

研究進捗報告

水惑星の気候の 太陽定数増減実験

河合 佑太

(海洋モデルミーティング 2017/05/02)

現在位置

- 水惑星の気候の太陽定数増減実験を行なっている.
 - swamp, slab, dynamic ocean 実験の気候レジーム図を大まかに作成
 - swamp ocean 実験の結果の解析, まとめページ作成
- 実験を進める中で, いくつかの問題に気がついた....
 - INTH07 の湿潤対流調節スキームのバグ
 - バグ修正, 影響の確認
 - 大気モデル T21 では大氷冠不安定が明瞭に現れない
 - 水平解像度不足が関係するようなので, 太陽定数が小さい設定では T42 計算を実施
 - dynamic ocean 実験において, waterbelt 的な解の現れ方が怪しい
 - 現在苦戦中...

今日の話

- モデル設定の確認
- 困っていた問題
 - 大氷冠不安定周辺の解に対する大気モデルの水平解像度の問題
- 検証中の問題
 - 大気海洋海氷結合実験における waterbelt 的な解の現れ方の問題
- スケジュール

モデル設定の確認

- 大気大循環モデル

- 大気成分
 - 乾燥空気, 水蒸気 (分子量はともに ~ 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 [m^2/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 W/m^2 以下 : T21L16, T42L16
 - 太陽定数 1450 W/m^2 以上 : T21L32
- 時間刻み幅
 - 基本 20 分. 暴走温室計算では数分

- INTH07 との設定の違い

- INTH02/07 の湿潤対流調節コードのバグ修正
- L32 格子配置の最適化
- L32 計算の鉛直フィルタの入れ方
 - 上部 7 層のみ導入
- T42 計算の追加

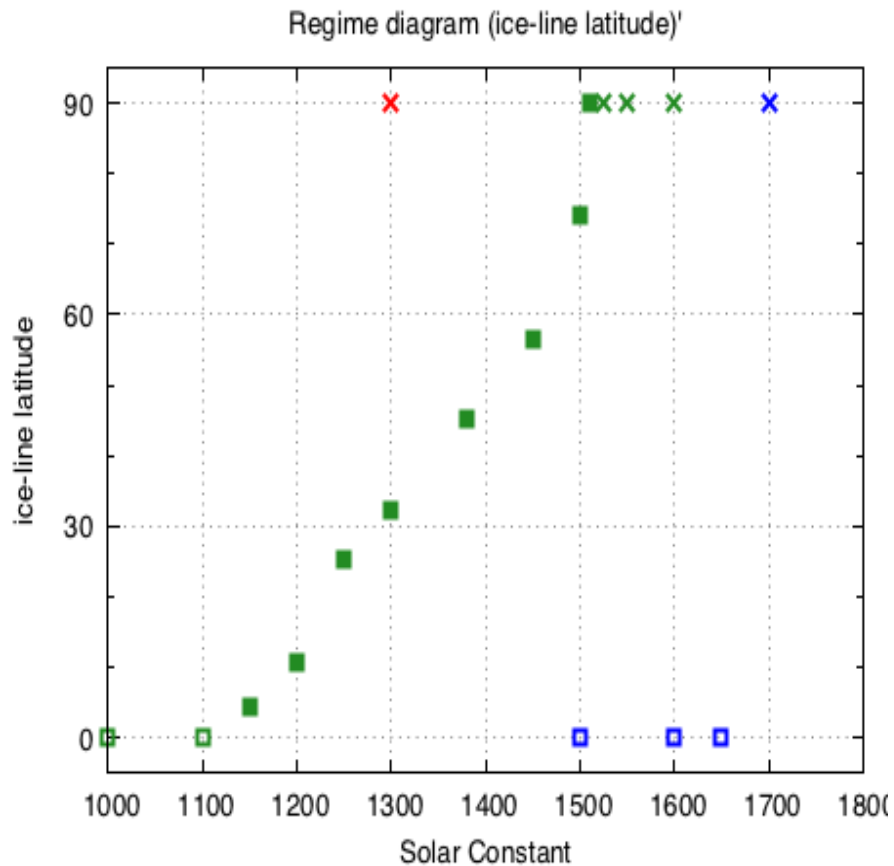
モデル設定の確認

- 海洋大循環モデル
 - 力学過程
 - 軸対称 (東西平均) 静力学ブジネスく方程式系
 - 水平スペクトル法, 鉛直有限体積法
 - 乱流混合過程
 - 中規模渦の混合スキーム (Redi, 1982; Gent and McWilliams, 1990)
 - 対流調節スキーム (Marotzke, 1991)
 - モデル解像度: 42 x 60
 - 時間刻み幅
 - 結合 run: 4 時間, 海洋海氷モデル単体 run: 12 時間
- 海氷モデル
 - 熱力学過程
 - 3-layer model (Winton, 2000)
 - 水平輸送は水平拡散によりパラメータ化
 - モデル解像度・時間刻み幅は海洋モデルと同じ
- カップラー
 - 各モデル間でのデータ交換: Jcup (Arakawa et al., 2011)
 - フラックスは, 保存型 2 次精度補間 (Jones, 1999)

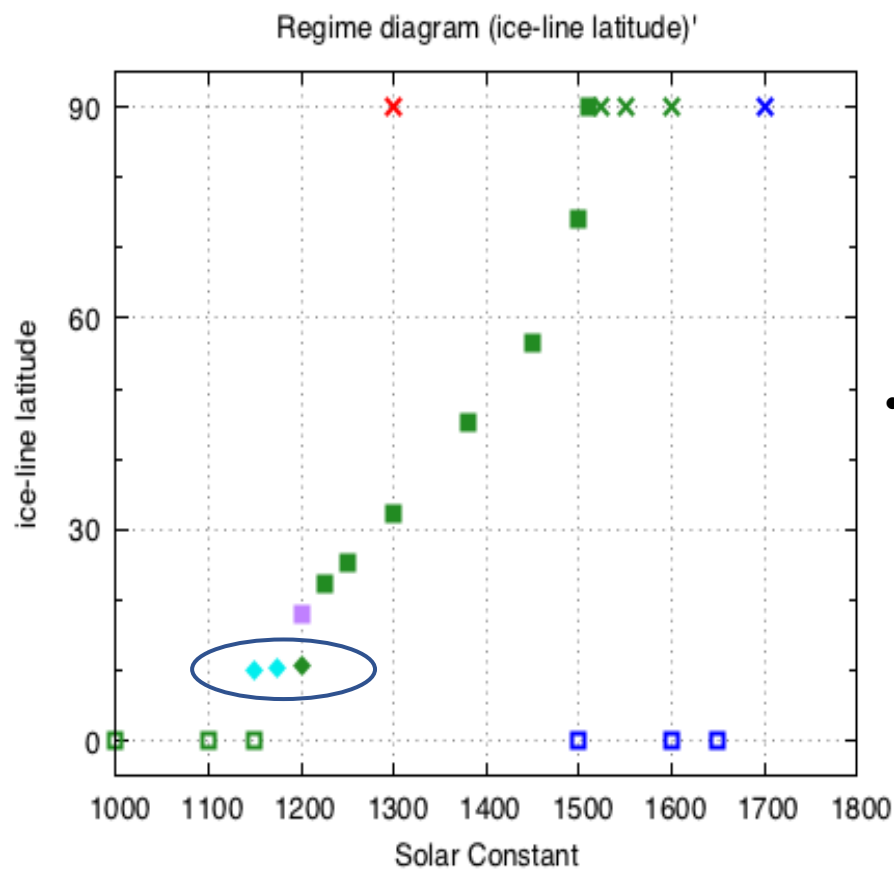
大氷冠不安定周辺の解に対する 大気モデルの水平解像度の問題

気候レジーム図 (太陽定数に対する氷線緯度)

SwampOcn (3/22 時点)



SwampOcn (最新版)

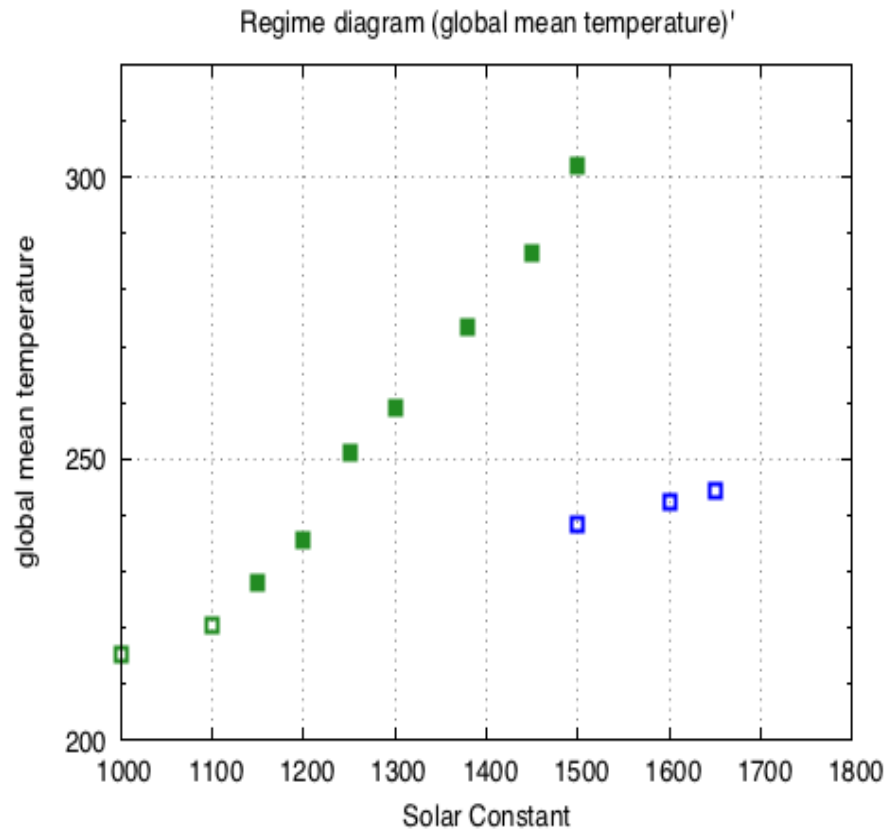


- ini280K->SnowB □
- iniS1000->SnowB □
- iniLargelce->Largelce ◆
- ini280K->Largelce ◆
- iniPartlce->Partlce □
- ini280K->Partlce ■
- iniS1600->Runaway ×
- iniS1000->Runaway ×
- ini280K->Partlce ×

