大気大循環モデルに見られる赤道域降水活動の表現の多様性に関する研究

林祥介（神大理）、石渡正樹（北大理）、山田由貴子（環境研）、
森川靖大（北大理）、中島健介（九大理）、高橋芳幸（神大理）、
竹広真一（京大数理）、小高正嗣（北大理）

平成19年度スーパーコンピュータ利用研究報告会
2007年11月20日

気象・気候モデル的背景

- 湿潤過程を含む系の収束問題
  - 分解能をあげれば幸せになれるのか？
    - 輸送表現問題
    - 乱流表現問題
      - 「積雲パラメタリゼーション」問題
    - 雲微物理表現問題
  - モデルの振る舞いに対する一致した見解は得られるのか
    - モデルの実装に応じた理解（現実との違い方の理解）
  - そもそもモデルがとりえる多様性が掌握されていない
- 水惑星実験(APE)
  - 簡単な境界条件（地表面が全部海洋）での大気モデルの振る舞いを観察して知見を得る

赤道域の降水階層構造

観測: **OLR**の経度-時間図 (Nakazawa, 1988)

水惑星実験:降水の経度-時間図 (Hayashi and Sumi, 1986) T42L12

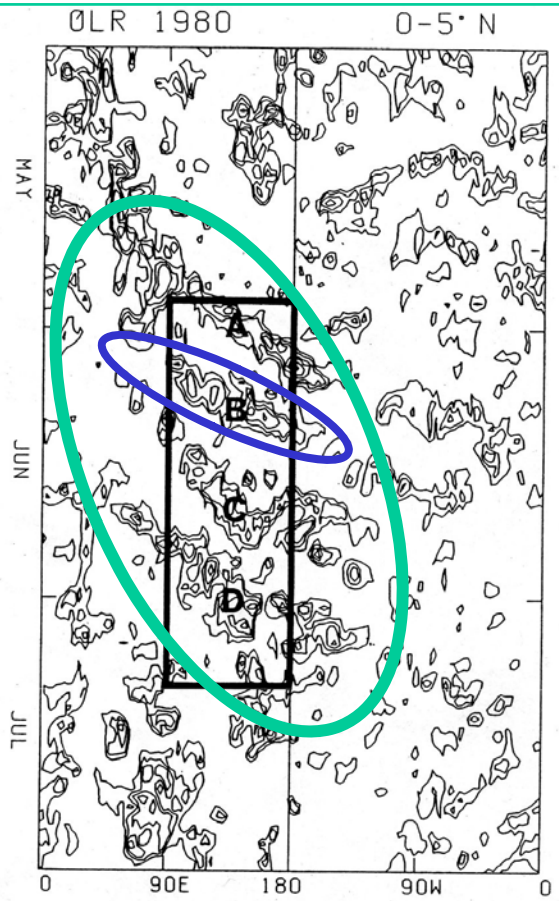
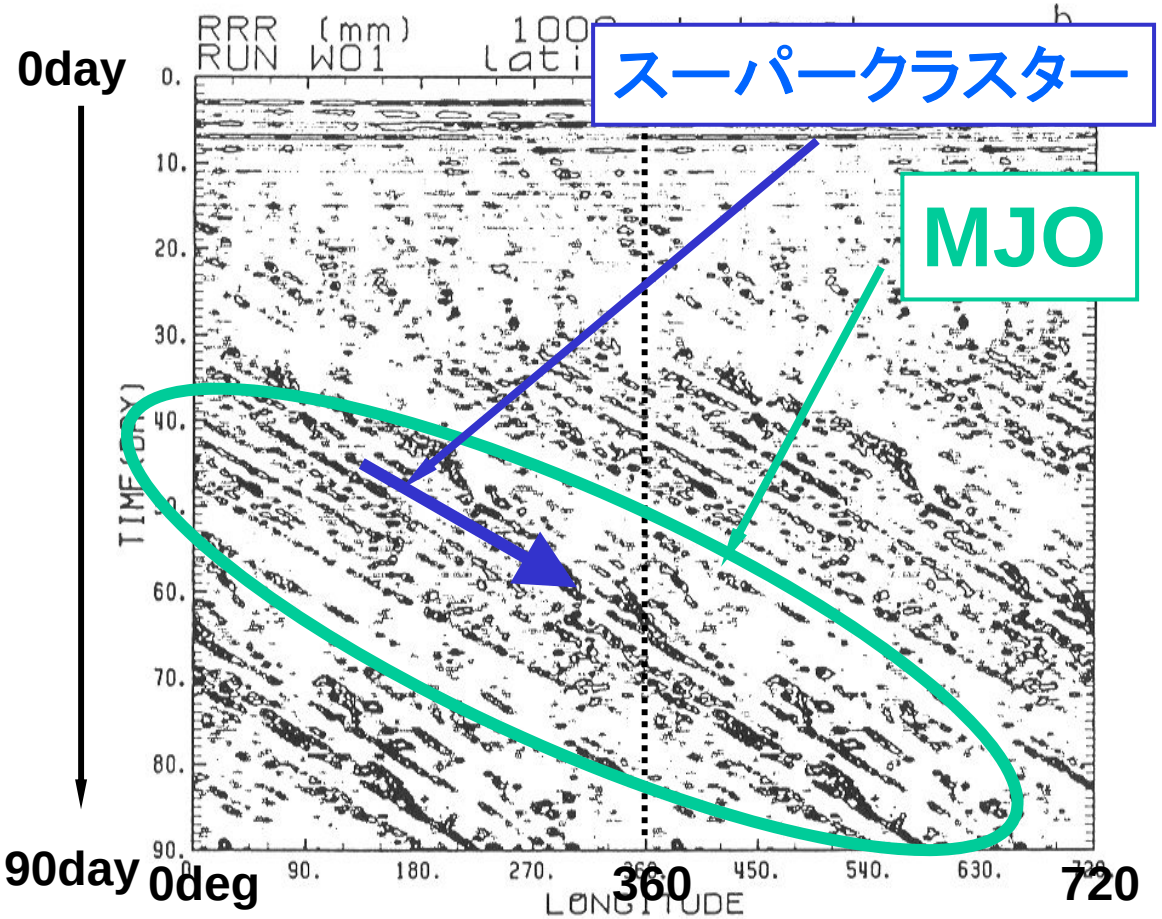


Fig. 1. Time-longitude section of transient (seasonal trend removed) OLR averaged between the equator and 5°N from May to July in 1980. Negative (active convective) regions are contoured. Contour interval decrements of 30 Wm^{-2} starting at -15 Wm^{-2}. Symbols A to D indicate super clusters.



われわれの目的

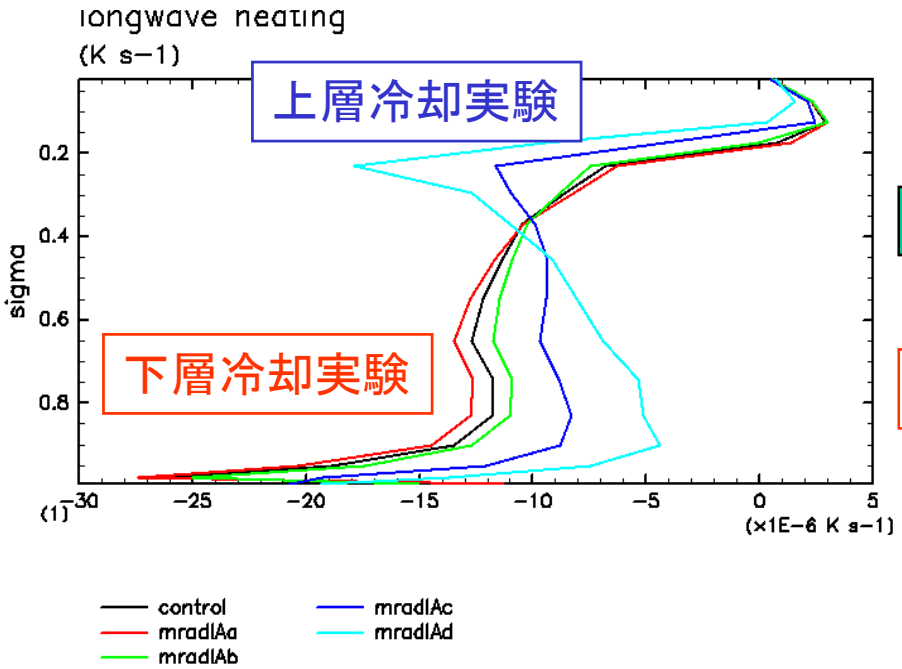
- 比較的簡略な物理過程しか持たないGCMでの水惑星実験（GFD）
  - パラメータ空間における面的な走査
  - 赤道域降水構造のモデルにおける表現の多様性を探査
  - 多様な降水構造の発生と維持のメカニズムの記述へ
    簡略な理論と複雑大規模な気象・気候モデルの接続
- 特に物理過程依存性
  - 凝結加熱率の鉛直分布に対する依存性の調査
  - 東進構造の生成とwave-CISK的構造
- 同時に，パラメタ研究に都合のよい大循環モデルの開発（DCPAM:地球型惑星大気モデル）

