

# 研究進捗報告

水惑星の気候の太陽定数増減実験の途中経過

河合 佑太

海洋モデルミーティング (2017/03/22)

# 現在の立ち位置

- 海洋の扱いとして swamp, slab, dynamic ocean の三種類を考えた, 水惑星の太陽定数増減実験を実施中である.
  - 実験中に INTH07 で使われた湿潤対流調節コードにバグを発見
- 計算が終わった実験から, 結果の整理を始めている.
  - 気候レジーム図の作成
  - 各海洋の扱い・各太陽定数における大気場の図の作成
- 本スライドでは, 以下のことを記述する.
  - INTH07 の水惑星の気候の太陽定数依存性の再現性, バグ修正の影響
  - swamp, slab, dynamic ocean の気候レジーム図の比較 (少しだけ)

# 実験シリーズ

実験シリーズ	海洋の扱い	湿潤対流調節コード	積分時間
SWPO_I07MCA	swamp ocean	INTH07 のバグを含む	約 200 年
SWPO	swamp ocean	INTH07 のバグを修正	約 200 年
SLBO	slab ocean	INTH07 のバグを修正	約 200 年
DYNO	dynamic ocean	INTH07 のバグを修正	(周期的結合で)約 20,000 年

## 実験の目的

- SWPO\_I07MCA
  - INTH07 の水惑星の気候の太陽定数依存性が再現できるかを確認
- SWPO\_I07MCA , SWPO の比較
  - INTH07 における湿潤対流調節コードのバグの影響を確認
- SWPO, SLBO, DYNO の比較
  - 海洋の熱慣性・熱輸送が気候レジーム図に与える影響の検証

\* モデルの設定は付録参照

# 実験設定

- 惑星パラメータ
  - 現在地球と同じ
- 表面アルベド
  - 263 K 以下の場所で 0.5, それ以外の場所 0
- 強制
  - 年平均日平均した日射分布を大気上端で与える
- 太陽定数を振る範囲
  - 900 ~ 1800 [W/m<sup>2</sup>]
- 積分時間
  - swamp ocean, slab ocean 実験: 約 200 年
  - dynamic ocean 実験: 約 1 万年~2 万年 (周期的結合)
- 初期条件
  - ini280K
    - 静止等温の大気・海洋 (280 K)
    - 比湿一様 ( $10^{-3}$  kg/kg), 塩分一様 (35 psu)
  - iniS1000, iniS900
    - それぞれの海洋の扱いで得られた全球凍結状態が初期値.
  - iniS1600
    - それぞれの海洋の扱いで得られた暴走温室状態(5000 日頃)が初期値.
  - iniPartIce
    - 最寄りの太陽定数で実現される部分凍結状態が初期値

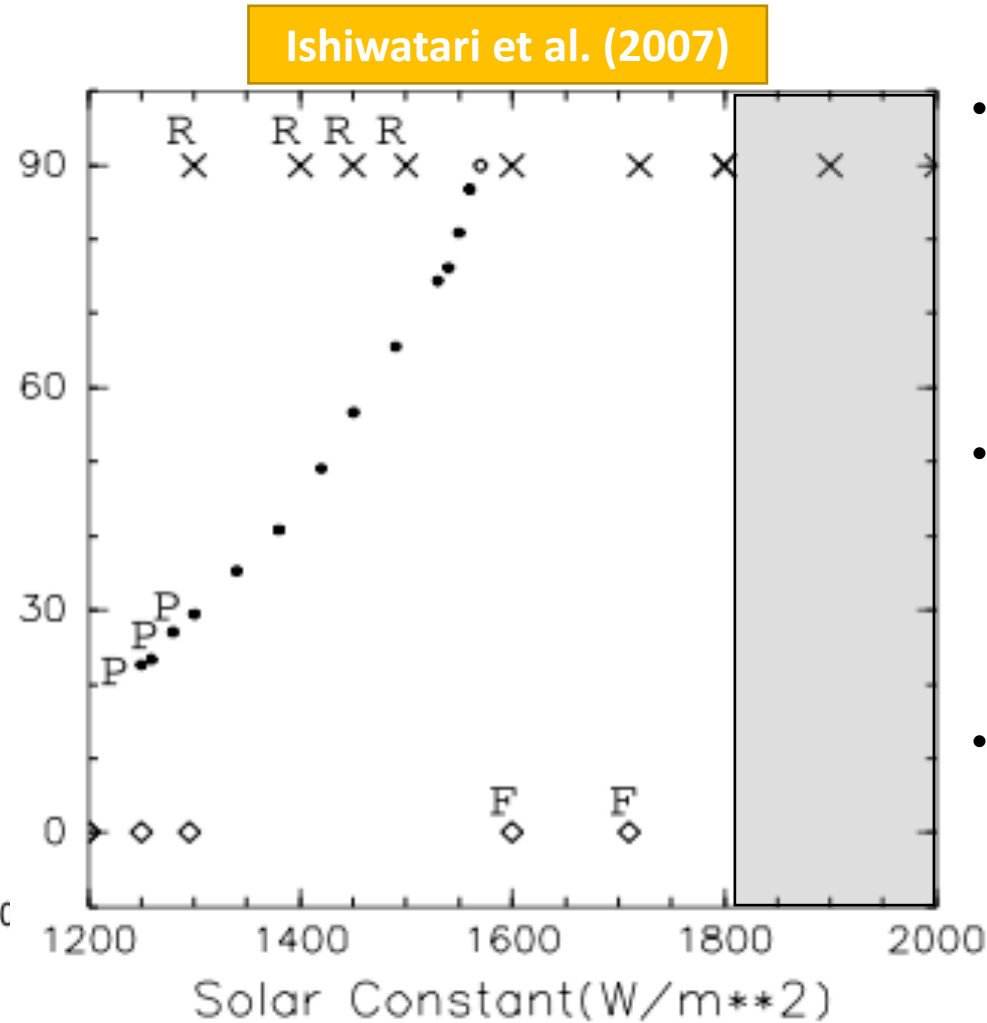
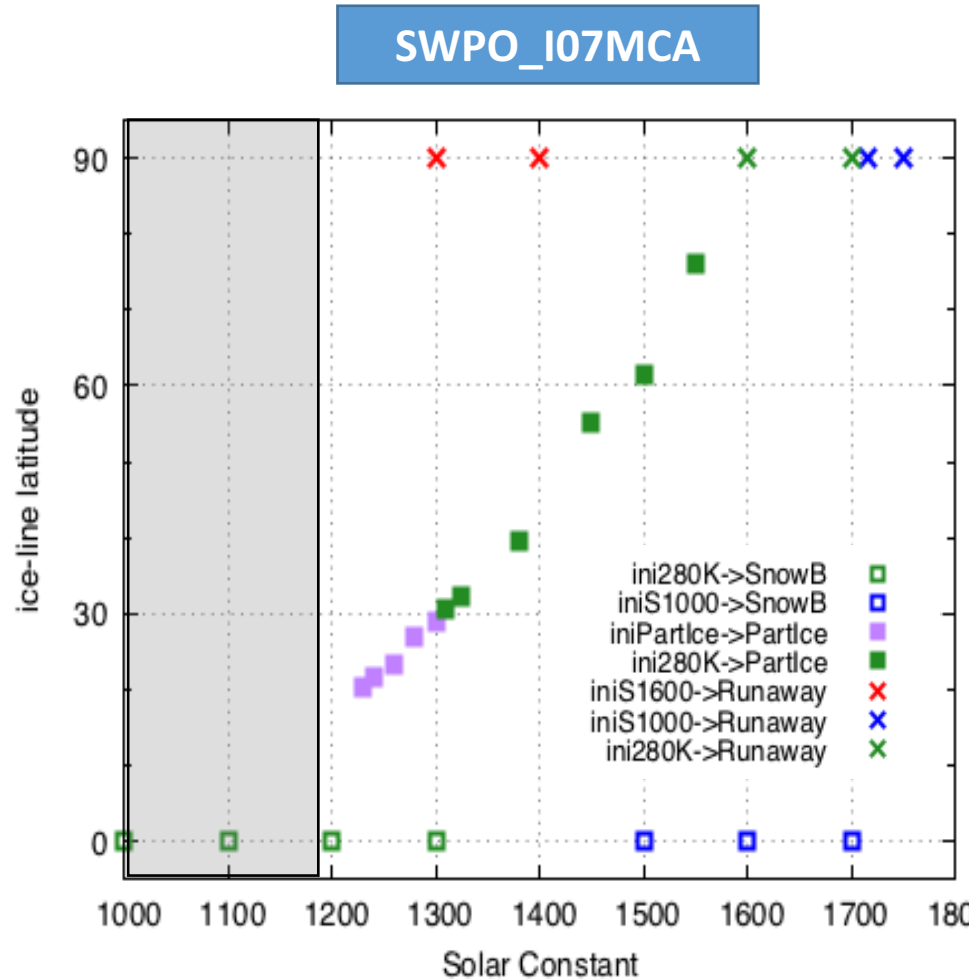
結果:

# swamp ocean 実験

- INTH07 の太陽定数増減実験の再現性
- INTH07 での湿潤対流調節スキームのバグの影響

# INTH07 の太陽定数増減実験の結果の再現性

- 気候レジーム図 (太陽定数に対する氷線緯度)



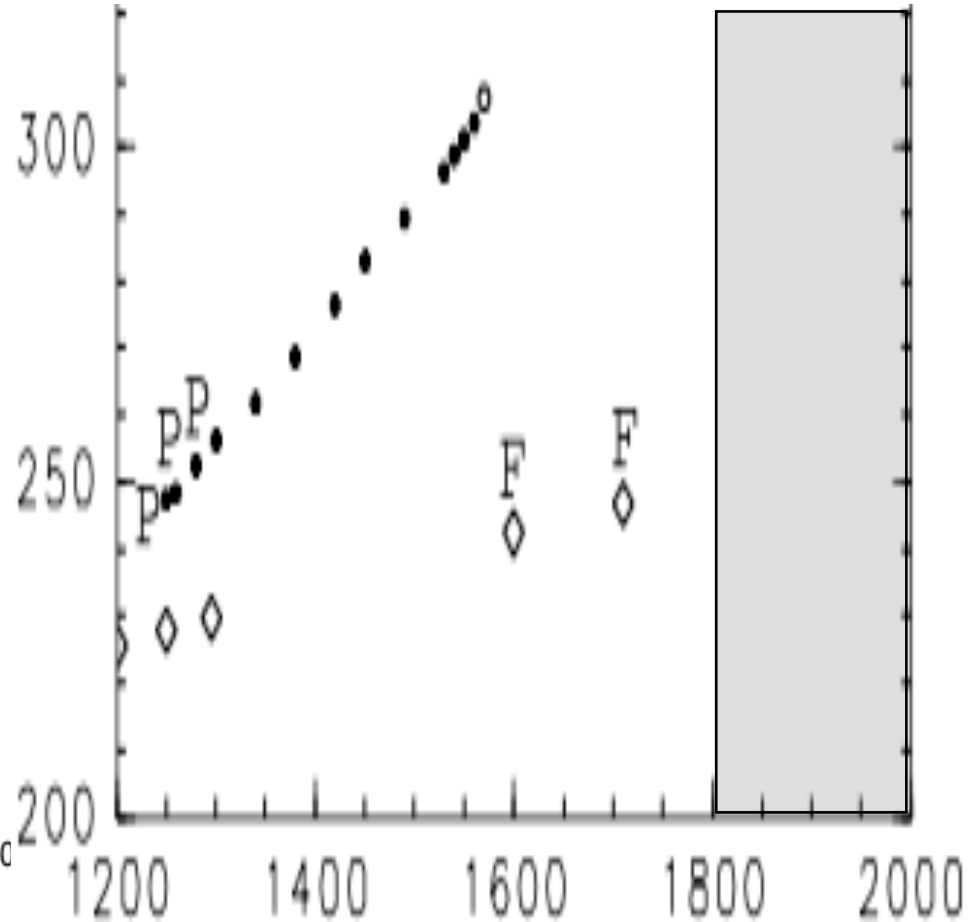
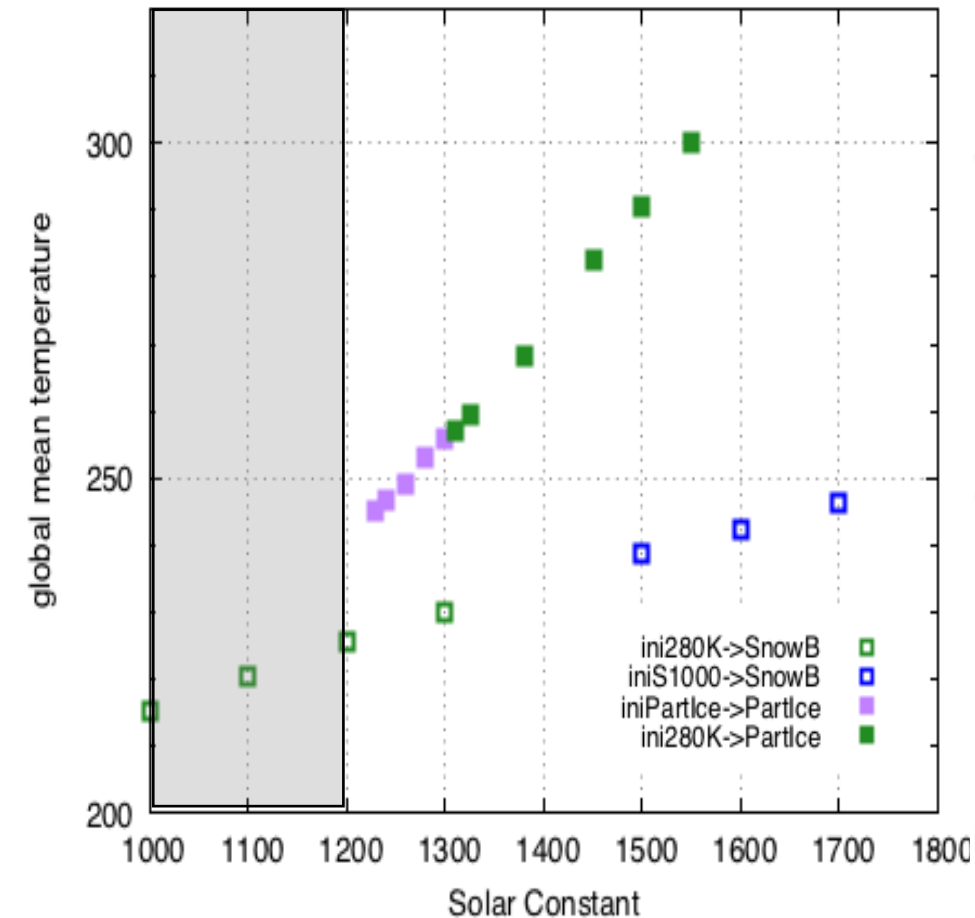
- ini280K から始めた場合, 全球凍結・部分凍結・氷なし・暴走温室状態を得る太陽定数は概ね INTH07 と同じ.
- iniS1000, iniS1600 から始めた場合, 他の気候状態に遷移する太陽定数も INTH07 と同程度.
- iniPartlce から始めた場合, 逆回りのハドレー循環を特徴とする部分凍結解が本計算でも得られた.

