

# GCMを用いた気候多様性の探索: 水惑星と陸惑星

石渡正樹(北大・理)

共同研究者:河合佑太(R-CCS), 高橋芳幸(神戸大), 中島健介(九大・理)、竹広真一(京都大・数理研), 檜村博基(神戸大・理), 富田浩文(R-CCS), 林祥介(神戸大・理), 吉田哲治(北大・理)



2022年3月30日 CPS/ABCワークショップ  
火星から諸惑星:表層環境の多様性



# 背景

- 惑星における液体の水の存在条件について考えたい

- 1つの路線は簡単なモデルと理想的な設定を用いた実験・考察

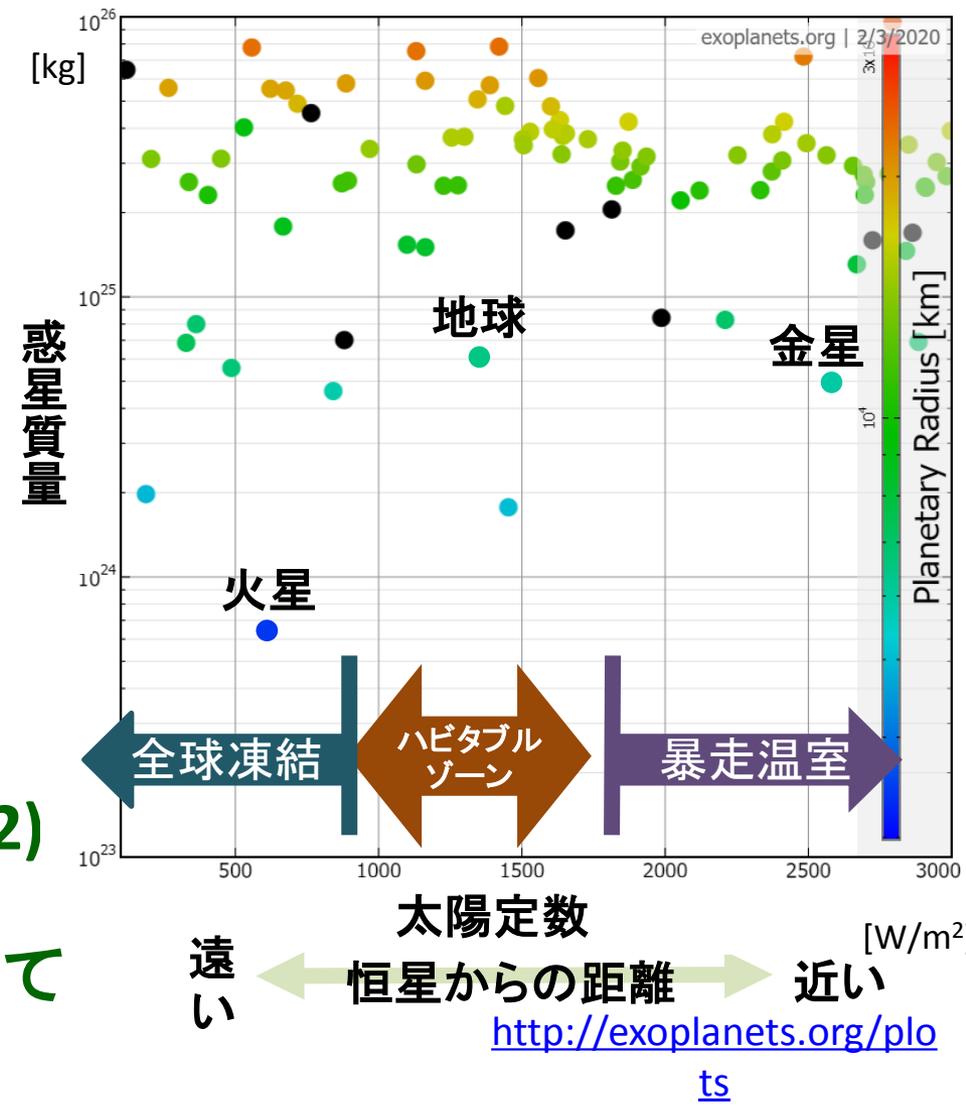
-  水惑星：全球表面が海洋で覆われた惑星

-  陸惑星：表層に少量の水を保持する惑星

- ここでは我々のGCM実験の結果を紹介

- 水惑星：Kawai et al. (2022) の話

- 陸惑星：チマチマとやっている実験の現状



<http://exoplanets.org/plots>

# 海惑星の気候レジーム図

Kawai et al. (2022?)の話

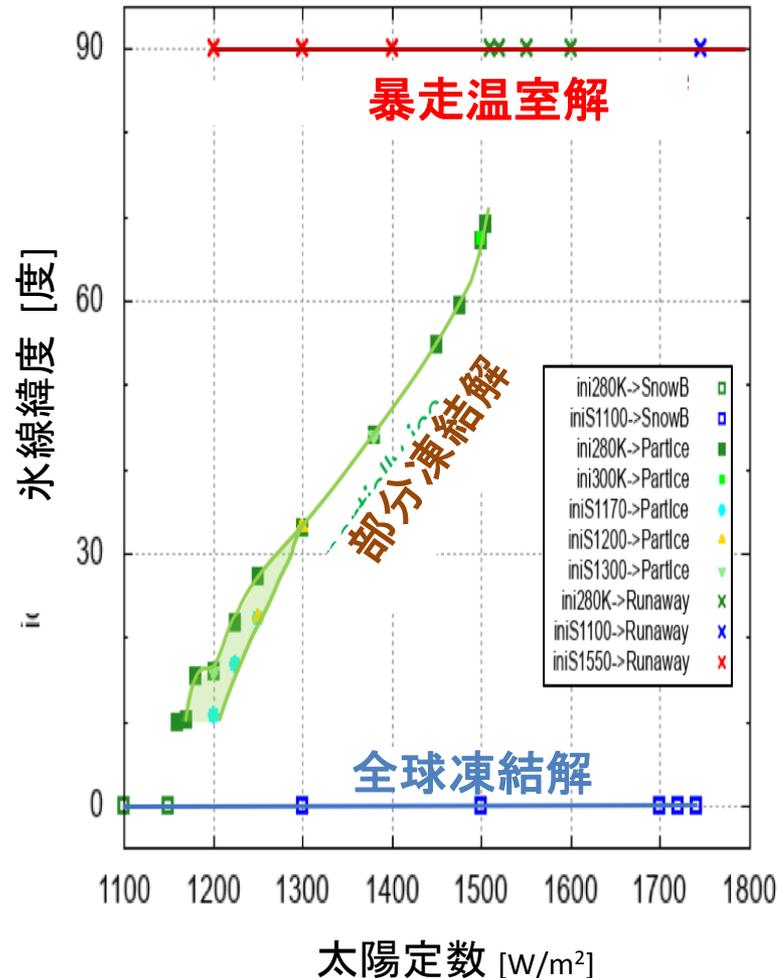
気象学会2021年秋季講演会発表

# 研究の背景

- 水が存在する惑星の気候多様性を明らかにするために、全球海洋の理想化された惑星（海惑星）の気候が探索されてきた
  - 例：太陽定数依存性 (Ishiwatari et al., 2021)
- 近年では海洋大循環が陽に考慮されるようになってきた (Rose, 2015)
- 我々のグループで実施した大気海洋結合計算（河合他、2018年春季大会）で得られた気候レジーム図は、過去の研究と異なる部分がある