  Fortran90/95特性の活用により
  - 可読性が高い（物理モデルとの対応付けが容易）
  - 可変性が高い（物理モデルの変更に容易に対応）
  - 階層的に用意したモデル群（書式を統合した複数のモデルと物理過程の着脱共有：雲対流モデルdeepconv など）

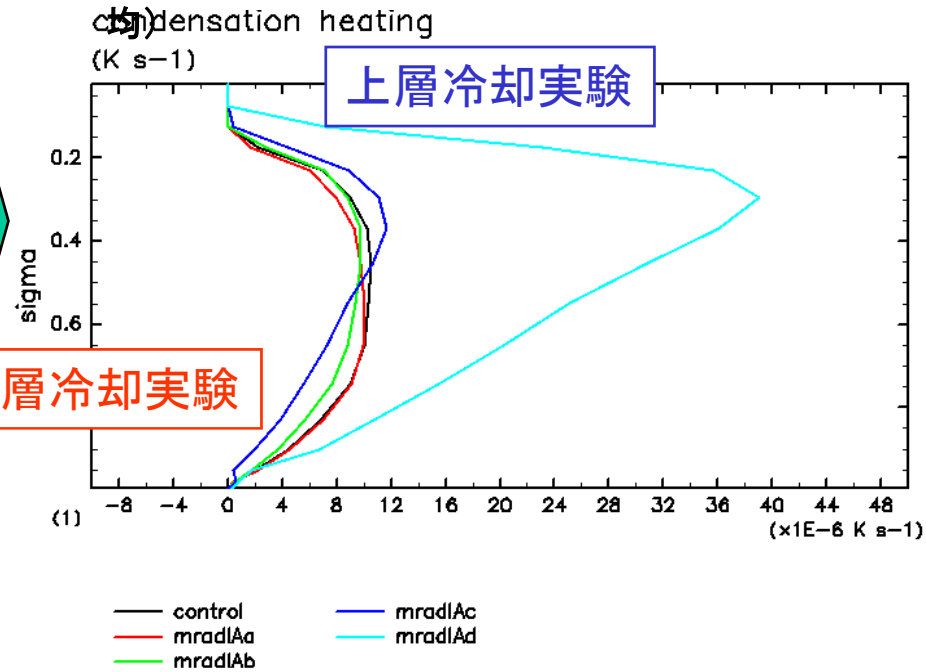
放射冷却率依存性実験（これまで）

- 東進構造がwave-CISK的に発現しているのであれば
  - 上層冷却（上層積雲加熱）ではケルビン波のwave-CISK構造が発現し東進構造
  - 下層冷却（下層積雲加熱）ではwave-CISKが働かず背景風に移流されるCIFK構造
- モデル: 地球流体電脳倶楽部版 AGCM5
  - 球面 3 次元プリミティブ方程式系: 解像度T42L16
  - 放射 : 水蒸気 3 バンド, 乾燥空気 1 バンド
  - 積雲パラメタリゼーション: Kuo スキーム
  - SST分布:南北対称・東西一様分布

