

水惑星における大気大循環の数値実験

with DCPAM

~ Ishiwatari et al.(1998) の再現実験

Y.Kawai 2016/08/18

目的

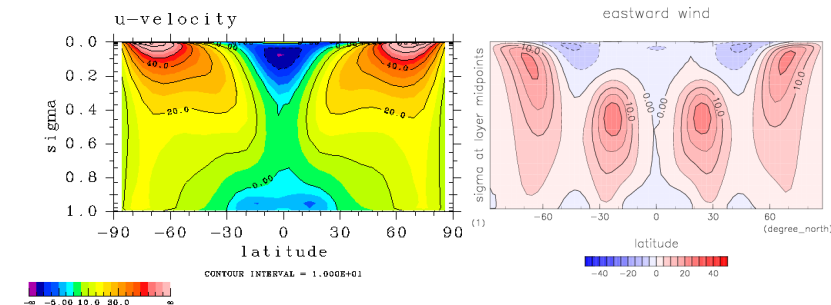
- Ishiwatari et al. (1998) が示した水惑星灰色大気大循環の計算結果と、それと対応するような DCPAM5 による数値実験の計算結果*1 で得られた大気場の特徴がいくつか異なっていた。

- 例えば, 東西ジェットの特徴や上層の温度分布

*1 自転角速度変更実験の中の灰色大気放射, 対流調節, 沼惑星条件, $\Omega/\Omega_E=1$ のケース

- 198 の数値実験が何であったかを確認するために, どのような実験設定を与えれば DCPAM5 において 198 の結果を再現できるかを調べる。

- 実際には, 幾つかの実験を経て 198 を再現する設定を見つけた
- * - ここでは, 再現に必要な設定とその結果のみを示す。
- 他の実験ケースやその結果は, 付録や web ページを参照



Ishiwatari et al. (1998)
で示される東西風

Ishiwatari et al. (1998)
に対応するような
DCPAM5 による数値実
験で示される 東西風

198 の実験を再現するDCPAM の設定

- 解像度
 - T21L26
- 惑星パラメータ
 - 惑星半径, 自転角速度, 自転傾斜角は地球と同じ値
- 大気成分
 - 乾燥空気の分子量は水蒸気と同じ値にする ($\sim 18 \times 10^{-3}$ [kg/mol])
- 放射過程
 - 灰色大気放射 (Nakajima et al. 1992)
 - 水蒸気による長波放射の吸収のみ考慮 (吸収係数 10^{-2} [m²/kg])
 - 年平均・日平均した太陽放射フラックスを大気上端で与える
- 力学過程
 - 水平粘性・水平拡散: 8 次 (ラプラシアン 4 つ), 最大波数に対する減衰の時定数 3 時間
 - 物質移流: スペクトル法
- 凝結過程
 - 対流調節 (Manabe et al., 1965)
 - 雲なし (雲の寿命は 0 秒)
- 惑星表面
 - Swamp 条件

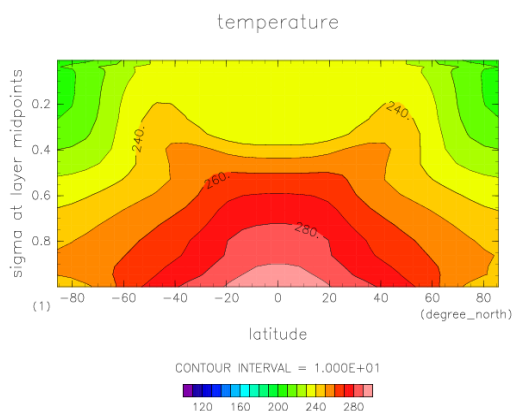
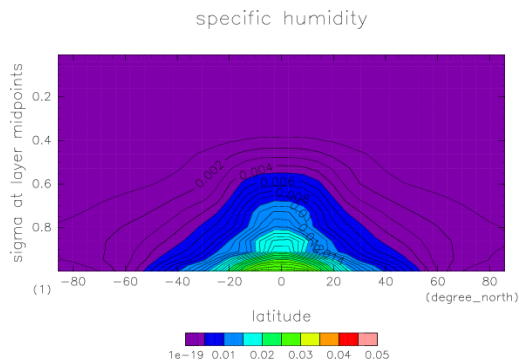
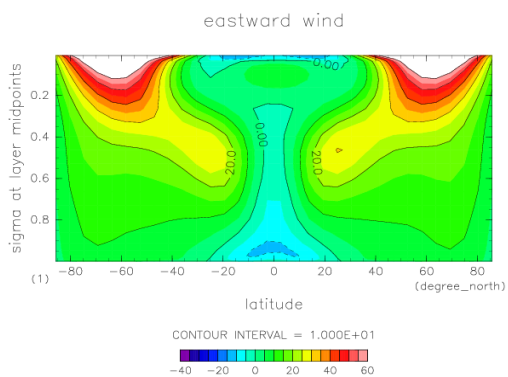
198 の実験を再現するDCPAM の設定

- 初期条件
 - 一様な比湿(10^{-3} [kg/kg])をもつ, 280 K の等温静止大気
- 積分時間
 - 1000 日程度
 - ただし, 統計的平衡状態を得るにはもっと時間積分が必要. この後示す再現実験では 60,000 日積分を行った.

198 の再現実験の結果

本実験

(1000 日~1500 日間の時間平均子午面分布)

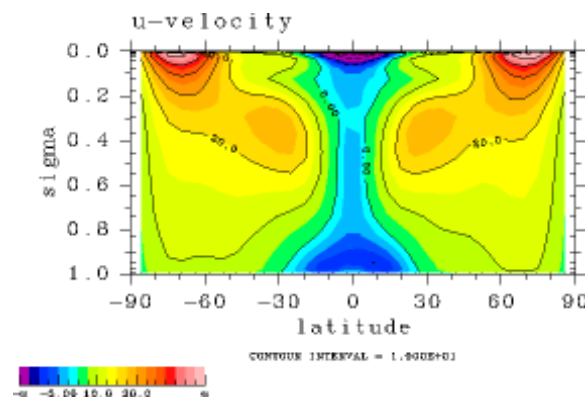


- 198 で得られた大気大循環の特徴を定性的には再現できているように見える。

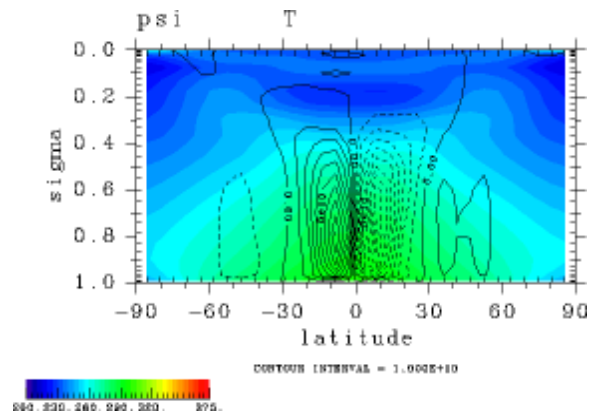
比較: Ishiwatari et al. (1998)