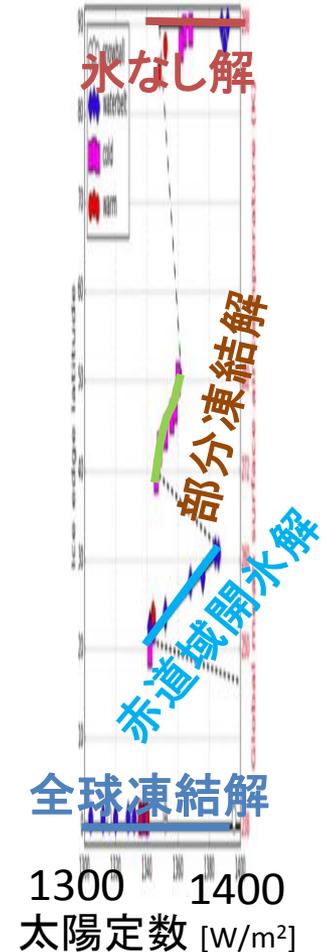
## 我々の計算結果

- 灰色放射 (Ishiwatari et al., 2021)
- 軸対称海洋大循環モデル



## Rose (2015)

- 4バンド放射
- 3次元海洋大循環モデル



# 目的

- 我々の大気海洋結合計算（河合他、2018年春季大会）とRose (2015) の気候レジーム図におけるブランチ構造の違いは、何によってもたらされたのか？
  - 部分凍結解が得られる太陽定数の範囲
  - ブランチの数や種類
- 大気海洋結合系における気候レジームに関する考察
  - エネルギーバランスモデルを用いた感度実験
- 我々のこれまでの実験よりも灰色大気の吸収係数を大きく設定した大気海洋海氷結合モデル実験
  - 灰色大気の吸収係数が大きい場合に、海洋熱輸送が気候レジーム図に与える影響を調べる
  - 赤道域開氷解は現れるのか？

# 海惑星気候モデル

## • 大気大循環モデル：DCPAM

(<https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>)

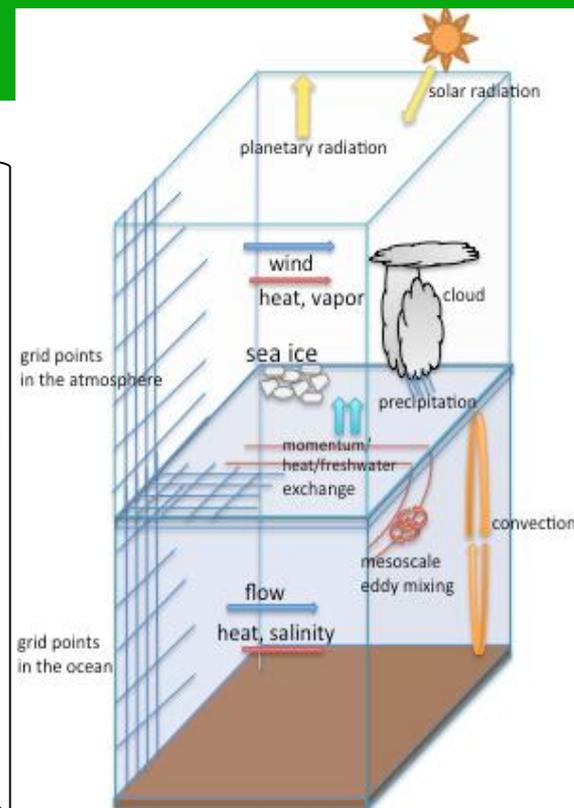
- 大気成分: 乾燥空気, 水蒸気
- 力学過程: 浅い大気, 静力学近似したナビエ・ストークス方程式
- 灰放射過程: 色放射スキーム (Nakajima et al., 1992)
- 乱流混合過程: Mellor and Yamada (1982), Louis et al. (1982)
- 凝結過程: Manabe et al. (1965), 雲なし
- 空間解像度: 水平格子間隔 約 6 度, 鉛直 16 層

## • 海洋大循環モデル

- 力学過程: 自転軸対称(東西平均)・静力学近似ブシネスク方程式系
- 乱流混合過程: Redi (1982), Gent and McWilliams (1990), Marotzke (1991)
- 空間解像度: 南北格子間隔 約 3 度, 鉛直 60 層

## • 海氷モデル

- 熱力学過程: 3-layer model (Winton, 2000)
- 水平輸送: 水平拡散によりパラメータ化
- 空間解像度: 南北格子間隔 約 3 度



## • カップラー

- モデル間のデータ交換: Jcup (Arakawa et al., 2011)