# INTH07 の太陽定数増減実験の結果の再現性

- 気候レジーム図 (太陽定数に対する全球平均表面温度)

SWPO\_I07MCA

Ishiwatari et al. (2007)

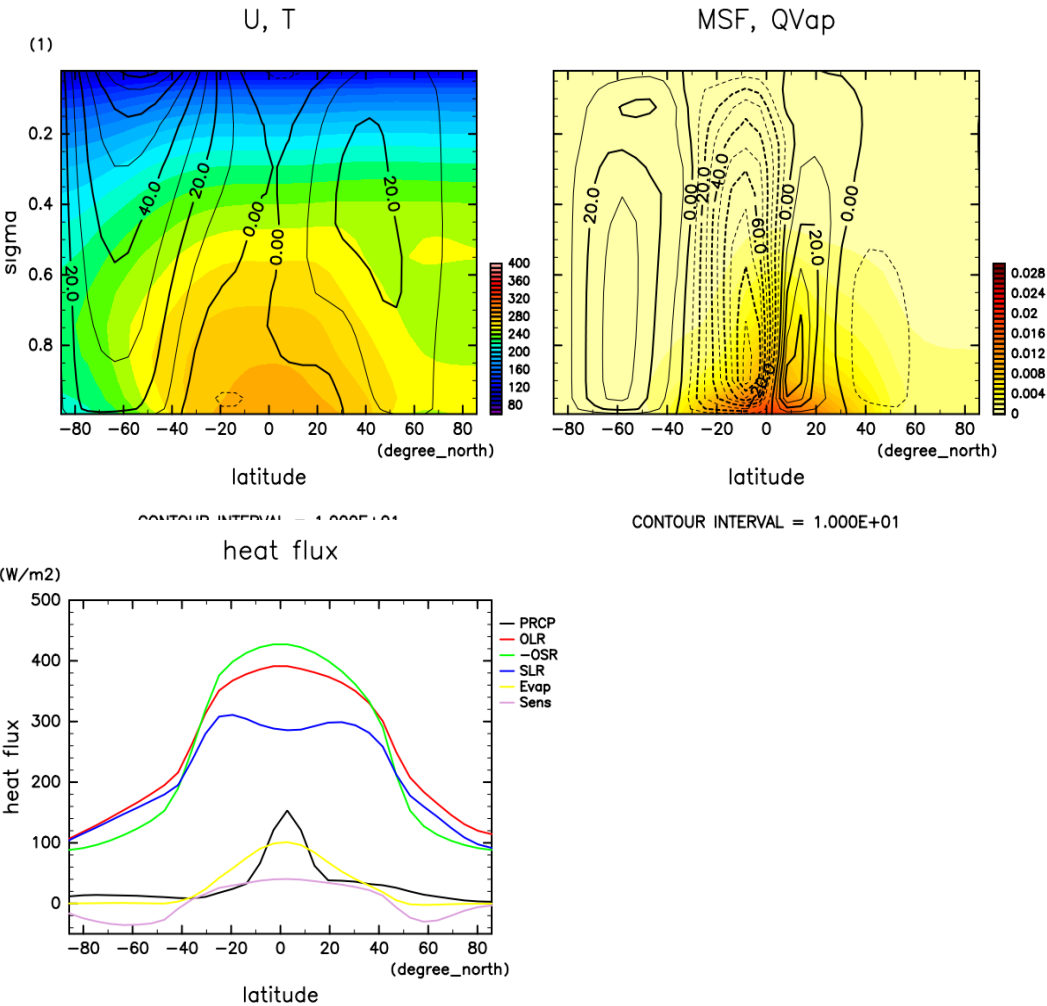


- 平衡状態における惑星表面温度の全球平均値の太陽定数依存性も, INTH07 をよく再現している.

