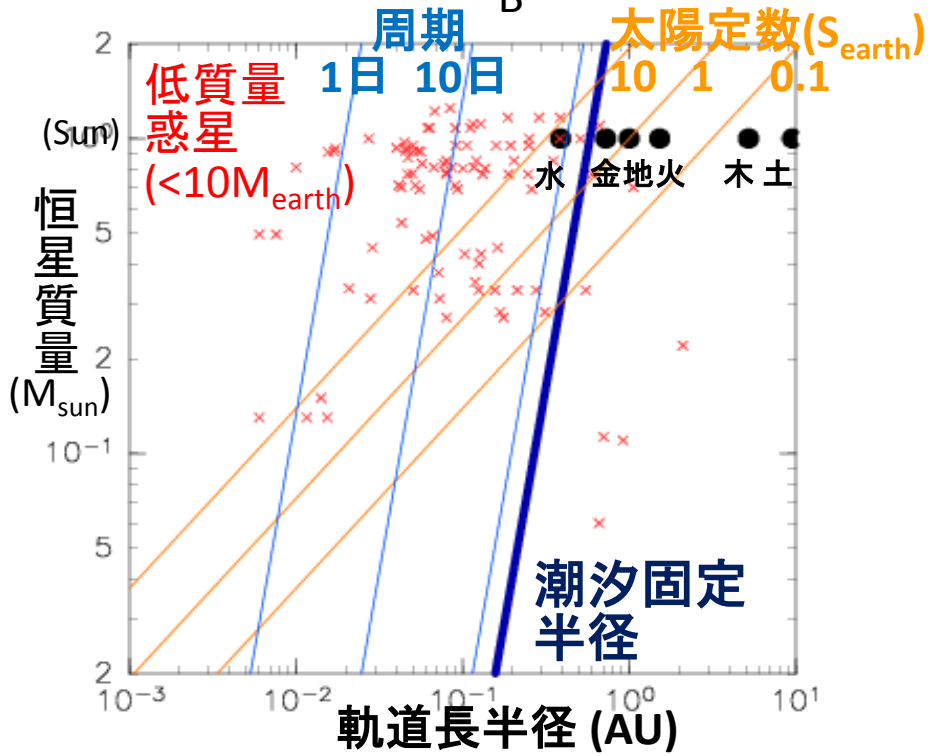


固定された
昼半球と
夜半球

- **暴走温室状態に関する考察**
  - ハビタビリティを決定する重要な概念の１つ

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

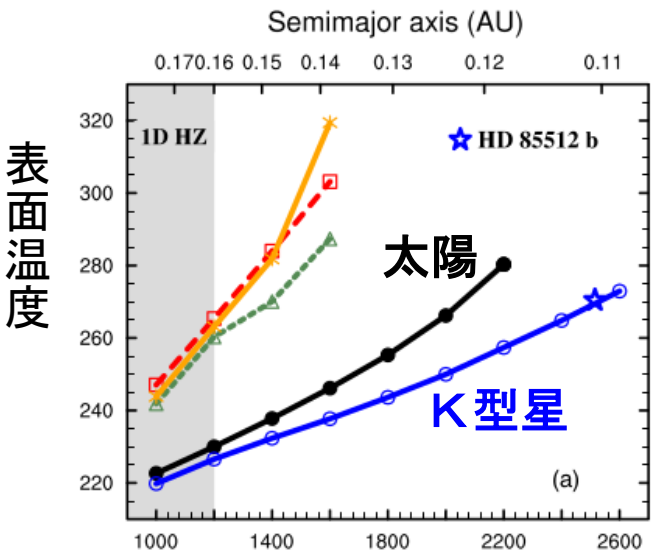




http://exoplanet.eu/catalog

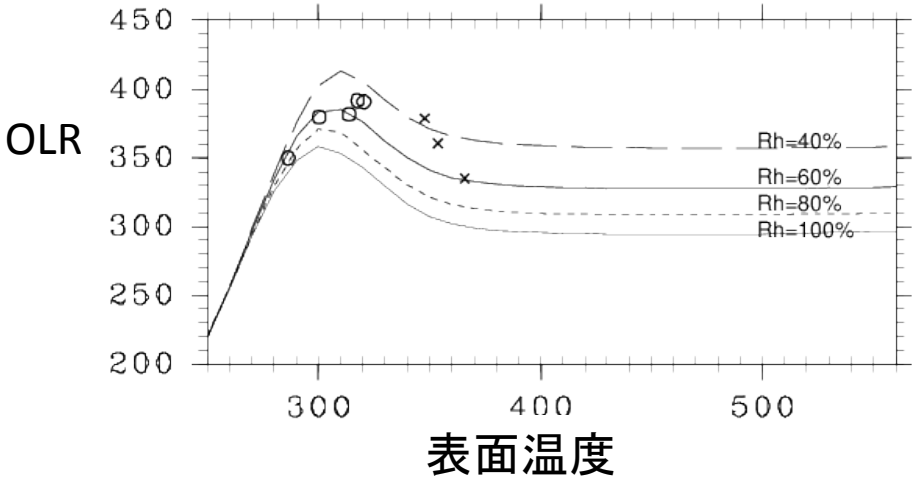
検討する問題

- 暴走温室状態に関する近年の研究
  - 同期回転惑星設定 (Yang et al., 2013)
    - 大気海洋結合モデル
    - S=2200W/m^{2}でも平衡状態。
      厚い雲の形成・アルベドの増加
  - 地球設定日射
    (Leconte et al., 2013; Wolf and Toon, 2015,2014)
    - 大気大循環モデル
    - S～1500W/m^{2}まで平衡状態。
      亜熱帯域の乾燥化



Yang et al. (2013)