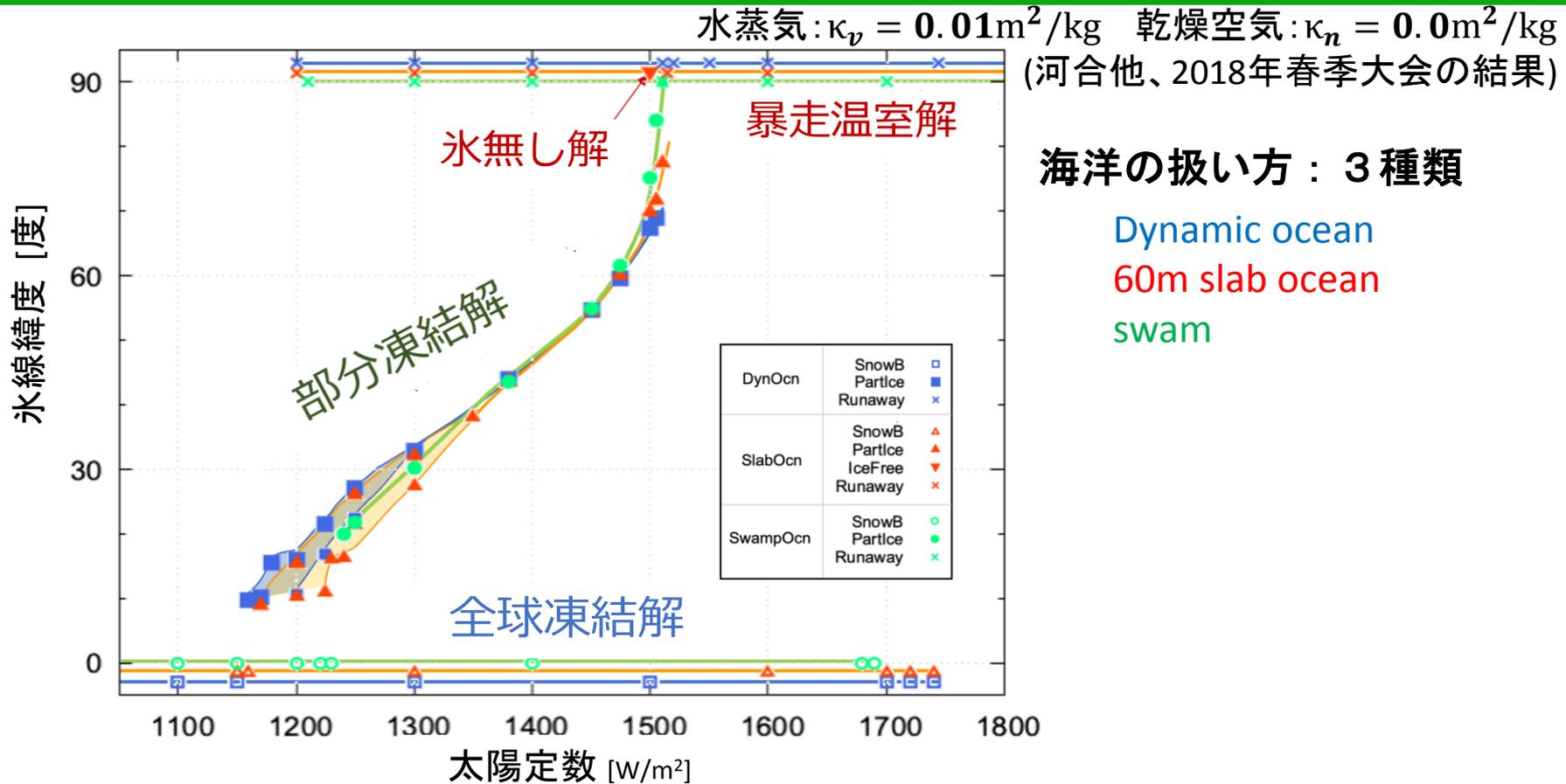
周期的同期結合

(Sausen and Voss, 1998)を用いて, 結合系を 3 万年間積分

# 実験設定

- 太陽定数: 1000~1750 W/m<sup>2</sup>
- 大気吸収係数
  - Ishiwatari et al. (2021) と同様の設定:  
水蒸気 :  $\kappa_v = 0.01\text{m}^2/\text{kg}$     乾燥空気 :  $\kappa_n = 0.0\text{m}^2/\text{kg}$
  - 吸収係数を大きくした場合  
水蒸気 :  $\kappa_v = 0.1\text{m}^2/\text{kg}$     乾燥空気 :  $\kappa_n = 10^{-5}\text{m}^2/\text{kg}$   
(Byrne and O' Gorman (2013), Vallis et al. (2018) に基づく)
- 海洋の取り扱い
  - Dynamic ocean
  - 60m slab ocean
  - Swamp ocean
- 惑星パラメータ (半径, 重力加速度, ...)
  - 地球と同様の値
- 季節変化・日変化: なし
- 表面アルベド
  - 表面温度が 263 K 以下のとき 0.5, それ以外は 0
  - セル内の海洋・海氷面積比を考慮して計算
- 初期条件
  - 基本は 280 K の等温大気海洋
  - 暴走温室解, 全球凍結解, 部分凍結解から始める場合もあり

# 吸収係数が比較的小さい場合の気候レジーム図



- 海洋の扱い方によらず複数種類の解が存在
  - 暴走温室解
  - 部分凍結解 (ただしRose(2015)が得た赤道域開氷解は現れない)
  - 全球凍結解
- 海洋の扱い方に依らずブランチの構造はほぼ変わらない

# なぜ海洋の扱いを変えてもブランチ構造は変わらない？

## • 海洋熱輸送を指定した拡散型南北一次元 EBM による考察

$$0 = \boxed{Q(1 - \alpha(x, x_s))S(x)} - \boxed{(A + BT)} + \boxed{D \frac{\partial}{\partial x} (1 - x^2) \frac{\partial T}{\partial x}} + \boxed{F_o(x)}$$

太陽放射

長波放射

大気熱輸送による加熱冷却

海洋熱フラックス

( $x$ : サイン緯度,  $T$ : 温度,  $Q$ : 太陽定数/4,  $\alpha$ : アルベド,  $S(x)=1+s_2 P_2(x)$ )  $F_o(x) = -\frac{1}{2\pi R^2} \frac{\partial H_o}{\partial x}$ ,

$$H_o(x) = \Psi_o x(1 - x^2)^N$$

## • パラメータ設定

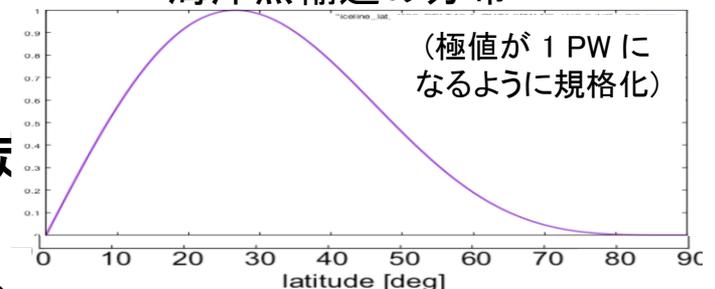
### – 長波放射の温度依存性と大気の南北熱拡散係数の比 $D/B$

- 小さい場合 0.1 (Ishiwatari et al., 2021の灰色大気に対応)
- 大きい場合 : 0.3 (North, 1975)

