

CPS/WTK&ABCワークショップ 「生命の起源と進化を規定した 惑星表層環境を考える」

- 趣旨：惑星の気候・表層環境がどのように決定されるか、について理解を深める・議論をおこなう
- きっかけ：小河さんの主張「生命の起源よりも惑星表層環境がどう決まるかを考察するべき」（於 2023年惑星科学フロンティアセミナー）
- プログラム
 - 10:00-10:30 石渡（北大）仮想惑星の気候の多様性
 - 10:45-11:45 小河 惑星のマントル進化と表層環境
 - 13:30-14:30 門屋（東工大・ELSI）炭素循環に基づく気候の安定性と長期進化
 - 14:45-15:45 濱野（ELSI）深いマグマオーシャンの固化と大気進化
 - 16:00-17:00 小宮（東大）地質学試料から見た生命・地球表層環境の経年変化

現地参加者に連絡

- 講演者の方はzoomに入って画面共有して講演をお願いします
- 昼食
 - 道路向こうの建物に飲食店 1 軒、キッチンカー
 - 徒歩 15 分でコンビニ
- Wifi
 - 貼り紙見てください
- お茶・お菓子あります
- 懇親会
 - ワークショップ終了後にこの建物で開きます。
 - オードブルと多少のお酒

仮想惑星の気候多様性

石渡正樹 (北大・理)

共同研究者: 中島健介 (九大・理)、林祥介 (神大・理)、竹広真一 (京大・数理研)、
河合佑太 (理研・AICS)、高橋芳幸 (神戸大・理)、櫻村博基 (神戸大・理)、

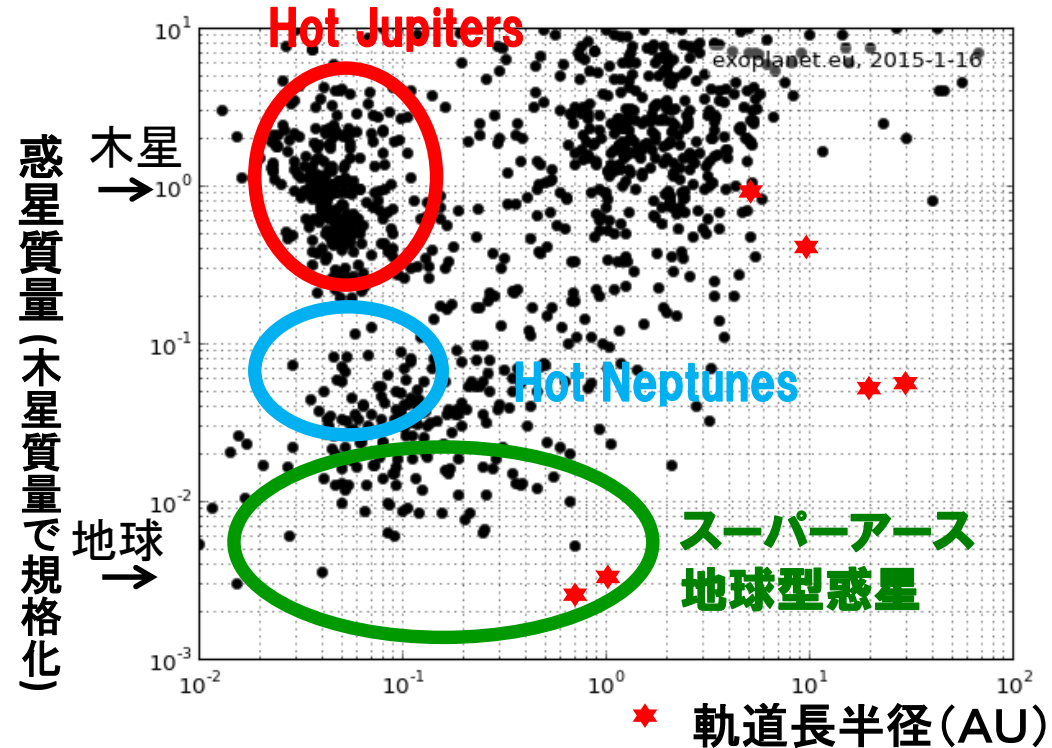


2024年03月07日 CPS
CPS/WTK&ABCワークショップ



大気モデルで考える惑星表層環境

- 系外惑星は多様
- 各種設定を用いた地球型惑星の気候計算・多様性の考察がおこなわれてきた
- 1つの路線は特定の惑星のシミュレーション (Fauchez et al., 2022: TRAPPIST-1の惑星の計算など)
- もう1つの路線は仮想惑星 (簡単なモデル+理想的設定) における実験・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（平均水深で数m）を保持する惑星