放射冷却率（赤道上時間東西平均）

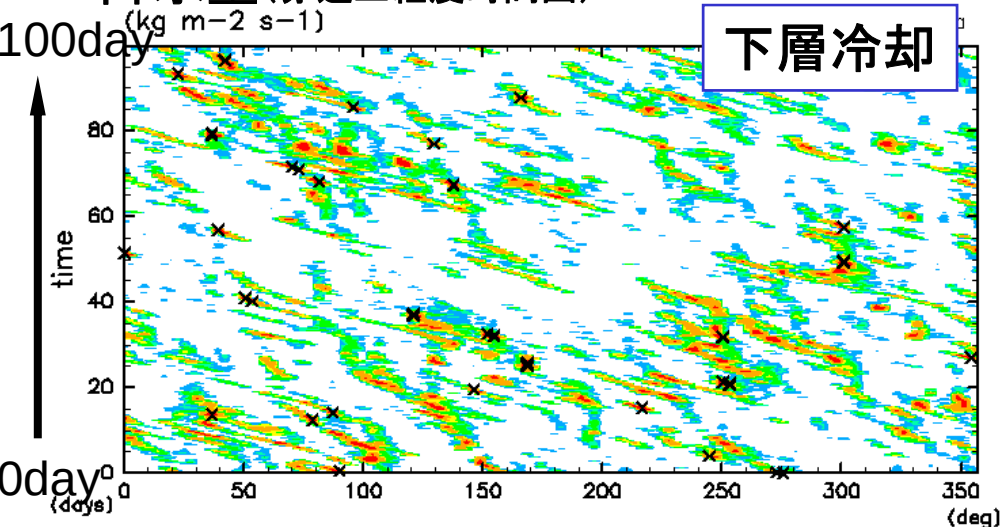


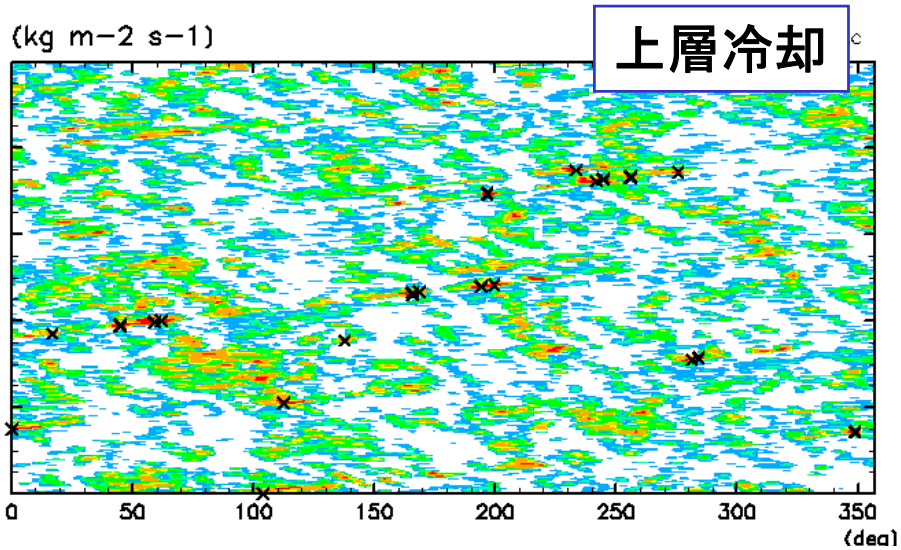
凝結加熱率（赤道上時間東西平均）



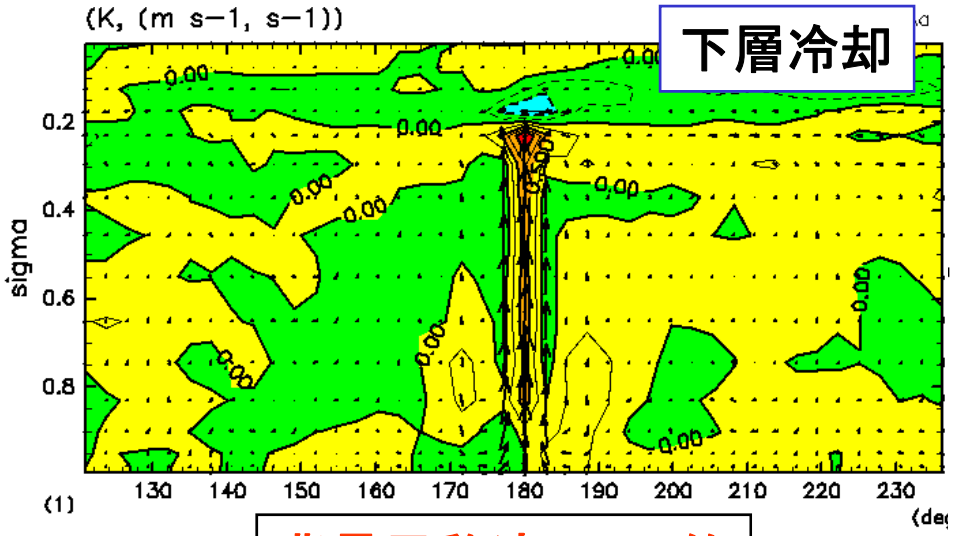
放射冷却率依存性実験（これまで）

降水量（赤道上経度時間図）

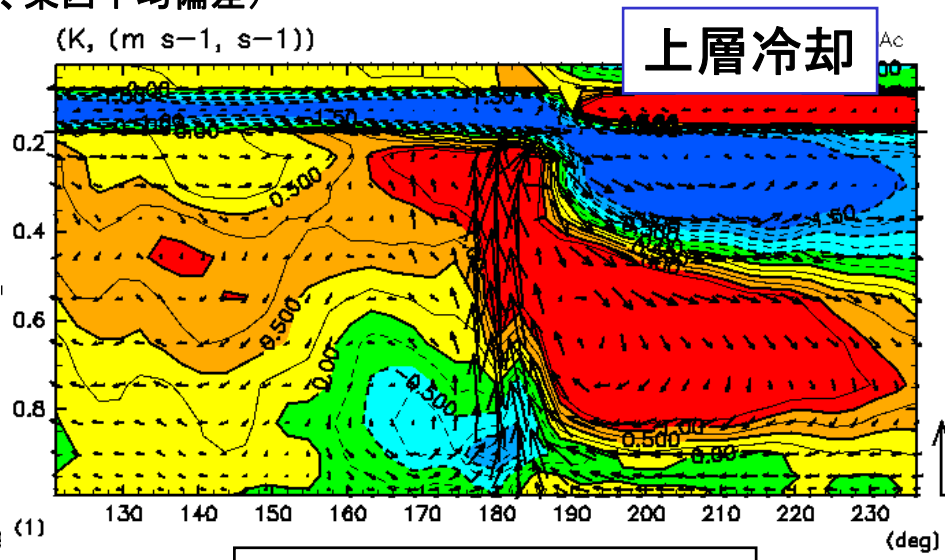




温度場、風速場の合成図（赤道上経度高度図、東西平均偏差）



背景風移流CIFK的



Kelvin wave-CISK的

放射冷却率依存性実験により wave-CISK的予想との整合性が確かめられたが

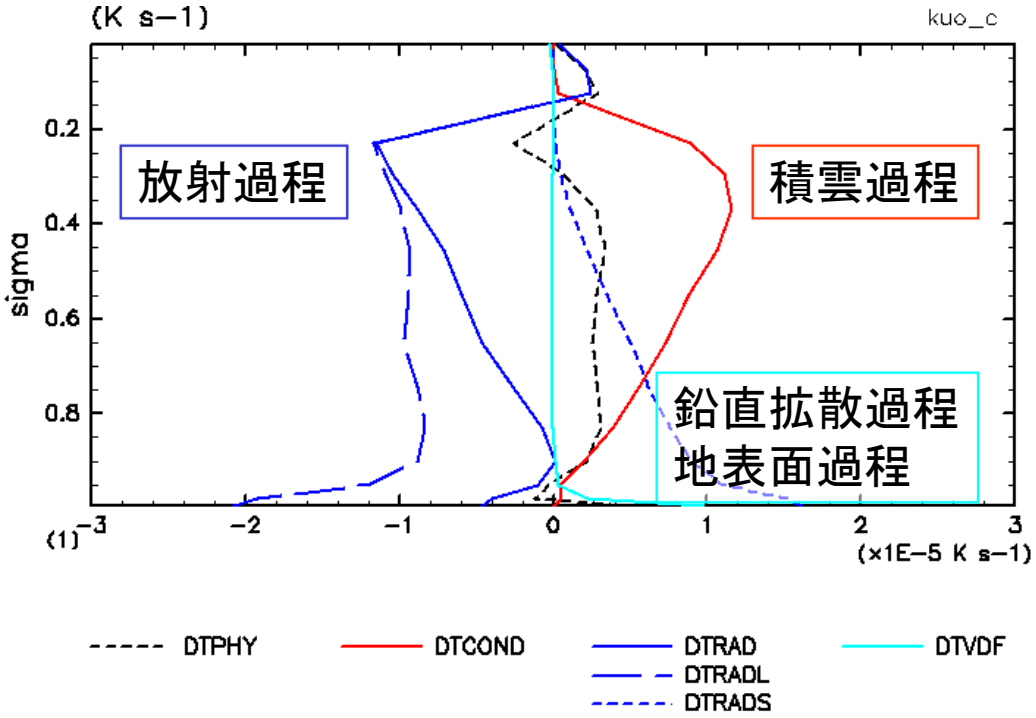
- Hayashi and Sumi (1986) や Numaguti and Hayashi (1991) と違い東進降水構造の発現数が少ない
- モデルの違いが原因？
  - 気象庁の最初の全球予報モデルvs地球流体電脳倶楽部AGCM5.3、特に物理過程が違う
    - 放射
    - 乱流混合
    - 地表面フラックス
- さらなる探索
  - 拡散係数の固定実験（場の乱流過程へのフィードバックを切り離し、より単純な理論に近づける）

水蒸気拡散係数固定実験：設定

- 鉛直混合過程を単純化させる

●降水域東進が顕著な上層冷却実験に対して、

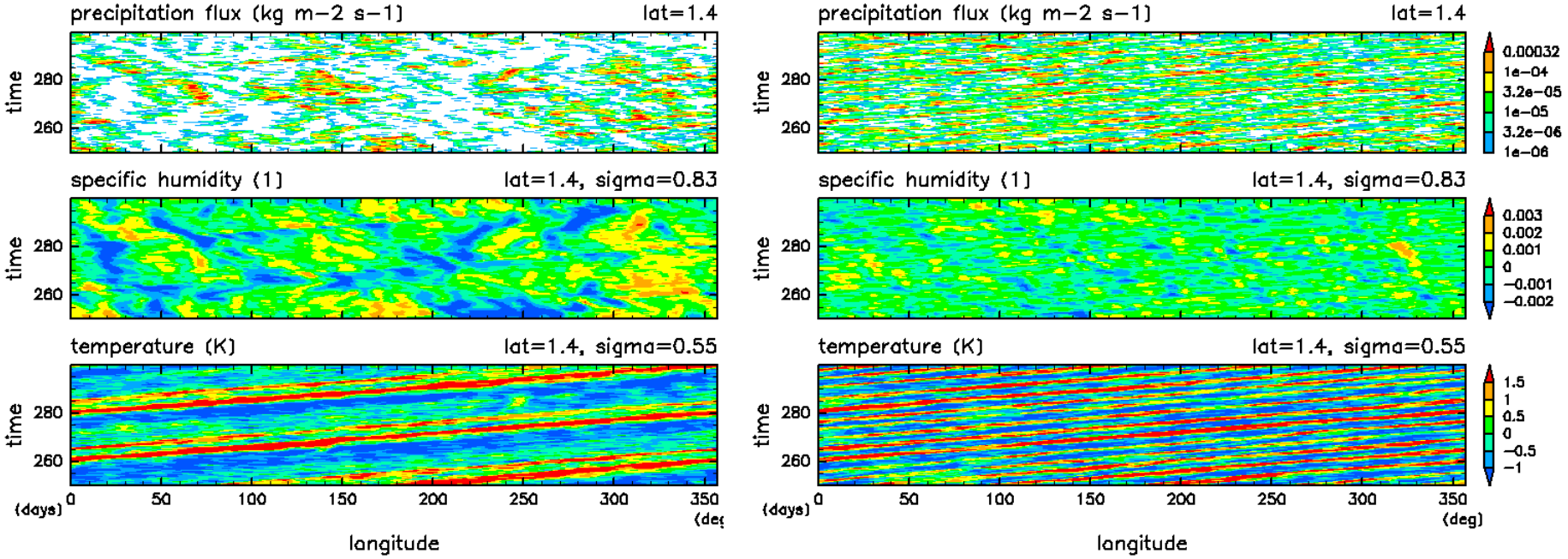
- ●放射冷却率固定（東西時間平均値）
- ●鉛直拡散（Yamada&Mellor）
  地表面過程（Louis）
  - ●拡散係数を固定（東西時間平均値）
  - ●拡散加[熱、速度、湿度]率を固定（東西時間平均値）
  - ●鉛直拡散、地表面過程を計算しない



物理過程による加熱率（赤道上東西時間平均）

水蒸気拡散係数固定実験：
昨年度の結果（KUO）

- 標準実験（上層冷却）
  - 強い降水域が、赤道円周上に一箇所ないし二箇所しか存在しない
- 拡散係数固定実験
  - 強い降水域が赤道円周上に複数発生する傾向