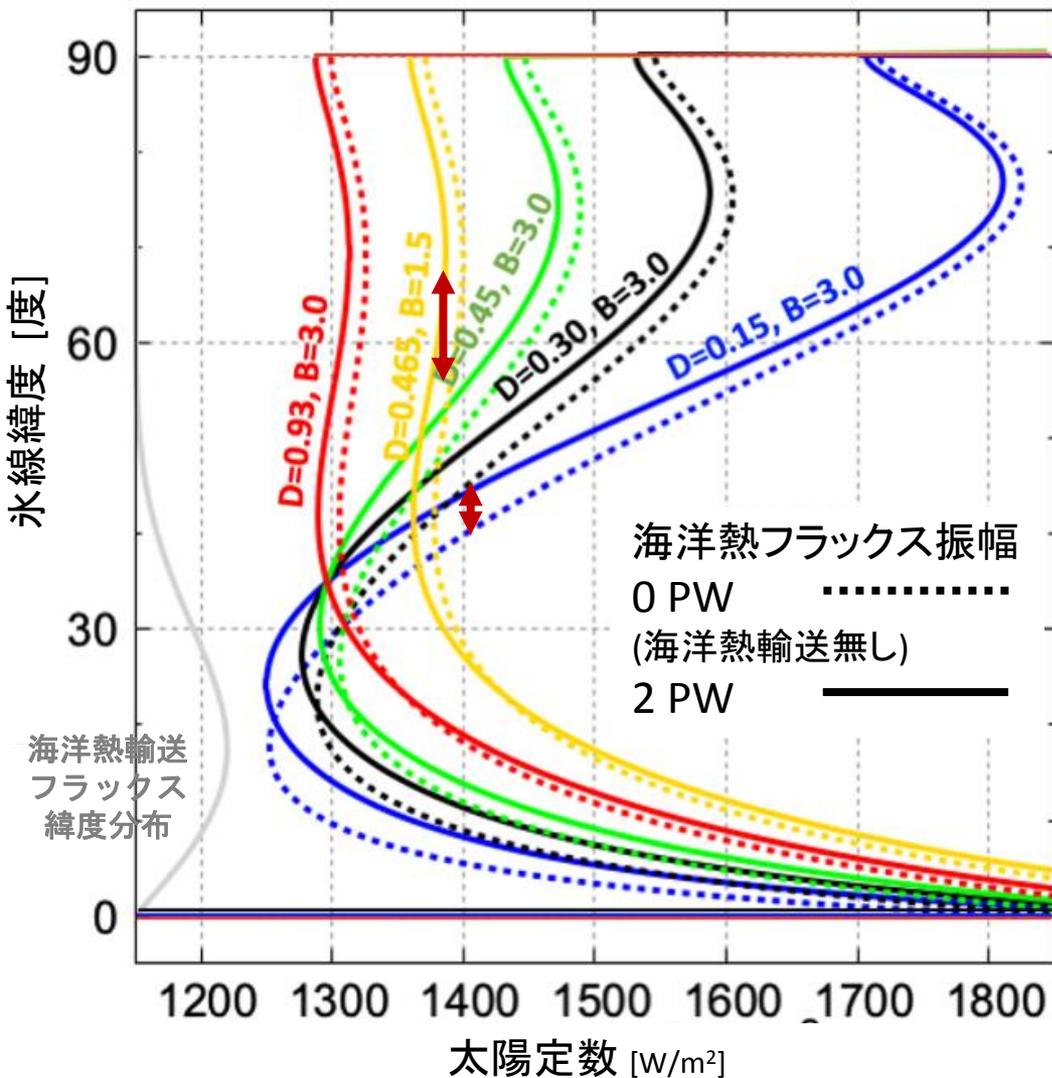
### – 指定する海洋熱輸送

- 氷線が中緯度にあるときの場合の結合モデル計算の結果に基づいて決める
- パターン :  $N=2$
- 振幅 : 1 [PW] (dynamic ocean に対応)

海洋熱輸送の分布



# エネルギーバランスモデルの結果



- エネルギーバランスモデルを用いた感度実験

$\frac{D}{B} \sim \frac{\text{熱輸送係数}}{\text{長波放射温度依存性}}$  が小さい

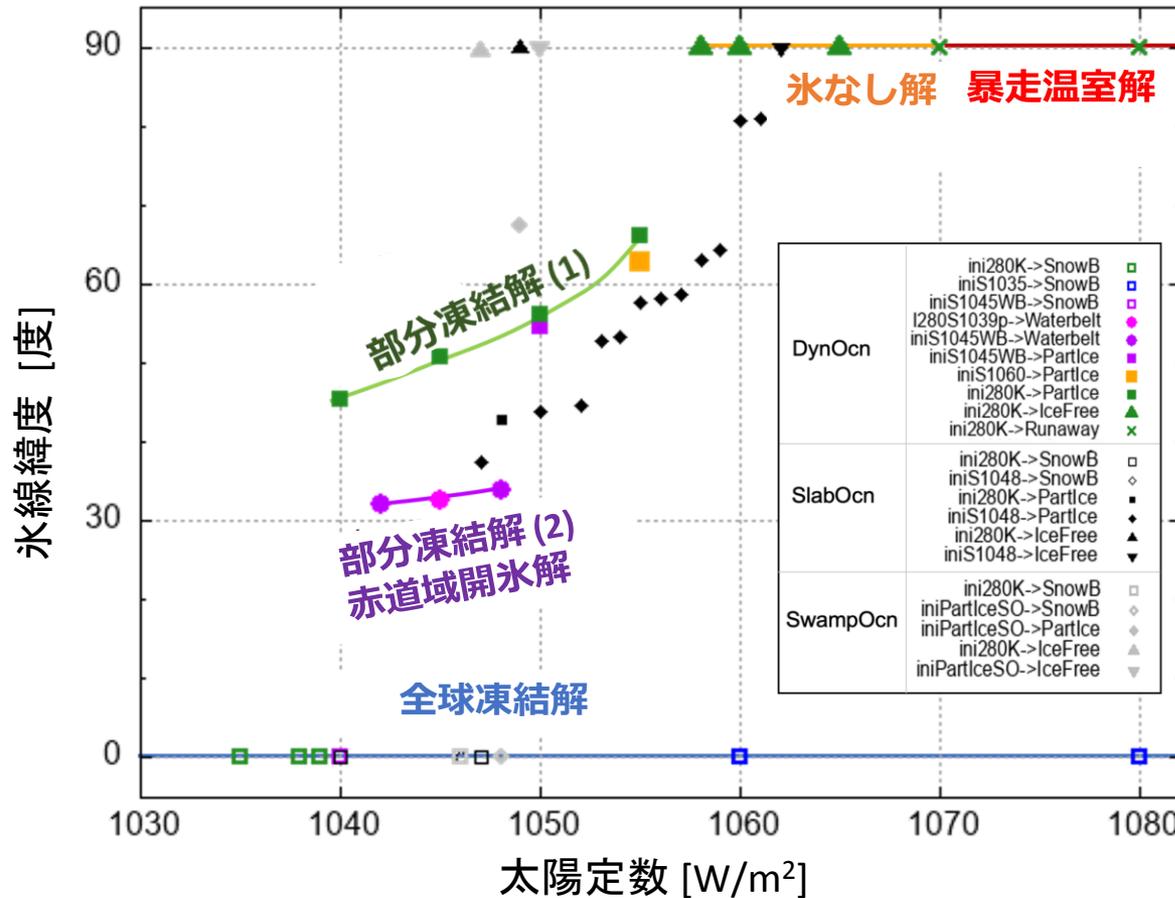
場合、海洋熱輸送を導入した際の氷線緯度の変化が小さい。

- これより、ここまでの結果において海洋の取り扱いを変えてもブランチの形態がほとんど変化しない理由は、長波放射による減衰に比べて大気熱輸送が弱いことだと考えられる。