- 暴走温室状態発生条件の決まり方はもっと単純では？
  - Ishiwatari et al (2002, 2007)
    - 灰色大気GCM、雲無し
    - 全球平均 OLR が相対湿度を考慮した１次元モデルの射出限界を超えると暴走温室状態が発生



物理過程

- 放射
  - Δ-Eddington 近似 (Toon et al., 1989)
    - 水蒸気、CO_2、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、海氷なし
- 簡単雲モデル
  - 移流、乱流混合、生成、消滅を考慮

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

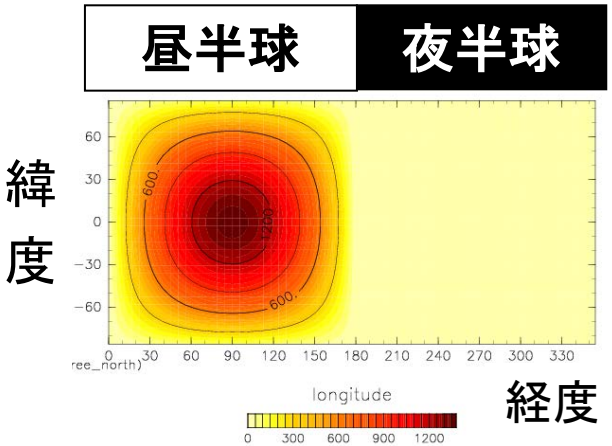
S_c : 雲水の生成
–大規模凝結で計算される凝結量
–RAS スキームで計算される雲頂からのデトレイン量

$\frac{q_c}{\tau_{LT}}$: 雲水の消滅
地球設定計算(T42L26)でチューニングすると $\tau_{LT} = 1500\text{sec}$