(注: T21L32, 積分時間 1000 日程度)

(注: 鉛直フィルタ無し)

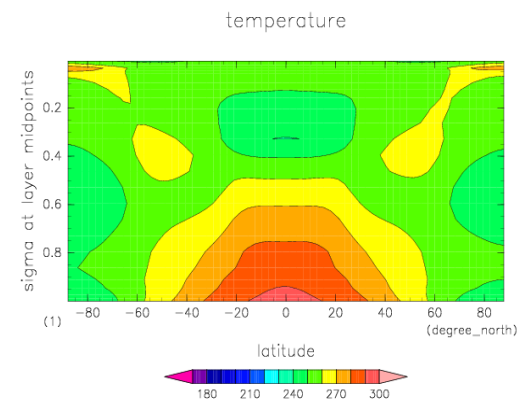
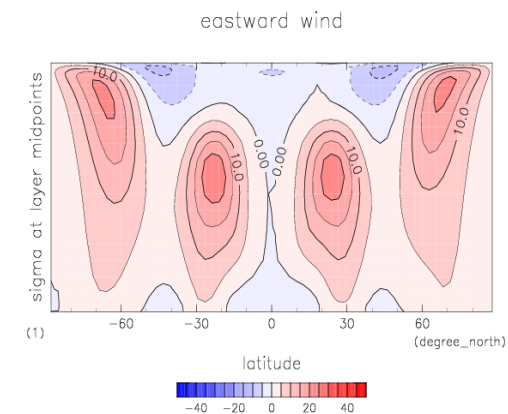


(注: トーンは等間隔でない, ジェットを強調して描いている)



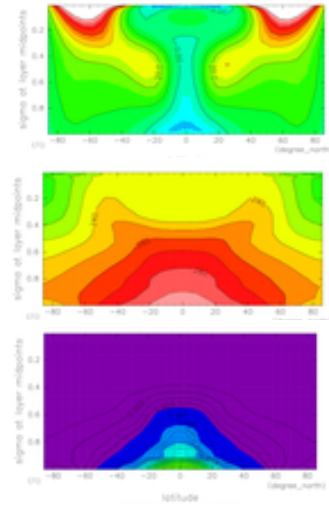
比較: 過去の DCPAM による結果

(注: T42L26, 積分時間 500 日程度)

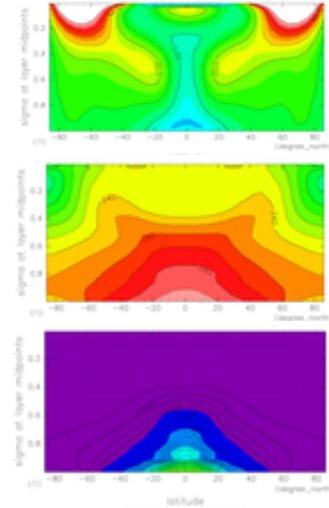


198 の再現実験の結果 (時系列)