# 吸収係数が大きい場合の気候レジーム図

水蒸気:  $\kappa_v = 0.1 \text{ m}^2/\text{kg}$

乾燥空気:  $\kappa_n = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{kg}$



## • 海の種類は5種

- 氷なし解が存在
- 部分凍結解のブランチが2つ

## • 同じ太陽定数に対して、2種類の部分凍結解と全球凍結解が共存

# 海惑星実験まとめ

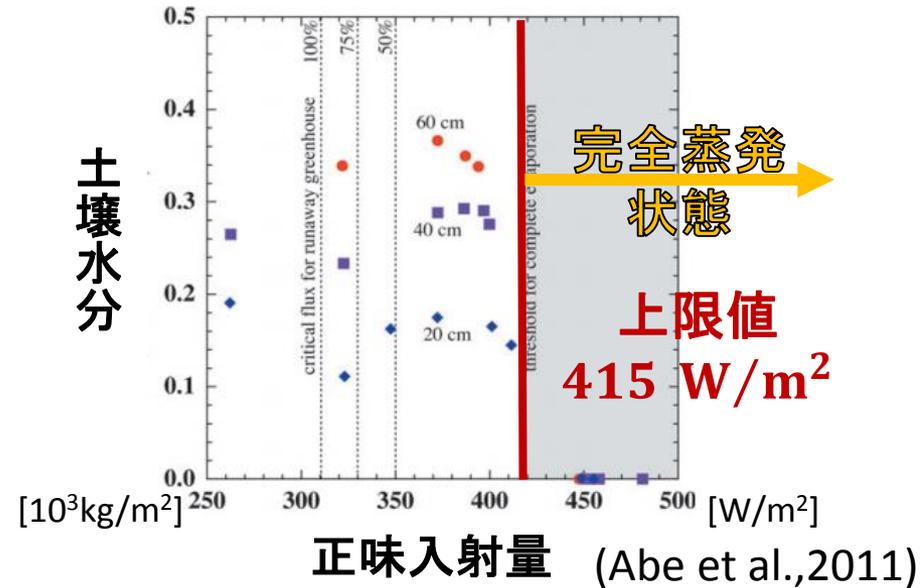
- 灰色大気放射を採用した大気海洋海氷結合モデルを用いて、海惑星気候の太陽定数依存性を調査
- 灰色大気吸収係数が比較的小さい場合の結合モデル実験
  - 氷線緯度の太陽定数依存性は、海洋熱容量・熱輸送の効果をあまり受けない。
  - 部分凍結解は一種類
- エネルギーバランスモデルを用いた考察
  - 大気放射特性と熱輸送の速さ (の比) が海洋の取り扱いによる氷線緯度の違いに大きく影響
- 灰色大気吸収係数を大きくした場合の結合モデル実験
  - 海洋熱輸送の有無により気候レジーム図に定性的な違いが出現
  - 海洋熱輸送が存在する場合には
    - 部分凍結解の存在できる太陽定数の範囲が狭くなる。
    - 気候レジームの種類は 5 つ。
      - 部分凍結解のブランチは 2 種類

# 陸惑星実験

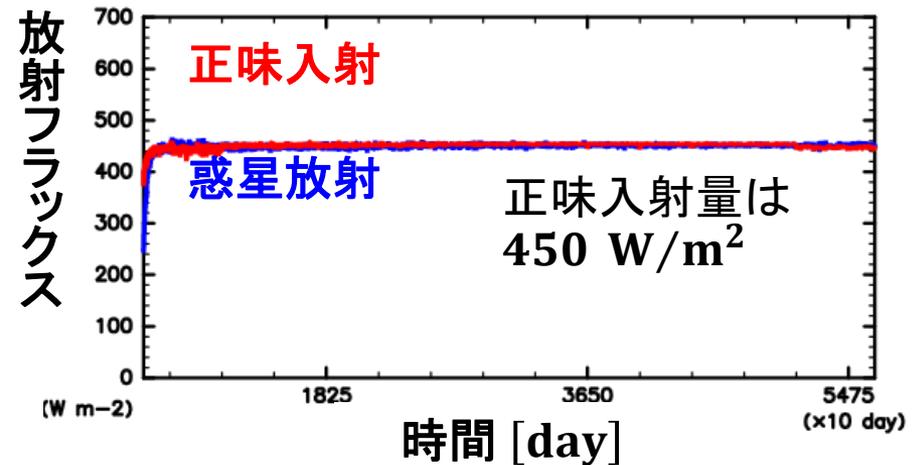
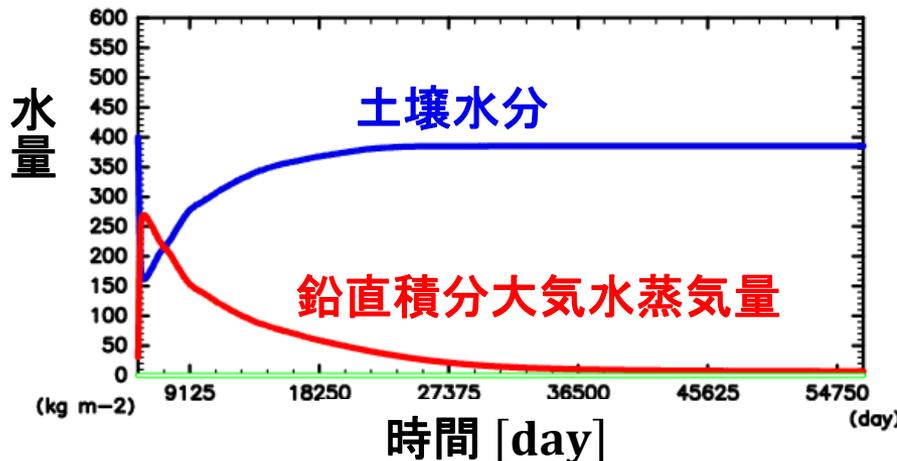
チマチマやっている実験の現状の話

# 陸惑星に関するこれまでの研究

- 過去の研究: Abe et al. (2011)
  - 太陽定数がとある臨界値を超えると完全蒸発状態が発生
- これまでの我々の研究
  - Abe et al. (2011)が得た臨界値を見つけれない



$S = 2400 \text{ W/m}^2$  の場合



# 研究目的

- 陸惑星における完全蒸発状態の発生条件に関する再検討
  - Abe et al. (2011):  
平均日射吸収量が $415 \text{ W/m}^2$ を超えると完全蒸発状態が発生
  - 我々のこれまでの結果:  
完全蒸発状態が得られていなかった
- これまでの実験設定
  - 自転傾斜角は0 :  
土壤水分が蓄積している極域で日射が存在しない
- ここでは極域に日射が入射する場合について試してみる
  - 極域を「強制的に」加熱すれば蒸発は起こるのか？
  - 自転傾斜角変更実験の実施
    - まずは $23.4$ 度（地球の値）、次に $15$ 度の場合など

# 実験設定・実験リスト

## 物理過程

- 放射過程: Chou and Lee (1996), Chou et al (2001)
- 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: バケツモデル (Manabe, 1969)
- 雲量の予報: 雲の消滅時間を仮定した雲モデルを使用

## 実験リスト

実験名	自転傾斜角	初期土壌水分量	大気初期状態
L_S2400_IniLP_Obl23.4	i=23.4	全球平均で40cm (L_S2400_IniAP_Obl0.0 の15年目の状態)	L_S2400_IniAP_Obl0.0 の15年目の状態
L_S2400_IniLP_Obl15.0	i=15.0		
L_S2400_IniLP_Obl10.0	i=10.0		
L_S2400_IniAP_Obl0.0	i=0.0	40cm一様	水惑星実験の平衡状態
L_S2400_IniUni_Obs0.0	i=0.0	40cm一様	温度一様状態