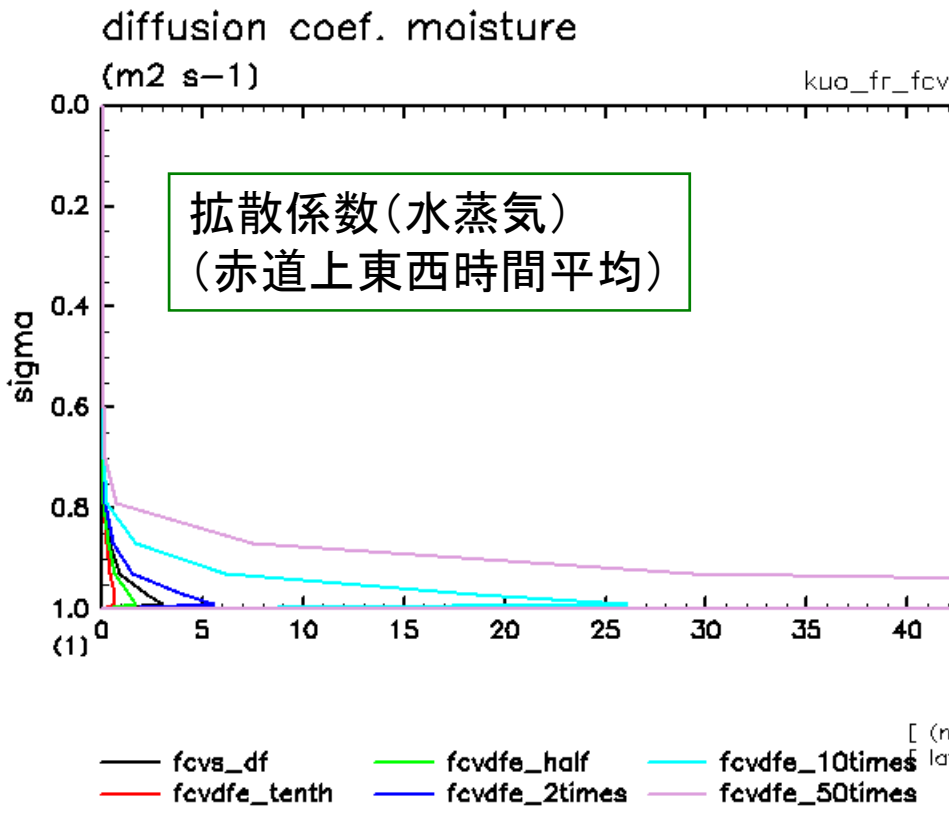


拡散係数固定実験により

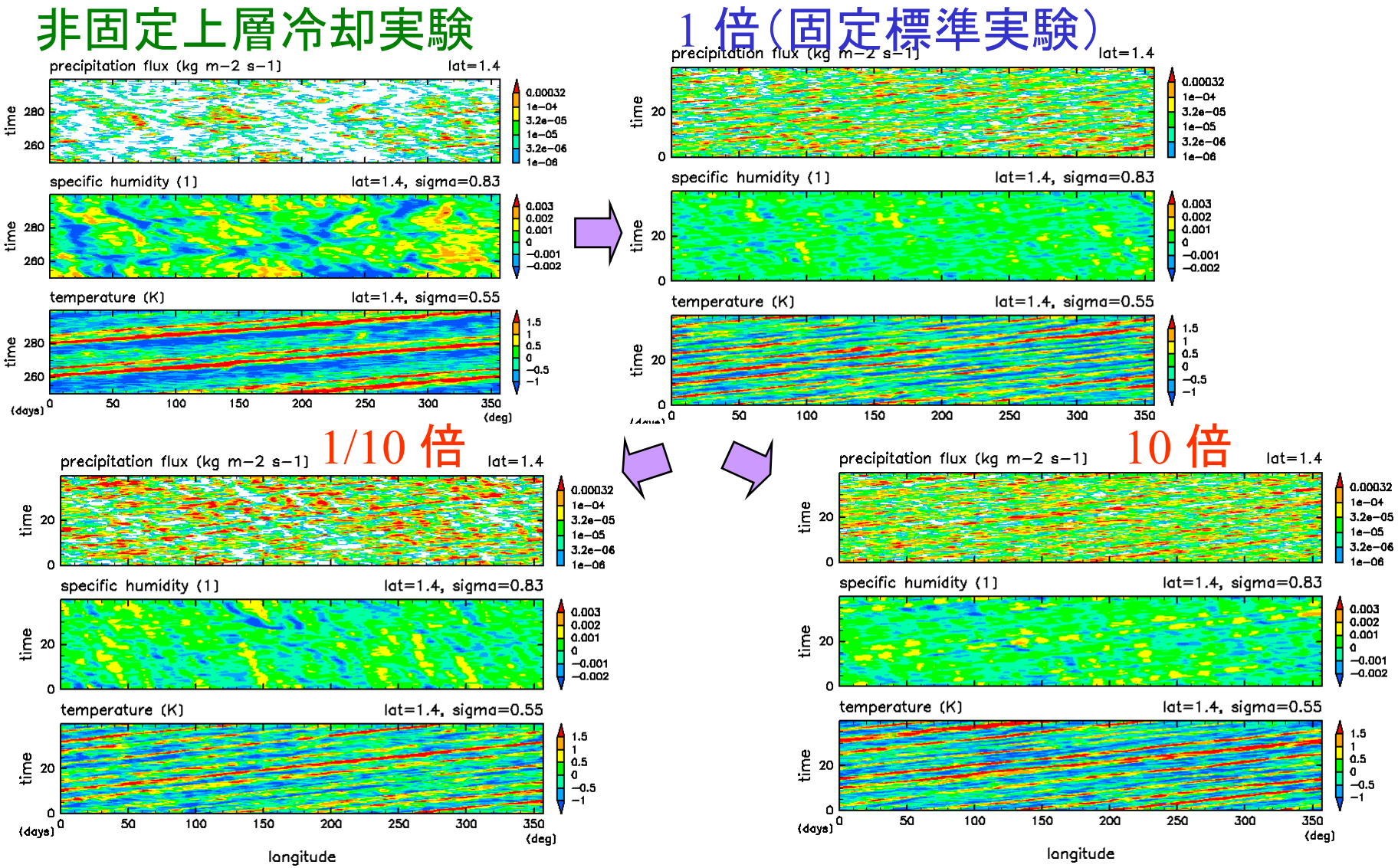
- 拡散係数を固定すると東進構造の数が増化傾向
  - 水蒸気コントラストの維持されにくさ（されやすさ）がキーとなる？
- 本年度の調査
  - 水蒸気の拡散係数だけを変化させパラメタ実験
    - 温度、運動量の拡散係数は固定
    - 対流圏上層における拡散係数は 0 とする

本年度の実験設定

- 降水域東進が顕著な上層冷却実験に対して、
  - 放射冷却率固定（東西時間平均値）
  - 地表面過程（Louis)の拡散係数を固定（東西時間平均値）
  - 鉛直拡散（Yamada&Mellor）の拡散係数（水蒸気、熱、運動量）を固定（東西時間平均値）し、拡散係数（水蒸気）について1倍、1/10倍、10 倍実験を行う