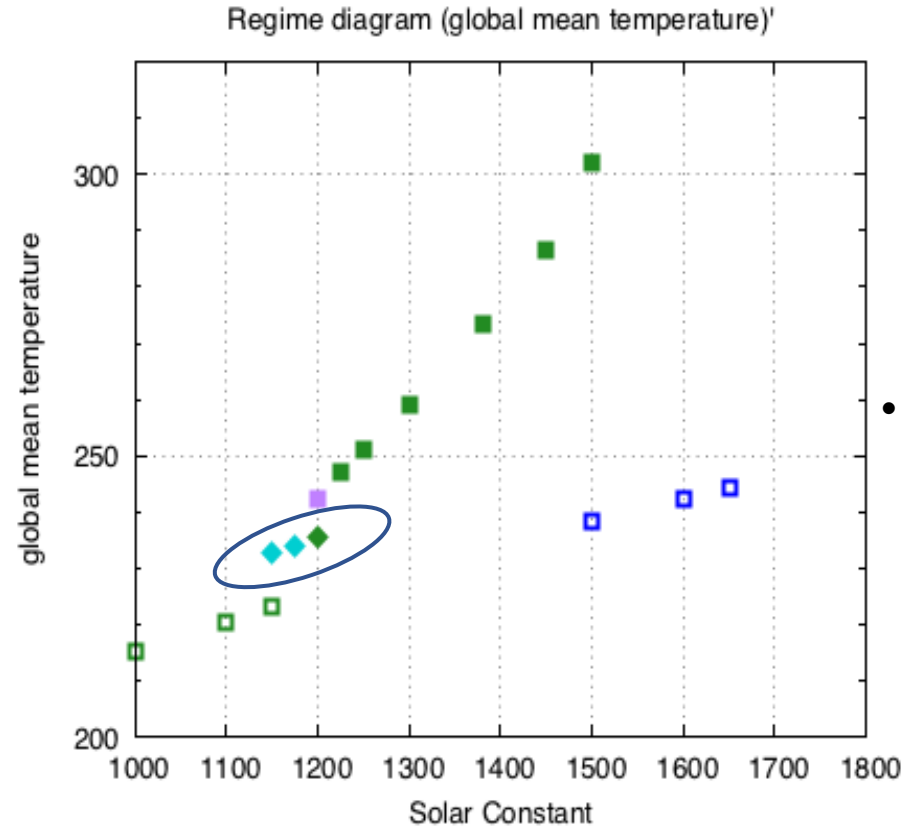
- 氷線緯度が約 10 度の安定な平衡解が見つかった。
 - 少なくとも 300 年ほどは維持している。
 - (通常の)部分凍結解と全球凍結解の間にある, waterbelt 的な平衡解とみなせるか?
 - 自分は数値的要因だと思う...

気候レジーム図 (太陽定数に対する全球平均表面温度)

SwampOcn (3/22 時点)

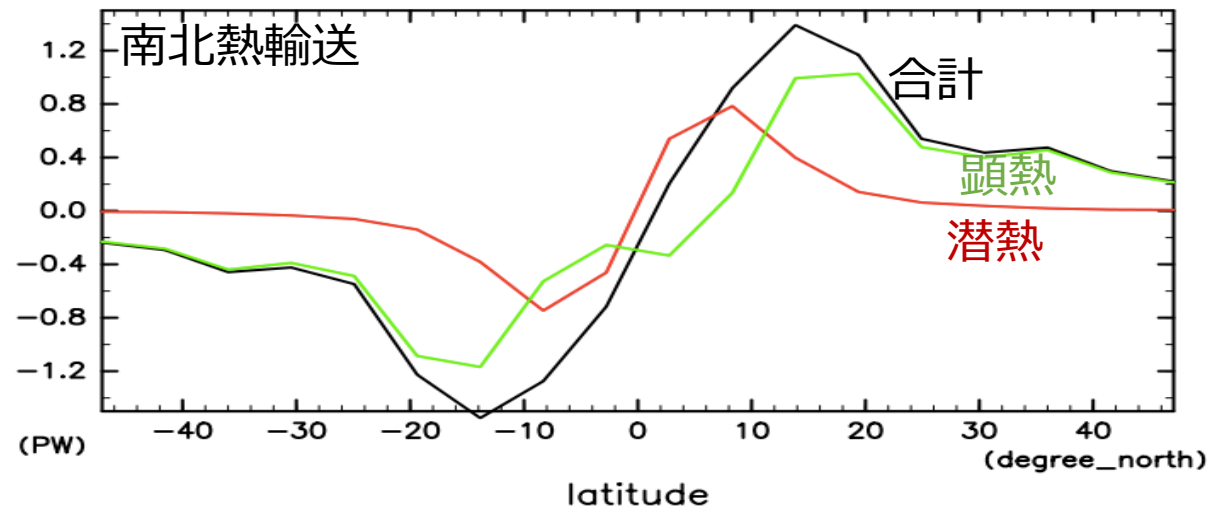
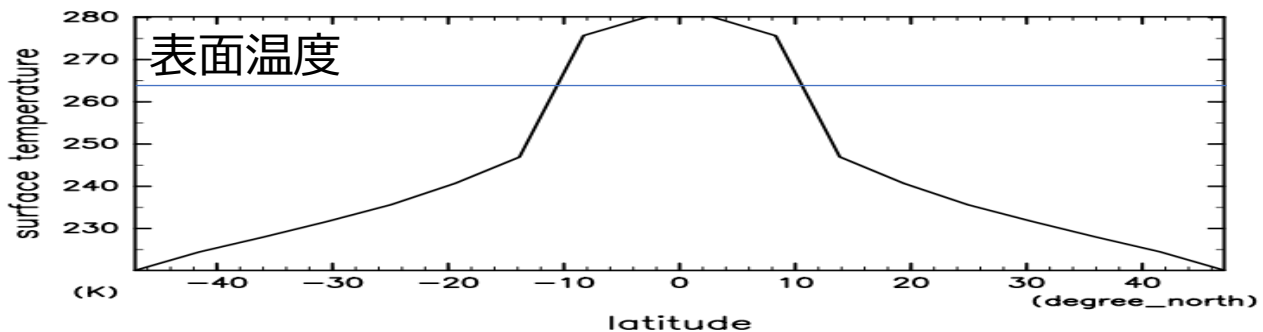
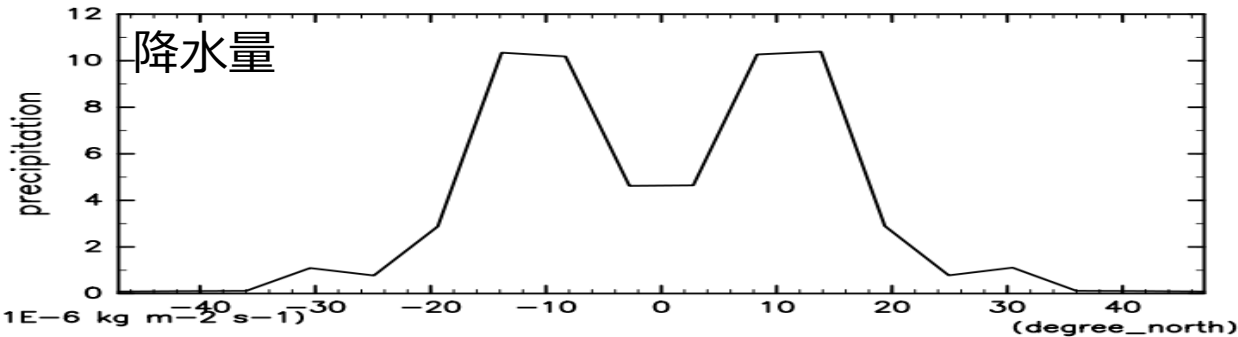
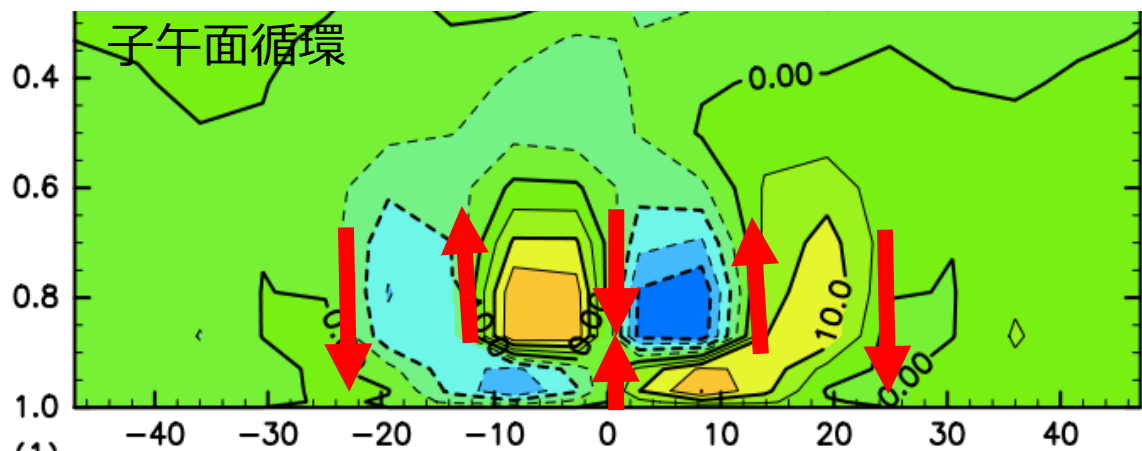


SwampOcn (最新版)



- 氷線緯度約 10 度でも少なくとも 300 年は安定な平衡解が見つかった。
 - 太陽定数に対する表面温度の傾きは, 全球凍結解と似ている.

