

研究進捗報告

~ INTH98 の水惑星灰色大気大循環の再試結果を用いた海洋大循環計算
(モード分割の手法を改良した海洋モデルの再計算)

河合 佑太

海洋モデルミーティング(2017/01/06)

短中期的な計画と現在位置

1. INTH98 再試実験の結果から海面境界条件を作り, 海洋モデルだけで海洋大循環を計算

• 主な目的

- (1) 海洋モデルだけでまず統計的平衡状態が得られるか確認
- (2) 結合計算のための初期値作成

今日の主な話題

2. INTH98 再試実験の大気モデル設定(太陽定数 1366 W/m²)を使って結合計算

• 主な目的

- (1) INTH98 の大気設定を用いた場合の, 結合系の統計的平衡状態の確認
- (2) 純粹結合と周期的結合の両方を試し, 計算時間が短縮できる周期的結合を利用できるか確認 (太陽定数増減実験で利用できそうかを調べる)

現在ここを中心に取り組んでいる(計算中).

話の大筋

- Ishiwatari et al.(1998) の水惑星灰色大気大循環の再試結果を用いた海洋計算

目的

- 海洋モデル単体でまずは平衡状態に至れるか?
 - 海面塩分フラックス固定(合計ゼロ)の境界条件下で, 塩分はドリフトしないか?
- 実験ケース I98CTRL と I98HDIFFWeak に対して, 海洋大循環の特徴はどれぐらい異なるか?

分かったこと

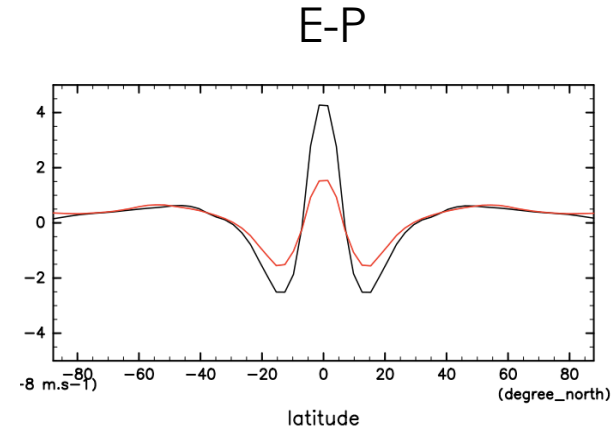
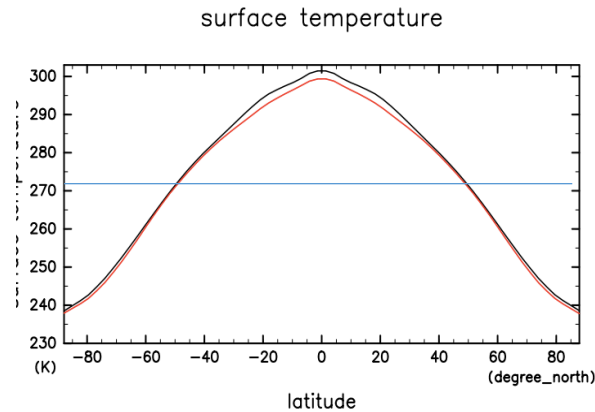
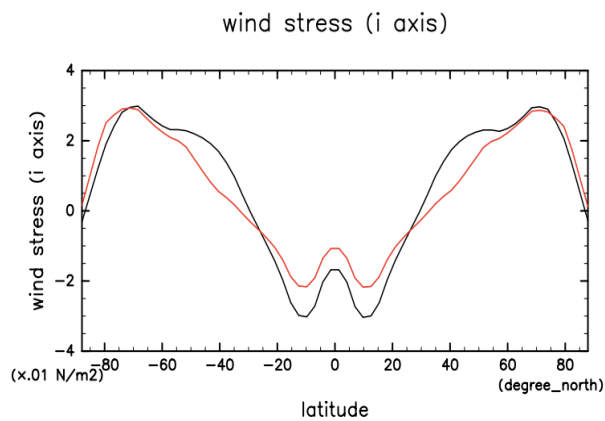
- restoring 境界条件を与えた温位は落ち着く
- フラックス固定の境界条件を与えた塩分はドリフトする
 - 一万年積分すると塩分の全球平均値は 0.2 psu (0.6 %) 増加する
 - これまでの鉛直離散化, 境界条件の取り扱いでは, 長時間積分でトレーサーの保存性の問題が顕著化する.

対処

- 保存性が保証されるように, 鉛直離散化として有限体積法も使えるようにした
 - 同様の数値実験を行い, 塩分が厳密に保存する結果を得た(ドリフトしない)
 - 温位・塩分分布のパターンは '鉛直chebyshev' と大きくは変わらない

海面境界条件の与え方

- INTH98 の再試実験から得た, 風応力, 海面温度, 蒸発フラックス (E)-降水量(P)の緯度分布をもとに海面境界条件を作成



CTRL
HDIFFWeak

注) HDIFFWeak は大気上層が非常に低温になる解

- 海面熱フラックス

- 緩和型: 時定数 60 日
- SST₁₉₈ < -1.8 度の場所は -1.8 度に置き換える

- 淡水フラックス

- 全球積分値がゼロになるように補正した E-P を与える.