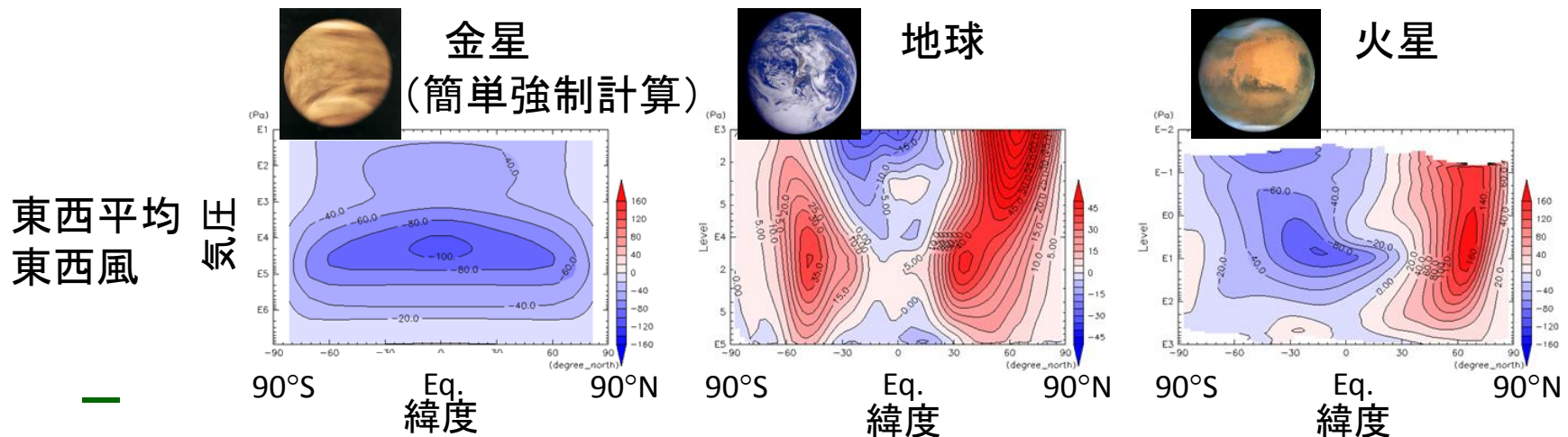
水惑星気候の 太陽定数依存性

モデル

- 惑星大気大循環モデル：DCPAM5

- <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>

- 開発方針：同一の枠組みで多様な惑星の計算を可能に



注意: 色の付け方と縦軸は図によって異なる。

- 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

灰色大気惑星の気候の太陽定数依存性

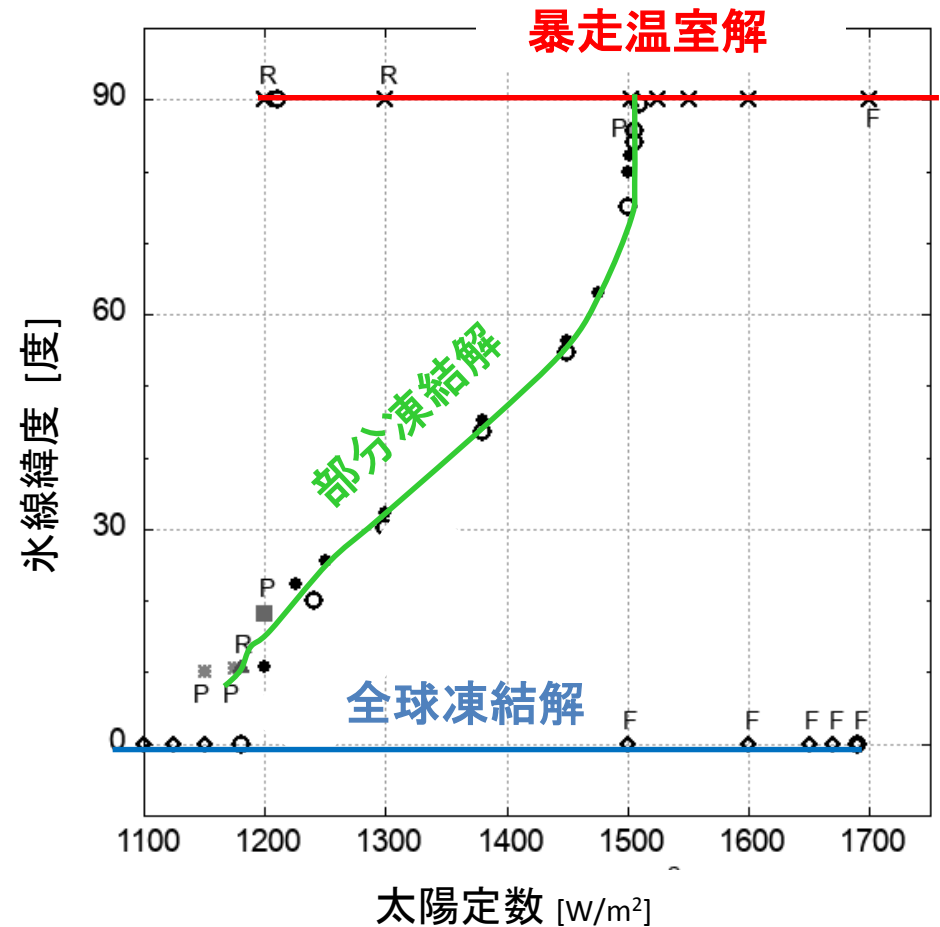
(Ishiwatari et al., 2021)

実験設定

- 放射：灰色大気
- 日射分布：地球の軌道パラメータで得られる年平均日射分布
- 太陽定数:1000~1700W/m²
- 表面：沼惑星(swamp ocean)設定。地表面は常に熱バランスしていると仮定。
- 地形無し、雲無し

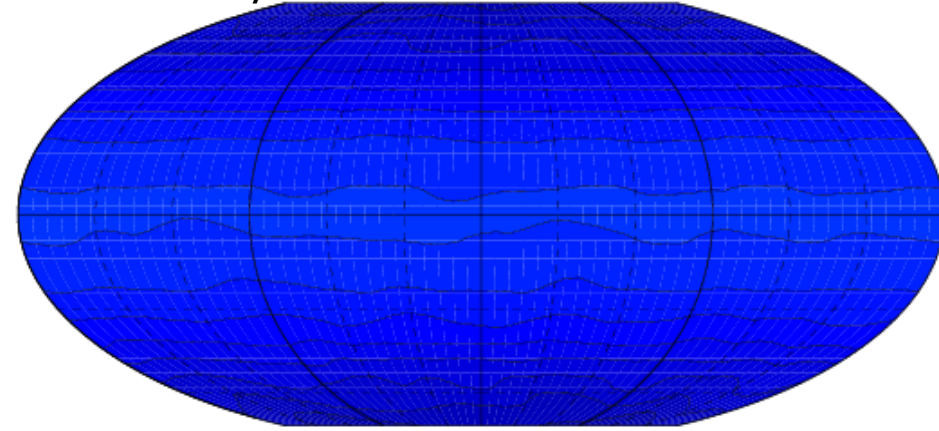
結果：複数の気候レジーム

- 部分凍結状態
- 全球凍結状態
- 暴走温室状態
- (氷無し平衡状態)