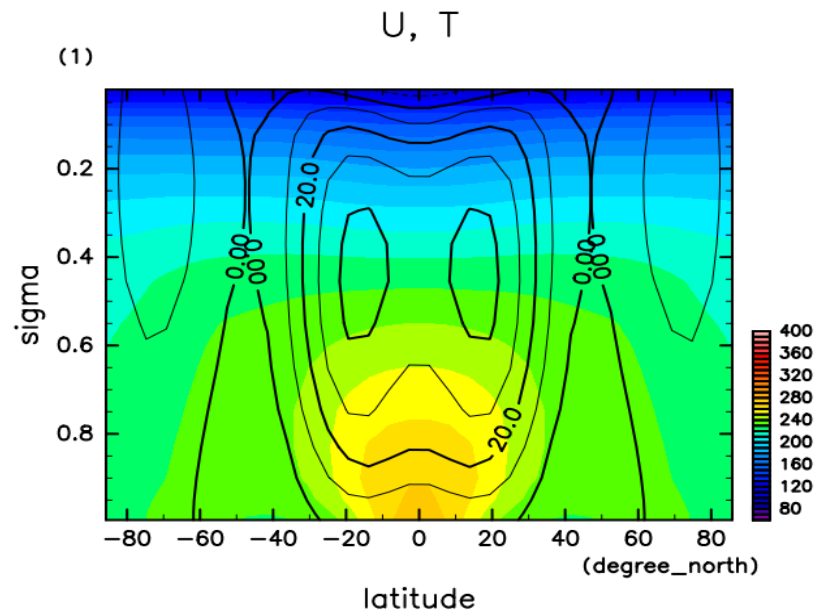
氷線緯度約 10 度の解の特徴



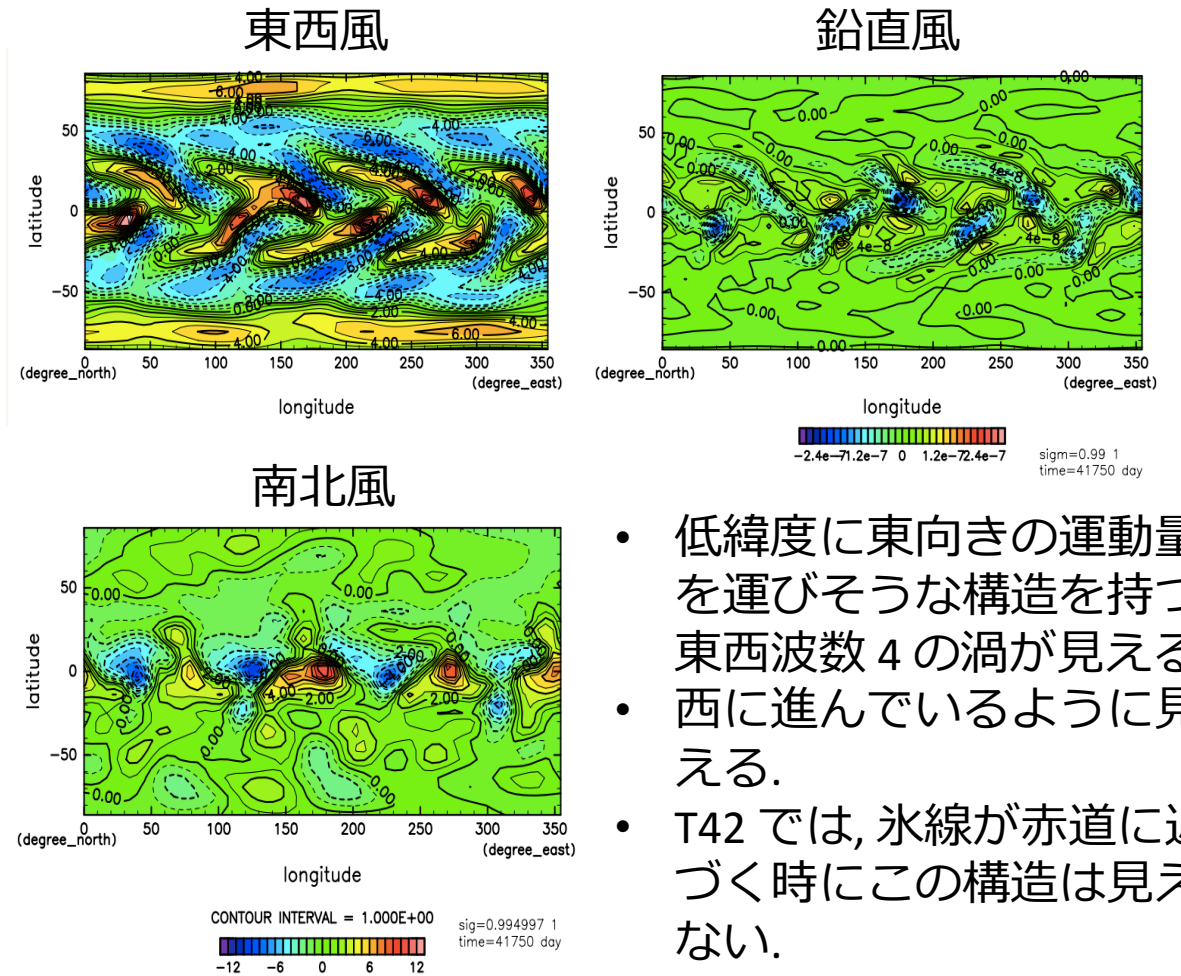
- ハドレー循環が十分に解像されていない
 - それと関係して(?), 地表近くを除く赤道域の子午面循環は, 通常とは逆周り.
 - 赤道域の潜熱輸送も通常とは逆向き(極向き)
 - 氷線緯度が進出するのを妨げている? (妄想)

氷線緯度約 10 度の解の特徴

モデル下層の風速場の特徴
(スナップショット)



- 低緯度が西風になる..
- 東西風の鉛直シアが、低緯度の南北温度差を維持し、全球凍結状態に陥ることを防いでいる? (妄想)