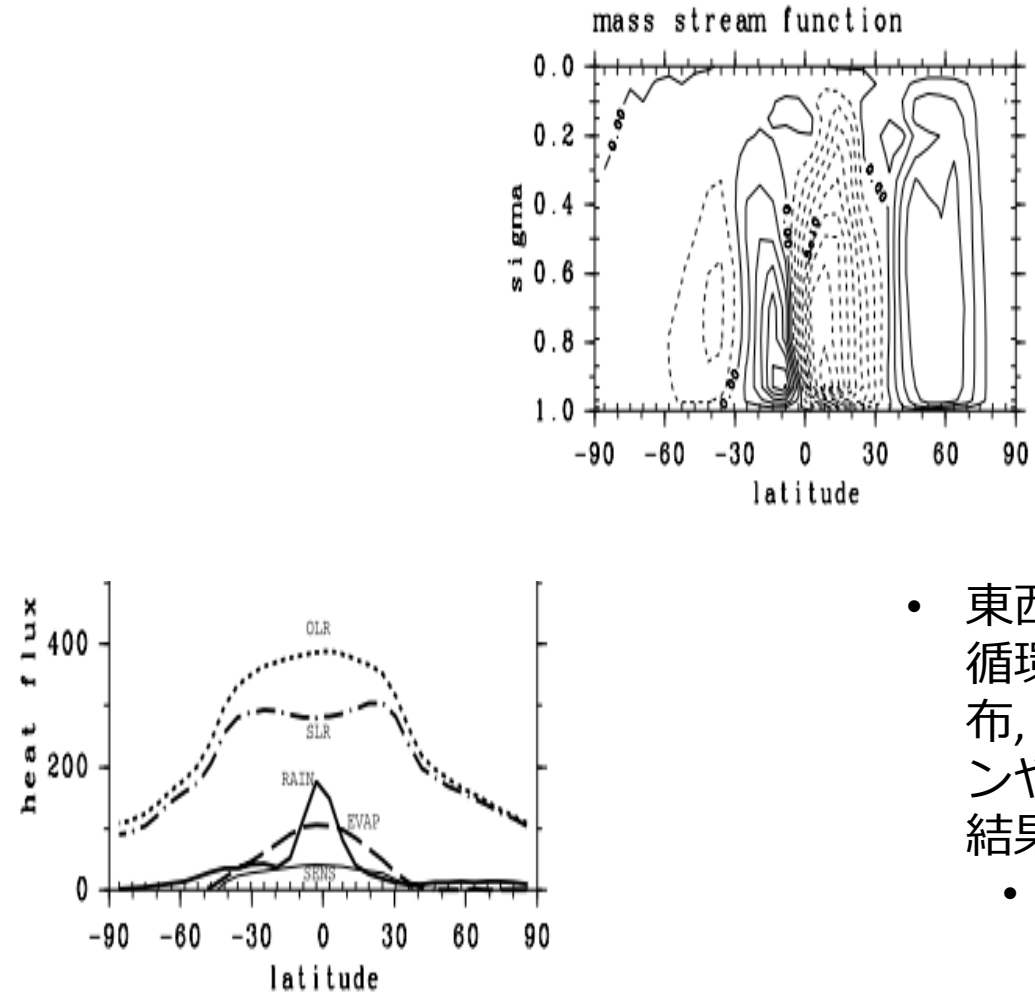
# INTH07 の太陽定数増減実験の結果の再現性

- 大気場, 熱フラックス ( $S=1380 \text{ W/m}^2$  の場合)

SWPO\_I07MCA (バグ修正前)



Ishiwatari et al. (2007)