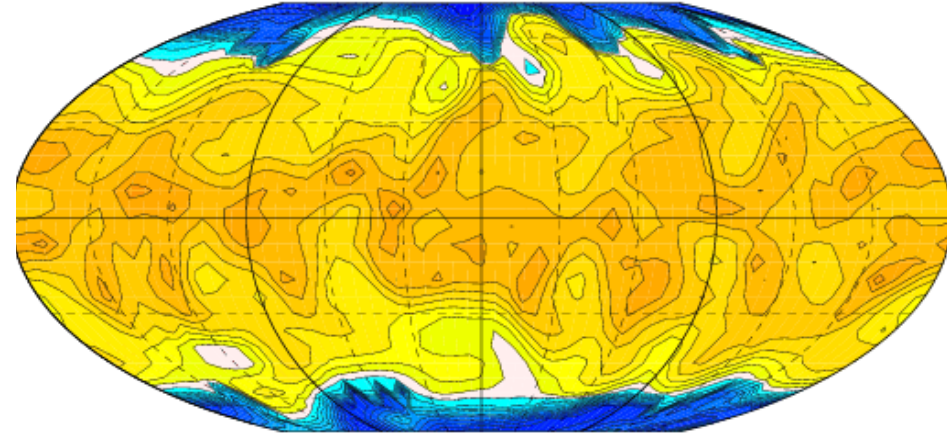


気候状態の太陽定数依存性(イメージ図)

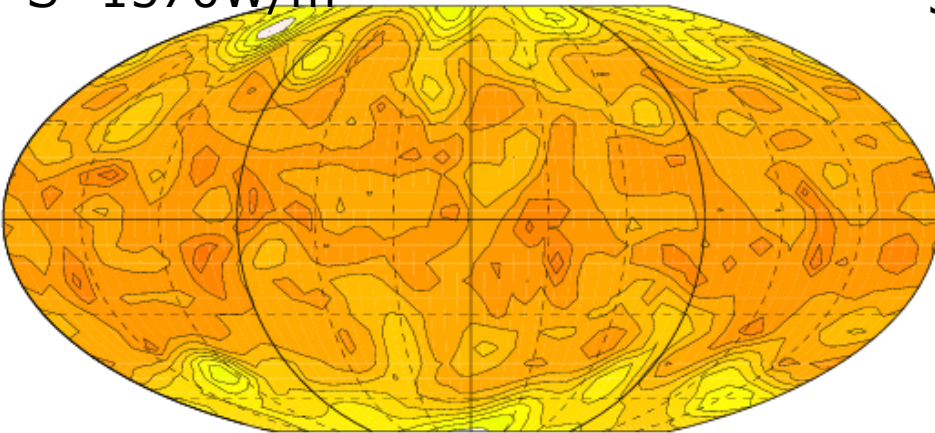
$S=1000\text{W/m}^2$ **全球凍結状態**



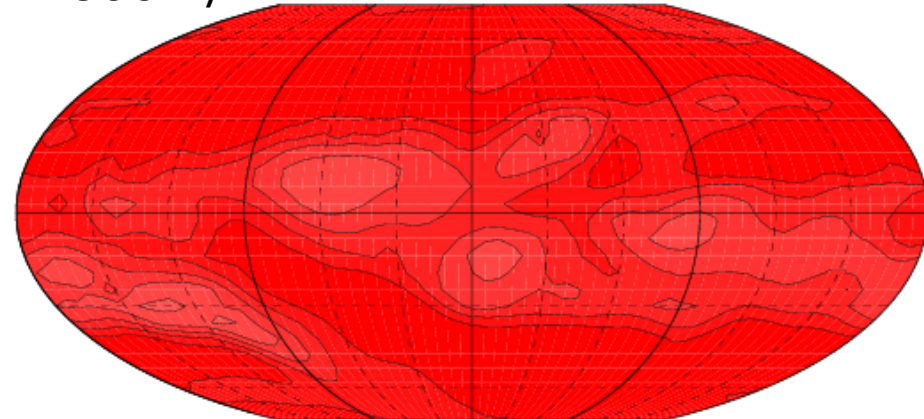
$S=1490\text{W/m}^2$ **部分凍結状態**



$S=1570\text{W/m}^2$



$S=1800\text{W/m}^2$ **暴走温室状態**

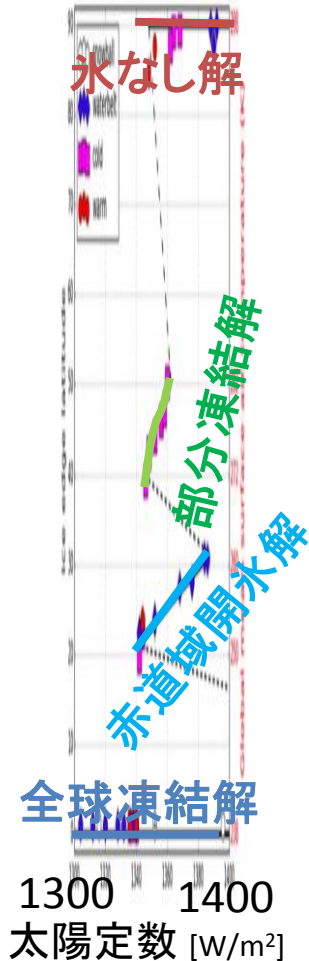


Ishiwatari et al.(2002, 2007)