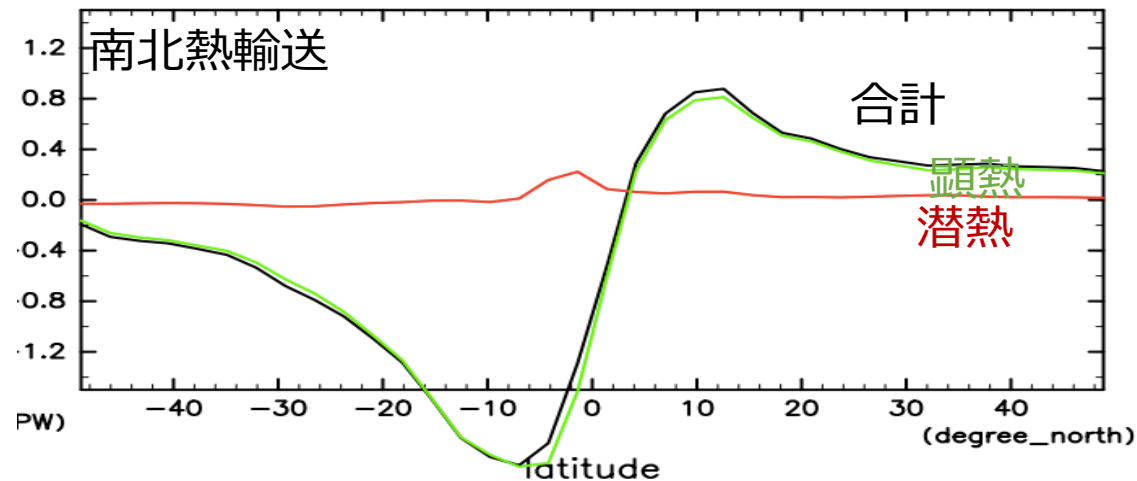
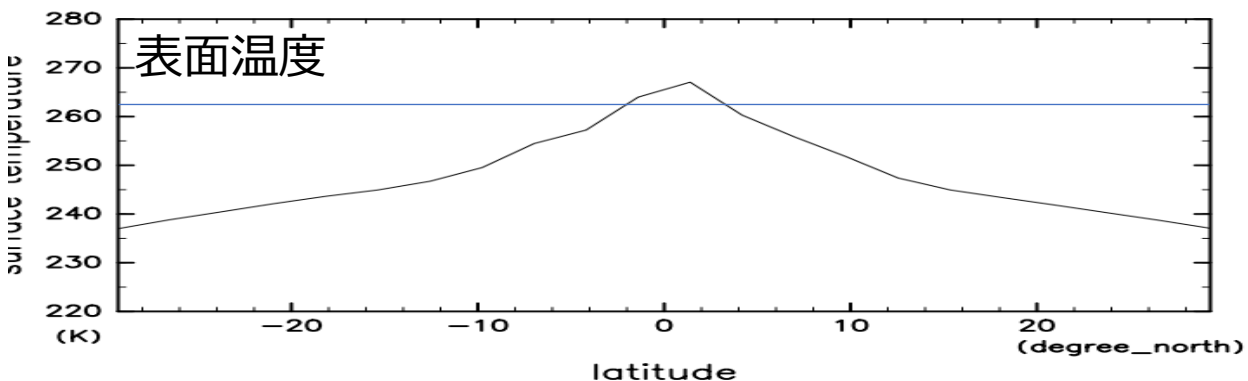
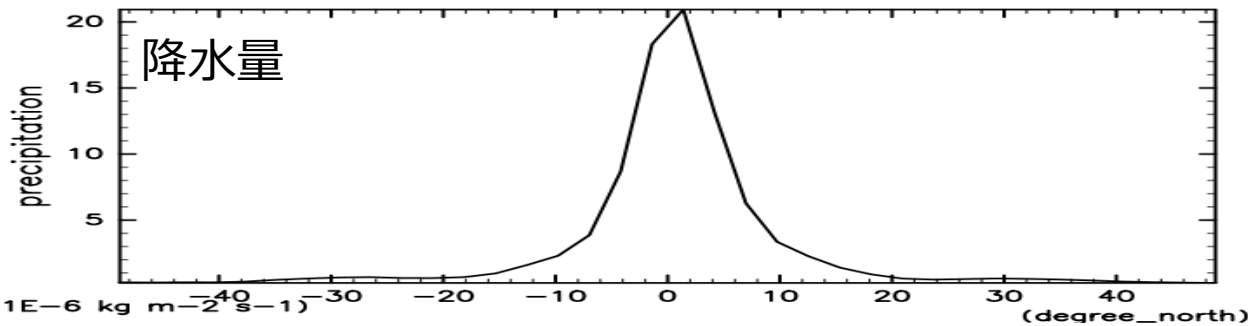
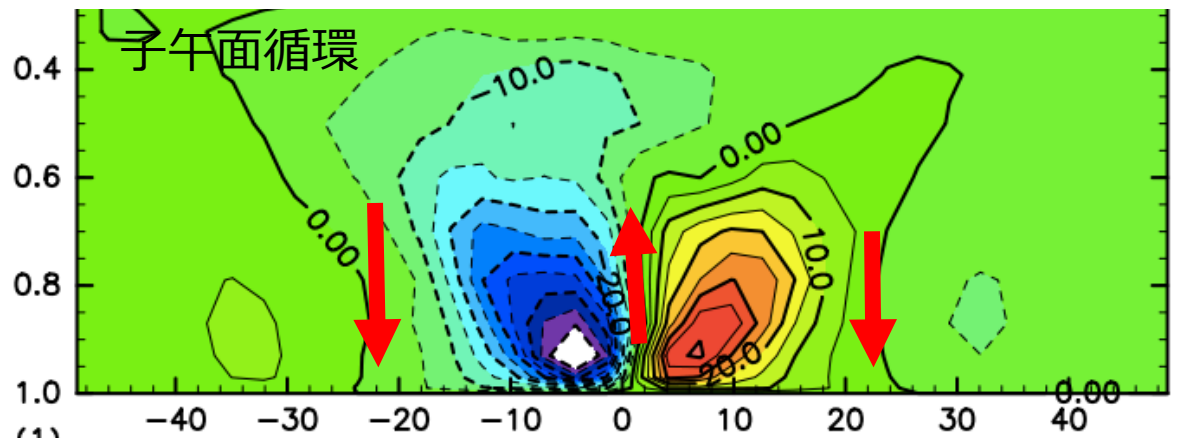
- 低緯度に東向き運動量を運びそうな構造を持つ東西波数4の渦が見える。
- 西に進んでいるように見える。
- T42では、氷線が赤道に近づく時にこの構造は見えない。

水平解像度を T42 に上げて見ると....

- 氷線が赤道に近づいてきても, 解像度不足でハドレー循環の水平構造が崩れなくなった.
- T21 計算で現れた氷線緯度約 10 度の安定平衡解は得られなくなる (先のページの気候レジーム図を参照).
 - 氷線が緯度 0 ~ 20 度に入ると, 長くても数十年で全球凍結状態に至る.
 - 気候レジームを眺めて見ると, 水平解像度の影響を受けやすいのは, やはり大氷冠不安定周辺の解であることが分かる.

T42 計算での全球凍結直前の様子

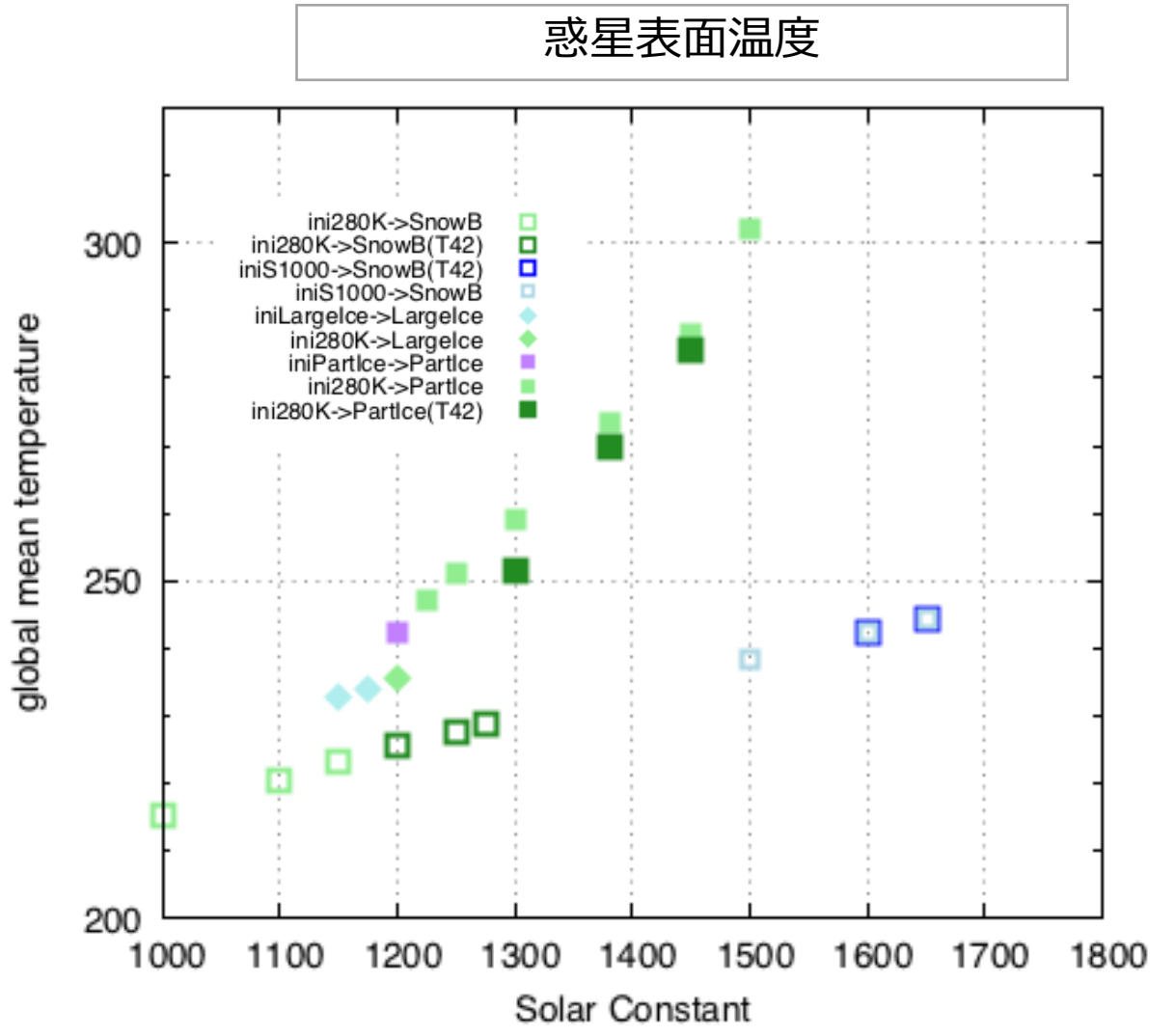
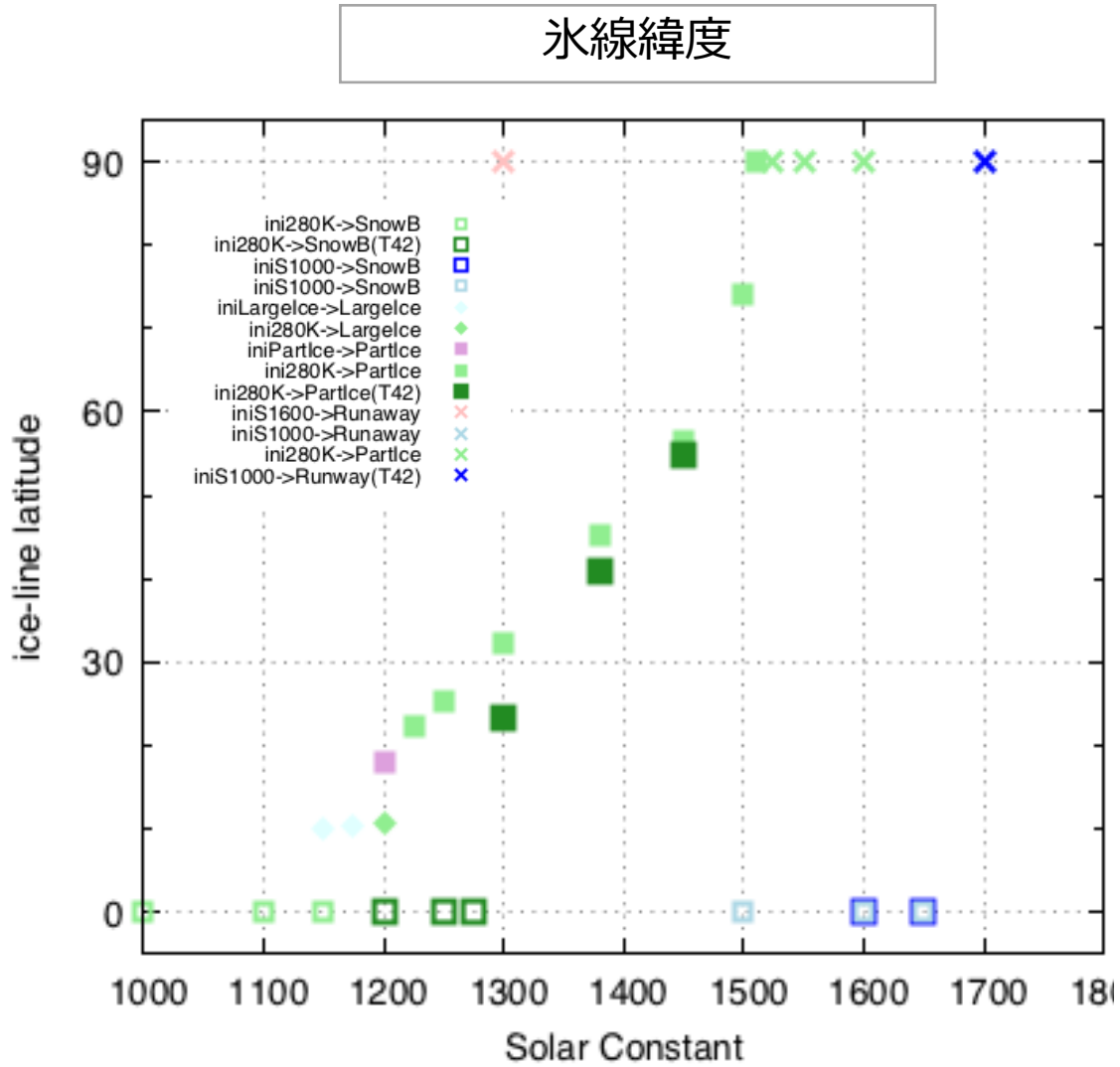
(2000 日で全球凍結状態に至る. 図は, 1000~1500 日間の時間平均)