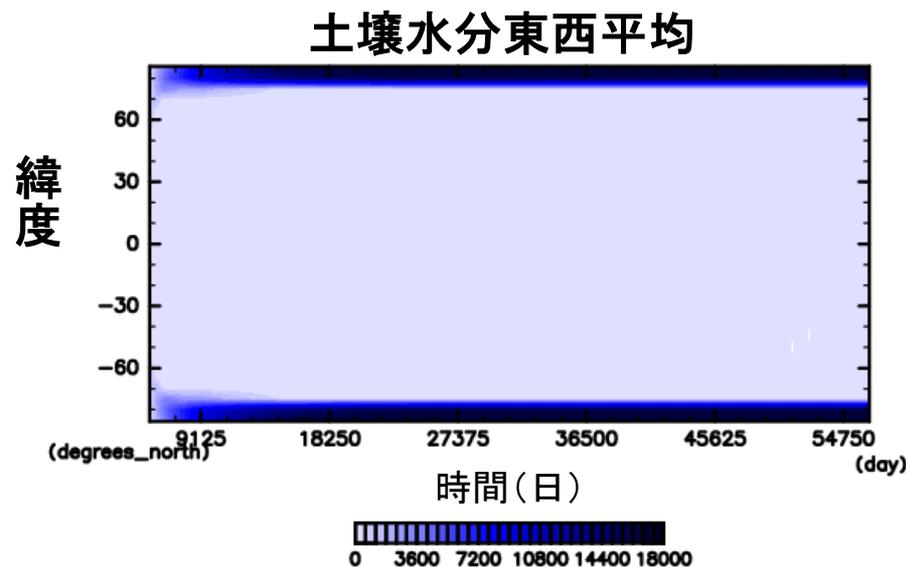
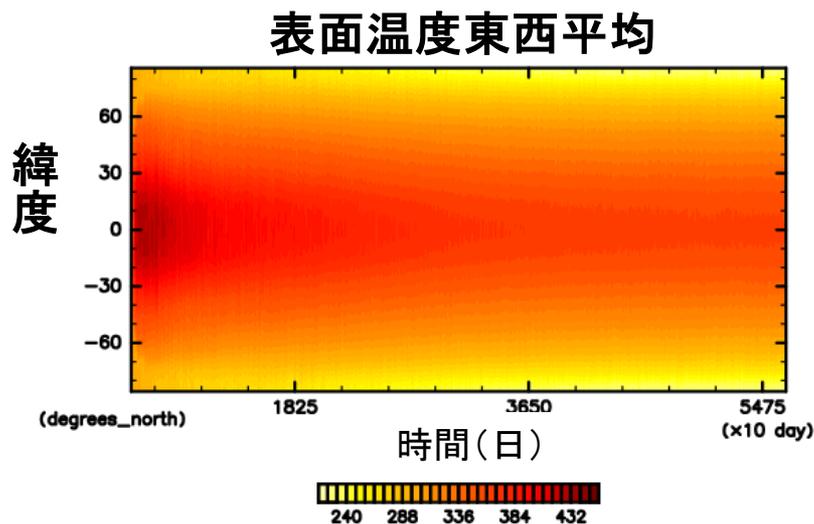
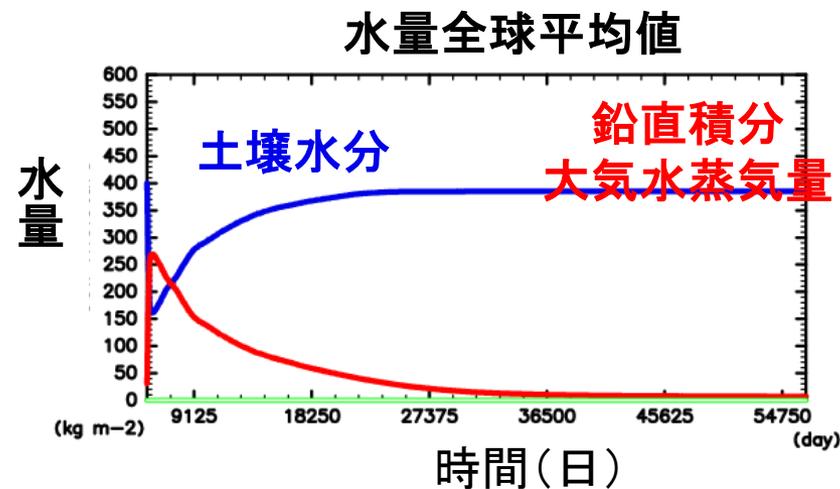
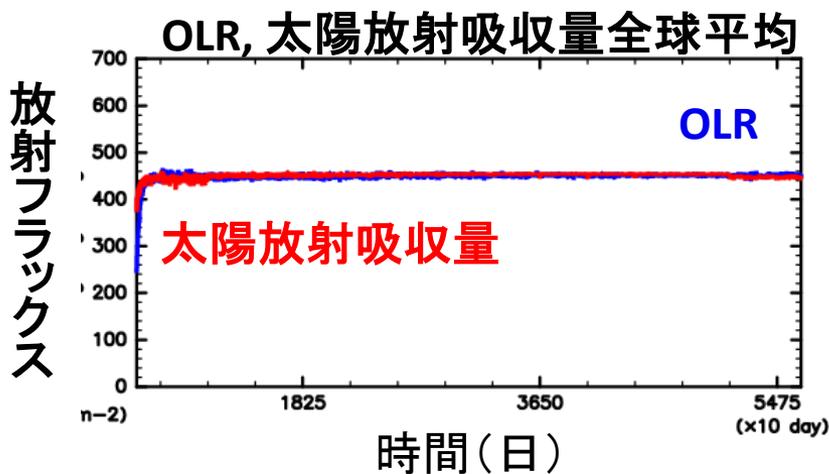
日射分布: 地球と同様(ただし離心率は0), 太陽定数: 2400W/m<sup>2</sup>