海洋の循環を考えると別種のレジームが出現する可能性

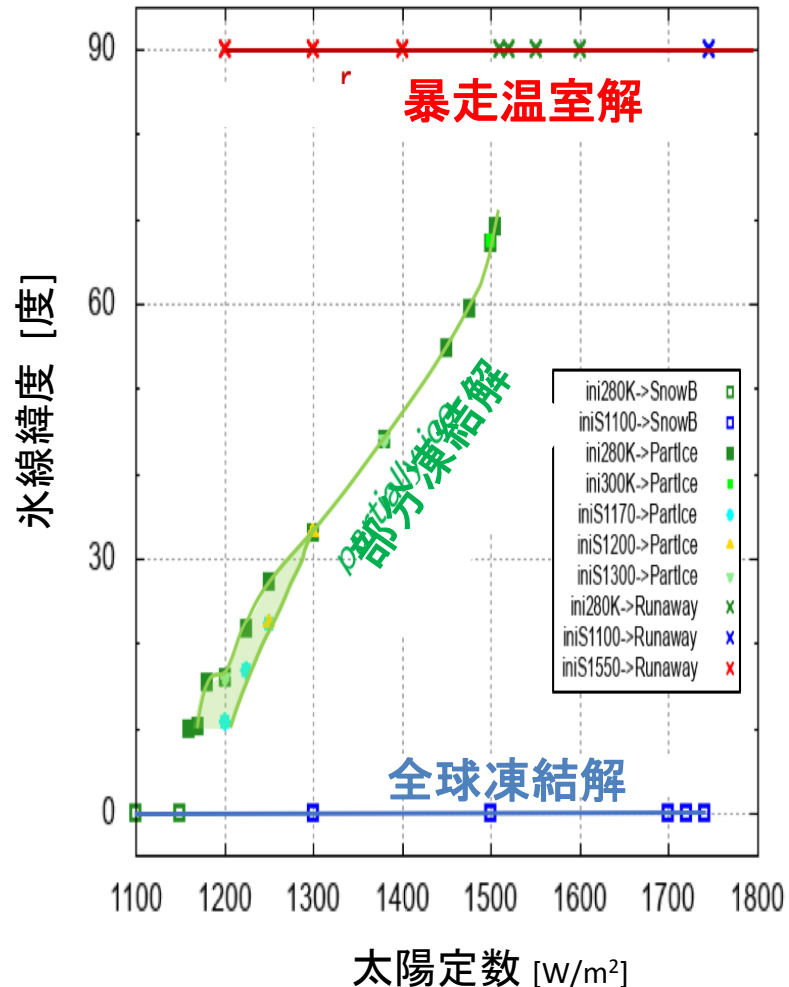
Rose (2015)

- 4バンド放射
- 3次元海洋大循環モデル



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



(河合他, 2021)

- Rose (2015)は新たな解のブランチを見つけた。Water belt と名付けられている
- 灰色放射で吸収係数を Ishiwatari et al. (2021) と同じ値とすると water belt 解が出ない

海惑星気候モデル

• 大気大循環モデル：DCPAM

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

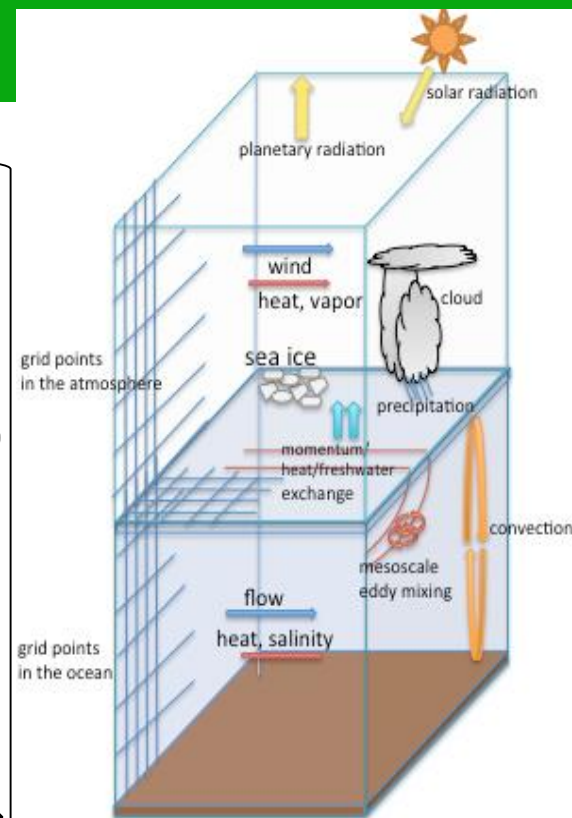
- 大気成分: 乾燥空気, 水蒸気
- 力学過程: 浅い大気, 静力学近似したナビエ・ストークス方程式
- 灰放射過程: 色放射スキーム (Nakajima et al., 1992)
- 乱流混合過程: Mellor and Yamada (1982), Louis et al. (1982)
- 凝結過程: Manabe et al. (1965), 雲なし
- 空間解像度: 水平格子間隔 約 6 度, 鉛直 16 層