- T42 計算では, 氷線緯度が赤道に近づいてきても, ハドレー循環の水平構造はよく表現できている.
- 赤道域の潜熱輸送は T21 と異なり赤道向き(さらに, とても小さい).
- 結果(?), 赤道域に氷線が入るとと速やかに全球凍結状態に至る.

T42 計算の気候レジーム図 (swamp ocean 実験)

T42 の結果は濃い色の点, T21 の結果は薄い色の点で示す.

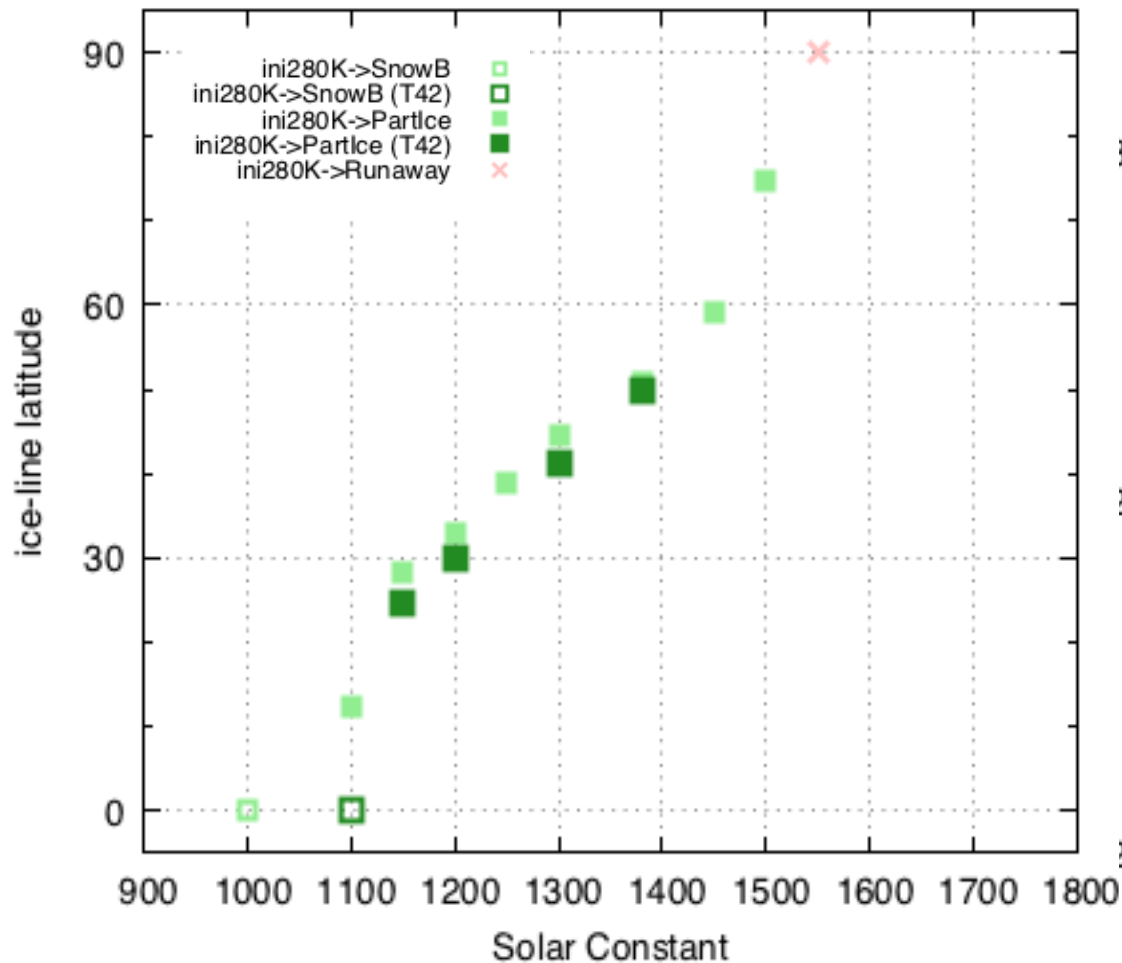


T42 計算では, 大氷冠不安定の領域が明瞭に現れる.

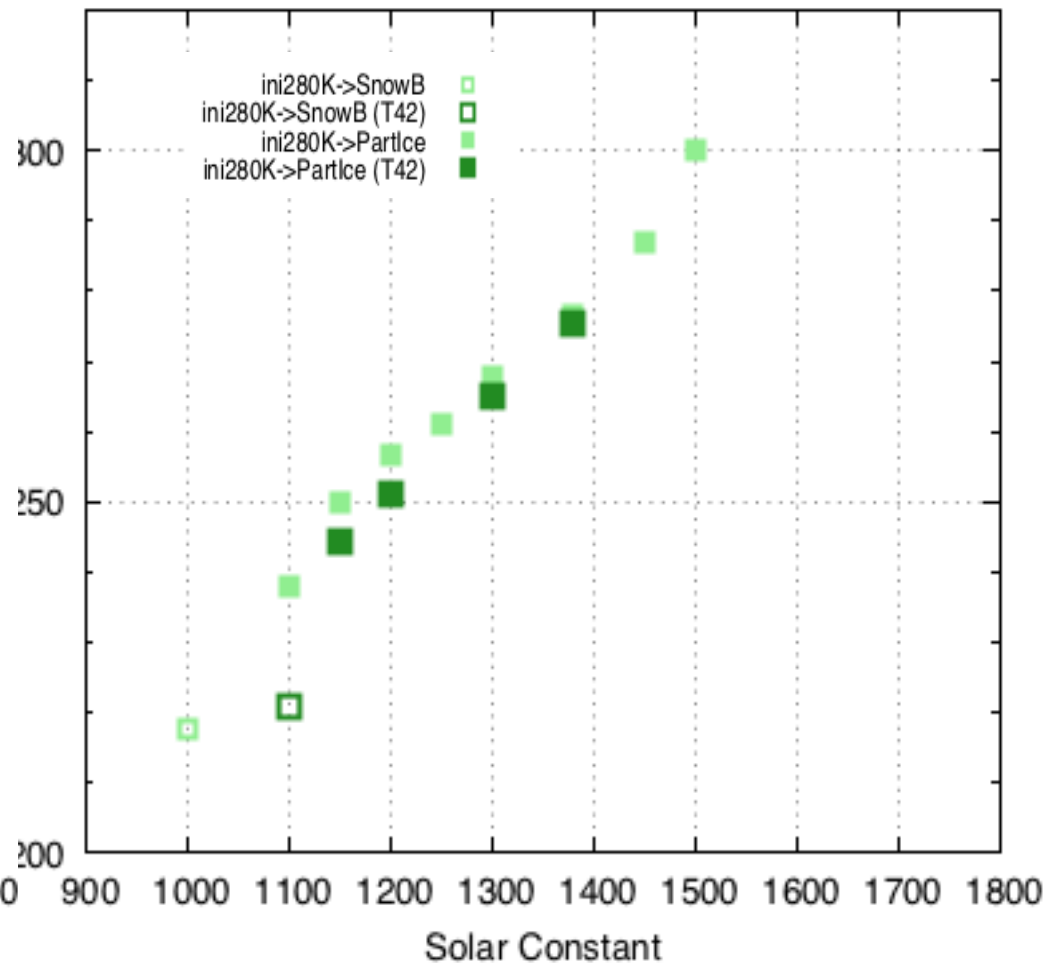
T42 計算の気候レジーム図 (dynamic ocean 実験)