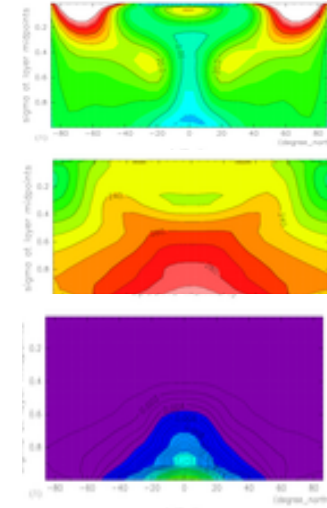
1,000 日



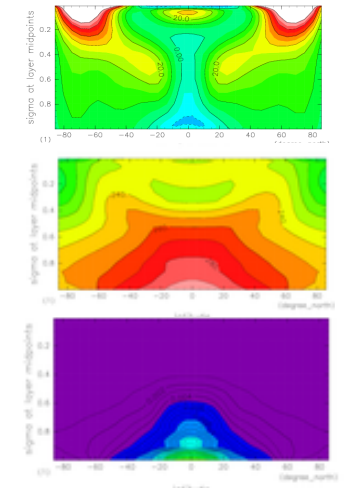
10,000 日



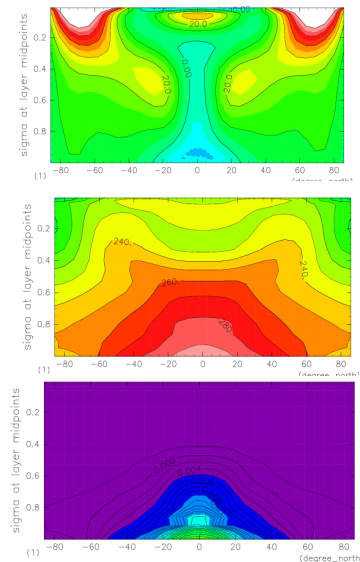
20,000 日



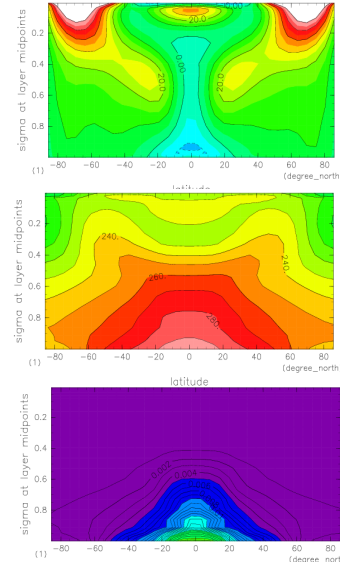
30,000 日



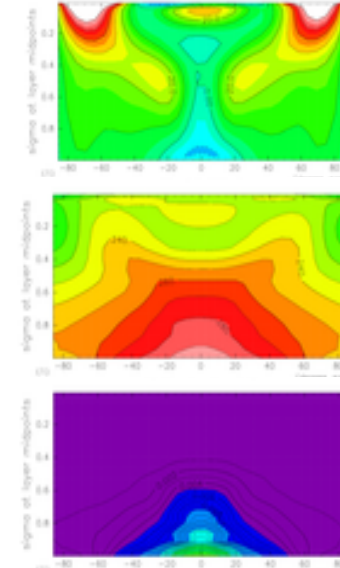
40,000 日



50,000 日

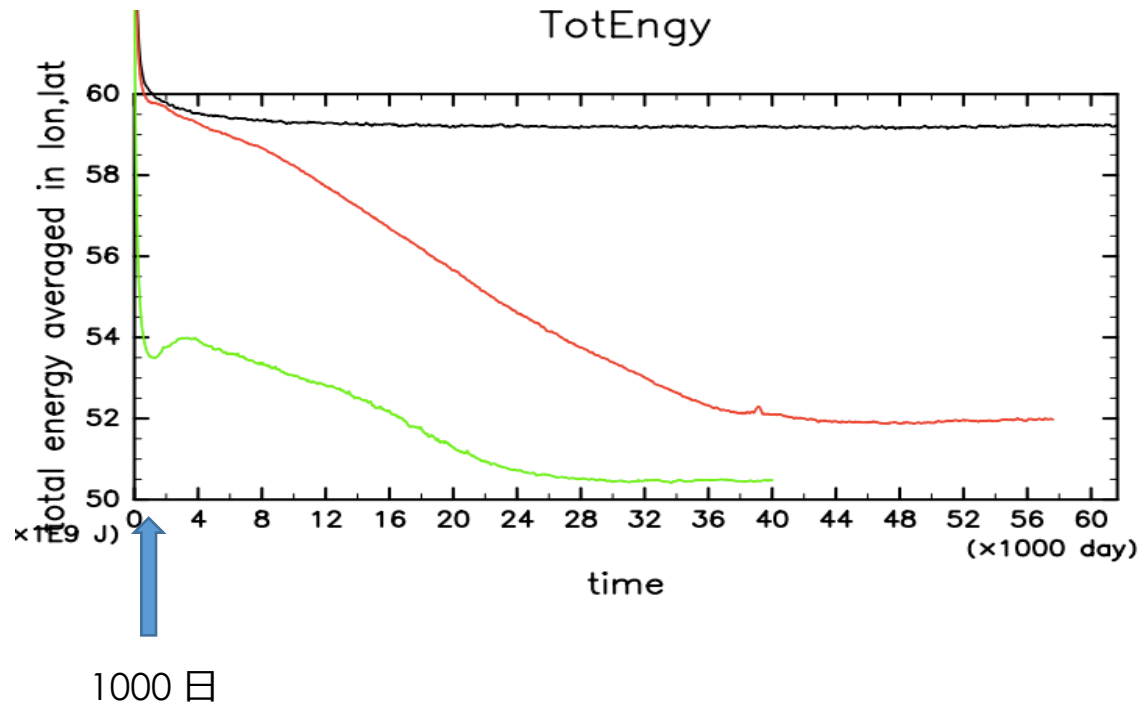


60,000 日



上段: 東西風
 中段: 温度
 下段: 比湿
 の子午面分布
 (* 各時刻の前後で 500 日平均)

198 の再現実験の結果 (時系列)



全エネルギーの全球積分値の時系列

黒: 198 再現実験

赤: 198 再現実験

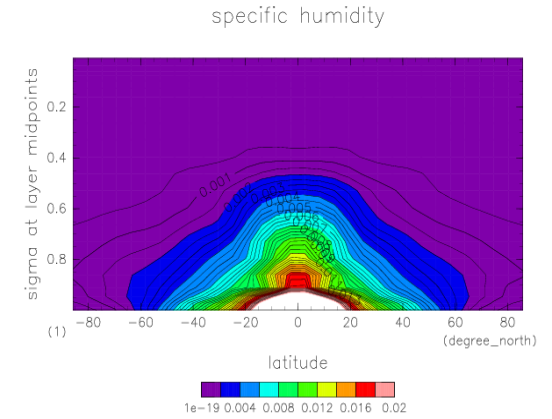
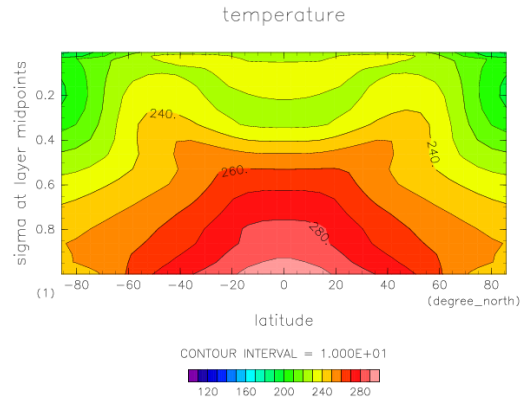
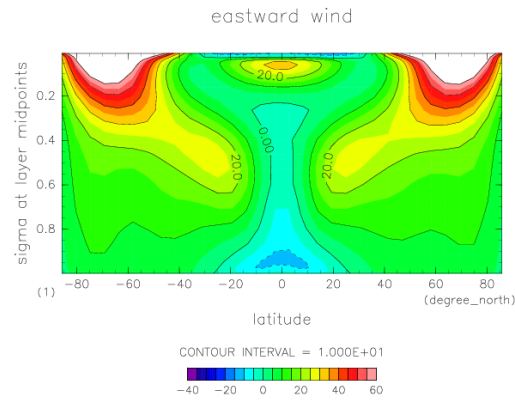
(ただし, セミ・ラグランジュ法により物質移流を計算)

緑: MOISTINI (付録参照)