自転角速度:  $7.23 \times 10^{-5}$  [rad/sec] (地球の値)、乾燥空気量: 表面気圧にして1気圧

氷無し表面のアルベド: 0.2, 解像度T21L26

# 自転傾斜角が0の場合の結果

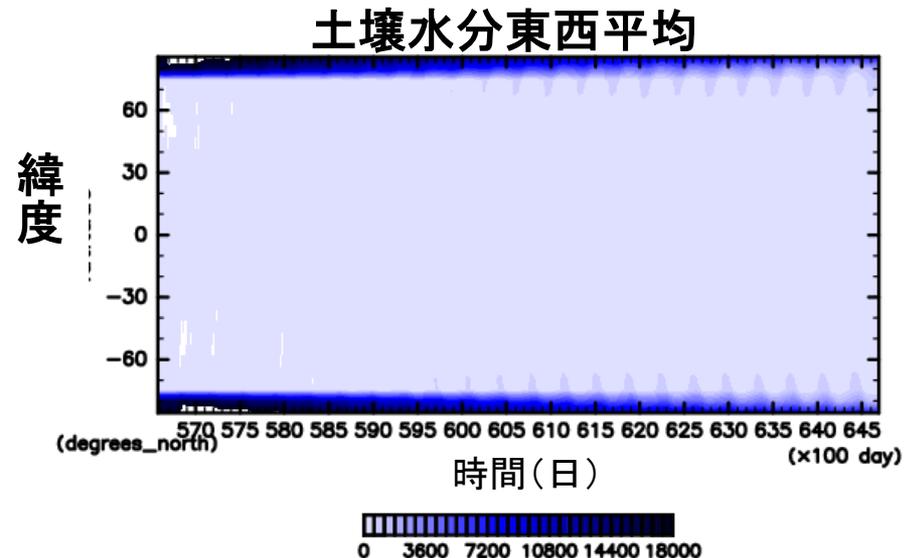
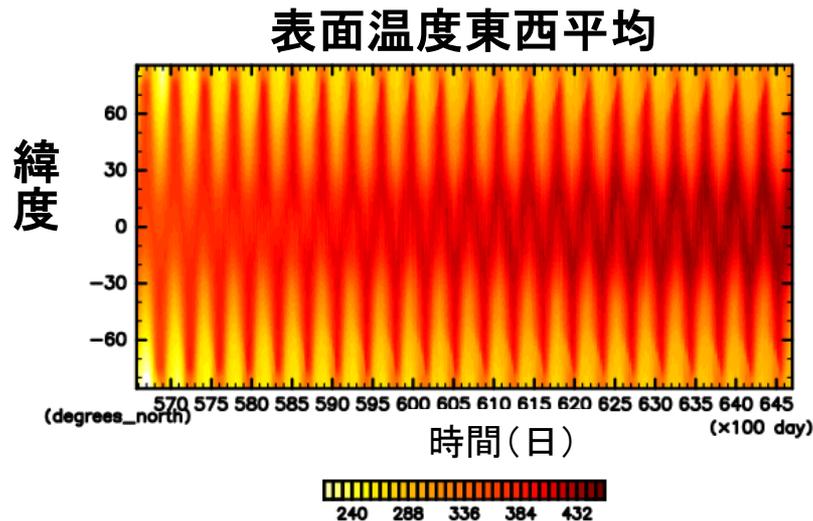
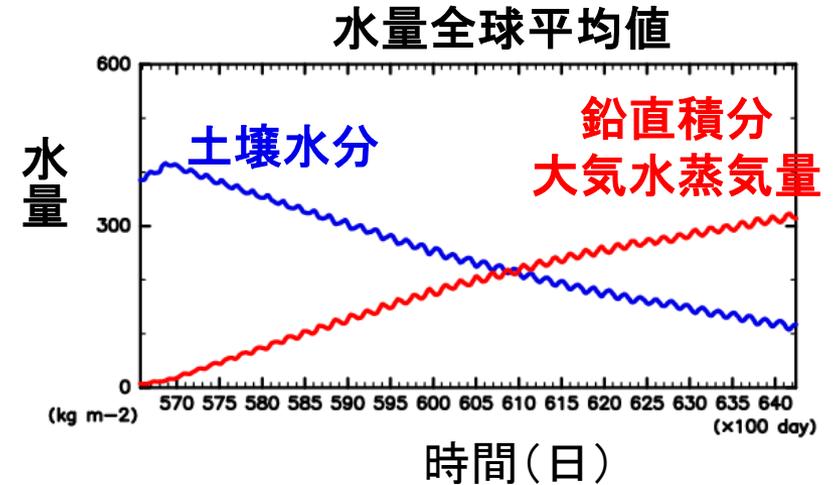
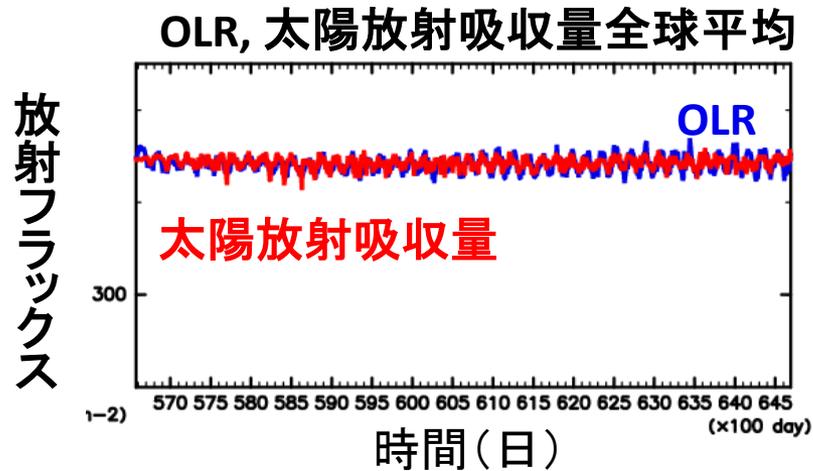
実験 L\_S2400\_IniAP\_Obl0.0 入射放射量はAbe et al. (2011)が得た完全蒸発状態発生の臨界値を超えている