T42 の結果は濃い色の点, T21 の結果は薄い色の点で示す。

氷線緯度



惑星表面温度



結果: swamp ocean 実験

全球凍結解

部分凍結解

暴走温室解

S1200

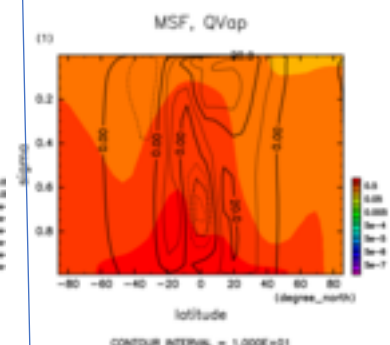
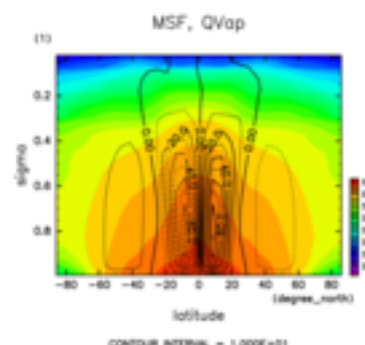
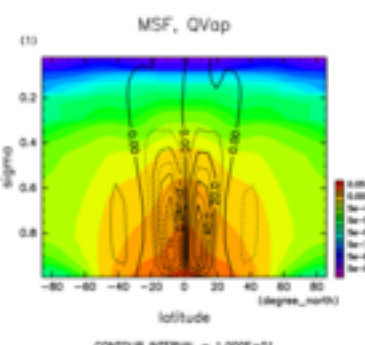
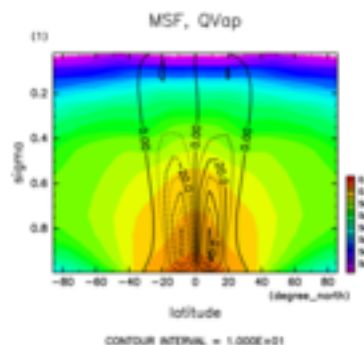
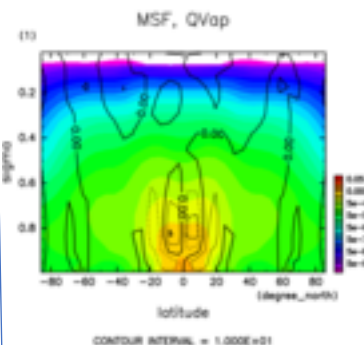
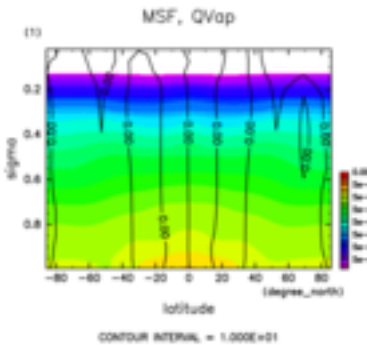
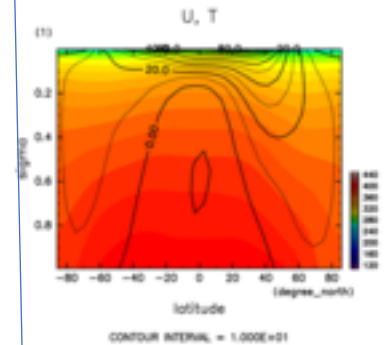
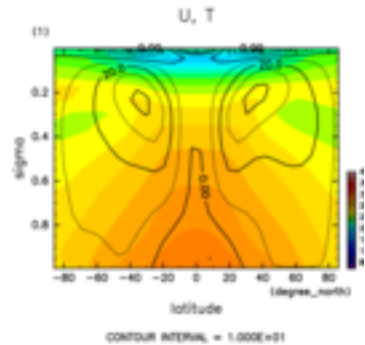
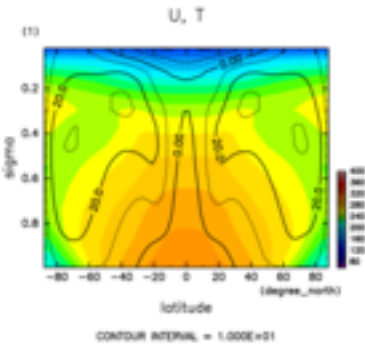
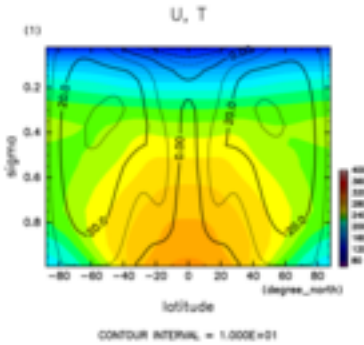
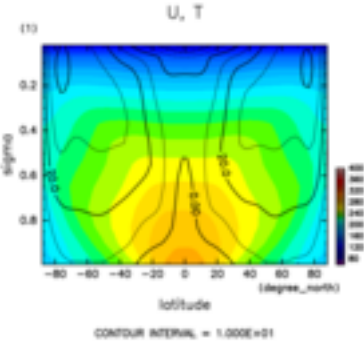
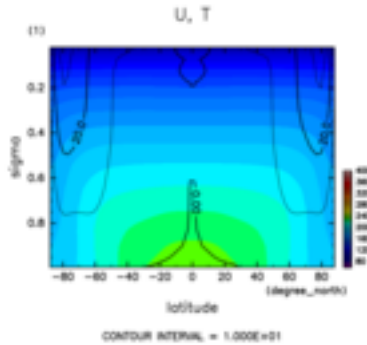
S1300

S1380

S1450

S1500

S1600



(T42L16)

(T42L16)

(T42L16)

(T42L16)

(T21L32)

(T21L32)

(宿題)