• 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

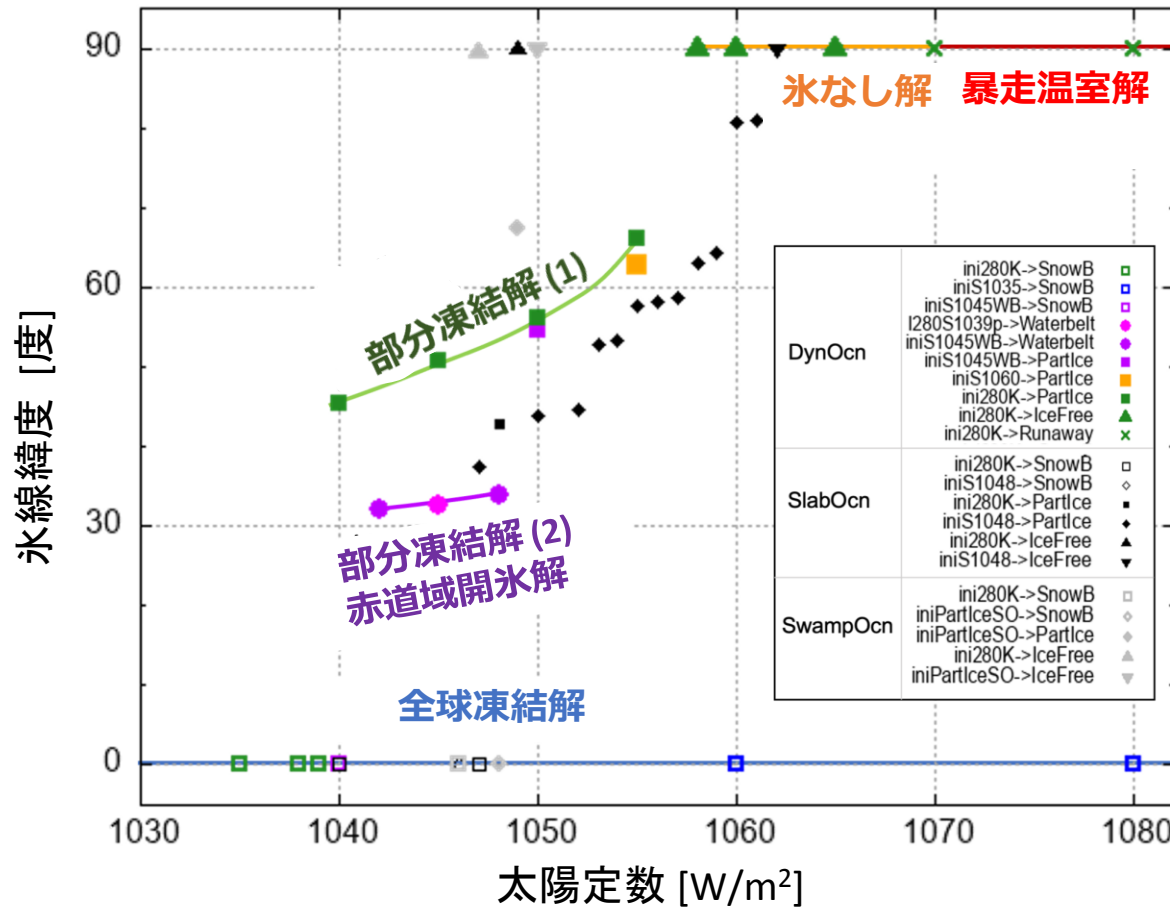
実験設定

- 太陽定数: 1000~1750 W/m²
- 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: $\kappa_n = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{kg}$