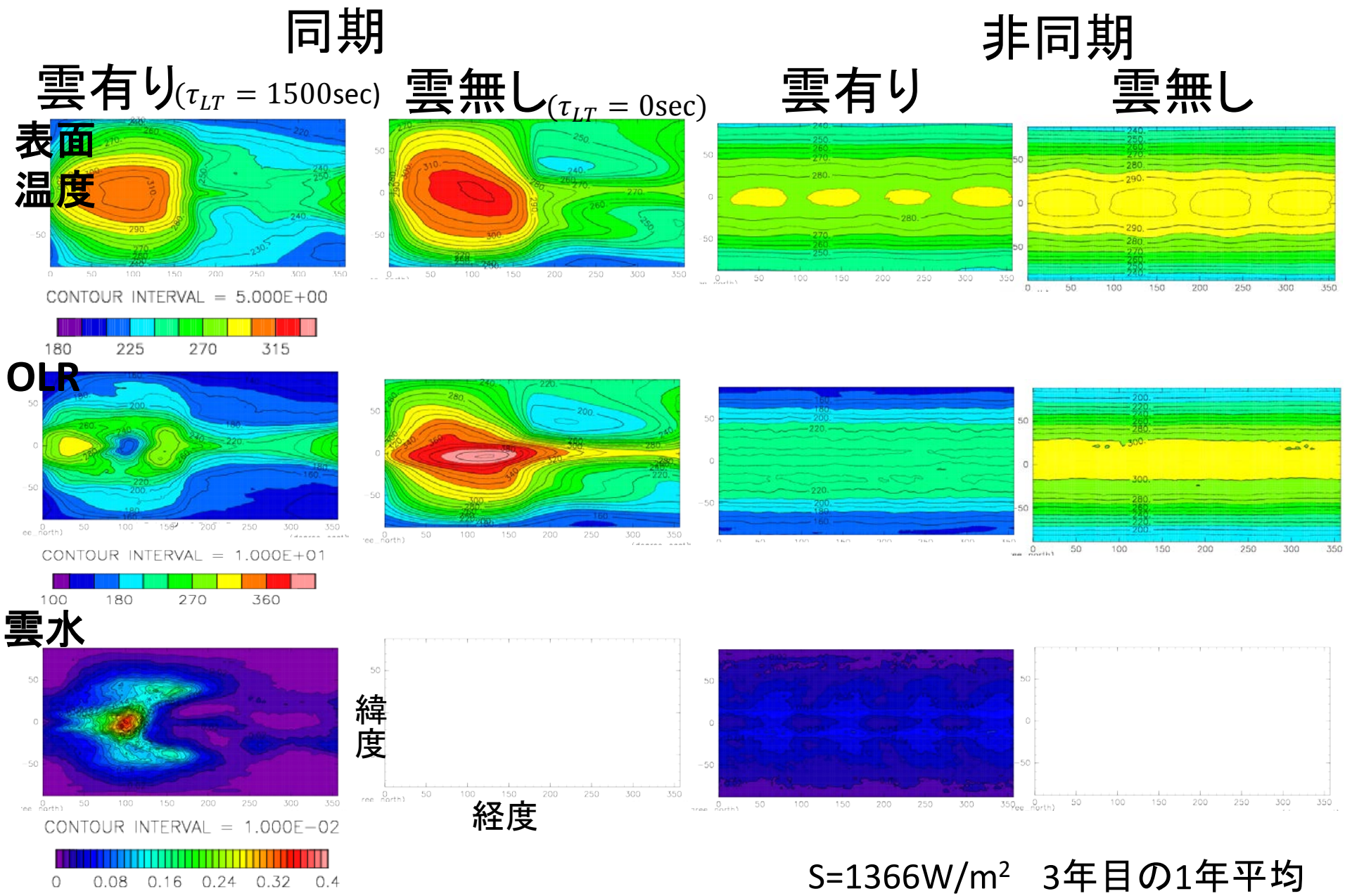
計算設定

- 計算設定
  - 太陽定数：S=1366 , 1600, 1800, 2000, 2200 [W/m^2]
  - 雲の消滅時間：τ_{LT}=0, 1500 [sec]
  - 日射分布：同期回転惑星設定、地球設定(非同期)
  - 自転角速度 ：Ω=7.29×10^{-5} [sec^{-1}](地球の値)
  - 表面における乾燥空気量：1気圧
  - 地表面アルベド ： 0.15
  - 解像度：T42L26
  - 積分期間：3年
- 計算資源
  - CGER SX9 7CPU
  - 使用メモリ： 2303MB(平均値)
  - 実行時間 : 約18.4時間（300地球日あたり）
  - ベクトル化率 : 90.0%