大気構造の太陽定数依存性を整理する

- 全球平均値
- 東西ジェット, 子午面循環の位置や強度

東西風・温度

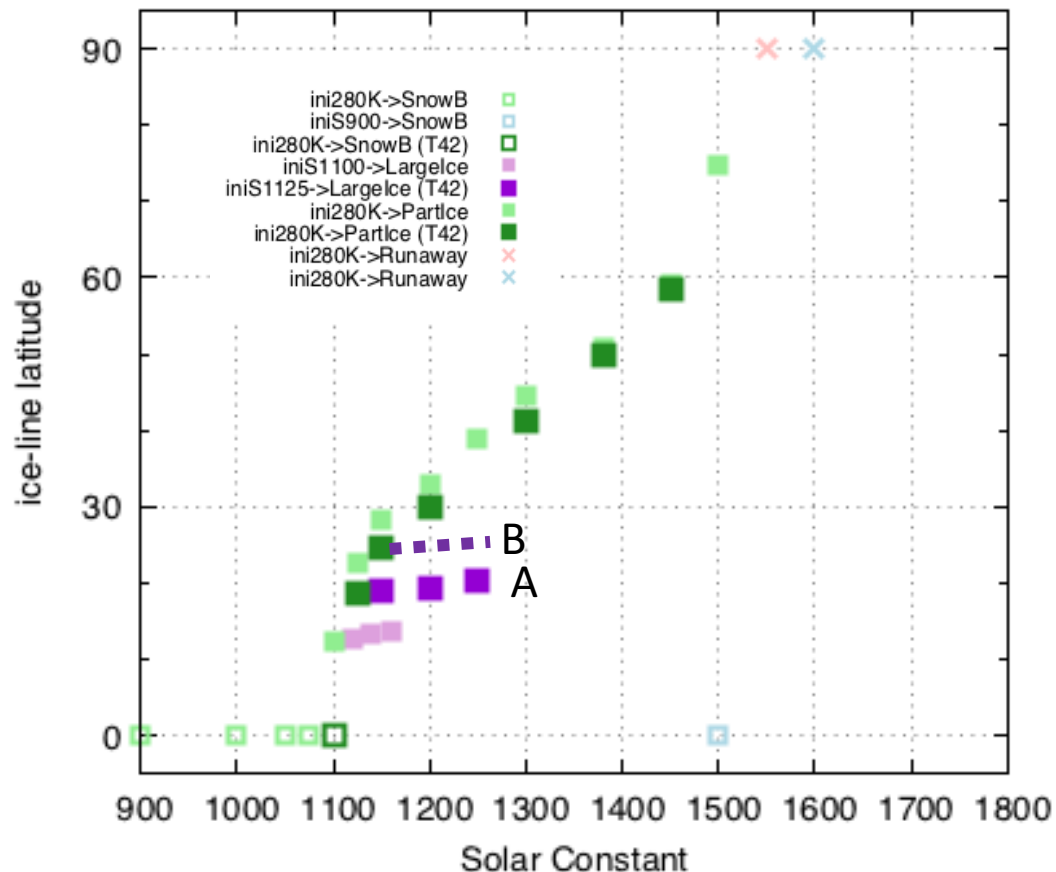
子午面循環・比湿

結合計算における
waterbelt 的な解の現れ方の問題

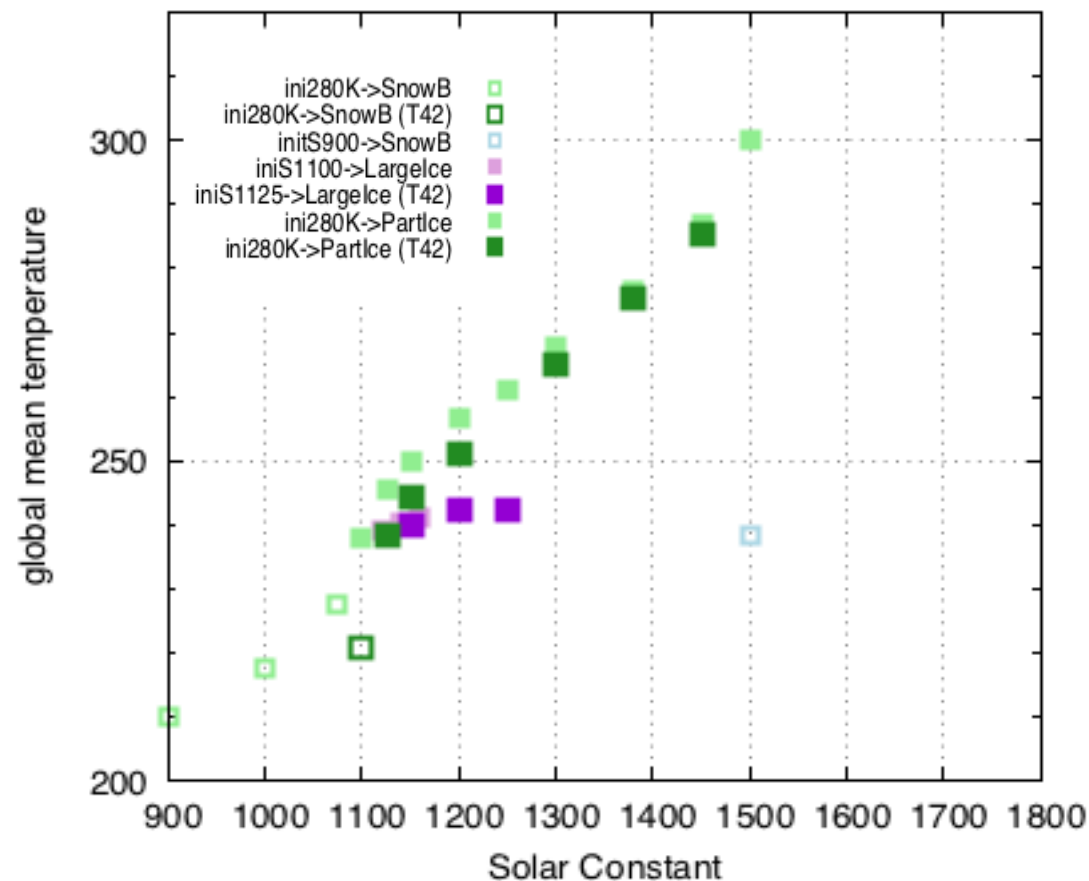
T42 計算の気候レジーム図 (dynamic ocean 実験)

T42 の結果は濃い色の点, T21 の結果は薄い色の点で示す。

氷線緯度



惑星表面温度

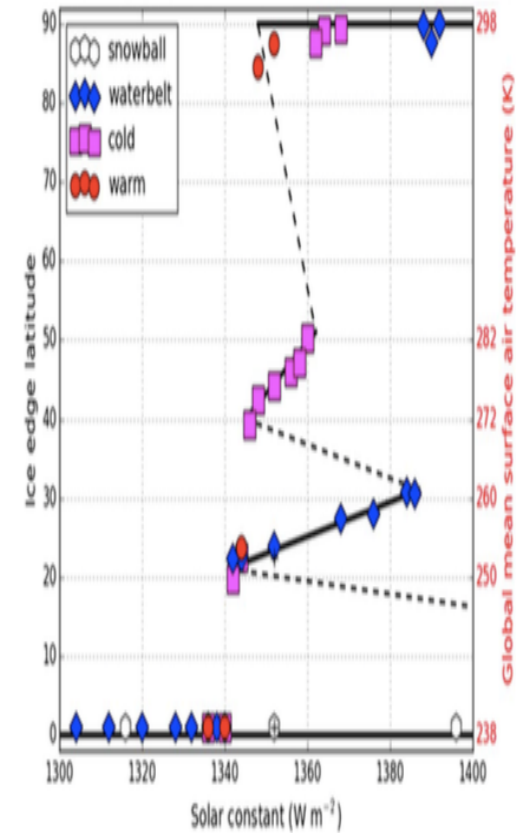
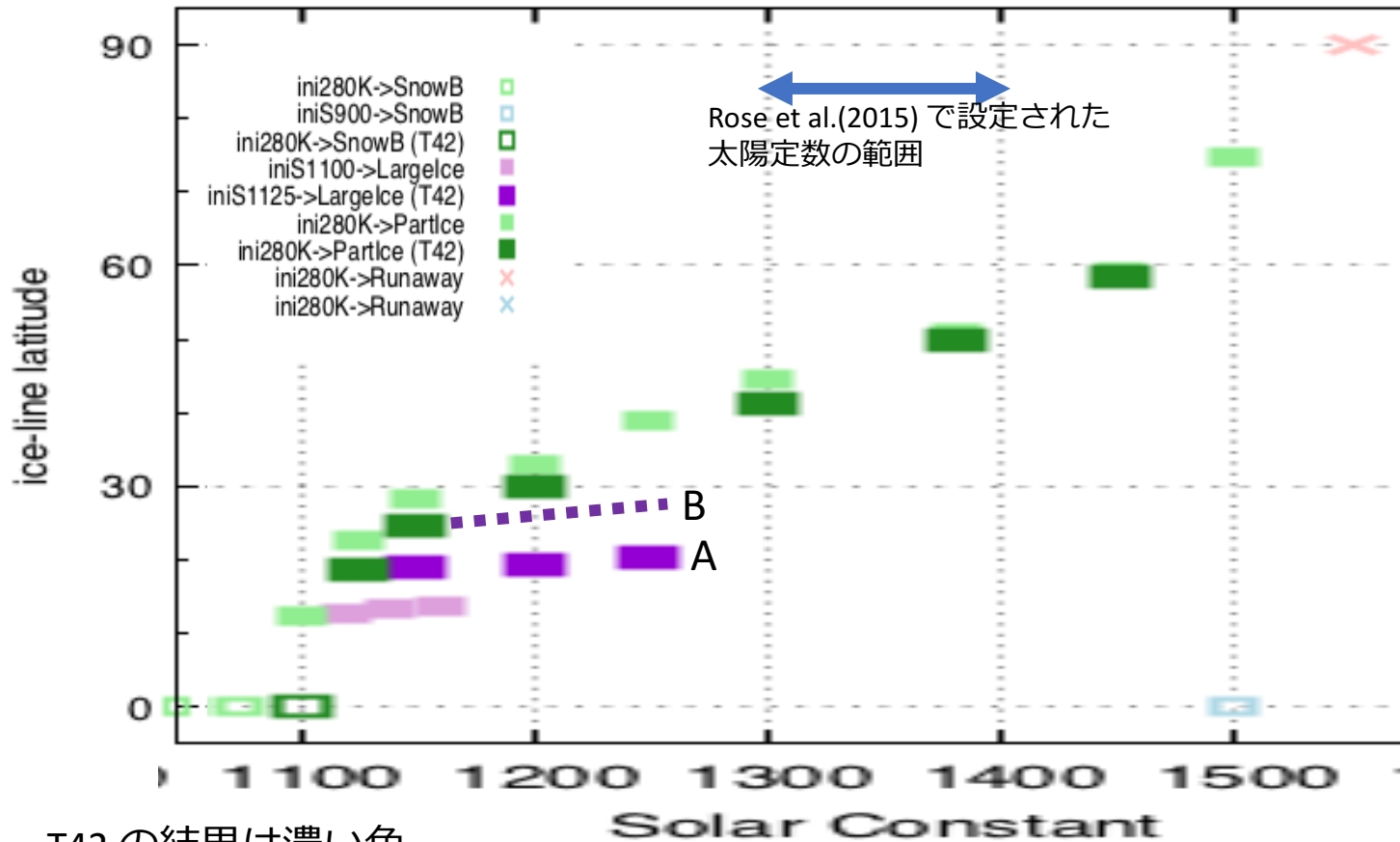


- 紫色の解(A)は, Waterbelt 的な解?
- しかし, S1150 の解から始めても, Waterbelt 的な解が見つかってしまう(B) ...
 - 別の言い方をすると, 太陽定数を上げてても海氷が思うように融解しない。

T42 計算の気候レジーム図 (dynamic ocean 実験)

氷線緯度

氷線緯度
(Rose et al. (2015) 水惑星結合計算)



T42 の結果は濃い色の点, T21 の結果は薄い色の点で示す.

考えられる原因は何か?