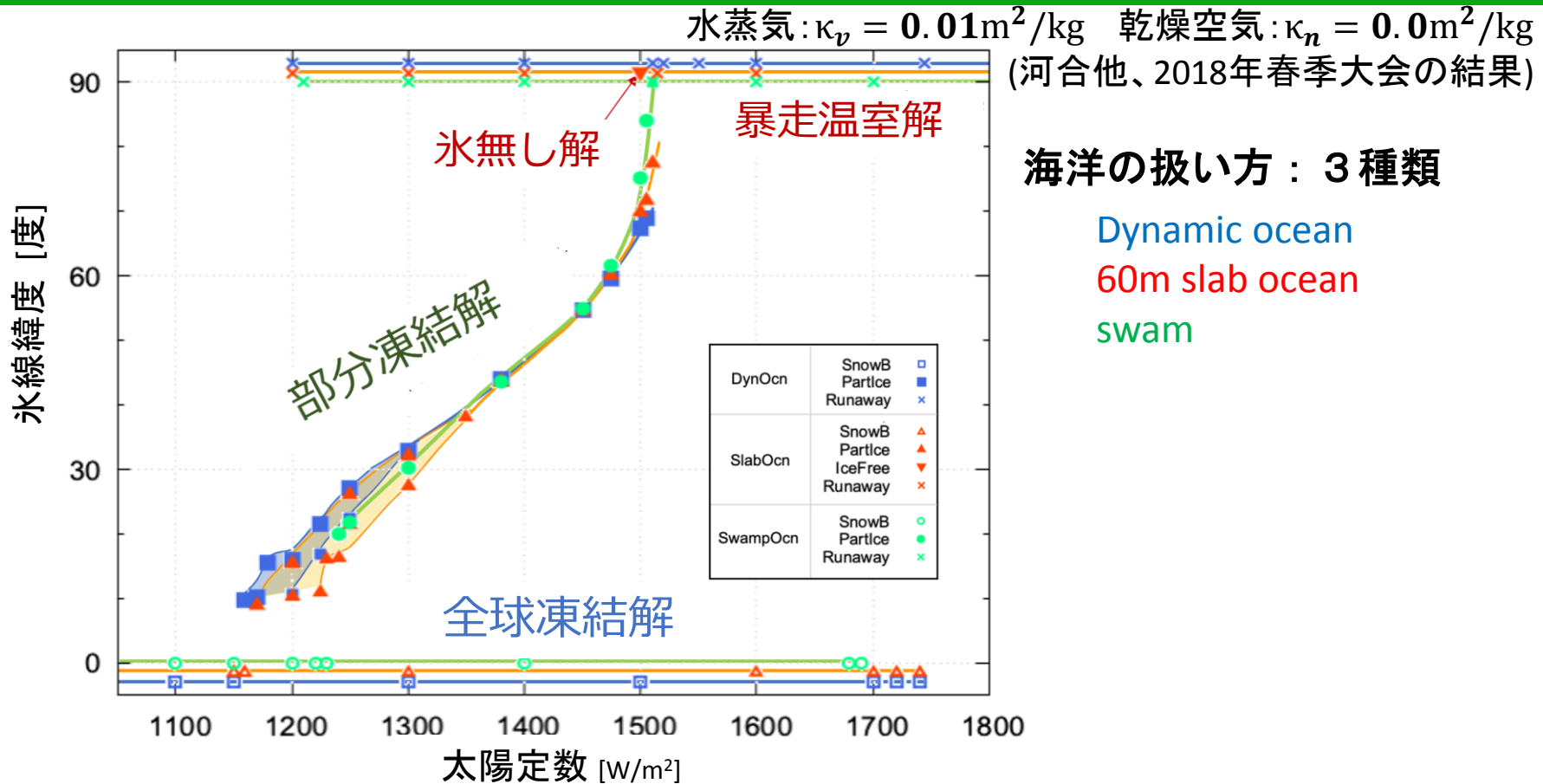


- 海の種類は5種

- 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

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

水惑星設定実験まとめ

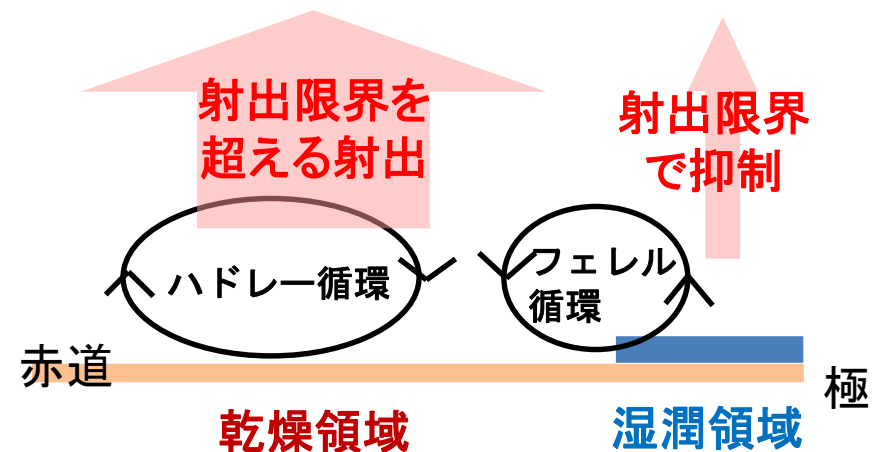
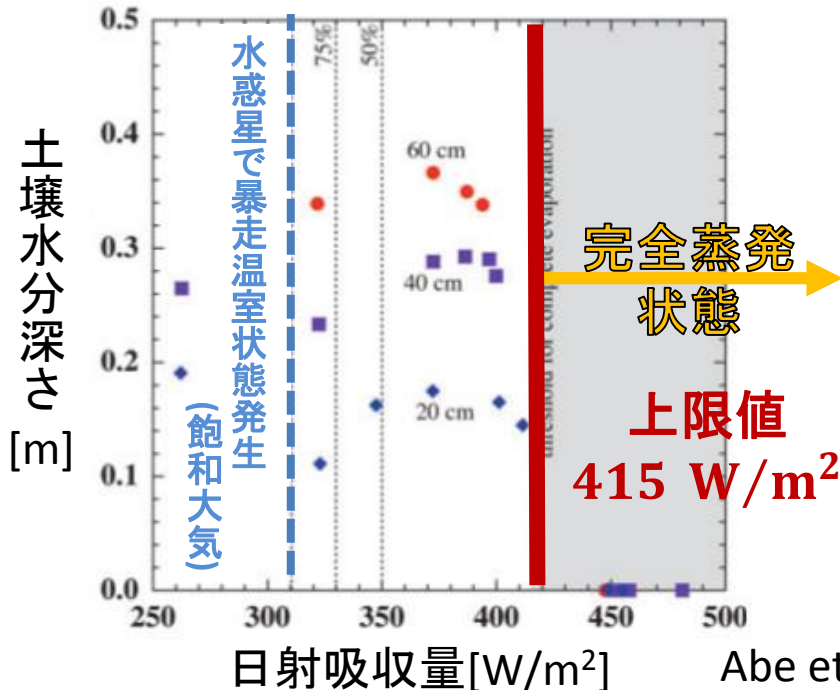
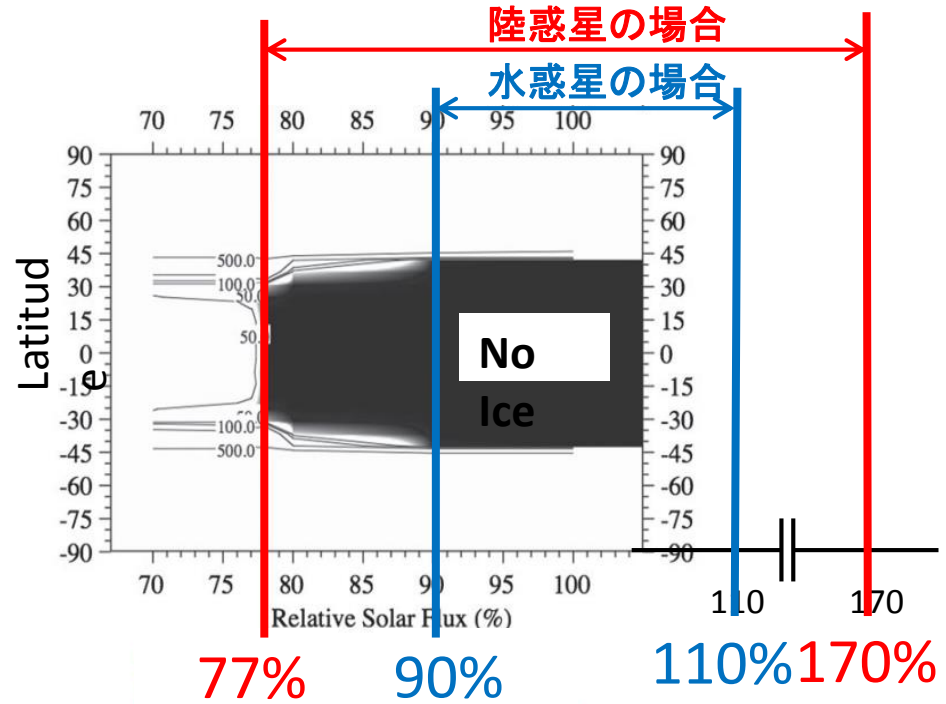
- 大気大循環モデルを用いた太陽定数依存性
 - 複数の気候レジームが存在
 - 全球凍結状態、部分凍結状態、赤道域開氷解 (water belt)、氷無し平衡状態、暴走温室状態
 - 気候レジーム図としてまとめられると嬉しい
 - Budyko (1969), Sellers (1969) などのエネルギーバランスモデルを用いた考察に接続できる
 - 多重解・解の安定性が見やすい