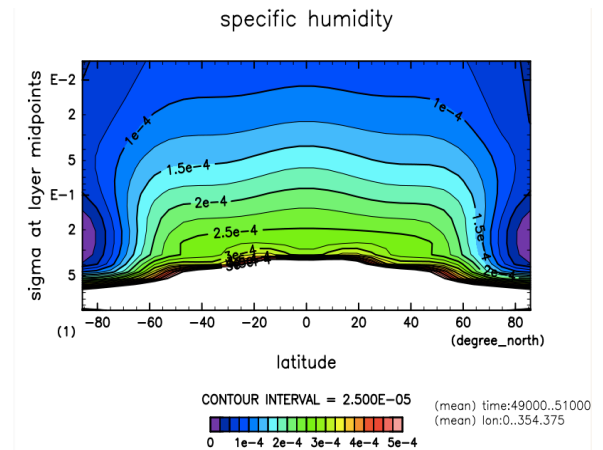
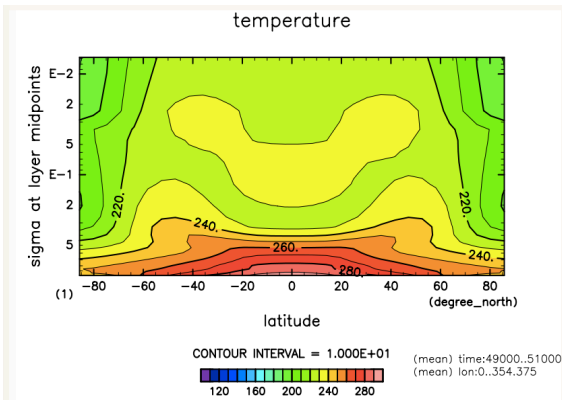
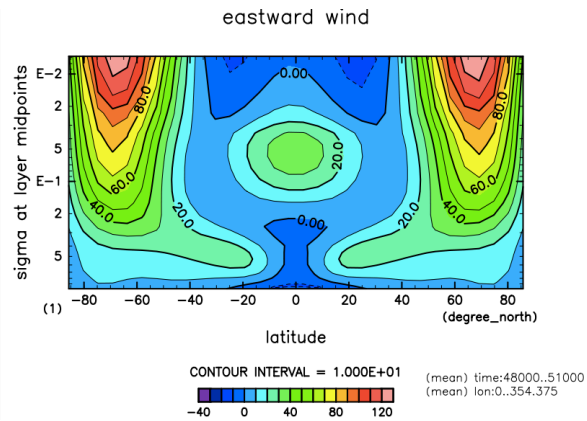
- 統計的平衡状態を得るまでには数万日の積分が必要
- 198 再現実験の設定では, 数千日後から統計的平衡状態に至るまでの間, 大気の特徴は大きくは変わらない.

198 の再現実験の結果 ~ 統計的平衡状態

* 50,000 日後の結果を 10 年平均



(鉛直 log プロット)



確認が必要な点

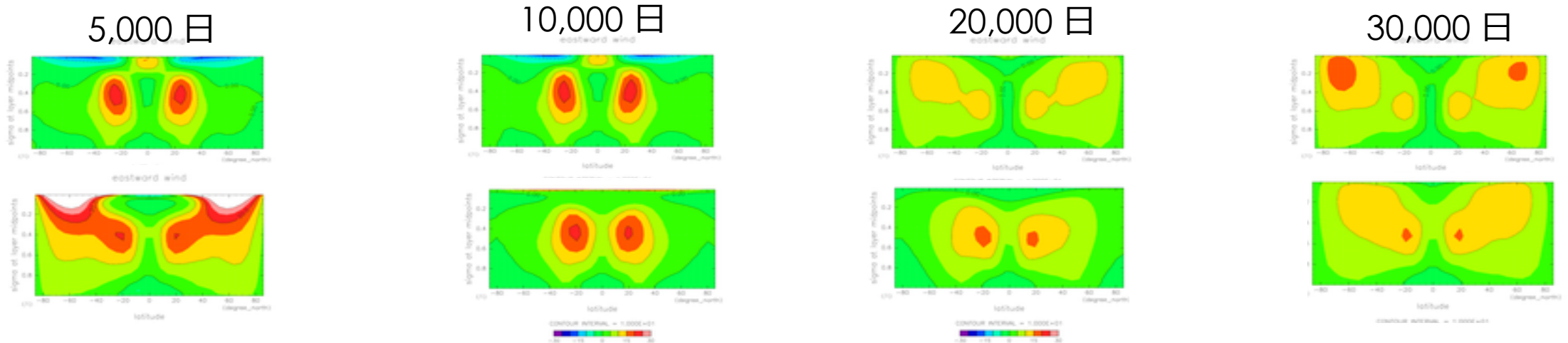
- 水蒸気の水平拡散の効果

- 198 の最大波数に対する減衰の時定数が, DCPAM でよく使われる 1 日に比べ 1/10 ほど短い.
- 水蒸気の移流計算にセミラグを使った実験ケース*1では, 5,000 日ぐらいいから大気構造が急激に変化し始める(下図)ことが分かっている.
 - この原因が水蒸気の水平拡散にあるのか要確認

*1 DCPAM において, 物質移流にセミラグ移流を使う場合には時間発展に水平拡散が含まれない.

HDIFF8

MOSITINI



東西風子午面分布の時系列

まとめ

- Ishiwatari et al. (1998) の水惑星灰色大気大循環の実験結果を再現する DCPAM 5 の実験設定を調べた.
- $O(1,000)$ 日頃の大気場はまだ統計的平衡状態に達していない.
 - さらに時間積分を続けたところ, 統計的平衡状態を得るには数万日の積分が必要であることが分かった.
- 実験設定を少し変えると, 5,000 日ぐらいから大気の分布が急に変化し始める(付録参照).
 - 水蒸気の水平拡散が関係しているように思われるが, 詳細については要確認

付録

付録 1

水惑星における大気大循環の数値実験

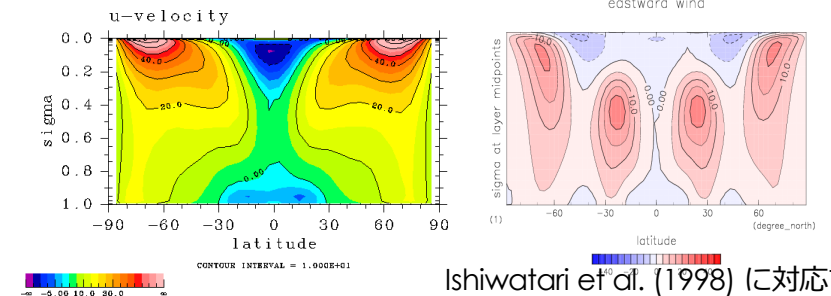
with DCPAM

~ 灰色放射, 対流調節, swamp 条件を用いた場合 (Part 1)