- 土壌水分は蒸発しない。低温の極域に固定されたまま

# 地球の自転傾斜角を与えた場合の結果

実験 L\_S2400\_IniLP\_Obl23.4



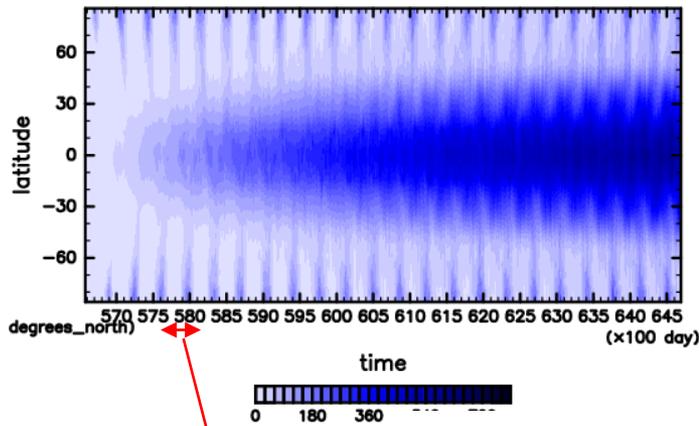
- 定常に達していないが、土壌水分量の減少が継続

# 水の挙動

実験 L\_S2400\_IniLP\_Obl23.4

## 鉛直積分水蒸気量

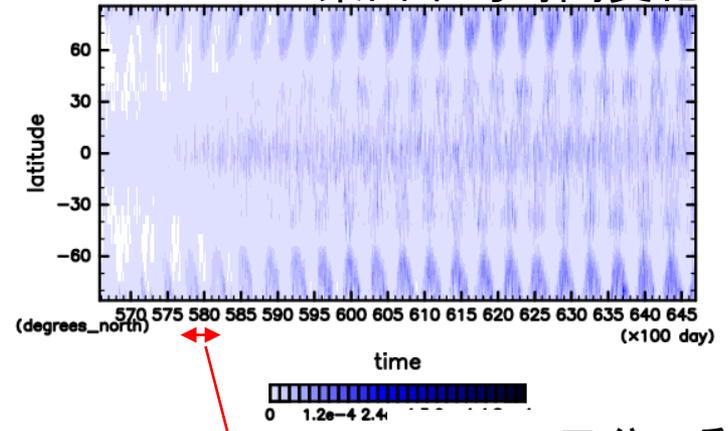
東西平均時間変化



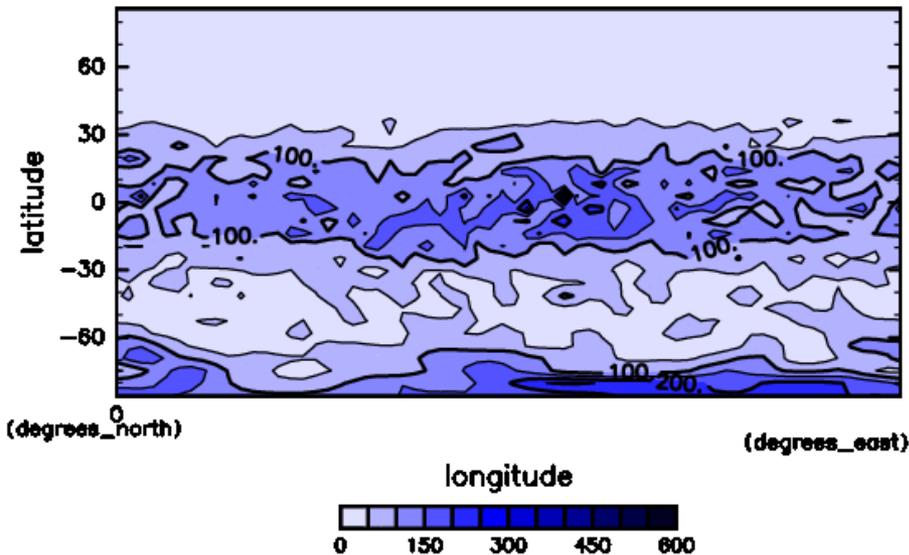
30日分の動画

## 降水量

東西平均時間変化

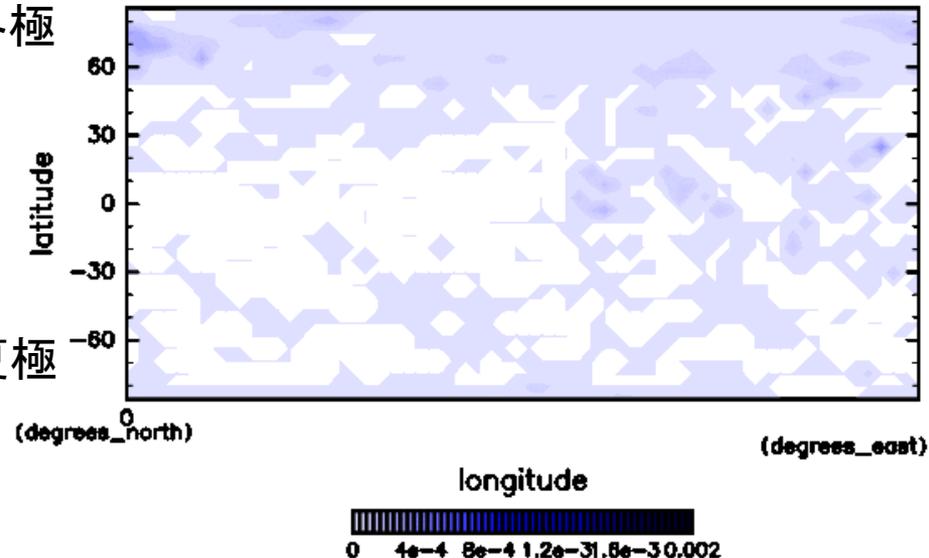


30日分の動画



冬極

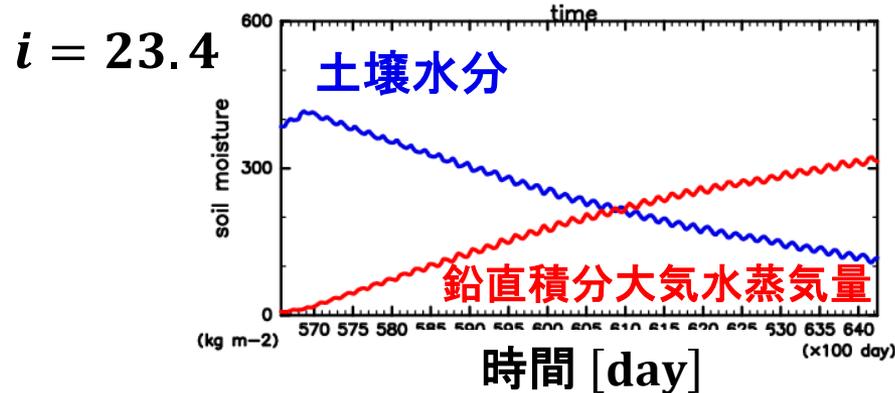
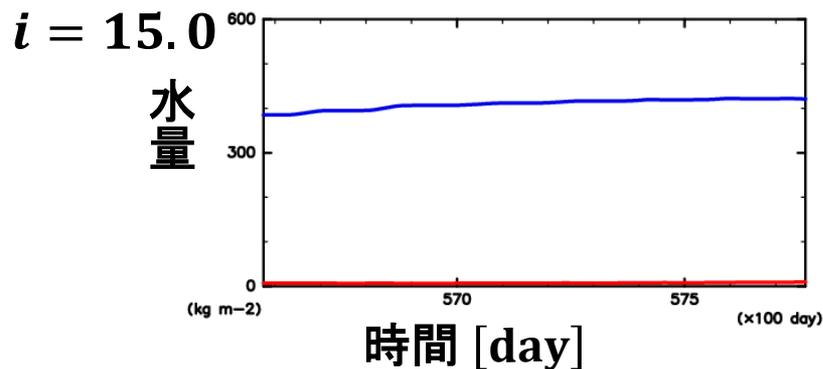
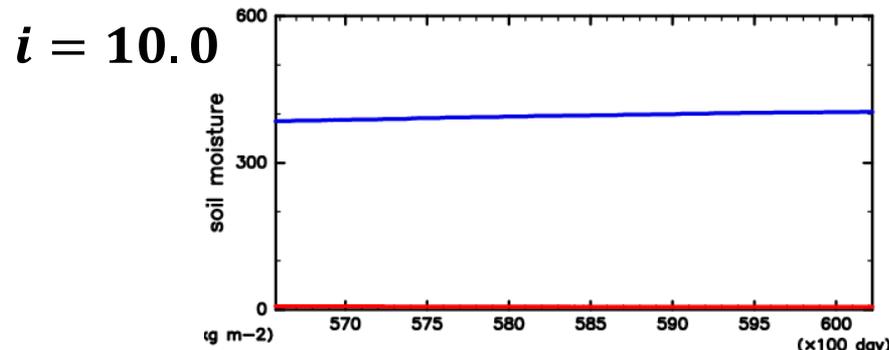
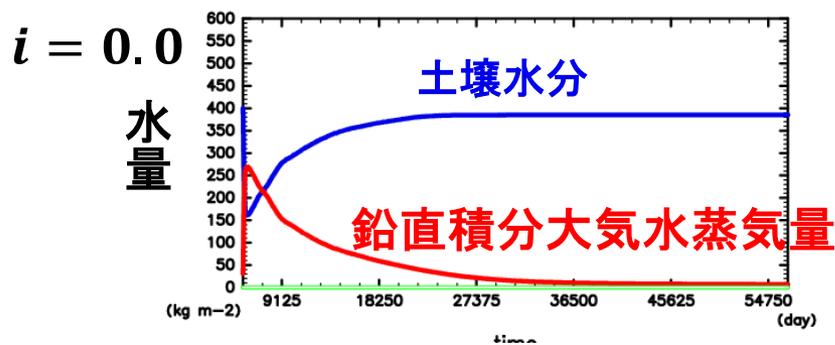
夏極



# どの自転傾斜角で完全蒸発が起こる？

## • まだ実験継続中

- $i=0, i=10$ だと極域に土壤水分がたまっている状態が維持される
- $i=15$ は実行中。完全蒸発起こらないかも？



# 陸惑星実験まとめ

## • 陸惑星設定を用いたGCM実験を実施

### – 自転傾斜角が0の場合

- 完全蒸発状態は発生しずらい？
- 自転傾斜角が0の場合にはどう頑張っても高緯度領域からの蒸発は起これない？（低温の極域に水分が溜まっている解と大気中に水蒸気が保持される解が存在したりするのだろうか？）

### – 自転傾斜角を0でない場合（極域にも日射が存在する場合）

- 極域での蒸発が進行する（完全蒸発状態の発生の確認に関しては更なる積分が必要）

### – モデル実装の違いが問題？