陸惑星気候の 太陽定数依存性

陸惑星設定の実験結果(Abe et al., 2011)

- 陸惑星設定のGCM実験 : Abe et al. (2005), Abe et al. (2011), 新田他 (2014)

- 水惑星よりも広い太陽定数範囲で惑星表層に液体の水が存在しそつ
- 高温状態では低緯度乾燥領域・高緯度湿潤領域の形成
 - 水惑星で暴走温室状態が発生する太陽定数でも表層に液体の水が存在可能



Abe et al. (2011)

我々がやってみると

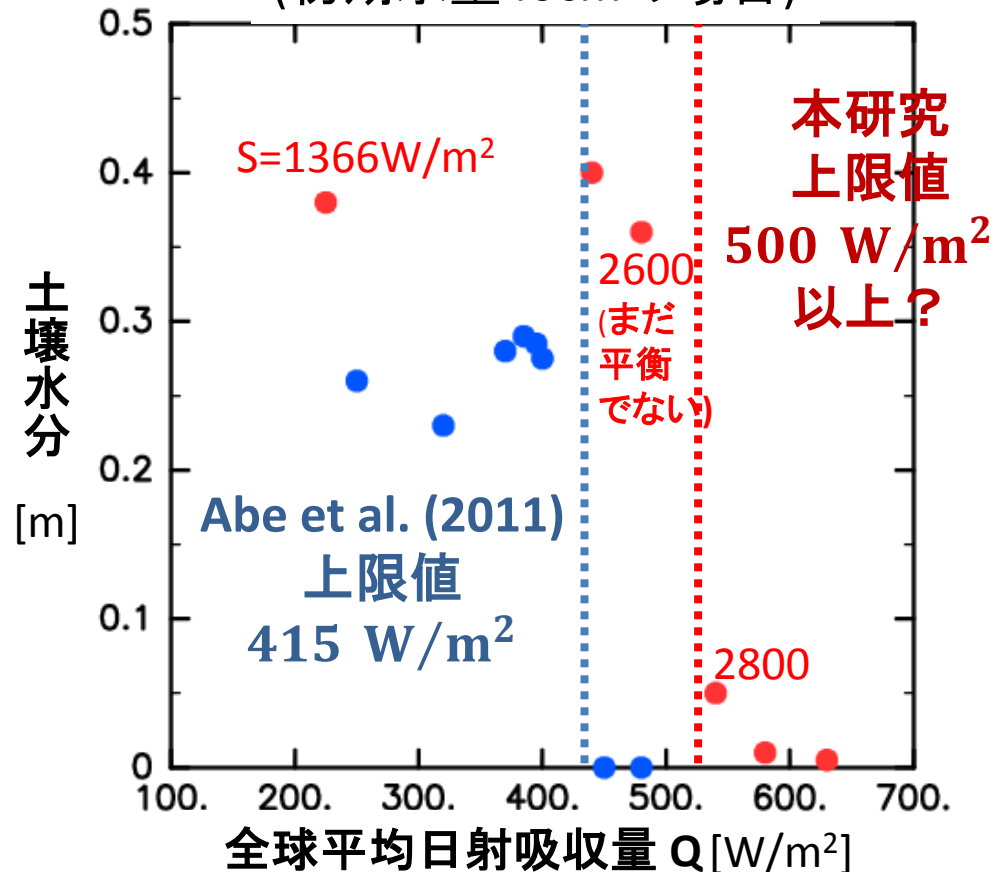
実験設定

- 放射：地球放射モデル (Chou and Lee, 1996; Chou et al., 2001)
- 表面：バケツモデル (Manabe, 1969)