$$\frac{\Theta_0 - SST_{I98Mod}}{\tau}$$

Θ₀: モデル最上層の温位

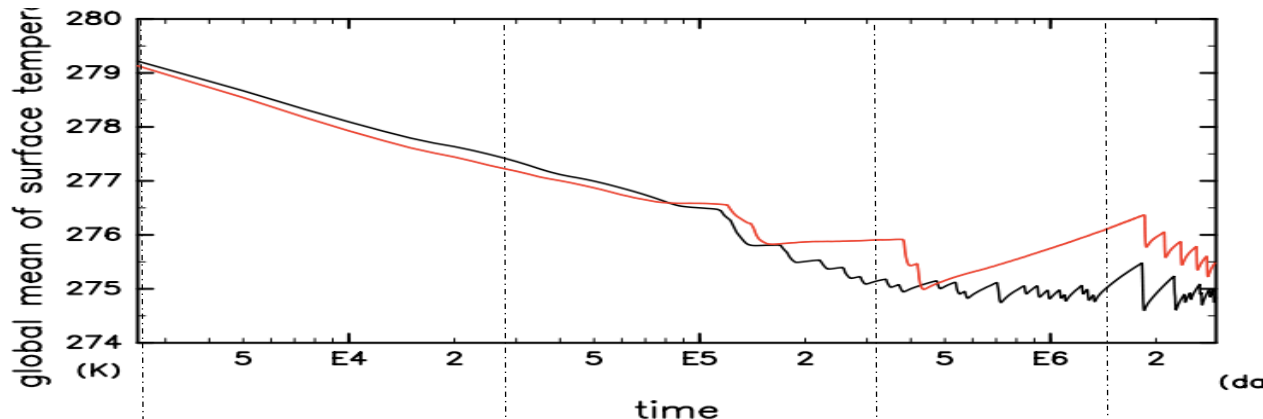
実験設定

- case 1: I98CTRL_VSPM
 - 海面境界条件: I98 再試実験ケース CTRL
 - 鉛直離散化: スペクトル法
- case 2: I98HDIFFWeak_VSPM
 - 海面境界条件: I98 再試実験ケース HDIFFWeak
 - 鉛直離散化: スペクトル法
- case 3: I98CTRL_VFVM
 - 海面境界条件: I98 再試実験ケース CTRL
 - 鉛直離散化: 有限体積法
- case 4: I98HDIFFWeak_VFVM
 - 海面境界条件: I98 再試実験ケース HDIFFWeak
 - 鉛直離散化: 有限体積法

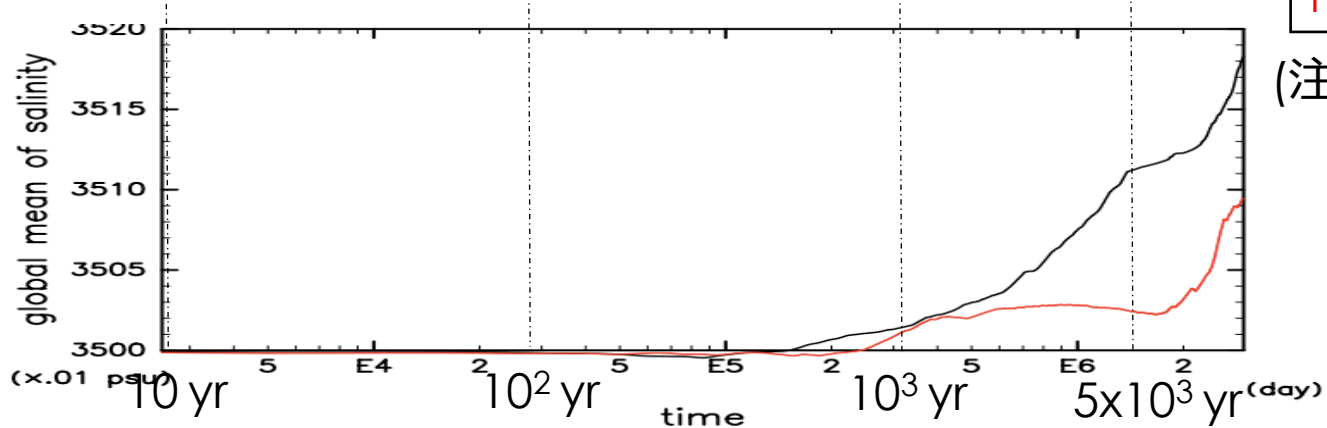
- 積分時間: 約 1 万年
- 空間解像度
 - 南北波数 42
 - 鉛直格子点数 61
- 時間ステップ: 12 時間
- 物理パラメタリゼーション
 - 対流調節
 - 等密度面混合
 - GMスキーム
- 初期条件
 - 静止状態
 - 温位(280 K), 塩分(35 psu)一様
- 境界条件
 - 海面: 前スライド参照
 - 海底
 - 熱フラックス, 塩分フラックスゼロ