日射分布



現在の太陽定数の場合の結果



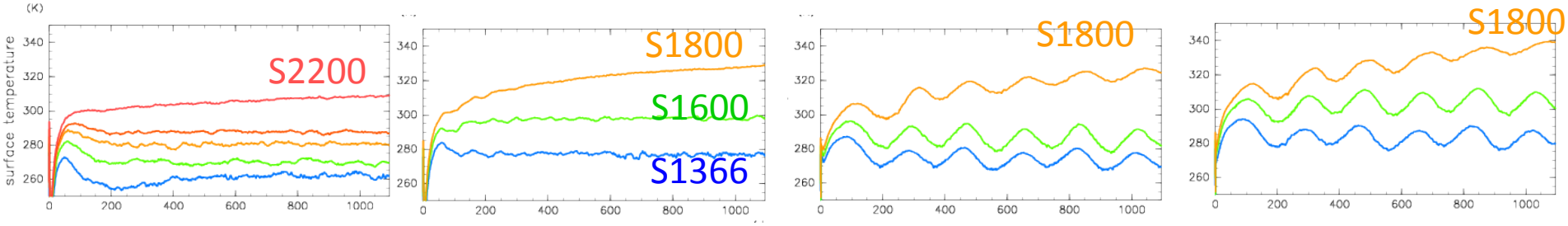
S=1366W/m^2　3年目の1年平均

表面温度・OLRの時間変化

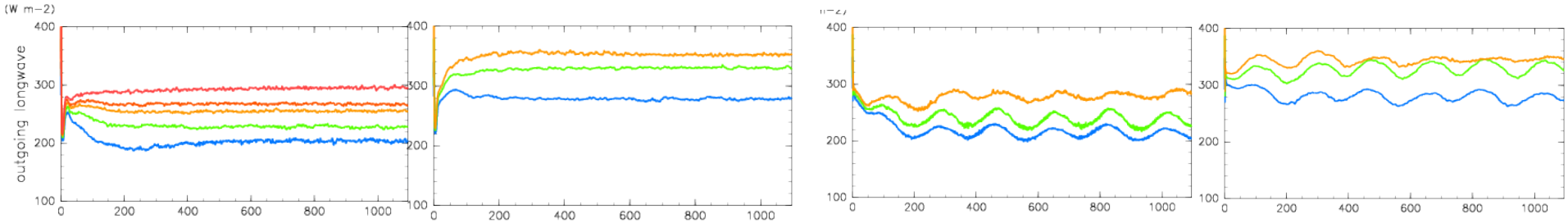
同期　　非同期

雲有り　雲無し　雲有り　雲無し

表面温度



OLR



全ての図において一番上の場合は熱的な暴走状態が得られた結果

実験結果まとめ

	同期回転		非同期回転	
	雲有り	雲無し	雲有り	雲無し
S=1366W/m^2（1.0倍）	○ 0.42 204W/m^2	○ 0.18 278W/m^2	○ 0.36 214W/m^2	○ 0.15 279W/m^2
S=1600W/m^2（1.17倍）	○ 0.44 228W/m^2	○ 0.18 331W/m^2	○ 0.40 237W/m^2	○ 0.17 331W/m^2
S=1800W/m^2（1.32倍）	○ 0.42 255W/m^2	× 0.16 352W/m^2	× 0.33 281W/m^2	× 0.13 345W/m^2
S=2000W/m^2（1.46倍）	○ 0.44 267W/m^2			
S=2200W/m^2（1.61倍）	× 0.44 295W/m^2			