結果：完全蒸発状態が発生する閾値がずれる？

- 現在のところ完全蒸発状態への移行は連続的に起こるか不連続的に起きるかはまだどちらともいえない。

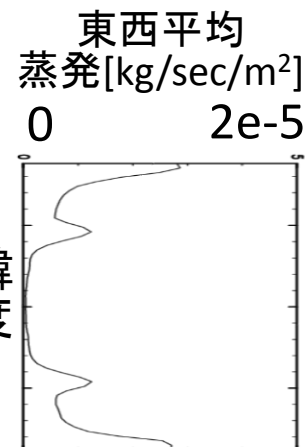
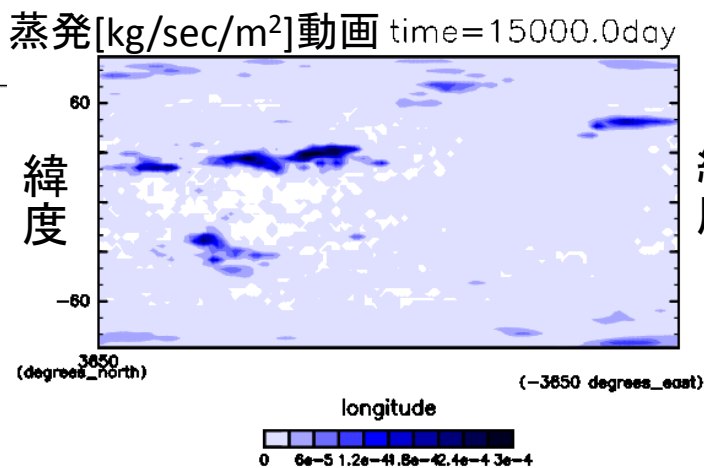
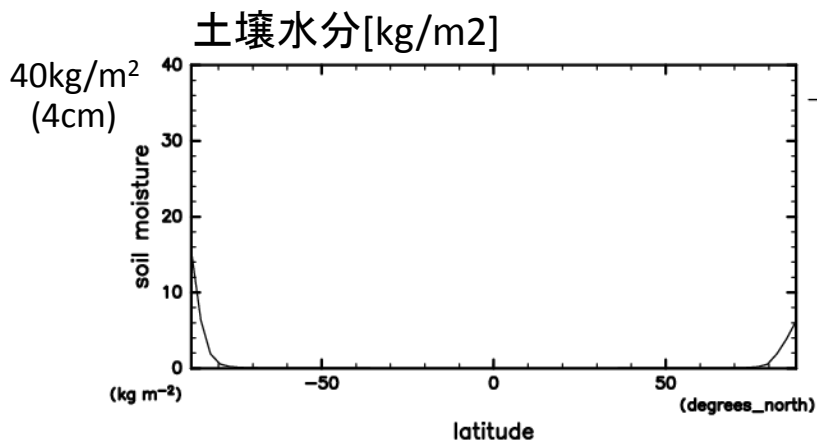
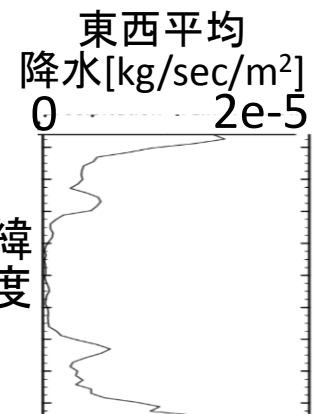
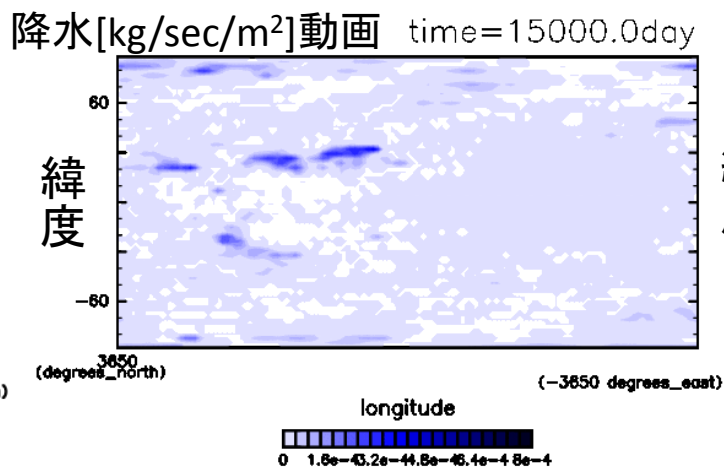
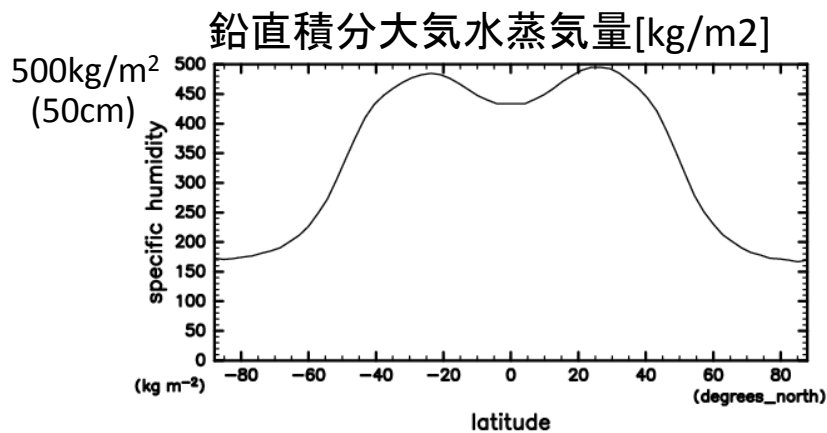
全球日射吸収量と土壌水分量の関係 (初期水量40cmの場合)



ほぼ完全蒸発した状態の水の挙動

- 大気水蒸気は低緯度域に蓄積
- まだわずかに土壌水分が極域に残存
- 少量の蒸発と降水が熱帯外で発生

S=3200W/m²の場合
 全球平均日射吸収量Q=630 W/m²



最後に

- 仮想的な惑星の計算で複数の気候状態が得られた
 - 水惑星：全球凍結状態、部分凍結状態、赤道域開氷解 (water belt)、氷無し平衡状態、暴走温室状態
 - 陸惑星：完全蒸発状態
- モデル設定としては
 - 大気組成、表面条件は固定
 - 積分時間はものすごく頑張って数万年（惑星進化のタイムスケールでは「一瞬」）
- しかし、表層環境の決定には地球内部まで含んだ物質循環・化学進化が重要なはず
 - というわけで講演者の皆さんにいろいろ教えて頂きたい