1. 海洋海氷モデルのエネルギー漏れ

- 海洋モデルのエネルギー収支は非常に良い精度で合っている
- 一方で, 海氷モデルと関係する部分で多少のエネルギー漏れがあった.
 - 海氷末端部分の取り扱い, 海氷の昇華に関するバグ <-- 修正した
 - 海氷の鉛直熱拡散を陰的に解くため大気海氷面のエネルギーフラックスが多少ずれ, 偽のエネルギー源を作ってしまう <-- 補正した

現在, 上記の修正を加えたモデルで結合計算を再試中
(多少は改善されたが, ハズレなような気がする..)

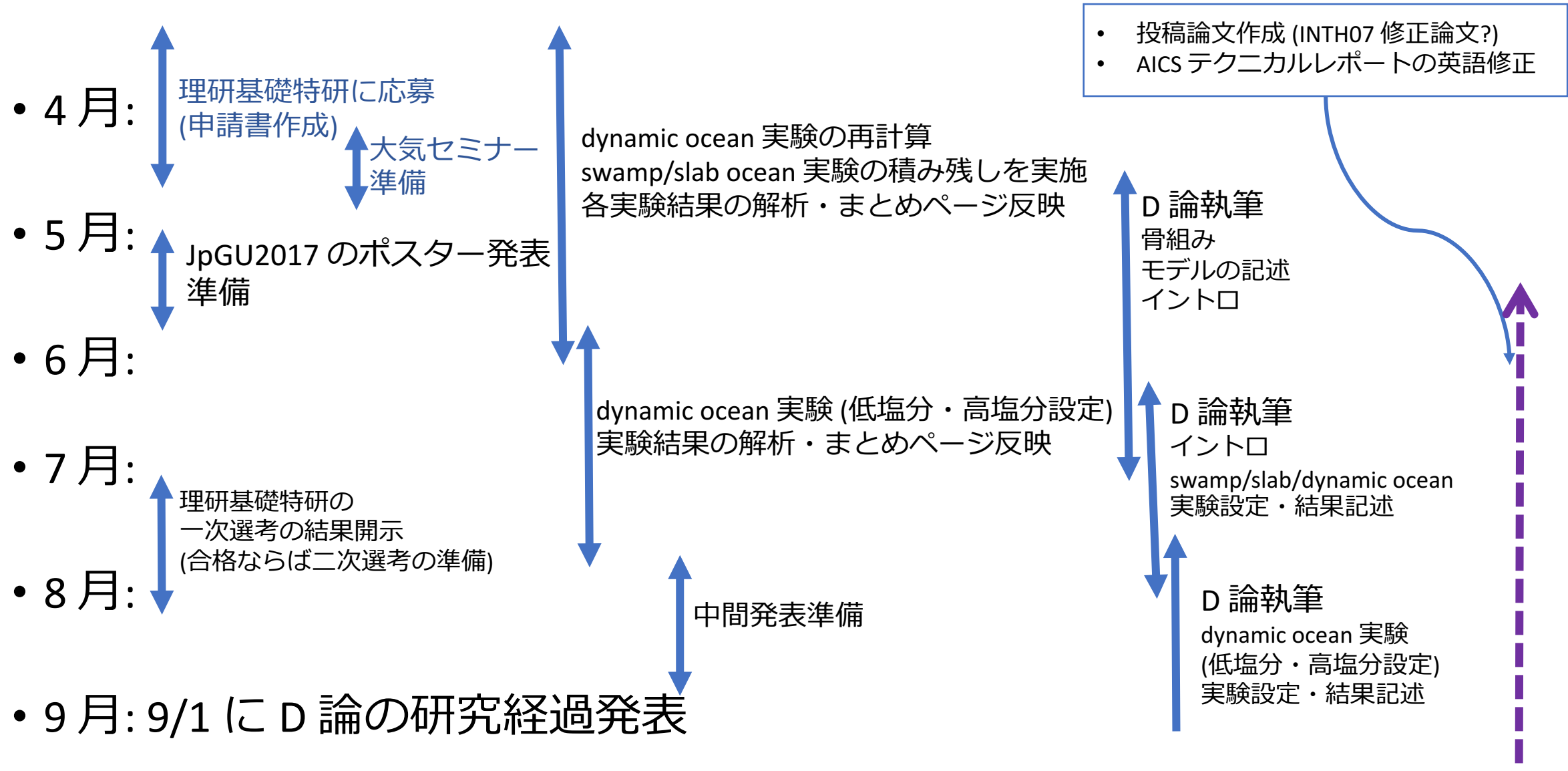
2. 結合モデルの時間積分の仕方(周期的結合の問題)

- 未検証...

3. fractional ice を考慮していない

- 未検証...
- 東西平均モデルの場合には, 影響が大きかもしれない....

スケジュール (目標)



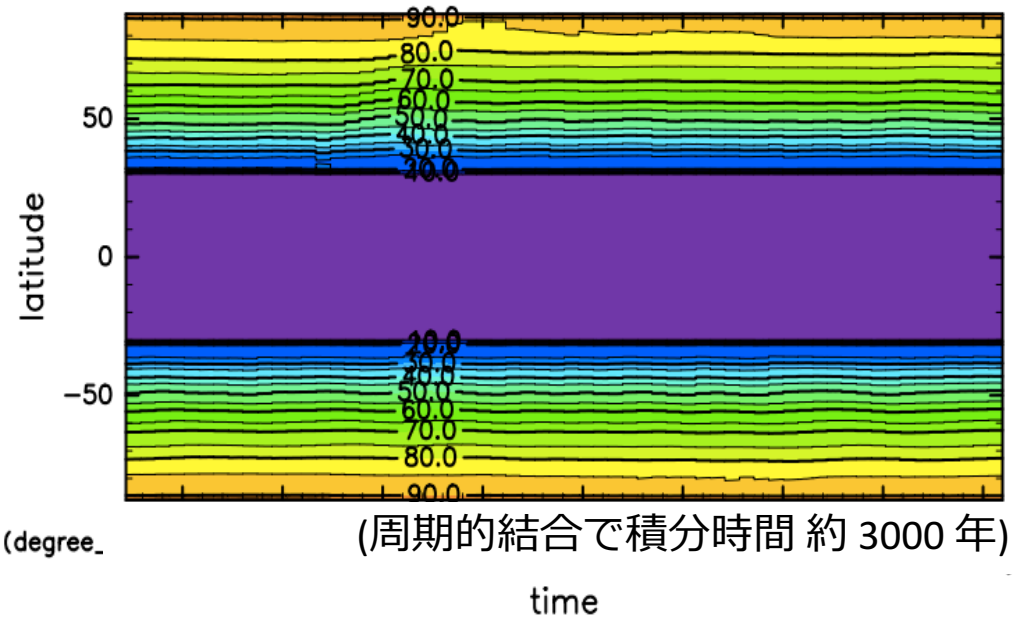
まとめ

- 水惑星の気候の太陽定数増減実験を行なっている.
 - swamp/slab/dynamic ocean 実験の気候レジーム図は大まかに書いた.
 - swamp 実験の計算, 結果の解析は大方収束に向かっている.
- 実験を進める中でいくつか問題にぶつかった
 - T21 大気モデル設定では, 大氷冠不安定が明瞭に現れない.
 - 水平解像度不足が要因のようなので, T42 計算を並行して行う.
 - dynamic ocean 実験で, waterbelt 的な解の現れ方が怪しい.
 - 原因を検証中
- 今後のスケジュールを確認した.

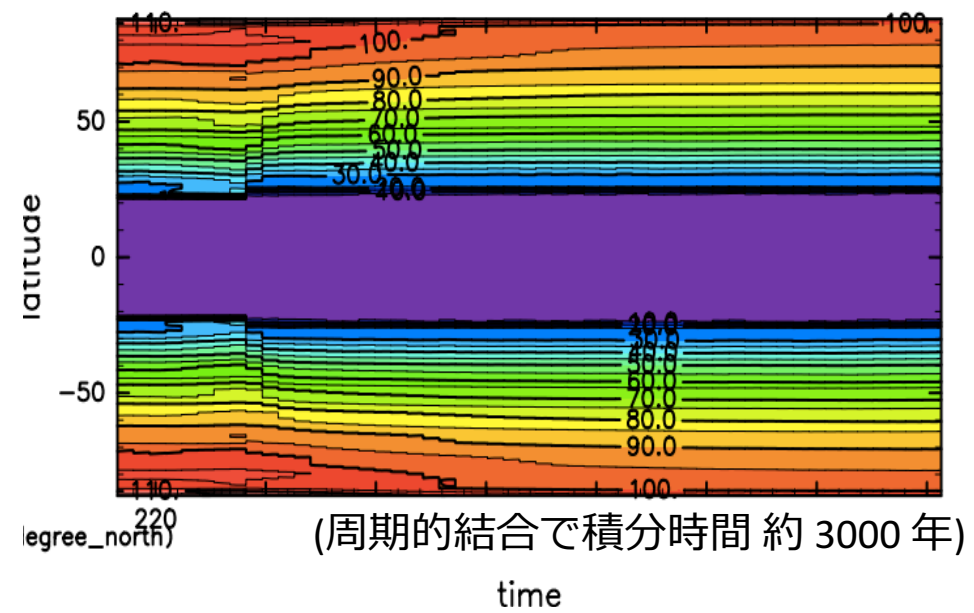
補足スライド: 太陽定数を上げてても海氷がなかなか融解しない問題

dynamic ocean 実験(AGCM T42 設定, 海氷モデルのエネルギー漏れを修正)の
海氷厚さの時系列

S=1200 W/m² の場合



S=1150 W/m² の結果を初期値にした
S=1200 W/m² の場合



S=1200 W/m² の氷線
緯度, 海氷厚さまで
戻りそうにない...