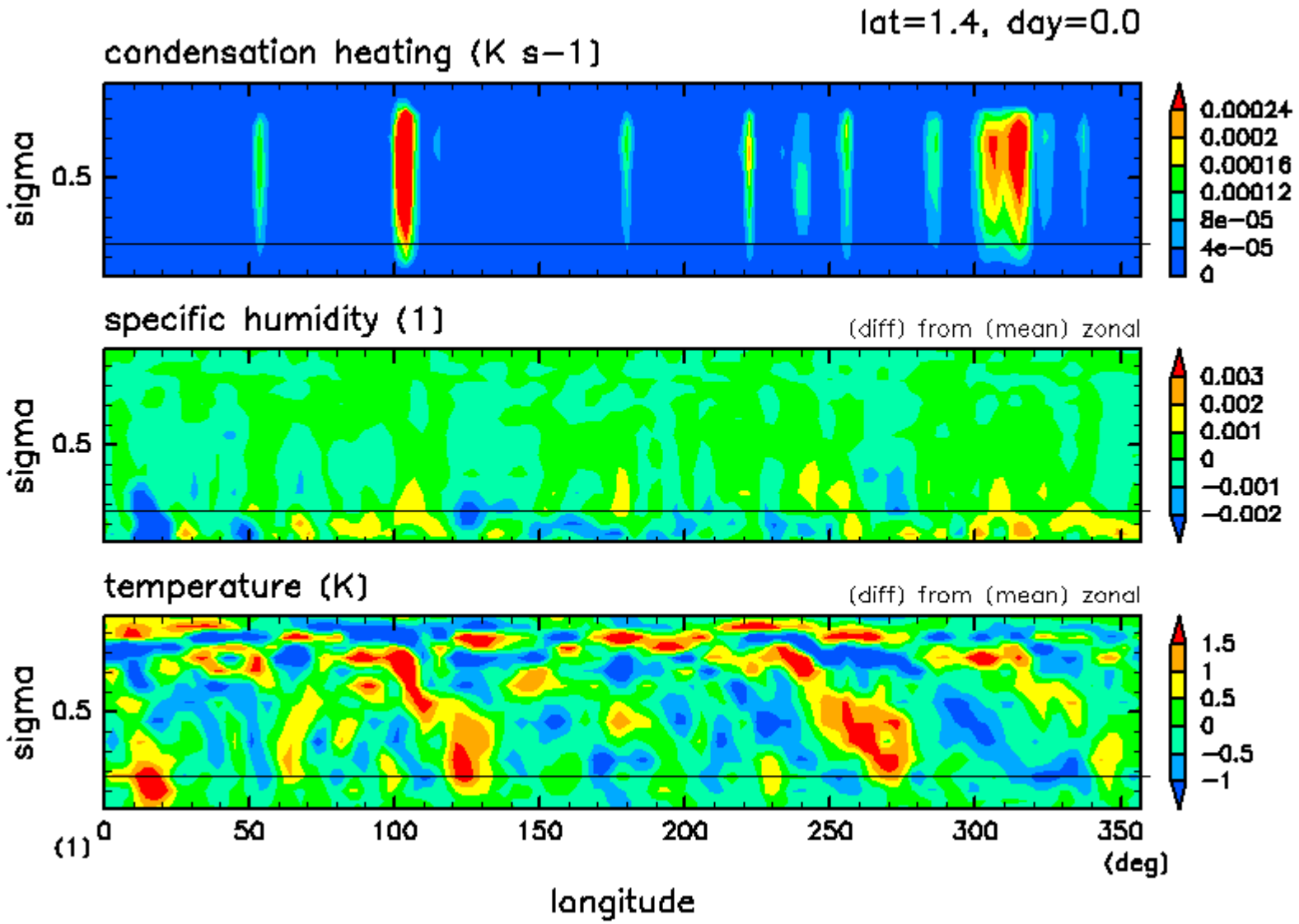


水蒸気拡散係数固定実験
降水・湿度・温度



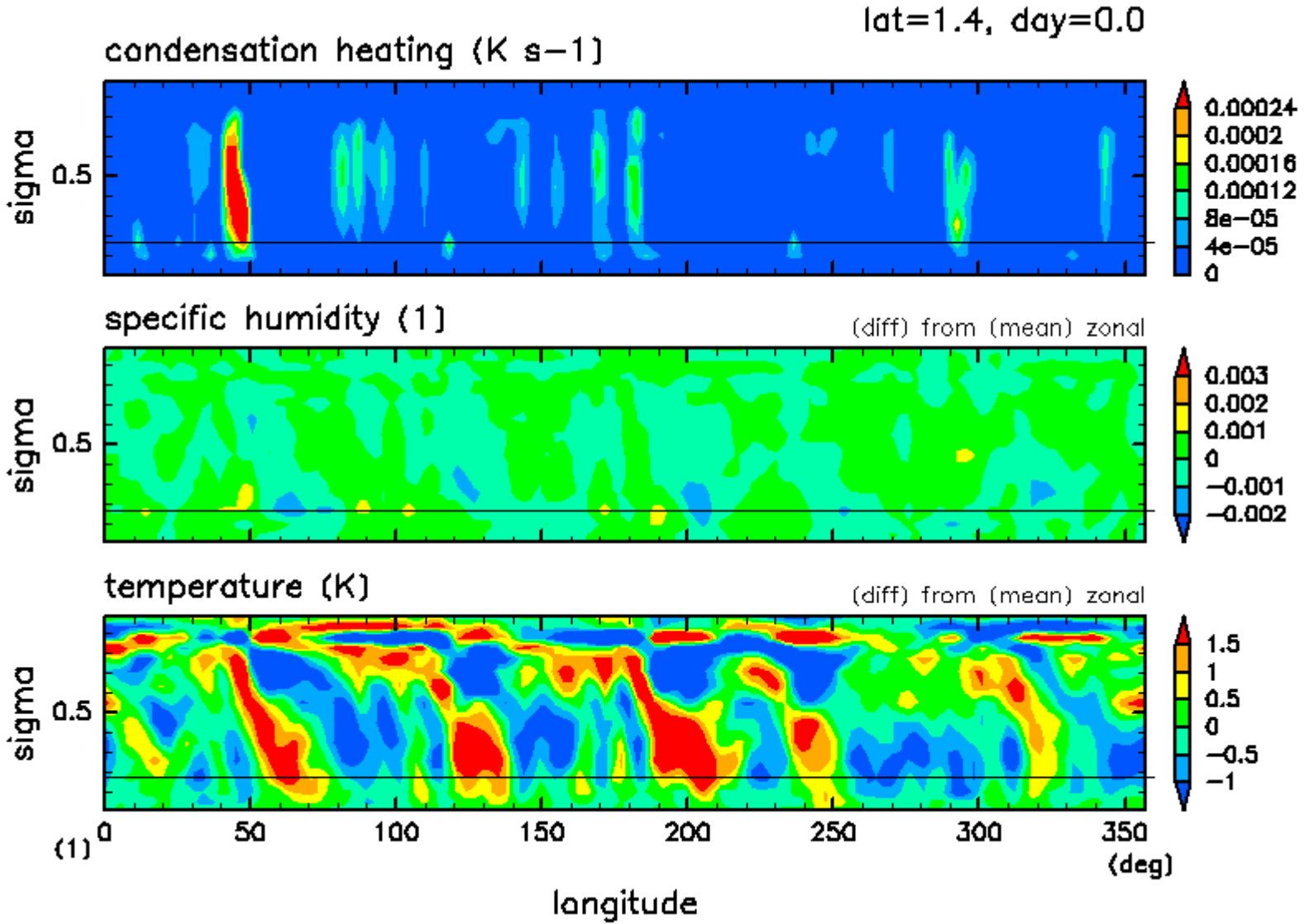
水蒸気拡散係数固定実験
凝結加熱・湿度・温度

1 /10 倍



水蒸気拡散係数固定実験
凝結加熱・湿度・温度

10 倍

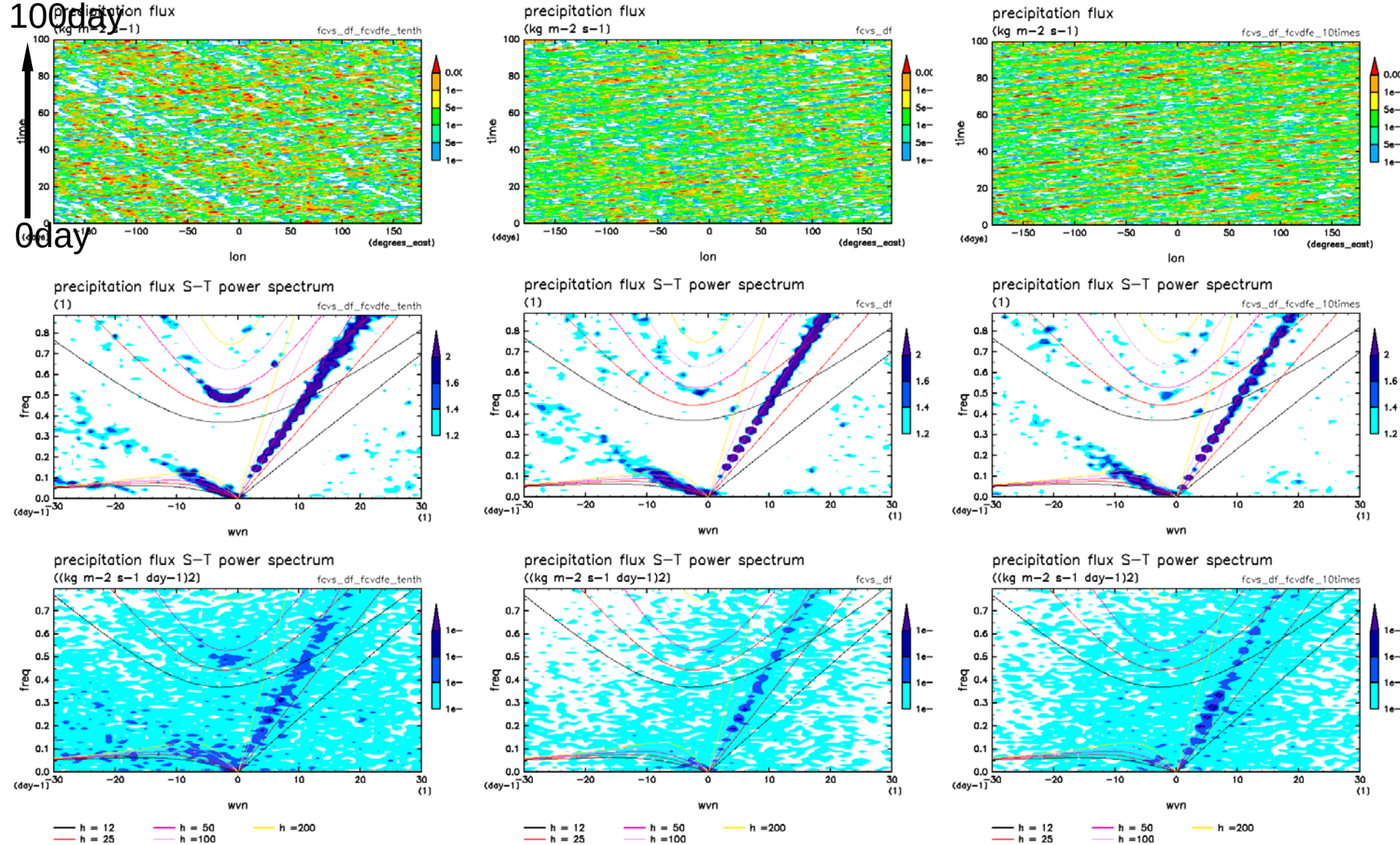


水蒸気拡散係数固定実験（降水）

1/10 倍　　1 倍（固定標準実験）　　10 倍

100day

0day



水蒸気拡散係数固定水惑星実験まとめ

- 東進構造の発現が有利な冷却分布（top-heavy）の下でのより単純な物理過程設定
  - 放射冷却率固定 (東西時間平均値)
  - 水蒸気の鉛直拡散 (Yamada&Mellor)、地表面過程 (Louis) を東西時間平均値固定、その値を変える
- 西進構造
  - 拡散係数の値が大きくなると発現が弱くなる傾向
    - 拡散係数が大きくなると水蒸気量が海面水温で決まる値を反映、水蒸気の水平コントラストが減るため？
- 東進構造
  - 水蒸気拡散係数には大きな依存性がない