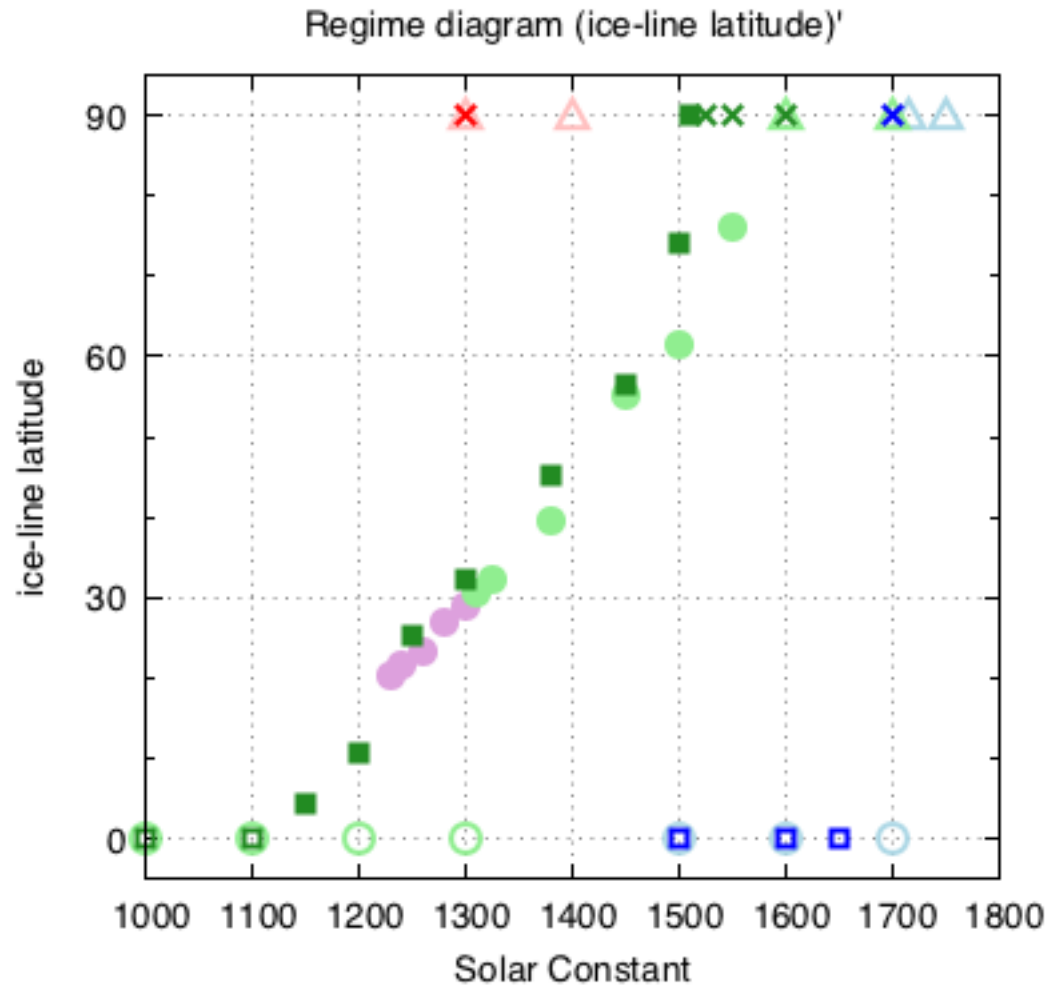


- 東西ジェット, 子午面循環, 温度の子午面分布, 降水分布のパターンや強度はINTH07 と結果とよく似ている
  - 大気場の半球非対称性も再現された



# INTH07 の湿潤対流調節スキームのバグの影響

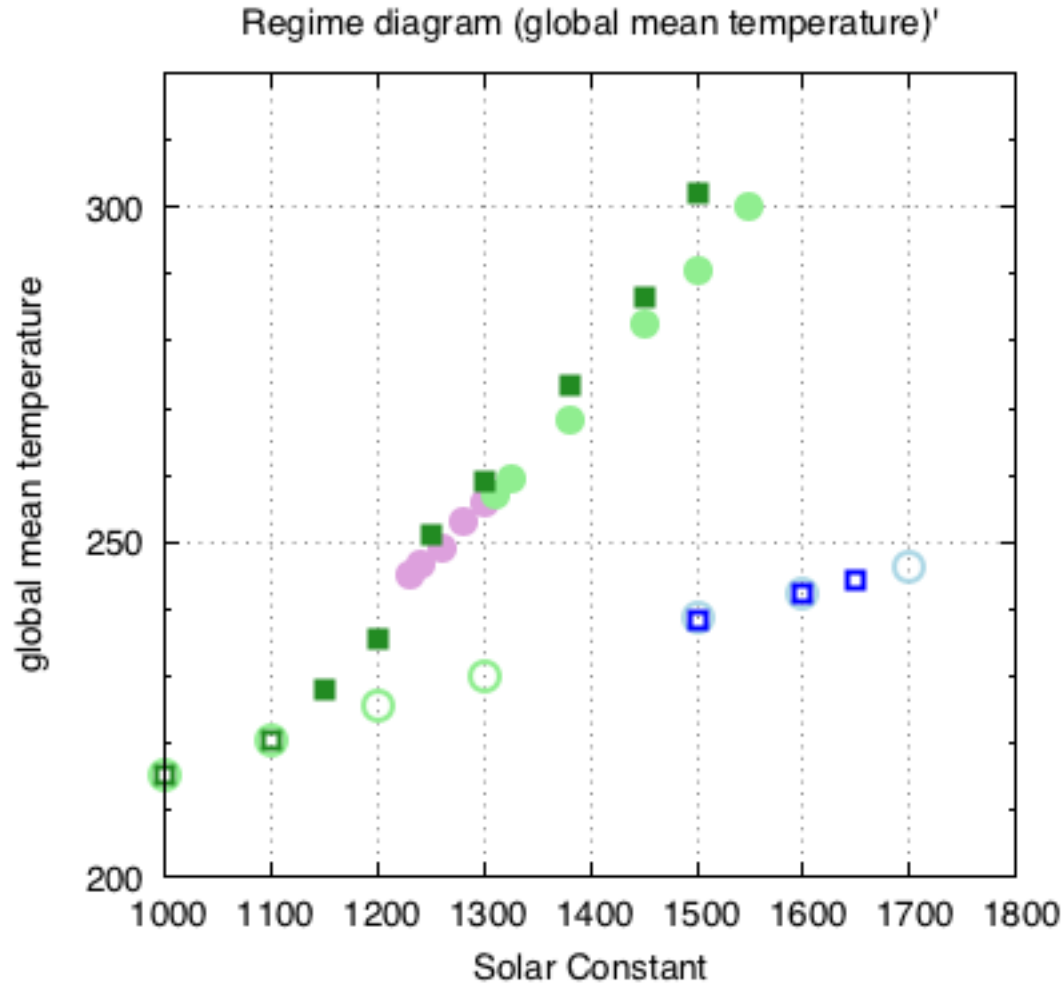
- 気候レジーム図 (太陽定数に対する氷線緯度)



- 修正後の氷線緯度は、同じ太陽定数に対して全体的に後退した
- 修正後、ini280K に対して全球凍結解を得る太陽定数は、150 W/m<sup>2</sup> ほど小さくなった。
- 修正後、ini280K に対して暴走温室解を得る太陽定数は、50 W/m<sup>2</sup> ほど小さくなった。
- 修正後は、大氷冠不安定が現れなくなった。
  - 赤道近傍だけ開氷している状態は、少なくとも250年ぐらいは維持しているように見える。

# INTH07 の湿潤対流調節スキームのバグの影響

- 気候レジーム図 (太陽定数に対する氷線緯度)



- 修正後の氷線緯度が後退したことと対応して、部分凍結状態の全球平均表面温度は、修正後高くなる。
- 全球凍結状態では、同じ太陽定数に対して修正前後の差は小さい。

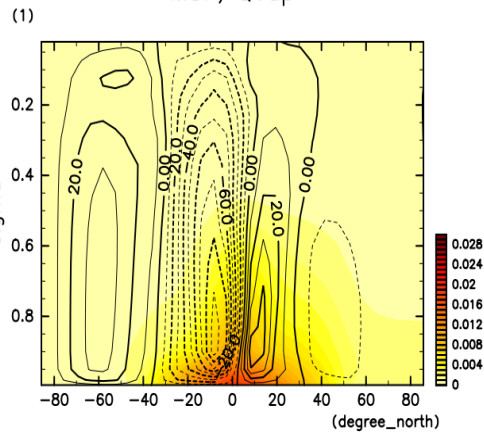
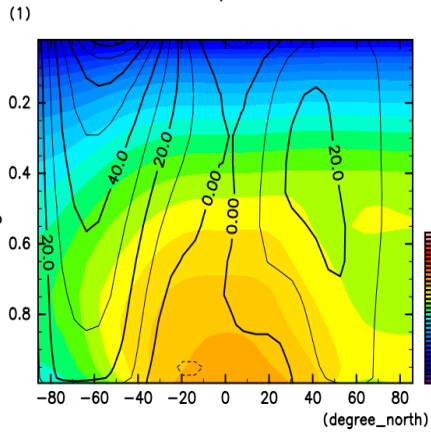
# INTH07 の湿潤対流調節スキームのバグの影響

- 大気場, 熱フラックス ( $S=1380 \text{ W/m}^2$  の場合)

SWPO\_I07MCA (バグ修正前)

U, T

MSF, QVap

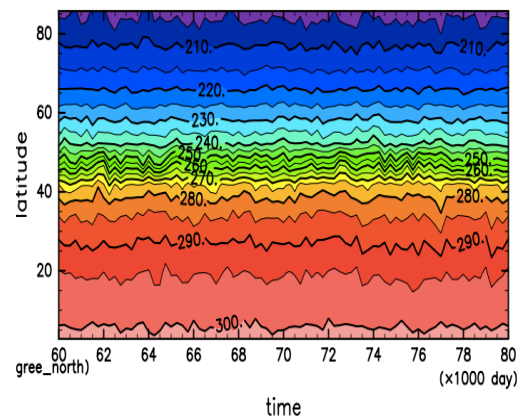
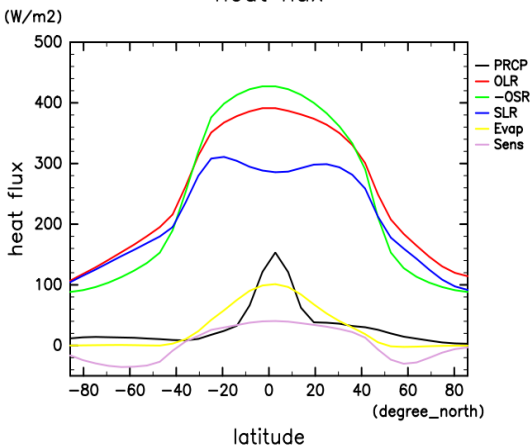


CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01

CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01

heat flux

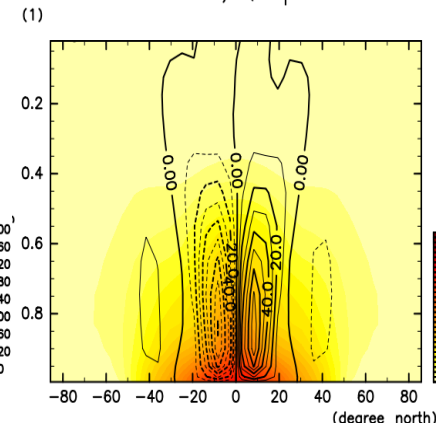
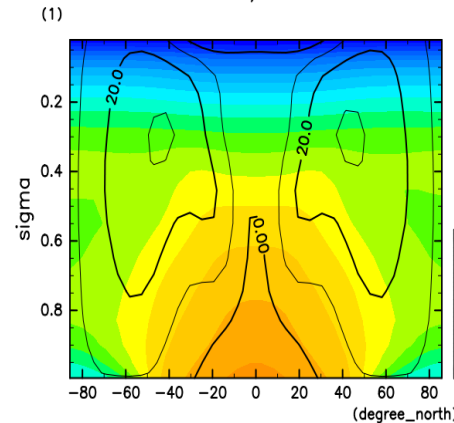
惑星表面温度の変動性



SWAMPO (バグ修正後)

U, T

MSF, QVap

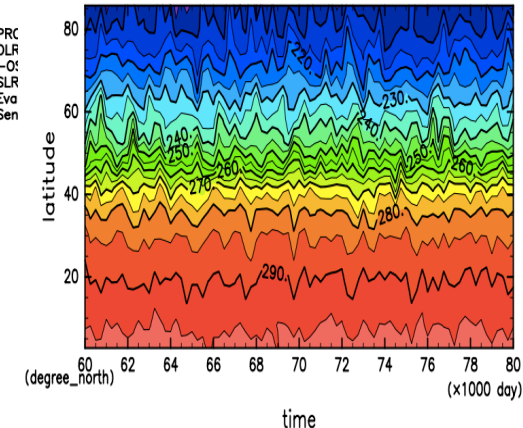
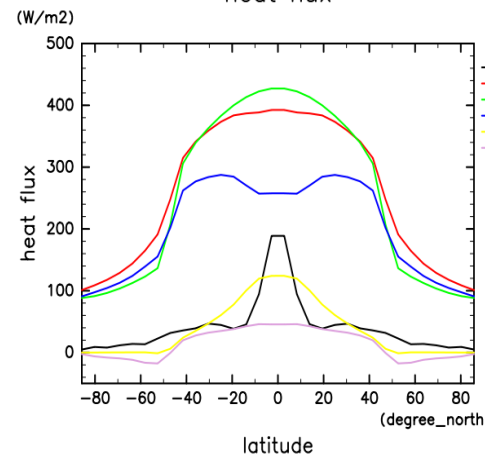


CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01

CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01

heat flux

惑星表面温度の変動性



- 修正後は, 極域の東西ジェットが弱くなる.
  - 風応力に影響大
- 修正後は, 半球対称的な分布になった.
- 修正後は, SSTの空間的・時間的変動が小さくなる.

結果:

swamp, slab, dynamic ocean 実験結果の比較

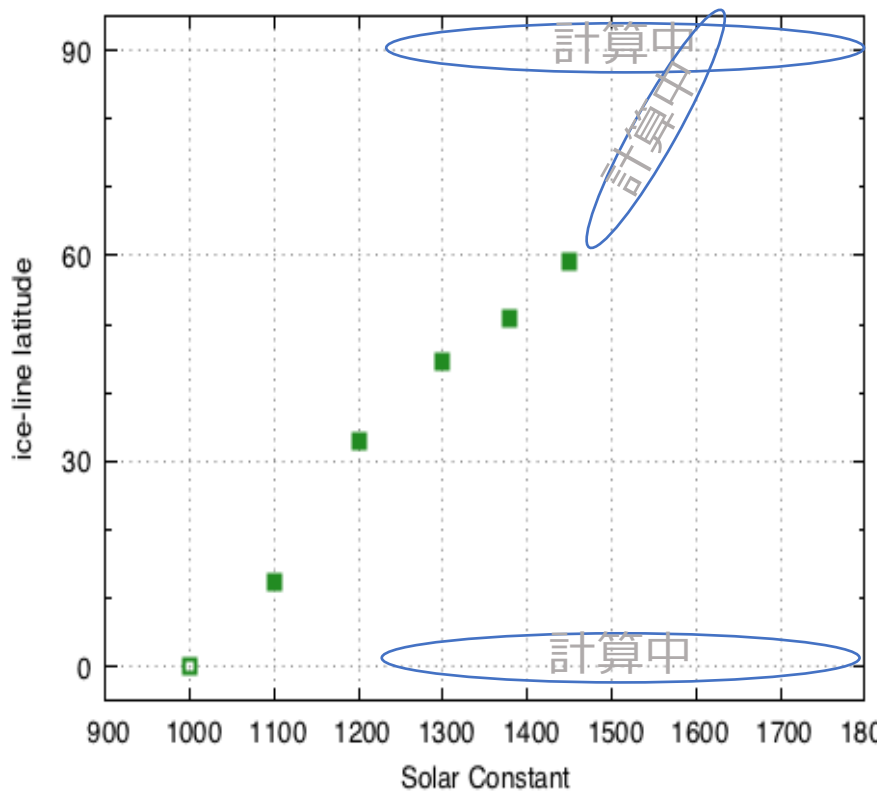
# 気候レジーム図 (太陽定数に対する氷線緯度)