Y.Kawai 2016/07/22

確認したいこと

- Ishiwatari et al. (1998) で示される灰色大気大循環と、それと対応するような(一昔前の) DCPAM5 による数値実験(自転角速度変更実験の中の灰色大気放射, 対流調節, 沼惑星条件, $\Omega/\Omega_E = 1$ のケース)で得られた大気の特徴が異なる.
 - 例えば帯状ジェットの特徴.
 - Ishiwatari et al. (1998, 2007) の延長上に位置付けたい, DCPAM5 と海洋モデルによる水惑星結合計算に至る前に, この結果の違いについて調べるべきだろう.
- 要因として考えられること
 - 水平解像度の違い
 - 前者は T21, 後者は T42
 - 積分時間不足
 - 後者は積分時間が短く, 大気上層が冷え切っていない?
- DCPAM5 (20150804 版)を用いて上記を確認
 - スピンアップのための実験: T21L26 で 30,000 日積分
 - スピンアップ後の実験(統計的平衡状態): T21L26, T42L26 で 3,650 日(10 年)積分

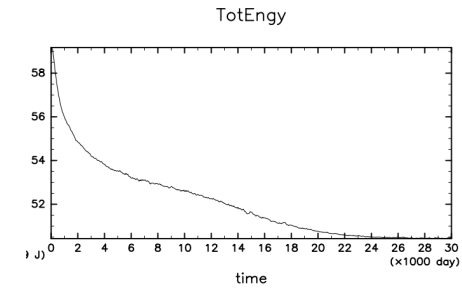


Ishiwatari et al. (1998) で示される結果

Ishiwatari et al. (1998) に対応するような DCPAM5 を用いた数値実験の結果

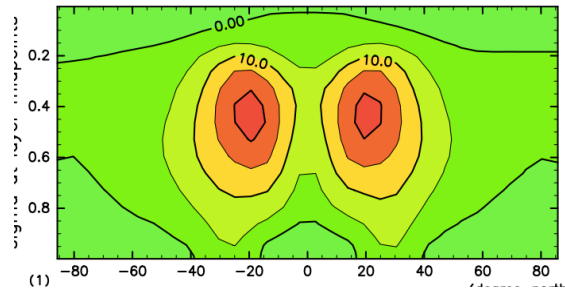
計算結果: スピンアップ

帯状平均した東西風, 温度場の時系列

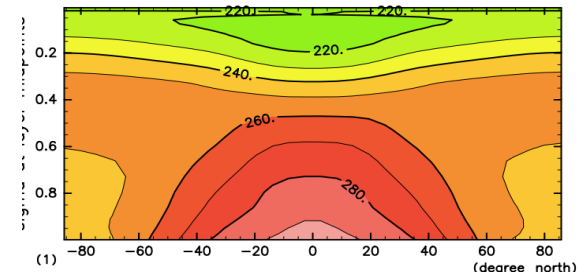


5,000 日

eastward wind



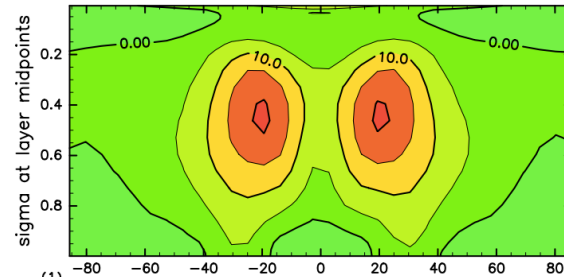
temperature



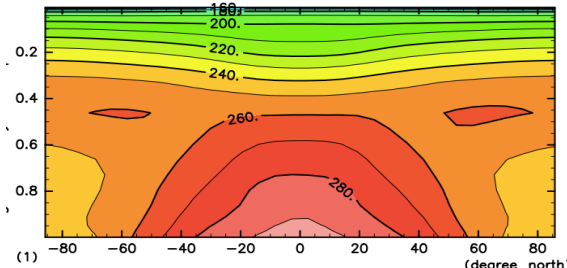
latitude

10,000 日

eastward wind



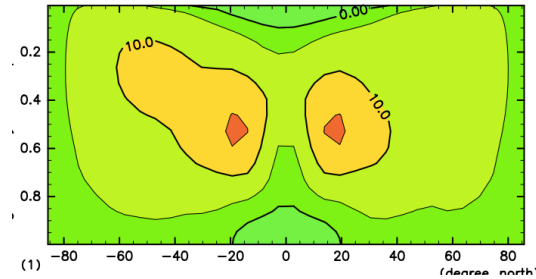
temperature



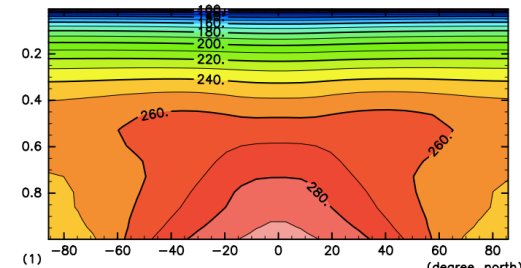
latitude

20,000 日

eastward wind



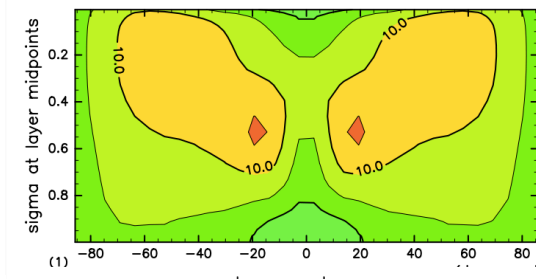
temperature



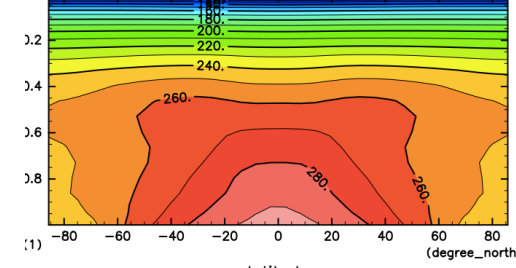
latitude

30,000 日

eastward wind



temperature



latitude

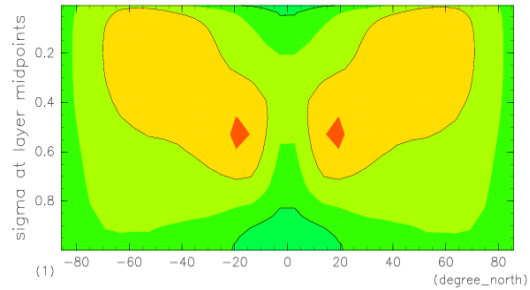
✓ 各時刻の前後で 500 日平均

計算結果: 統計的平衡状態

帯状平均した東西風, 温度場

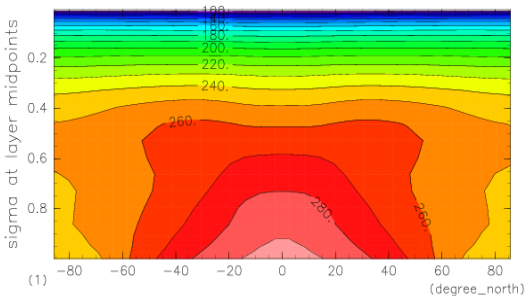
T21L26

eastward wind



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01
-30 -15 0 15 30

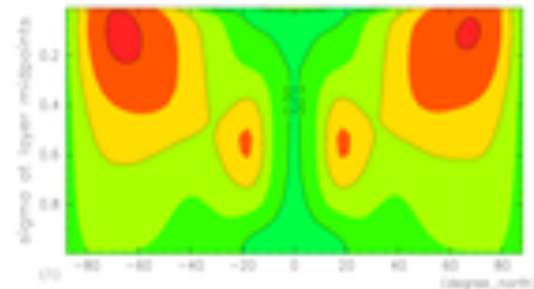