時系列

温位の全球平均値



塩分の全球平均値



I98CTRL_VSPM
HDIFFWeak_VSPM

(注) 時間軸は対数軸

- 温位の全球平均値は数千年で落ち着く。

- 大気はHDIFFWeakの方がより低温であるが、海洋はCTRLの方が低温となった。
- 平衡状態において特徴的な振動が見られる(次のスライド)。

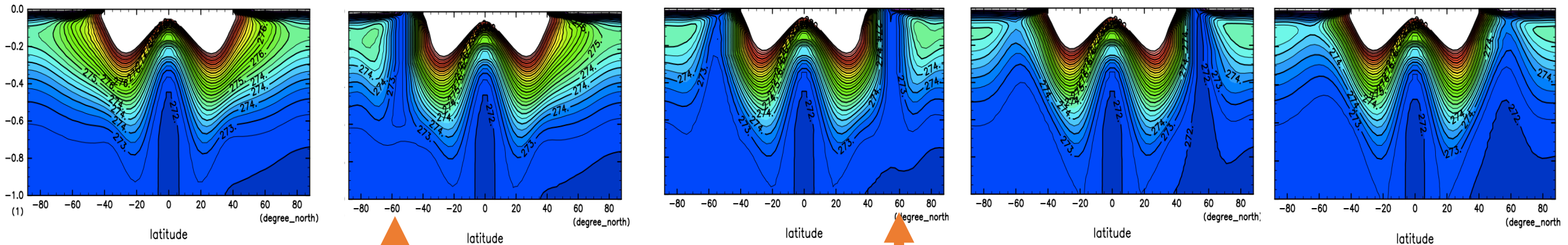
- 一方、塩分はドリフトしてしまう。

- 一万年間で、0.6%程増加
- 塩分はフラックス固定なので、モデルの保存性の悪さが直接的に現れる。

時系列 ~ 特徴的な振る舞い

- 緯度 60 度付近で, 表層から低温な水塊が, 周期的に深部へ落ちる.

とある 35 年間の温位の子午面分布のスナップショット (I98CTRL_VSPM)



↑
深い対流発生

↑
深い対流発生

→
数百年かけて徐々に成層が回復

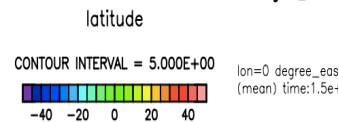
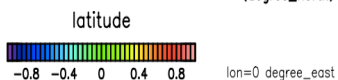
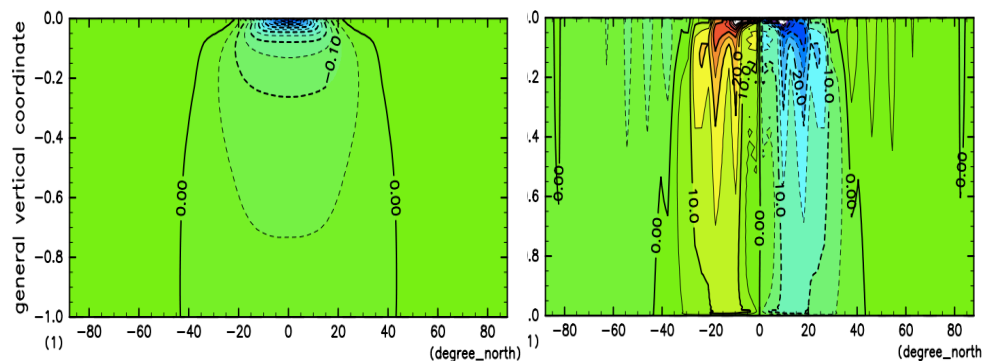
- (我々の)大気海洋結合モデルにおいても, この現象は起きる.
- 三次元海洋でもこのような劇的な深い対流は起こるのだろうか? 周期的な振る舞いをするのだろうか?

統計的平衡状態

198CTRL_VSPM

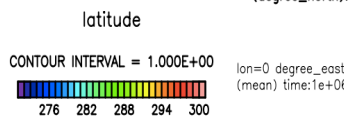
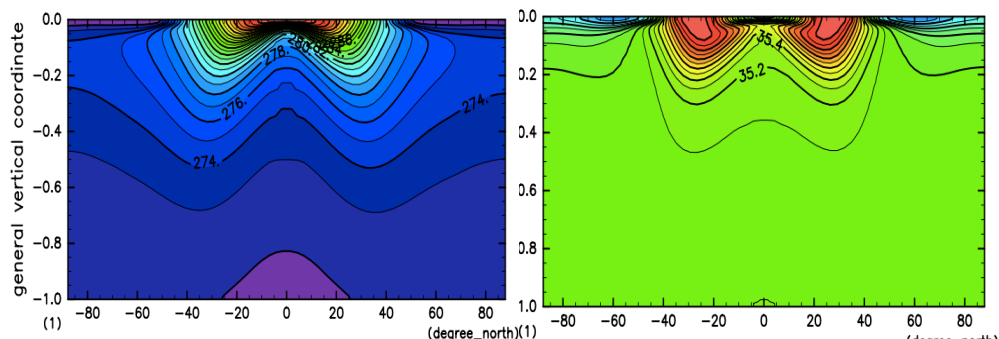
東西流

鉛直流



温位

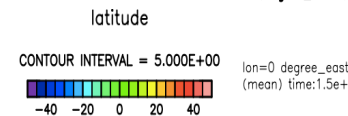
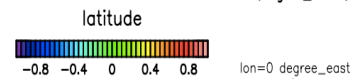
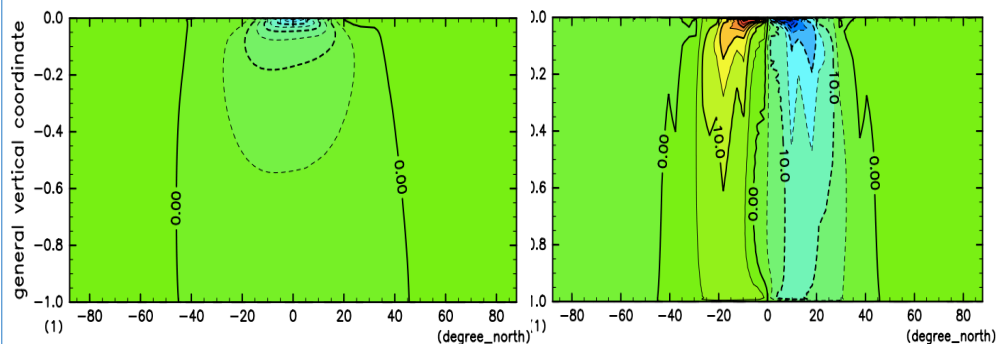
塩分