DynOcn

SlabOcn

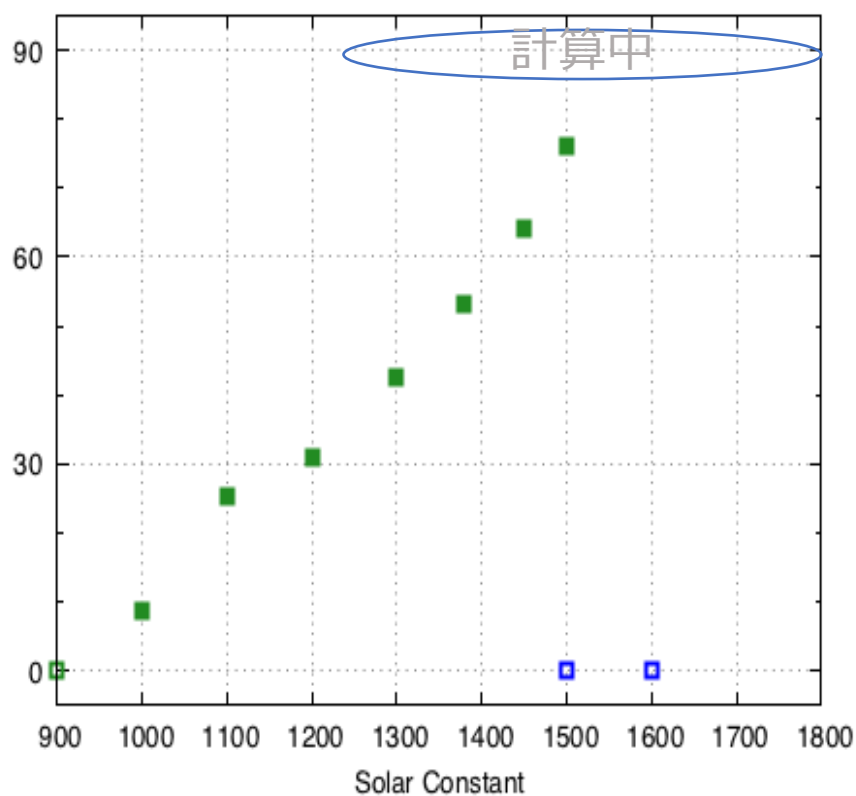
SwampOcn

Regime diagram (ice-line latitude)



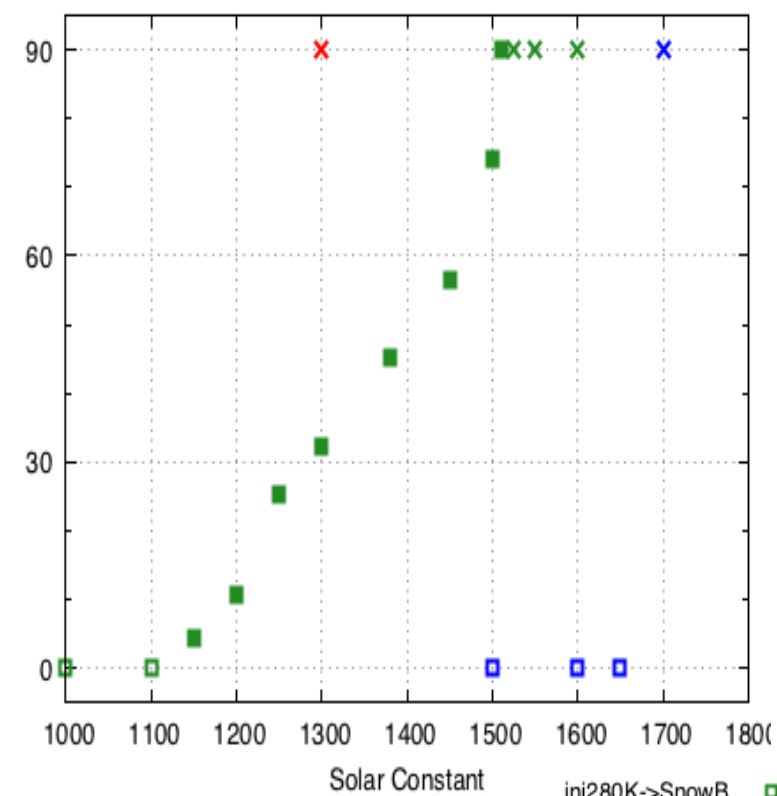
ini280K->SnowB □  
ini280K->PartIce ■

Regime diagram (ice-line latitude)



ini280K->SnowB □  
iniS900->SnowB □  
ini280K->PartIce ■

Regime diagram (ice-line latitude)



ini280K->SnowB □  
iniS1000->SnowB □  
ini280K->PartIce ■  
iniS1600->Runaway ×  
iniS1000->Runaway ×  
ini280K->PartIce ×

\* 同じ太陽定数に対する部分凍結状態の氷線緯度は, DynOcn が最も高い. (大気・海洋熱輸送の分布を要チェック)

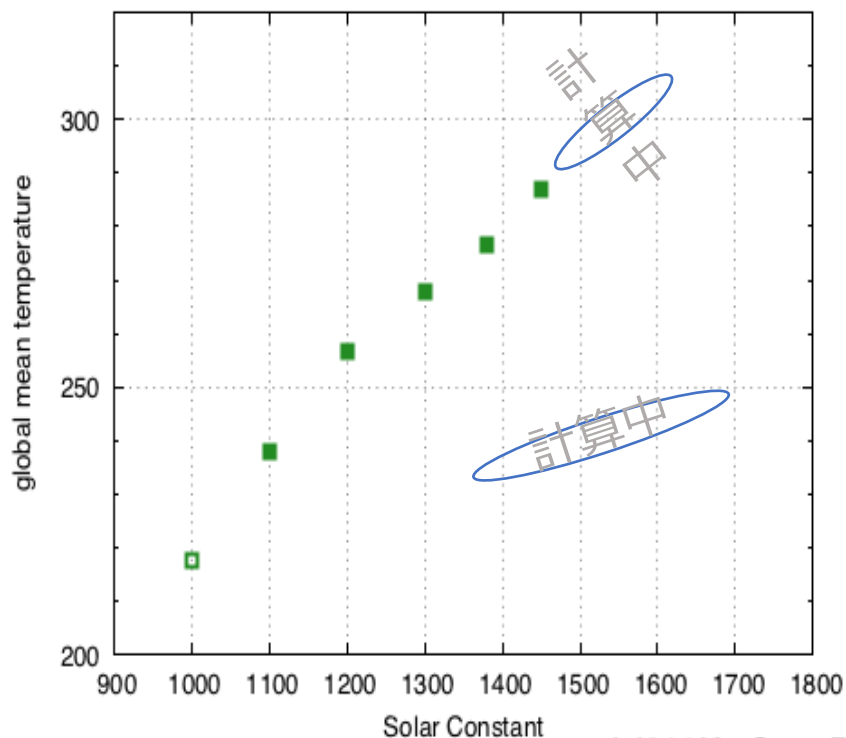
# 気候レジーム図 (太陽定数に対する全球平均温度)