temperature



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01
120 160 200 240 280

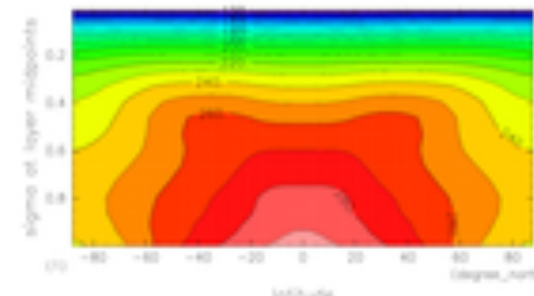
T42L26

eastward wind



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01
-30 -15 0 15 30

temperature



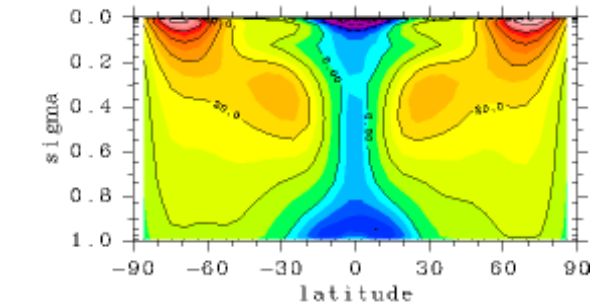
CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01
120 160 200 240 280

比較: Ishiwatari et al. (1998)

(注: T21L32, 積分時間 1000 日程度)

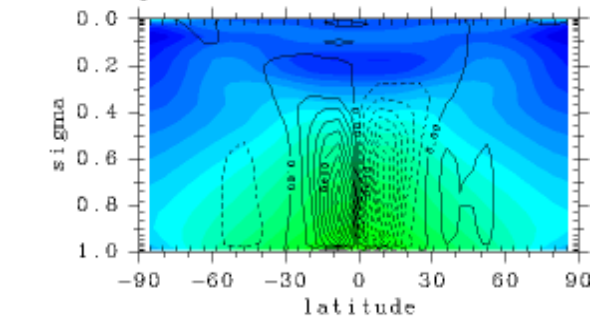
(注: 鉛直フィルタ無し)

u-velocity



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01
(注: トーンは等間隔でない,
ジェットを強調して描いている)

psi T

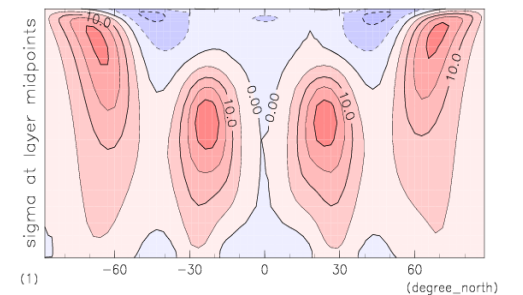


CONTOUR INTERVAL = 1.000E+10
280 320 360 380 375

比較: 過去の DCPAM による結果

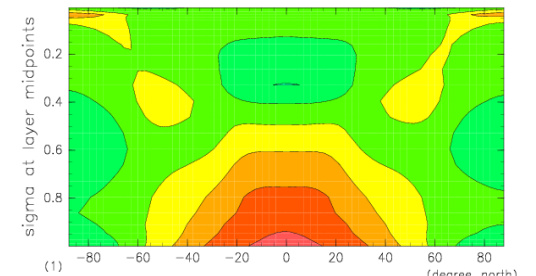
(注: T42L26, 積分時間 500 日程度)

eastward wind



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01
-40 -20 0 20 40

temperature



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01
180 210 240 270 300

分かったこと・考察

- 水平解像度(T42 と T21)の依存性
 - T21 で表現される, 高緯度側の帯状ジェット(地球の極ジェットに対応?)は, T42 の場合と比べて幅が広く不明瞭.
 - 198 と過去の DCPAM による結果において, 対流圏の帯状ジェットの特徴の違いは, 水平解像度がいくらか影響しているように見える.
- 長時間積分
 - 初期に水蒸気が無く, 徐々に海面から供給される設定では, 統計的平衡状態に落ち着き始めるまでに, 長い積分時間(~50 年)が必要.
 - 198 のように初期に 10^{-5} の比湿を一様に与えた場合は, 今回得た統計的平衡状態と同じものが得られるのだろうか?
 - 198 や過去の DCPAM による結果と比べ, 統計的平衡状態における中層大気の温度は全体的にかなり低く, 南北温度差は小さくなった.
 - 対応して中層大気の帯状ジェットが弱い(パターンは似ている)

付録 2

水惑星における大気大循環の数値実験 with DCPAM

~ 灰色放射, 対流調節, swamp 条件を用いた場合 (Part 2)