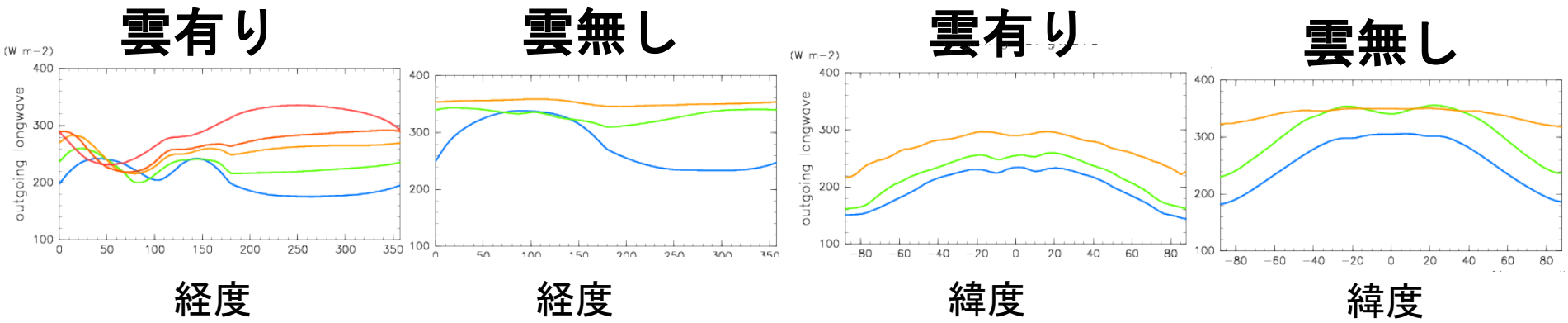
アルベド
OLR

○：平衡状態
×：暴走状態

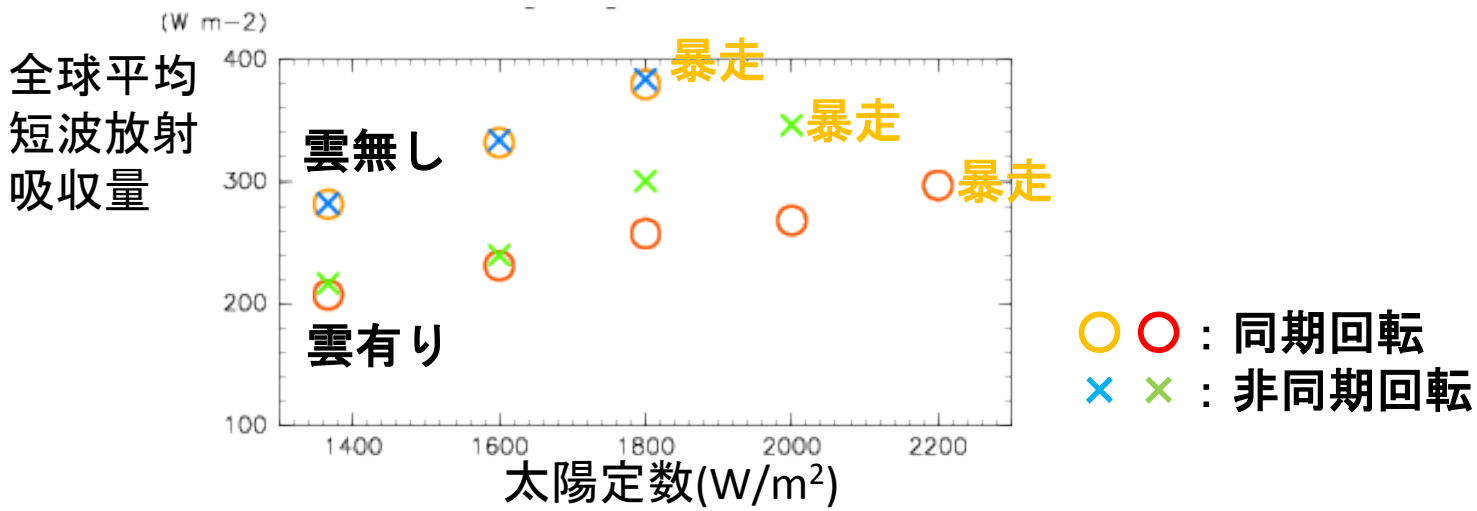
放射量上限値に関する検討

- **OLR 空間分布**

OLR東西分布（同期回転設定）　OLR南北分布（非同期設定）



- **短波放射吸収量太陽定数依存性**



昨年度課題まとめ

- GCM による太陽定数増加実験
  - 地球設定 vs 同期回転惑星設定
- 同期回転惑星設定の場合の方が暴走温室状態が発生する太陽定数が大きくなる。雲無しの場合には日射分布によらず同じ
- 設定によらず(雲の有無・日射分布)、赤外放射 射出量には上限値が存在するように見える。その値は設定によって50W/m^{2}程度の差が生じる(しかし、ごくおおまかには300 W/m^2 程度)
- よって暴走温室状態の発生条件は「全球平均日射吸収量が赤外放射上限値を越えること」と考えて良さそうである。
- ただし、雲の取り扱いについては検討を要する。