DynOcn

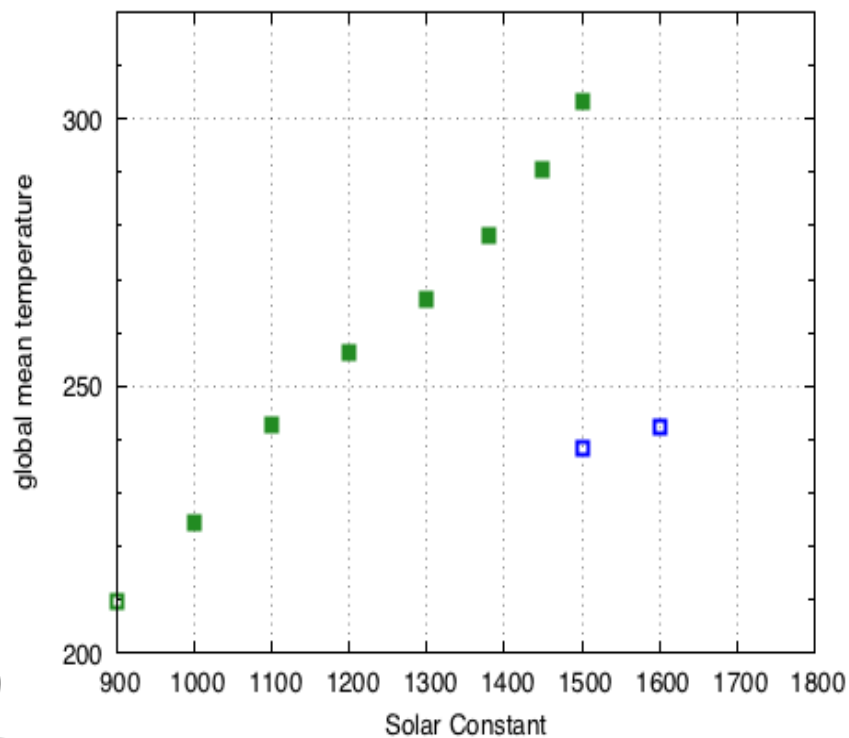
SlabOcn

SwampOcn

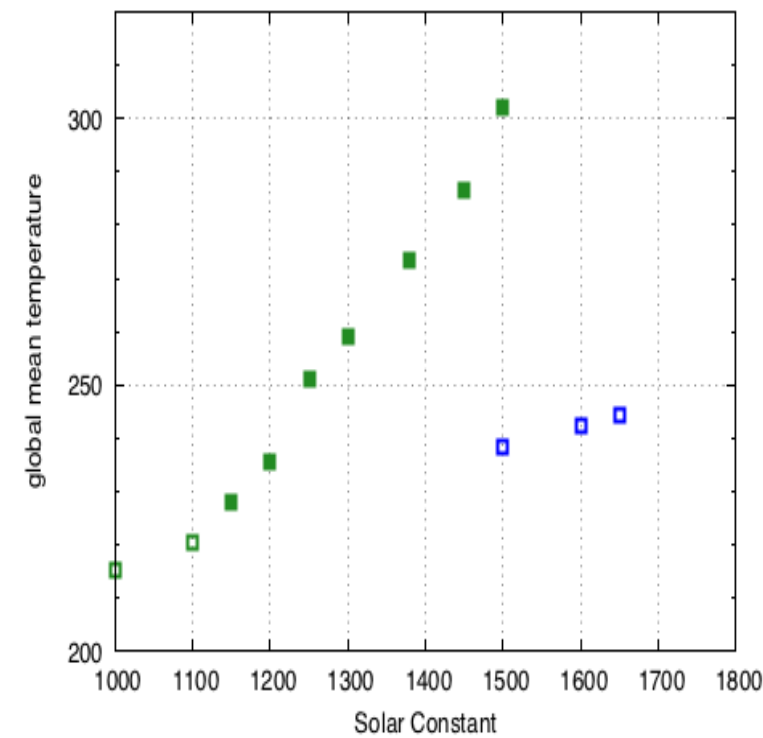
Regime diagram (global mean temperature)'



Regime diagram (global mean temperature)'



Regime diagram (global mean temperature)'



ini280K->SnowB □  
ini280K->Partlce ■

ini280K->SnowB □  
iniS900->SnowB □  
ini280K->Partlce ■

ini280K->SnowB □  
iniS1000->SnowB □  
ini280K->Partlce ■

\* 同じ太陽定数に対する部分凍結状態の全球平均表面温度は, SwampOcn が最も低い.

\* DynOcn と SlabOcn ではあまり違いはないように見える. (緯度分布を要チェック)

# まとめ

- 海洋の扱いとして swamp, slab, dynamic ocean の三種類を考えた, 水惑星の太陽定数増減実験を実施中であり, 並行して結果の整理(気候レジーム図の作成, 大気海洋場の分布図の作成)を始めている.
- ここでは, その途中経過報告として, 以下のことを述べた
  - INTH07 の水惑星の気候の太陽定数依存性の再現性
    - INTH07 の湿潤対流調節コードのバグを含めると, INTH07 と概ね同様の結果を得る.
  - バグ修正の影響
    - 修正後, 特に部分凍結状態において, 氷線緯度が後退し, 全球惑星表面温度が上昇する.
  - swamp, slab, dynamic ocean の気候レジーム図の比較
    - 同じ太陽定数に対する部分凍結状態の氷線緯度は, DynOcn が最も高い.
    - 同じ太陽定数に対する部分凍結状態の全球平均表面温度は, SwampOcn が最も低い.
    - slab ocean, swamp ocean の多重解の存在の詳細を調べるために, さらに実験ケースを増やす必要がある.

# 付録



# モデル設定

- 大気モデル (INTH07 と同様の大気モデルの設定)
  - 大気成分
    - 乾燥空気, 水蒸気 (分子量はともに  $\sim 18$  [g/mol] に設定)
  - 力学過程
    - プリミティブ方程式系, spectral Eulerian method
  - 放射過程
    - 灰色大気放射スキーム (水蒸気の吸収係数:  $0.01$  [ $\text{m}^2/\text{kg}$ ]) (Nakajima et al., 1992)
  - 乱流混合過程
    - Mellor and Yamada (1982) level 2 scheme
    - バルク公式 (Louis et al., 1982)
  - 凝結過程
    - 湿潤対流調節スキーム (Manabe et al, 1965)
      - ただし, 水蒸気少ない近似をしていない (Ishiwatari et al., 2002)
    - 大規模凝結スキーム (Manabe et al, 1965)
    - 雲なし
  - モデル解像度
    - 太陽定数  $1450 \text{ W/m}^2$  以下 : T21L16
    - 太陽定数  $1450 \text{ W/m}^2$  以上 : T21L32
- スポンジ層, 鉛直フィルタ
  - L16 : なし
  - L32 : 上部 7 層

# モデル設定

- 海洋モデルの設定
  - 力学過程
    - 静力学ブジネスク方程式系
  - 乱流混合過程
- モデル解像度
  - 64x60 (P142L60)