198HDIFFWeak_VSPM

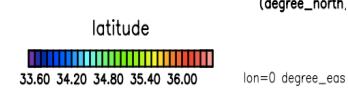
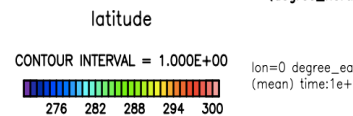
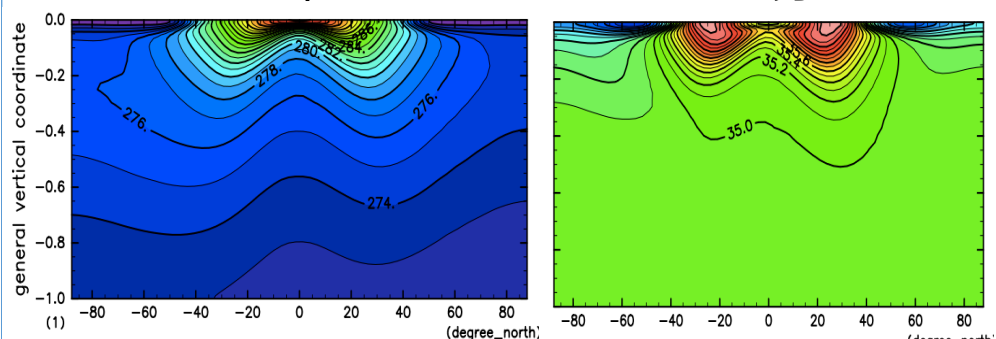
東西流

鉛直流



温位

塩分



- 198CTRL と 198HDIFFWeak の間で特徴に大きな違いは見られない。

細かい特徴に注目すれば..

- 風応力が 198CTRL の方がやや強い分、東西流や子午面循環がやや強い。
- 主躍層の舌上の構造が CTRL の方がやや狭い。
 - 対流が活発な緯度の違いを反映しているのか？
- HDIFFWeak の統計的平衡状態はやや半球非対称性がある

トレーサーの方程式の鉛直離散化の再考 ～ 保存性を悪化させる要因は何か？

• 現状の鉛直離散化法

- chebyshev 多項式による擬スペクトル法
 - 移流項: advection form
 - 等密度面混合, GM スキームによる項: flux form
 - 境界条件の指定: boundary bordering

• 保存性に問題をきたす要因

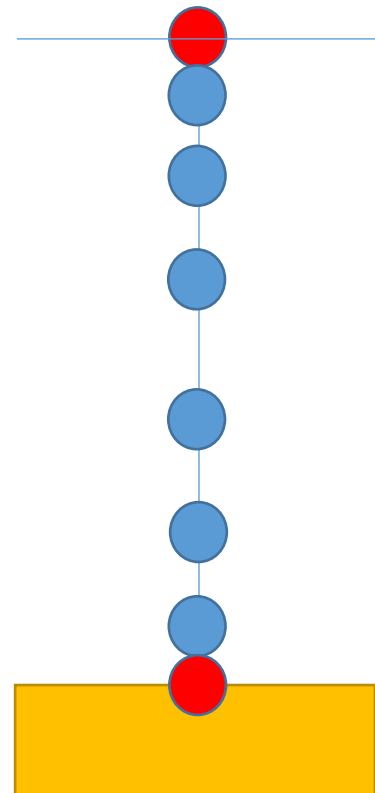
• 1. 移流項が flux 形式でない

- 現状の枠組みにおいて flux 形式にしていなかった理由
 - 例: tracer 方程式と連続の式の離散化式の間で compatibility を担保するのが困難

• 2. boundary bordering

- end point の値は境界条件で決まり, 時間発展式に従わせられない.
(全ての点で時間発展式を解ければ高精度で保存性を実現できるが, 最終的に end point の値は境界条件で置き換えないといけないため, 保存性が悪化)

chebyshev grid



end point : ●
interior point: ●

トレーサーの方程式の鉛直離散化の再考 ～ 対処

- 鉛直 chebyshev の枠組みの中で, 1., 2. の問題に対処する方法はあり, 幾つかの技法を試したが結果は思わしくなかった.
 - スキームが非常に複雑になる
 - 実問題を解く際に, 等密度面混合や対流調節スキームとの相性が悪い.
 - さらに, 海洋業界でよく使われる物理パラメタリゼーションを追加したい時に困る.
- 最終的に, 鉛直離散化として有限体積法を追加した.
 - 離散化の取り扱い上, 保存変数は離散系でも必ず保存する