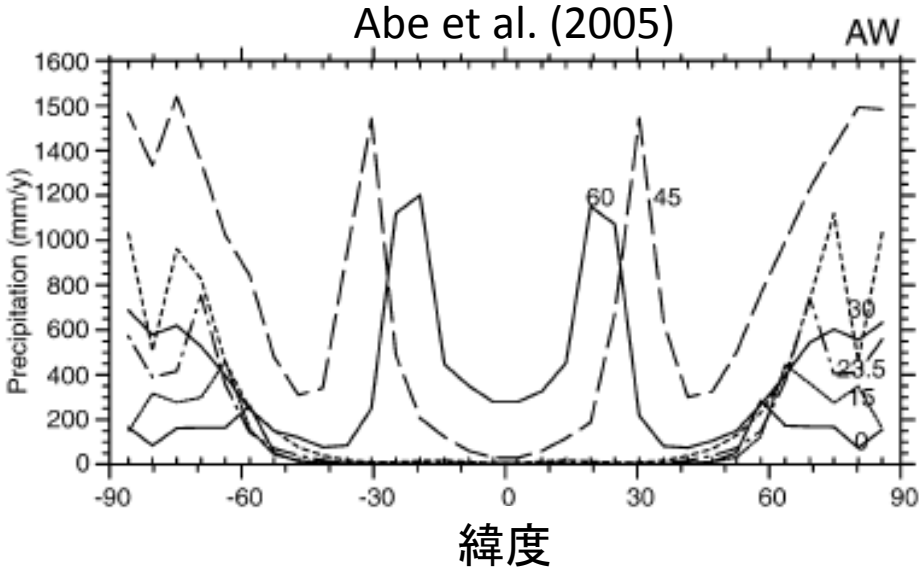
今年度課題の現状

研究課題名：系外惑星大気シミュレーションモデルの開発: 陸惑星の気候多様性に関する考察

今年度課題の研究対象

- 陸惑星
  - 地球に比べて表層の水の量が非常に少ない惑星 (Abe et al., 2005)
  - 低緯度領域で乾燥化
  - 水惑星よりも暴走温室状態が発生する太陽定数が大きい
  - 暴走温室状態の発生条件は「乾燥領域境界における惑星放射量が射出限界を超えること」(新田他, 2014)
  - しかし、乾燥領域の幅は循環パターンによって変化するのではなかろうか？

年平均・東西平均降水量
Abe et al. (2005)



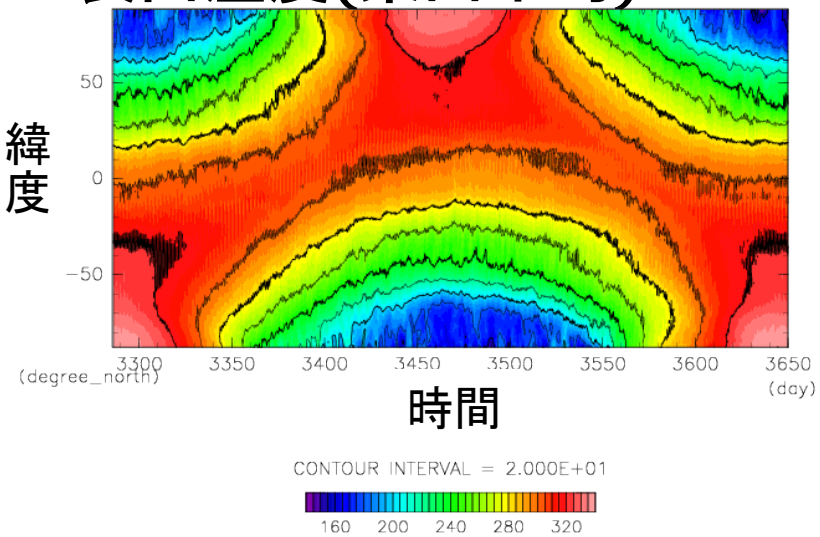
陸惑星実験の計算設定

- 計算設定(現時点での)
  - 地表面にはバケツモデル (Manabe, 1969) を適用
    - 初期の水の深さは1m、10m
  - 自転傾斜角：I=0，23.44 [degree]
  - 自転角速度 ： $\Omega=7.29\times10^{-5}$ [sec^{-1}](地球の値)
  - 雲の消滅時間：τ_{LT}=1500 [sec]
  - 太陽定数：S=1366 [W/m^2]
  - 日射分布：地球設定(非同期)
  - 解像度：T42L22
  - 積分期間：10年
- 計算資源
  - CGER SX-ACE 8CPU
  - 使用メモリ： 704MB(平均値)
  - 実行時間 : 約4時間（300地球日あたり）
  - ベクトル化率 : 90.0%