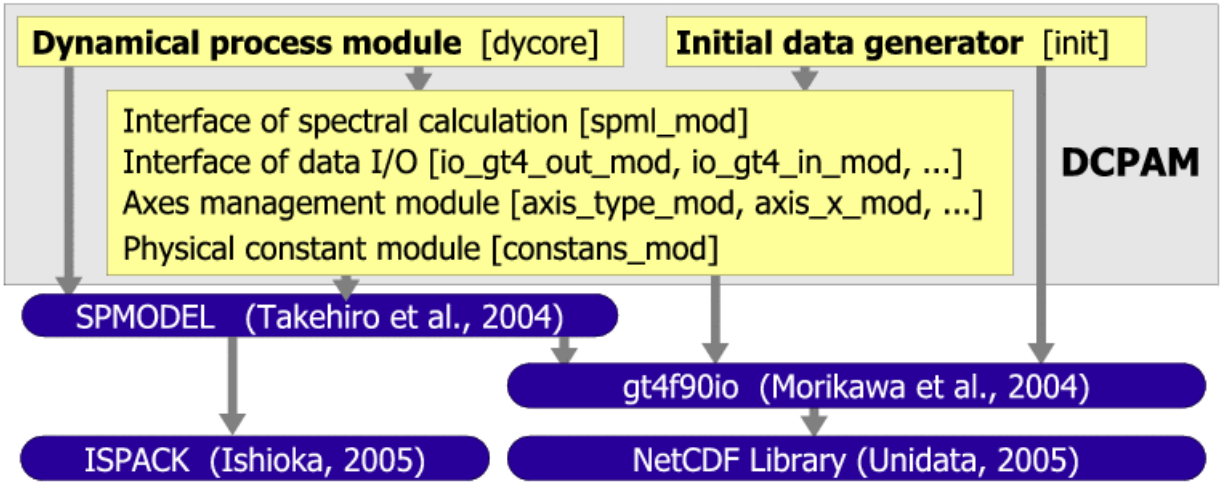
DCPAM

パラメタ研究に都合のよいモデルの試み DCPAM

- AGCM5.3(FORTRAN77)→DCPAM(Fortran90/95)
- モデルインフラストラクチャー
  - I/Oの統合：gtool4 F90 netCDF I/O
  - 並列化インフラスタラクチャ（GFDL/FMS に対抗） 未実装
- 力学過程
  - 通常のAGCMの枠組：静水圧+浅い大気近似
  - スペクトル変換法
- 物理過程の組み込み実験
  - AGCM5と同様の簡略な物理過程
  - モジュールの再設計
- ドキュメンテーション等の技術開発
  - RDoc (Rubyドキュメンテーションツール)のFortran90用改良開発と導入（ソースコードからのリファレンスマニュアル生成の自動化）

モデル開発

モデル構成



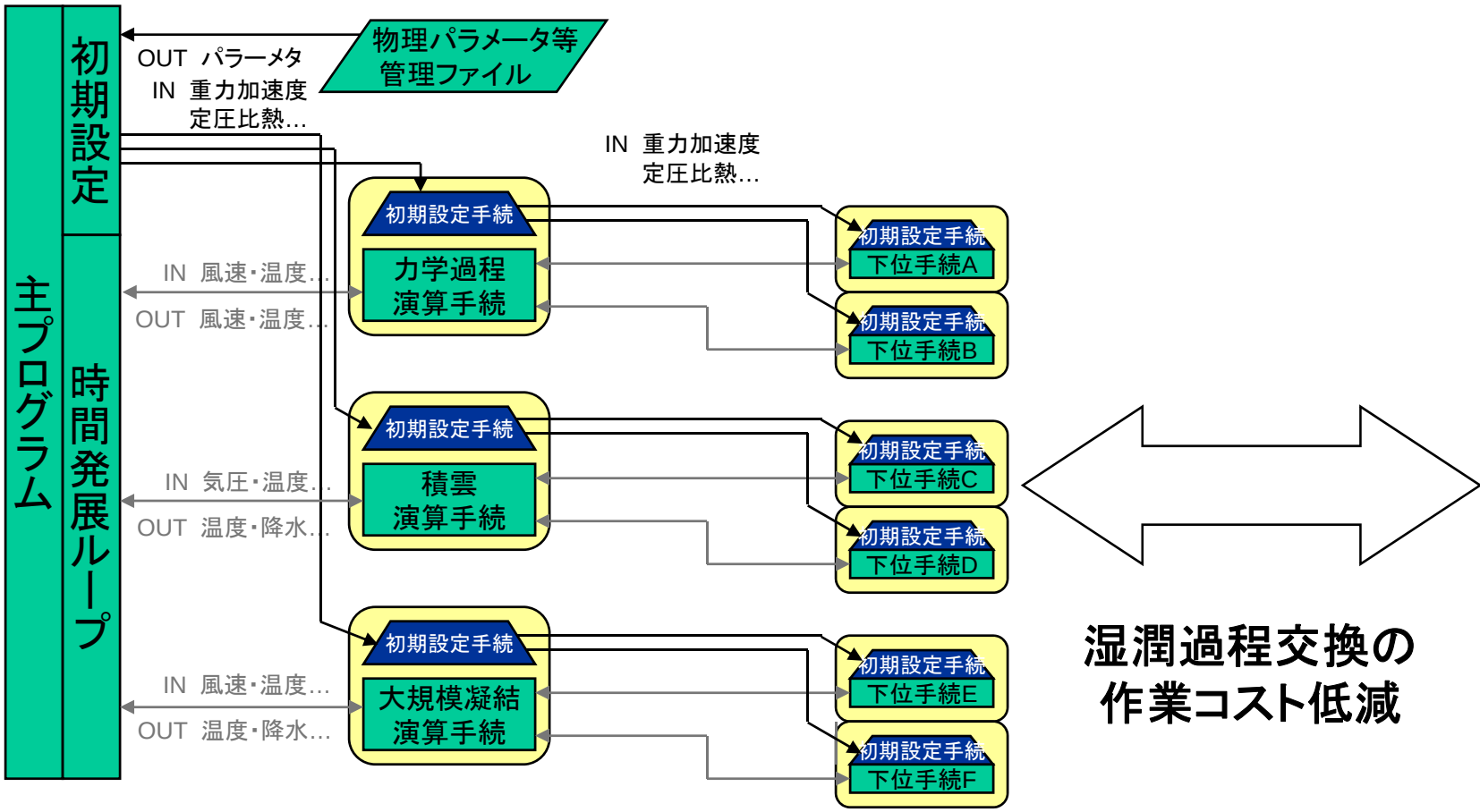
モデルの可読性を高める試み：数式のようなソースコードを

(a)
```
wz_VorTend_n =                                                  &
      & wa_Div_xya_xya( xyz_VA_n , - xyz_UA_n )                 &
      & / Rplanet
```