Y.Kawai 2016/08/10

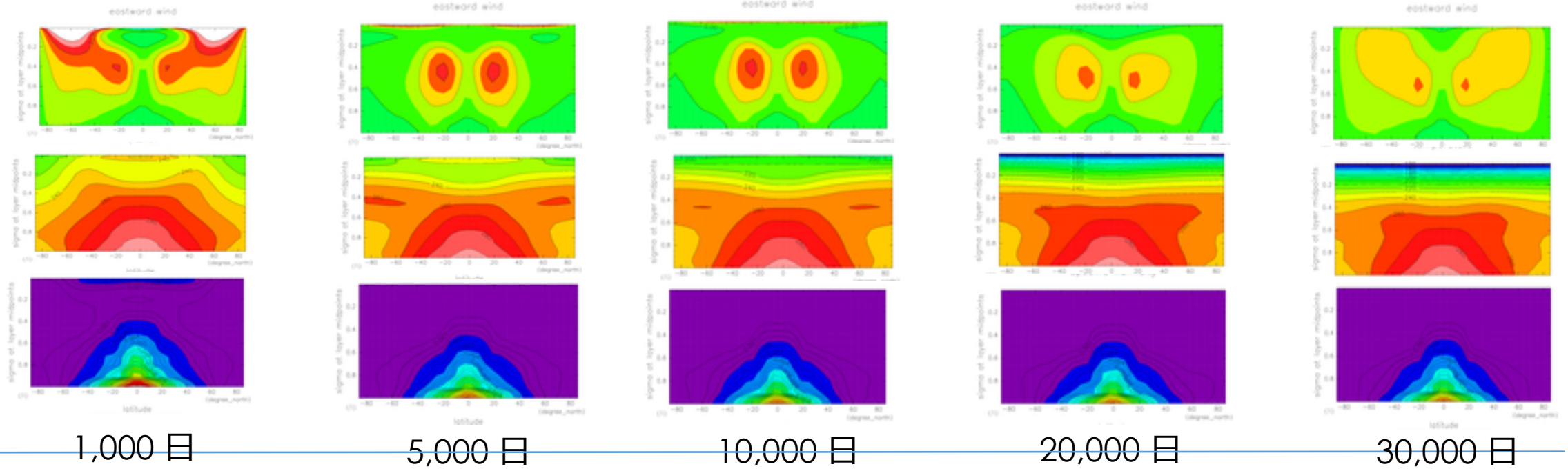
追加実験

- Part 1 の灰色大気水惑星実験(swamp 条件)に続き, 以下の追加実験を行った
 - 実験 1 (MOISTINIT) :
 - 初期の大気を湿らす. 比湿: $0, 10^{-2}$ [kg/kg]
 - 統計的平衡状態に達する時間は短くなるか?
 - また, それらの統計的平衡状態に, 大きな違いはあるか?
 - 実験 2 (HDIFF8):
 - 水平粘性として 8 階の微分演算子を使う(今までは 4 次).
 - 前の T21の結果では, 亜熱帯ジェットと極ジェットが繋がっているように見える. 8 階の水平粘性を使うと, 2 つのジェットは分離するか?

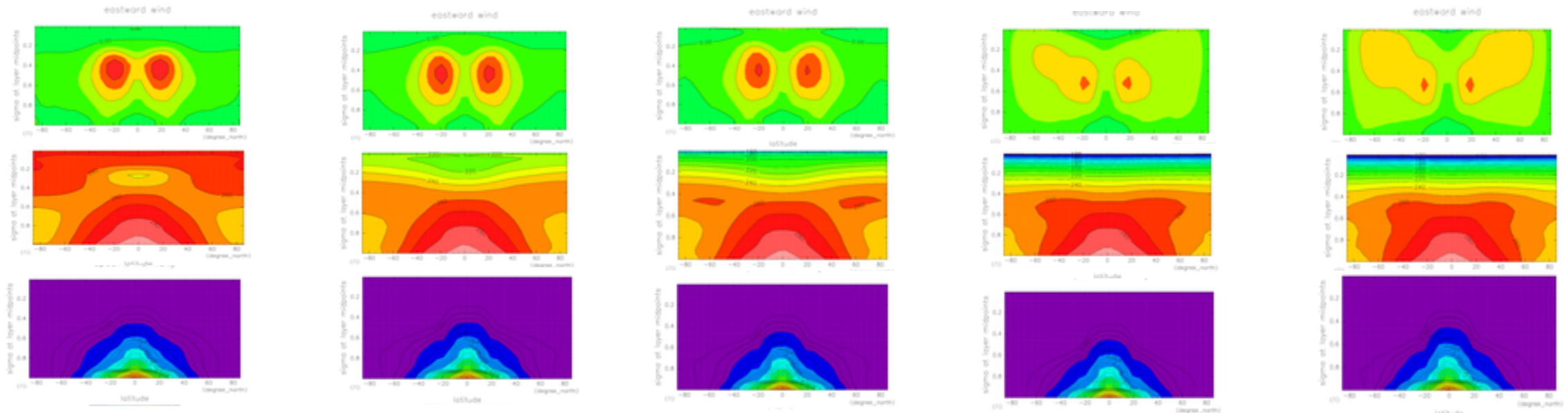
✓ 前回行った T21L26 のケースをコントロール実験とする.

追加実験の計算結果 (MOISTINI 時系列)

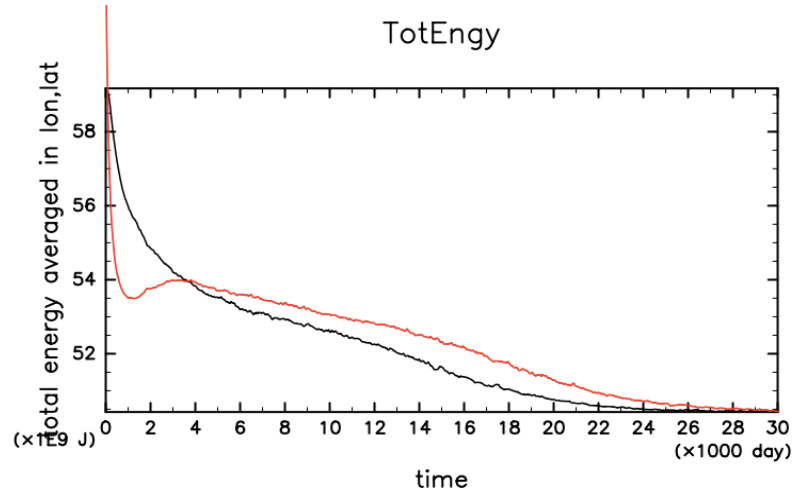
MOSITINI



比較:
CNTRL



追加実験の計算結果 (MOISTINI 時系列)



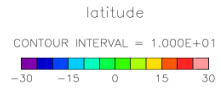
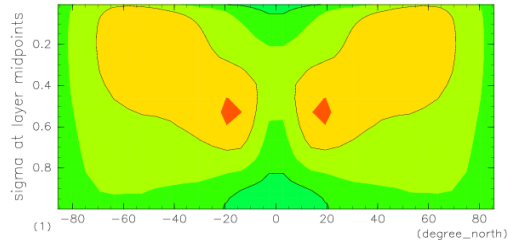
赤線: MOISTINI ($qv_0=1e-2$)
黒線: CNTRL ($qv_0=0$)

- 198 のように初期に湿った大気から始めると, 大気場の時間発展の仕方が(特に最初の数千日間の大気上層において)CNTRL とやや異なる.
- しかし, 統計的平衡状態やそれに至るまでに必要な時間は大差がないように見える.