実験設定

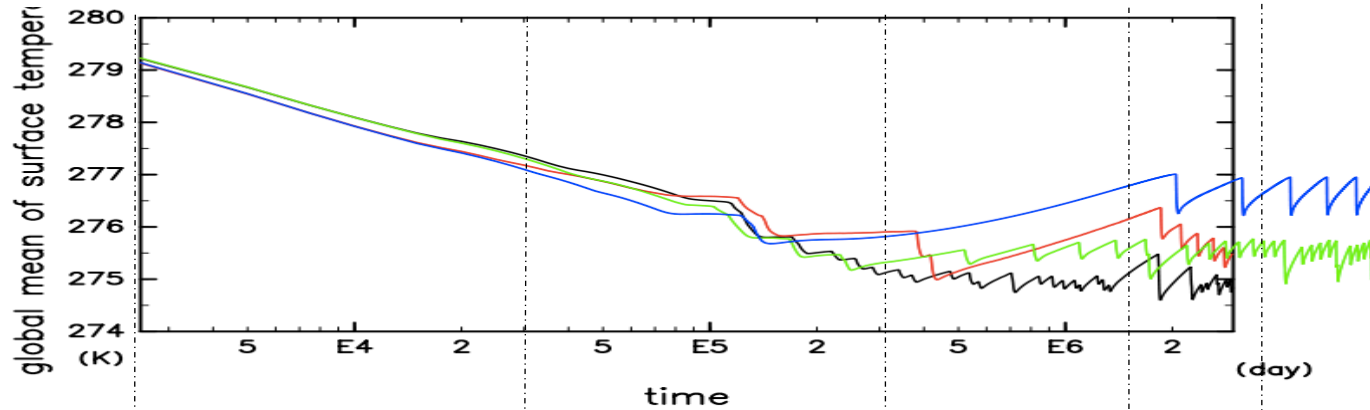
- case 1: I98CTRL_VSPM
 - 海面境界条件: I98 再試実験ケース CTRL
 - 鉛直離散化: スペクトル法
- case 2: I98HDIFFWeak_VSPM
 - 海面境界条件: I98 再試実験ケース HDIFFWeak
 - 鉛直離散化: スペクトル法

- case 3: I98CTRL_VFVM
 - 海面境界条件: I98 再試実験ケース CTRL
 - 鉛直離散化: 有限体積法
- case 4: I98HDIFFWeak_VFVM
 - 海面境界条件: I98 再試実験ケース HDIFFWeak
 - 鉛直離散化: 有限体積法

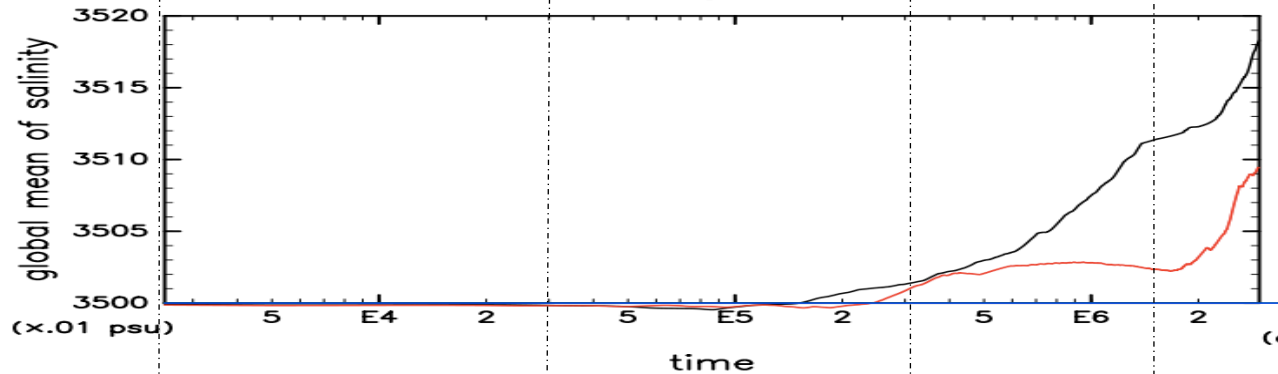
- 積分時間: 約 2 万年
- 空間解像度
 - 南北波数 42
 - 鉛直層数 60
 - 層の取り方は鉛直chebyshev grid の配置に合わせた
- トレーサーの鉛直移流
 - QUICK スキーム
- 物理パラメタリゼーション, 初期条件, 境界条件は case1, 2 と同じ
- (補足)
 - VFVM の方が, VSPM より 3 倍ほど早い.
 - さらに, 本当は鉛直格子点ももっと節約可能

時系列

温位の全球平均値



塩分の全球平均値



198CTRL_VSPM
HDIFFWeak_VSPM
198CTRL_VFVM
HDIFFWeak_VFVM

(注) 時間軸は対数軸

10 yr 10² yr 10³ yr 5x10³ yr 10⁴ yr

- VFVM の場合は, 丸め誤差の範囲で塩分は保存し, ドリフトしない (当たり前ですが...).
- 統計的平衡状態における温位の全球平均値は, VFVM と VSPM で, 0.5 度 ~ 1 度ほど異なる.
- 保存性の影響は, 循環パターンや温度塩分場にどれくらい現れるのだろうか? (次のスライド)
 - これまで, 塩分場に関して「パターンは信用できそうだが, 絶対値が怪しい」と言及していたが, それは正しかったかの確認.

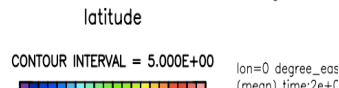
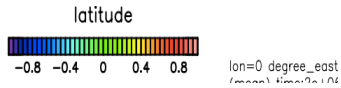
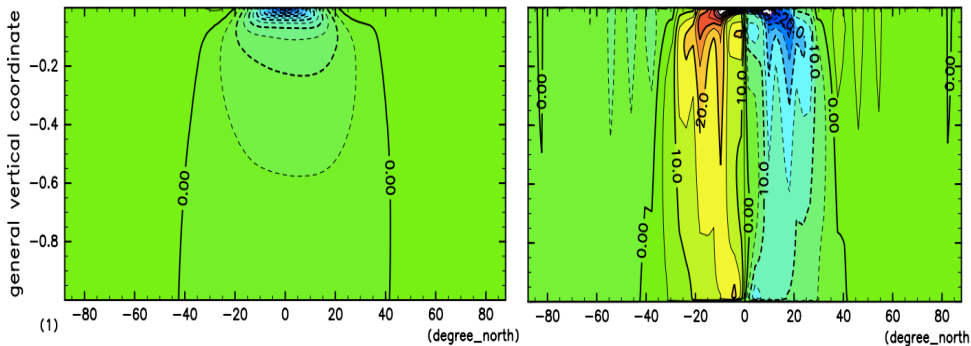
統計的平衡状態