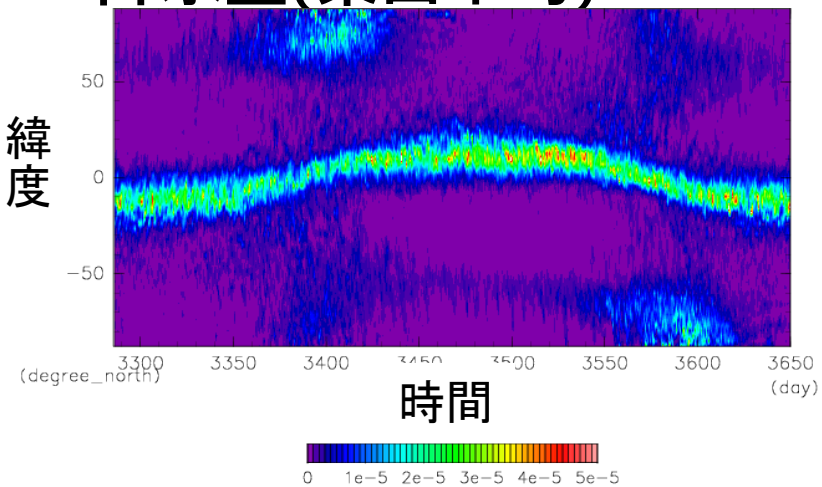
陸惑星実験の結果

初期バケツ深さ10m, 自転傾斜角：23.44[deg]
10年目の状態

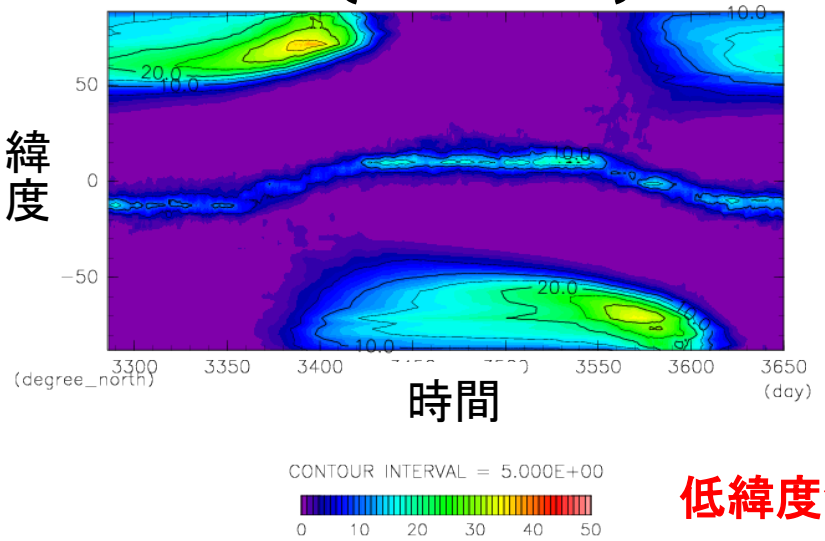
表面温度(東西平均)



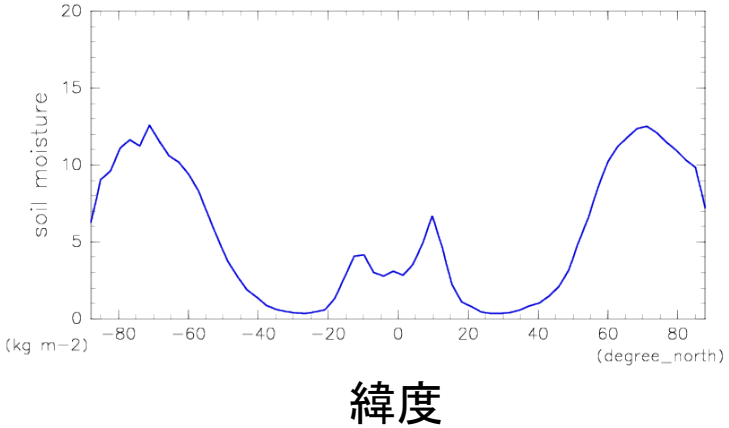
降水量(東西平均)



土壌水分(東西平均)



土壌水分(時間平均・東西平均)



低緯度領域に水が残る(過去の研究と違ってしまった)

今年度課題の現状

- 陸惑星実験
  - まだ少数の実験のみに留まっている：
    自転傾斜角０°と23.44°の場合
  - これまでの実験結果
    - 低緯度領域の乾燥化が完全には起こらない
      (Abe et al., 2005とは異なる結果になっている)
    - 熱帯域における土壌水分、降水が維持されている
    - 初期のバケツ深さを1mとした場合でも同様
  - 今後は
    - まずは、過去の研究との差異が生じる原因の追究
    - その後、パラメータ実験を用いた暴走温室状態発生に関する考察、特に自転角速度依存性の調査を行いたい