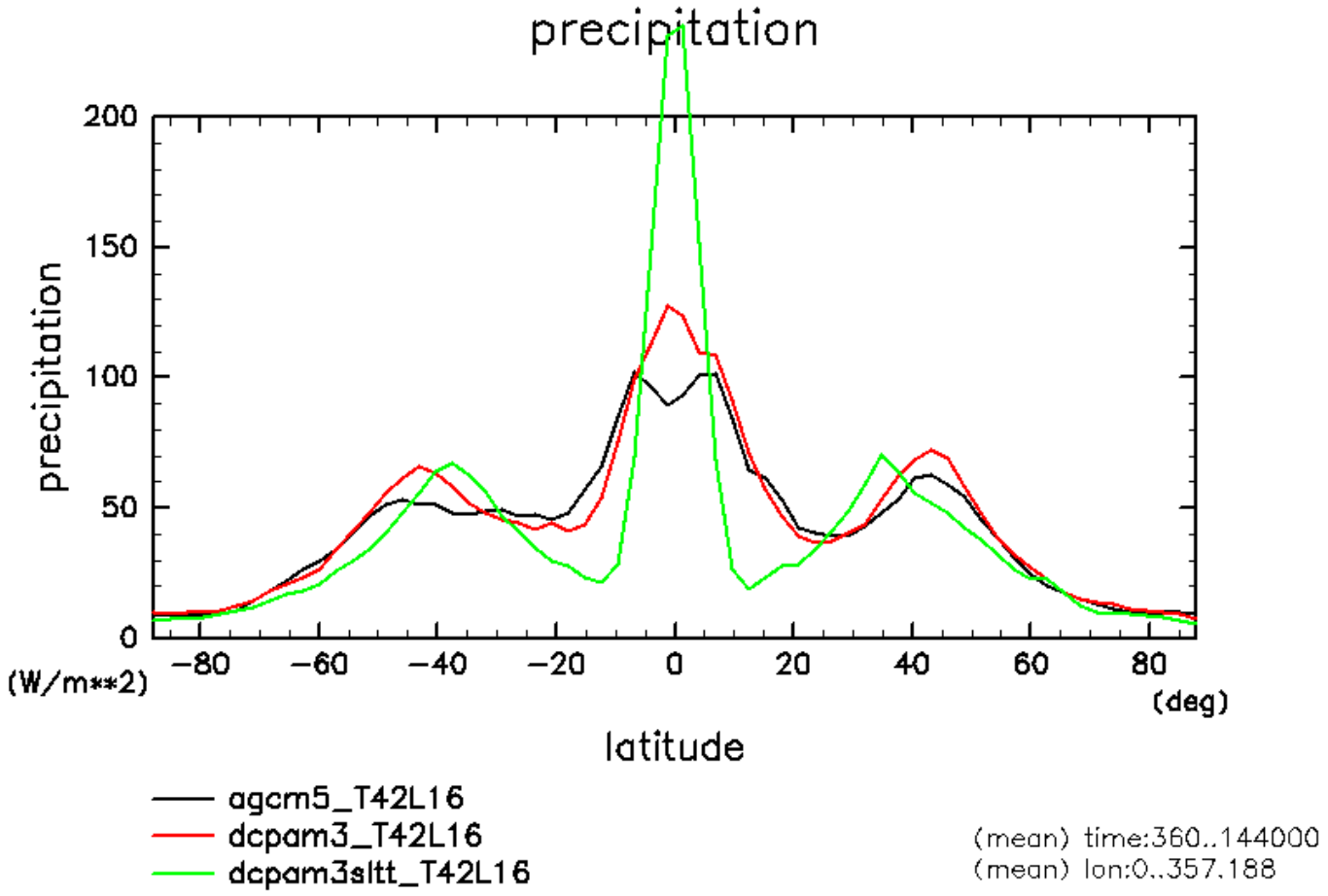
(b)
```
xyz_Vor_a     =                                                 &
      & xya_wa( wa_xya( xyz_Vor_b )                             &
      &          + 2. * DelTime * wz_VorTend_n )
```

モジュールの再設計

- 個々の演算で必要なパラメータはモジュール毎に保持
  - 各モジュールで初期設定手続を用意し、その手続でパラメータを設定
  - スキーム交換に必要な情報が初期設定手続と演算手続の引数として集約

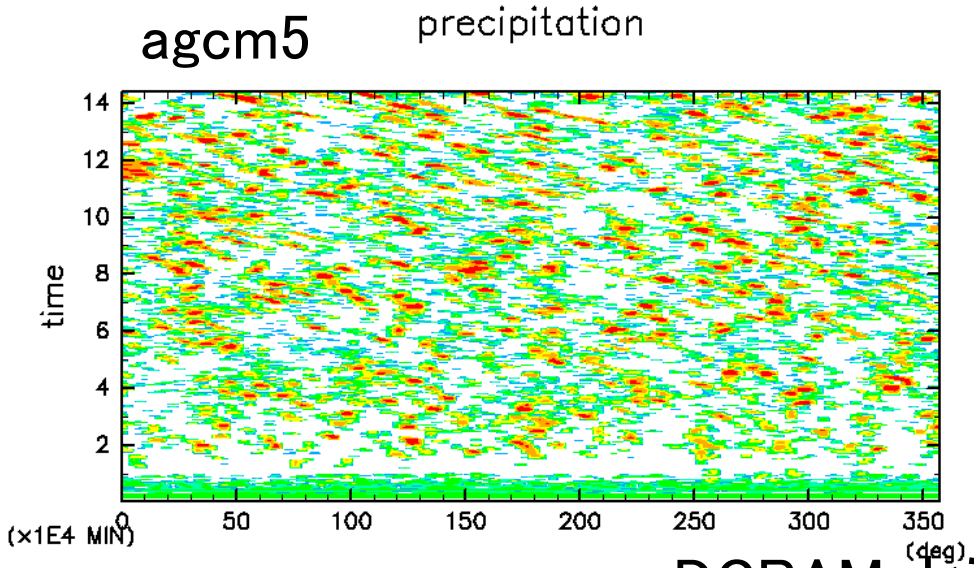


降水: 東西時間平均 (DCPAM)

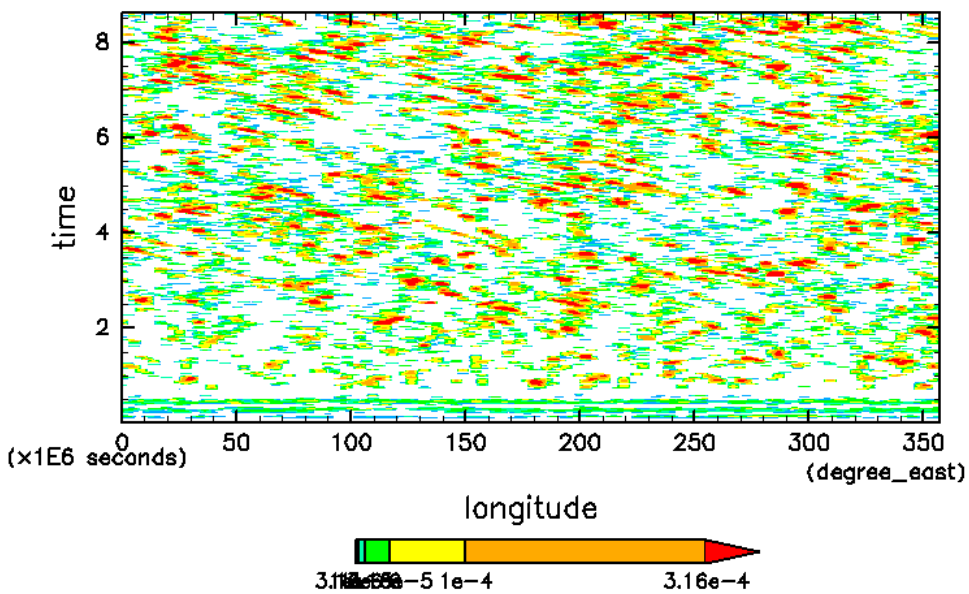


降水: 赤道上経度時間図 (DCPAM)

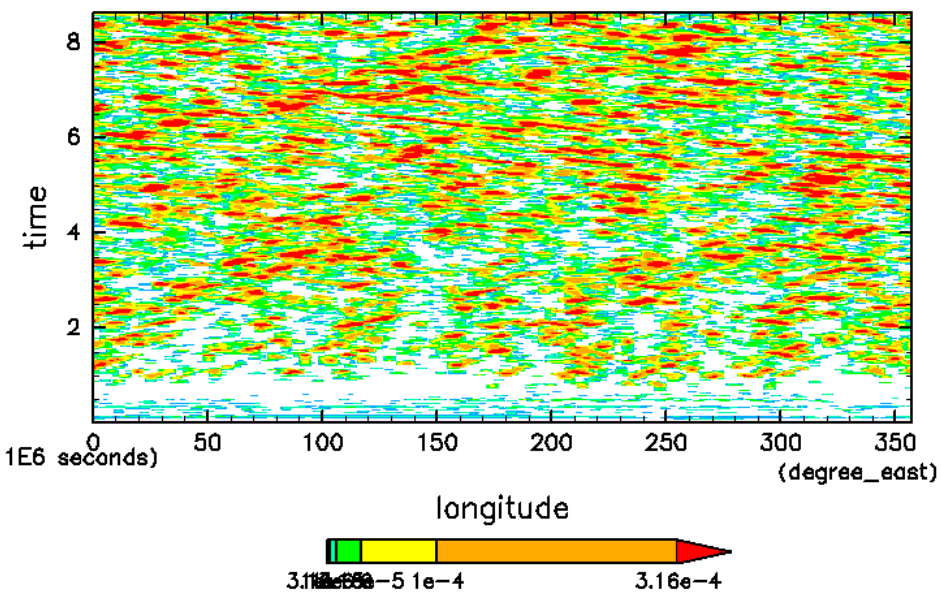
agcm5



DCPAM



DCPAM ゼミラグ版



パラメタ研究に都合のよいモデルの試み DCPAM問題

- 遅い　AGCM5.3の３～４倍？
  - Fortran90関数を多用しても何とかなる方法は？
    - 既存のAGCM5.3　T42L16
      - 100日積分＝50分 on NIES SX8R
      - 一実験1500日=750分、データ数十GB
      - （物理過程簡略もありメモリは300MBしかいらない）
- 並列化インフラストラクチャまだ
  - GFDL FMS のような並列操作隠蔽の仕掛け
- もろもろの物理過程の実装まだ
  - 既存モデルを参照してのチューニングなど