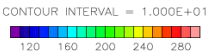
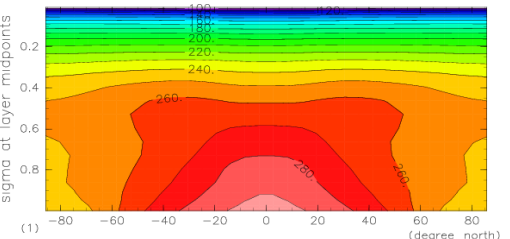
追加実験の計算結果 (統計的平衡状態)

MOISTINI

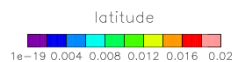
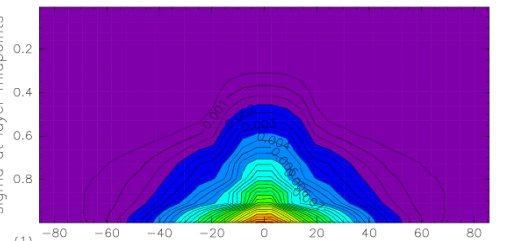
eastward wind



temperature

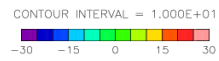
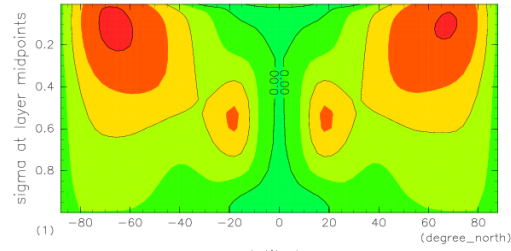


specific humidity

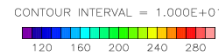
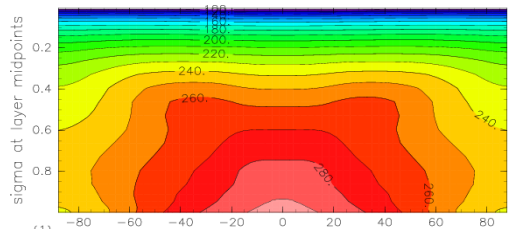


HDIFF8

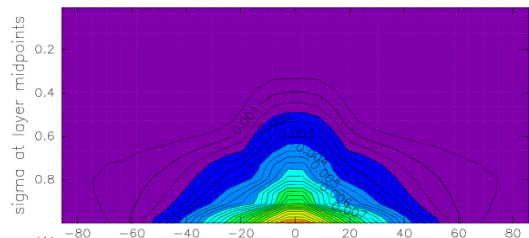
eastward wind



temperature

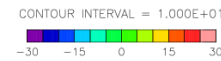
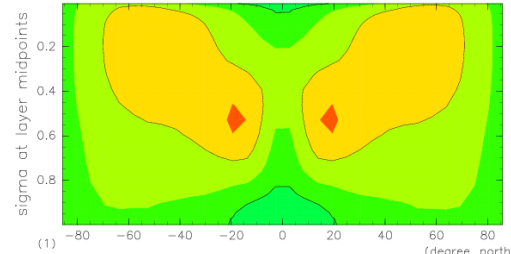


specific humidity

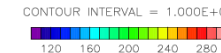
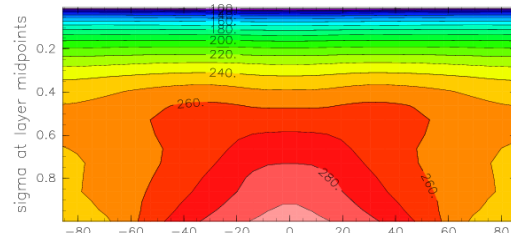


CNTRL

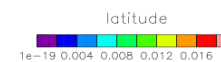
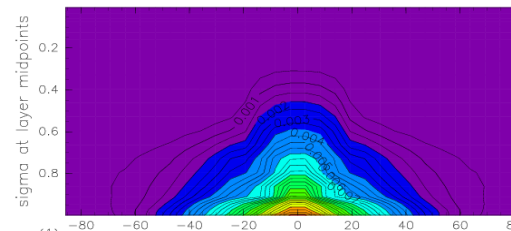
eastward wind



temperature



specific humidity



- HDIFF8 の寒帯ジェットは, CNTRL より明瞭で, T42 で得られたジェットの特徴とよく似ている.

- T21 における 4 次の粘性は, (傾圧波の活動度を弱め), 寒帯ジェットを弱めていたのだろう.

- 統計的平衡状態において, CNTRL と MOISTINI の結果にはほとんど違いが見られない

- 198 との水蒸気の初期値の違いは, 統計的平衡状態の大気場に対して本質的ではないだろう.

✓ いずれも10年間平均

付録 2

水惑星における大気大循環の数値実験 with DCPAM

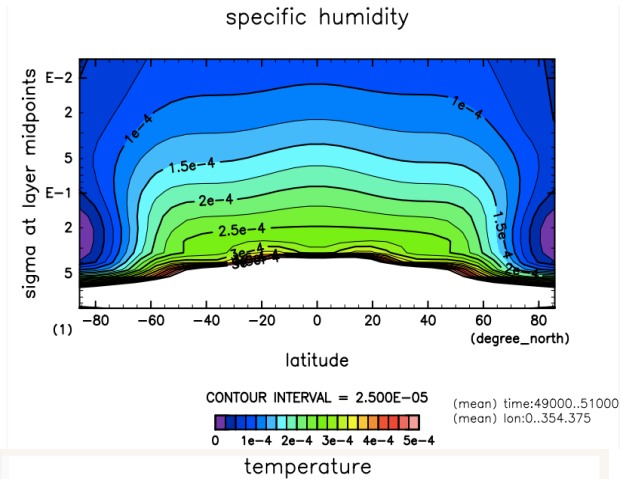
~ 灰色放射, 対流調節, swamp 条件を用いた場合 (Part 3)

Y.Kawai 2016/08/19

198 再現実験における 物質移流スキームの依存性

5 万日後の大気上層の比湿分布

物質移流: スペクトル法
specific humidity



物質移流: セミ・ラグランジュ法
specific humidity