子午面分布(5千年平均)

198CTRL_VFVM

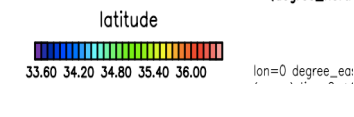
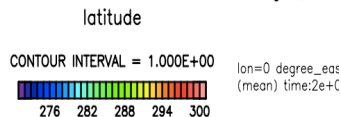
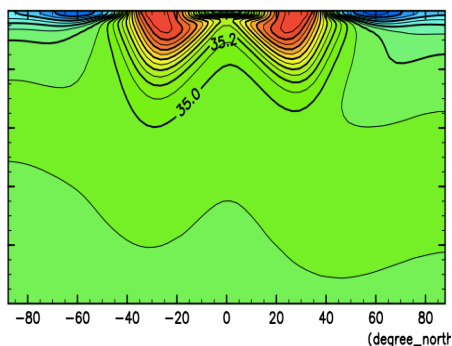
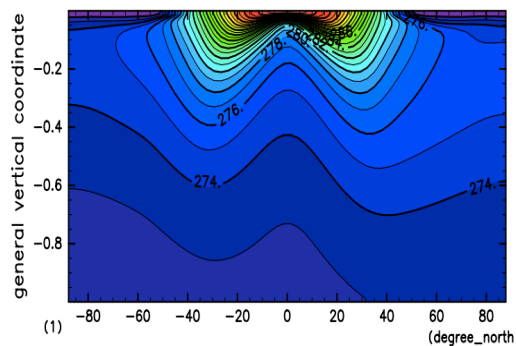
東西流

子午面循環 [sv]



温位

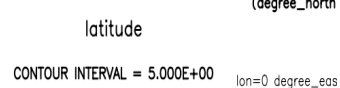
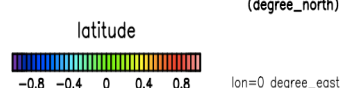
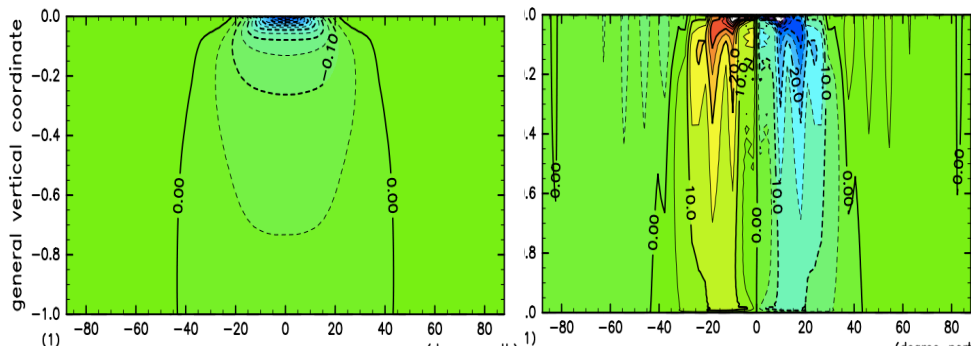
塩分



198CTRL_VSPM

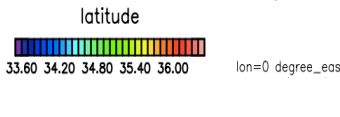
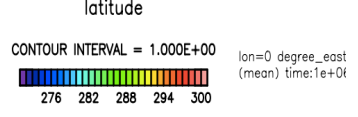
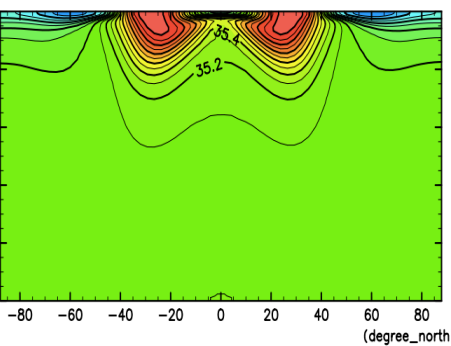
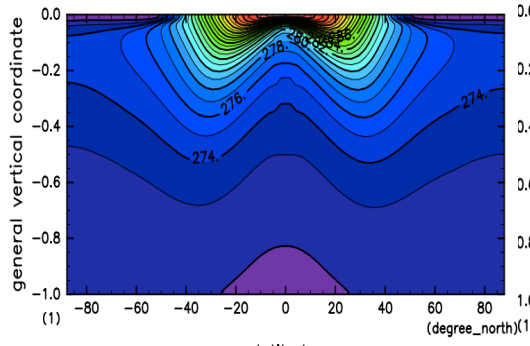
東西流

鉛直流



温位

塩分



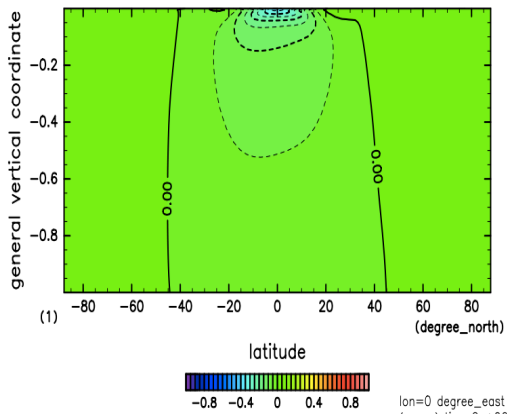
- VFVM と VSPM の間でパターンは大きく変わらない。
- VSPM はドリフトの結果, 内部領域の塩分が全体的に 0.2 psu ほど大きい。

統計的平衡状態

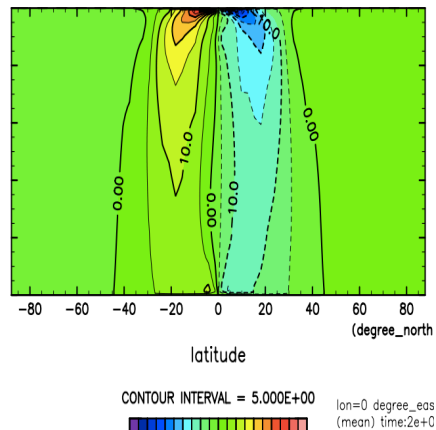
子午面分布(5 千年平均)

I98HDWeak_VFVM

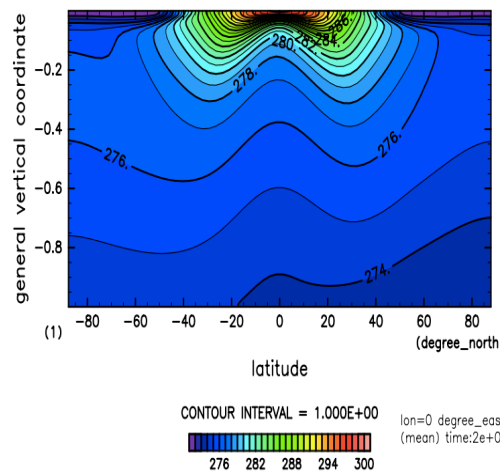
東西流



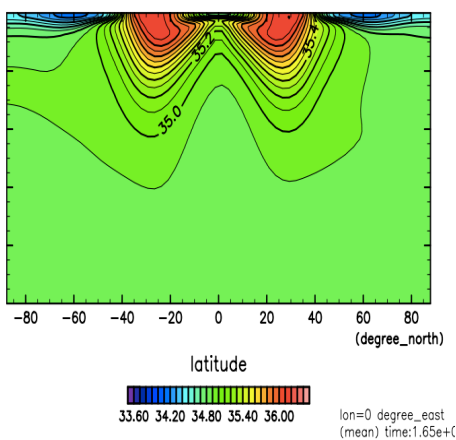
子午面循環 [sv]



温位

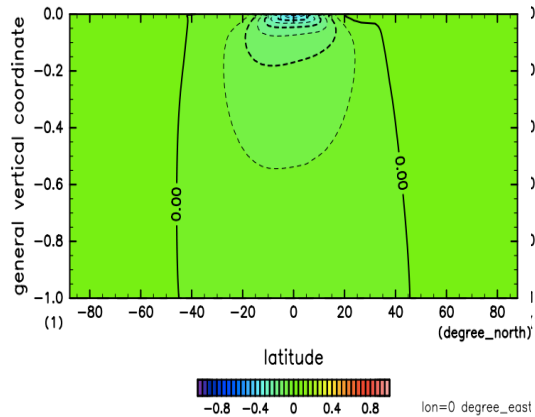


塩分

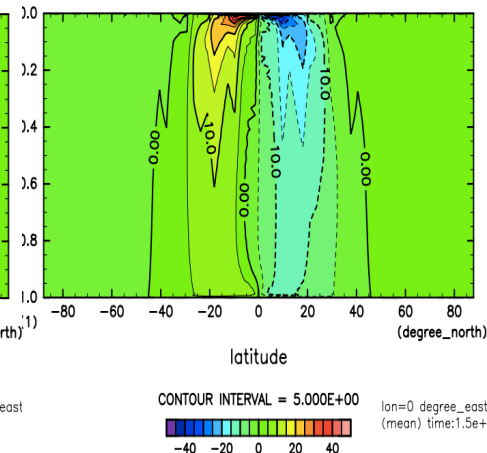


I98HDWeak_VSPM

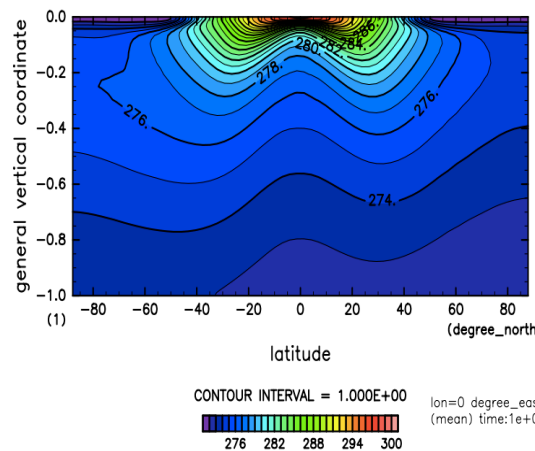
東西流



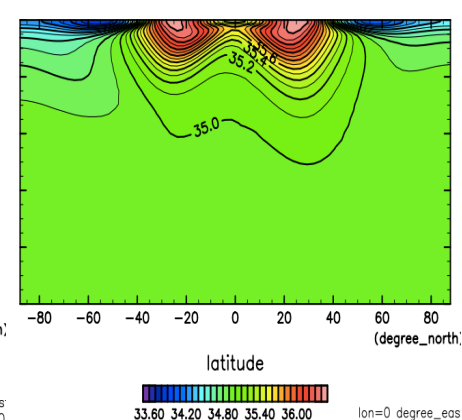
鉛直流



温位



塩分



- VFVM と VSPM の間でパターンは大きく変わらない。
- VSPM はドリフトの結果, 内部領域の塩分が全体的に 0.1 psu ほど大きい。

まとめ

- Ishiwatari et al.(1998) の水惑星灰色大気大循環の再試実験の結果をもとに軸対称海洋単体計算を行った。
 - 温位の全球平均値は数千年で統計的平衡状態に達する
 - 一方で, 塩分はドリフトする。
 - 鉛直離散化を再検討し, FVM を用いると, 厳密に塩分が保存する結果を得た.
 - この実験では, 保存性の悪さが, 海洋の全体的なパターンに与える影響は小さい.
- 循環や温位塩分の子午面分布は, 簡略大気海面境界条件下においても, これまで見てきた水惑星海洋大循環とよく似た特徴を持っていた。
 - I98CTRL と I98HDIFFWeak の結果の違いは小さい.

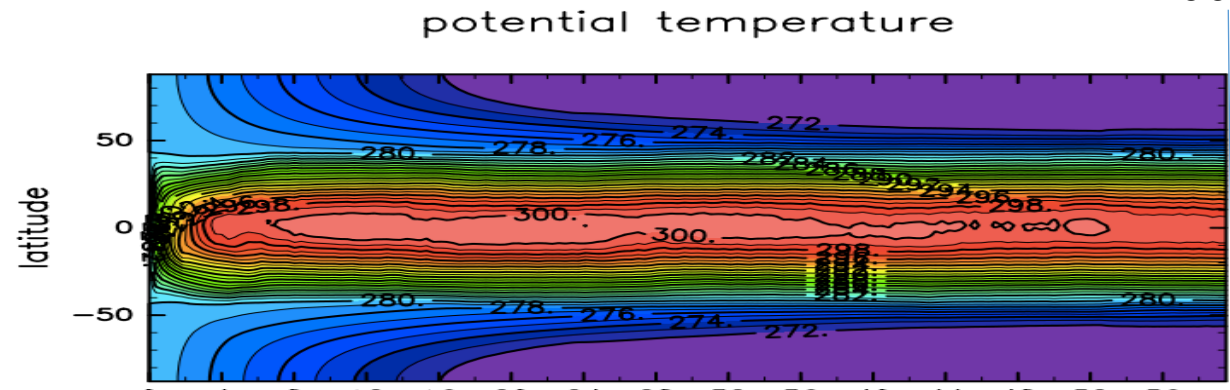
補足

結合計算の途中経過

- 大気モデル
- T10L26
 - INTH98 再試設定(CTRL)
- 海洋モデル
- PI42L26
 - HSPM-VFVM
- I98 再現実験と同様に、海面海氷面アルベドは、ゼロに設定
 - 海洋大循環による熱輸送の効果のみを見る

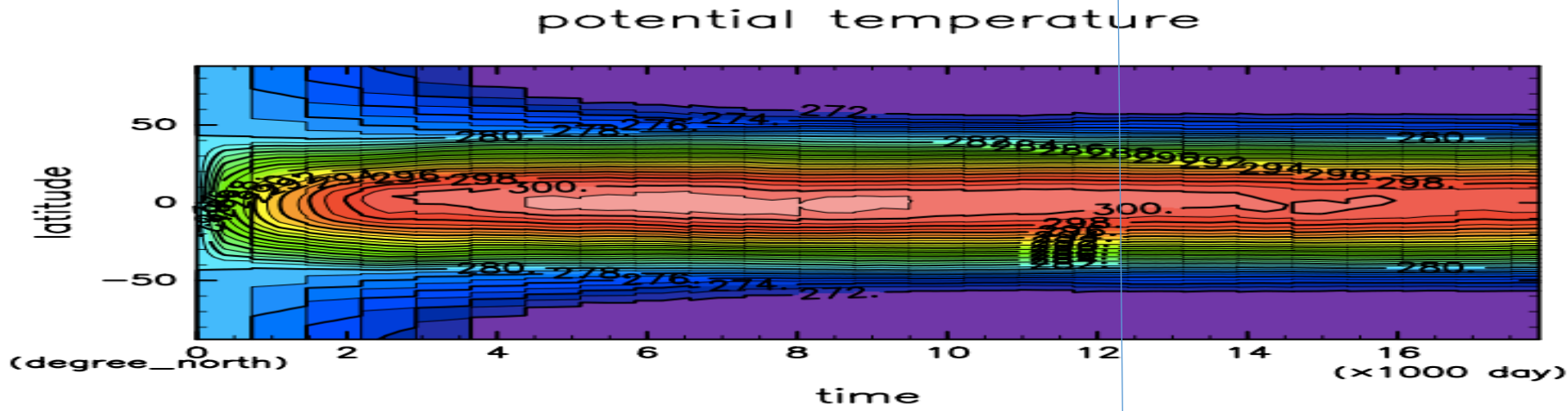
200年

純結合



周期的結合

(結合モデル 2年+海洋海水モデル 10年)



lon=0 degree_east
sig=-0.000342616 1

- 今の設定では周期的結合の方が 2~3 倍ほど計算時間短い。
 - 200年積分: 純結合 7 時間, 周期的結合 3 時間
- 周期的結合と純結合で、立ち上がり方はやや異なる。
- 平衡状態は同じようなところに行きそうだ。さらに積分を続ける。