今後の活動

- DCPAM化
- APE（国際水惑星比較実験）サマリレポート用理想化実験

ふろく

Numaguti and Hayashi (1991)

- 線形 wave-CISK 解

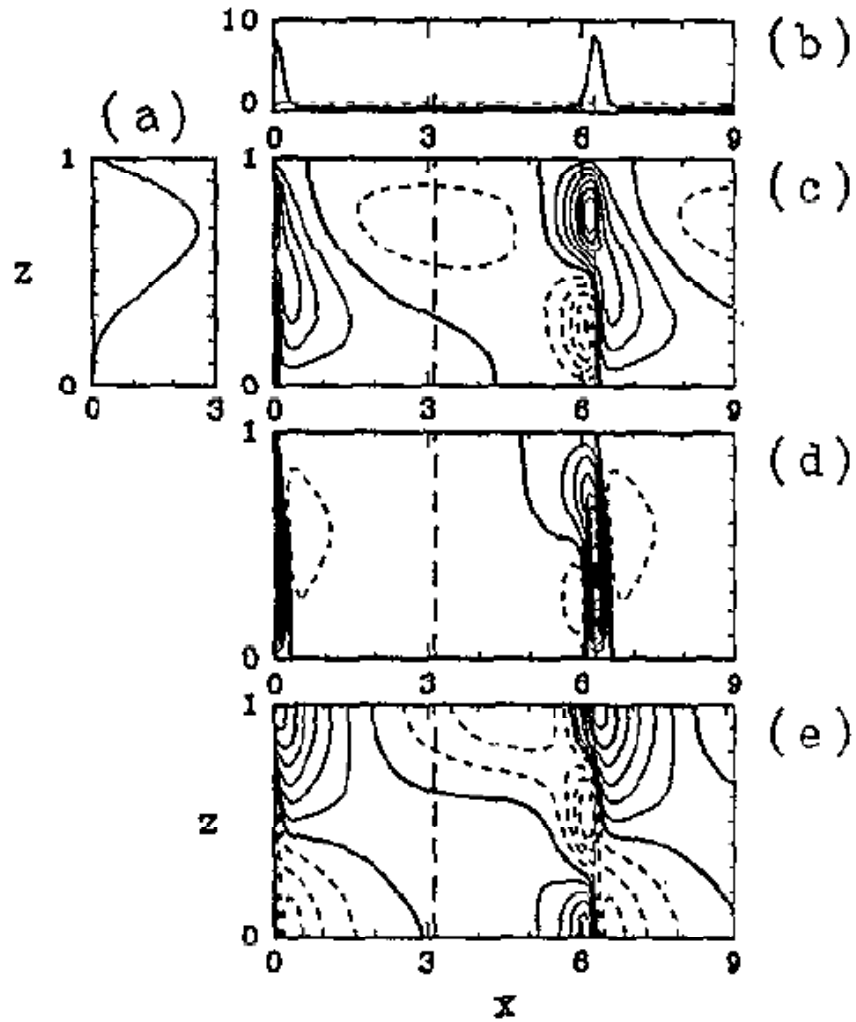
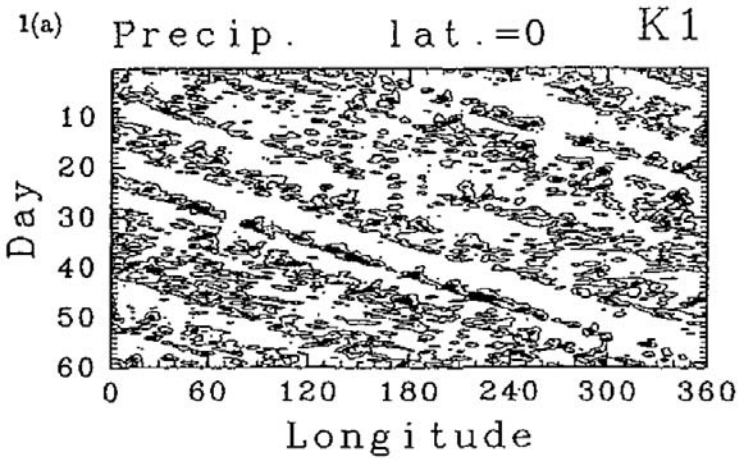
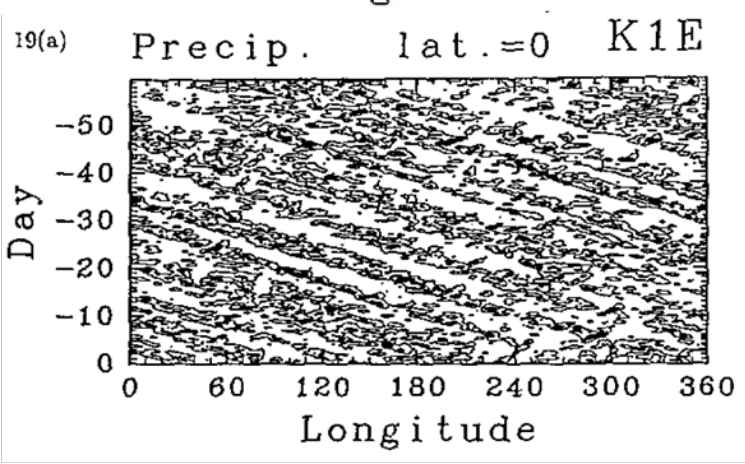


Fig. A5. Responses to a moving and growing heat source in the linear model. The case of the longitudinally Gaussian heating with two vertical modes: $C_r = 0.062$ and $C_i = 0.031$. (a) Vertical distribution of heating $\eta(z)$, (b) horizontal distribution of heating $\tilde{Q}(x)$, (c) temperature T, (d) vertical velocity w, (e) zonal velocity u.

WISHE (wind-induced surface heat exchange)

- Numaguti and Hayashi (1991b)
  - WISHE: 蒸発-風速フィードバック





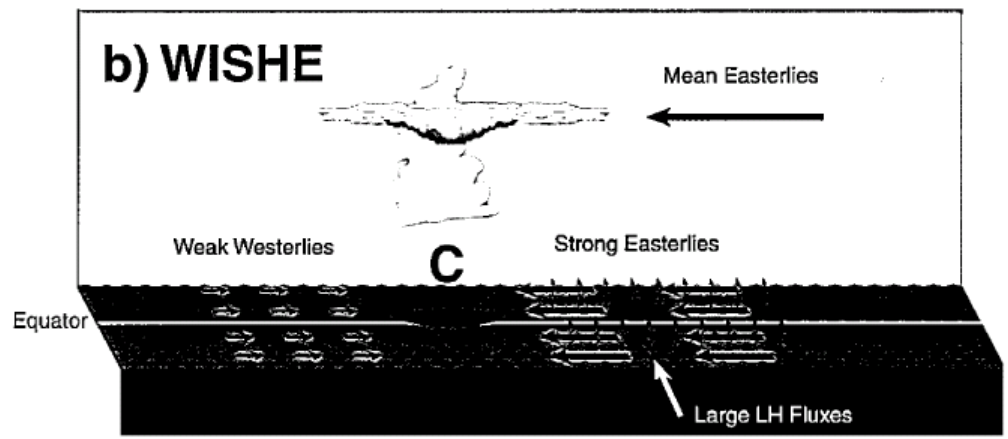


FIG. 9. The illustration of three conceptual models of intraseasonal oscillation. (a) Wave-CISK, (b) wind-induced surface heat exchange (WISHE), and (c) air–sea convective intraseasonal interaction (ASCII).

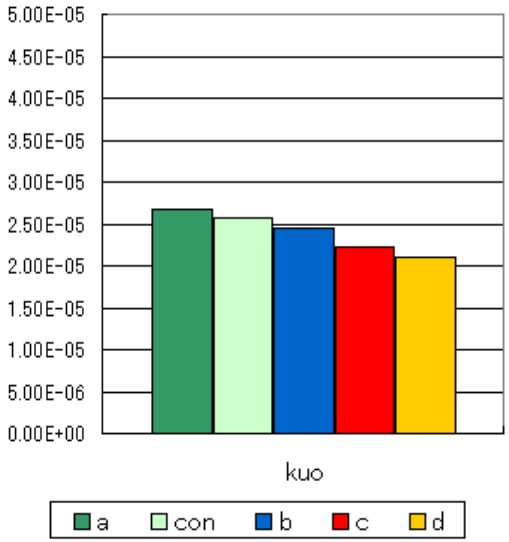
$$E = \rho C_D |\vec{v}| (q^* - q_a)$$

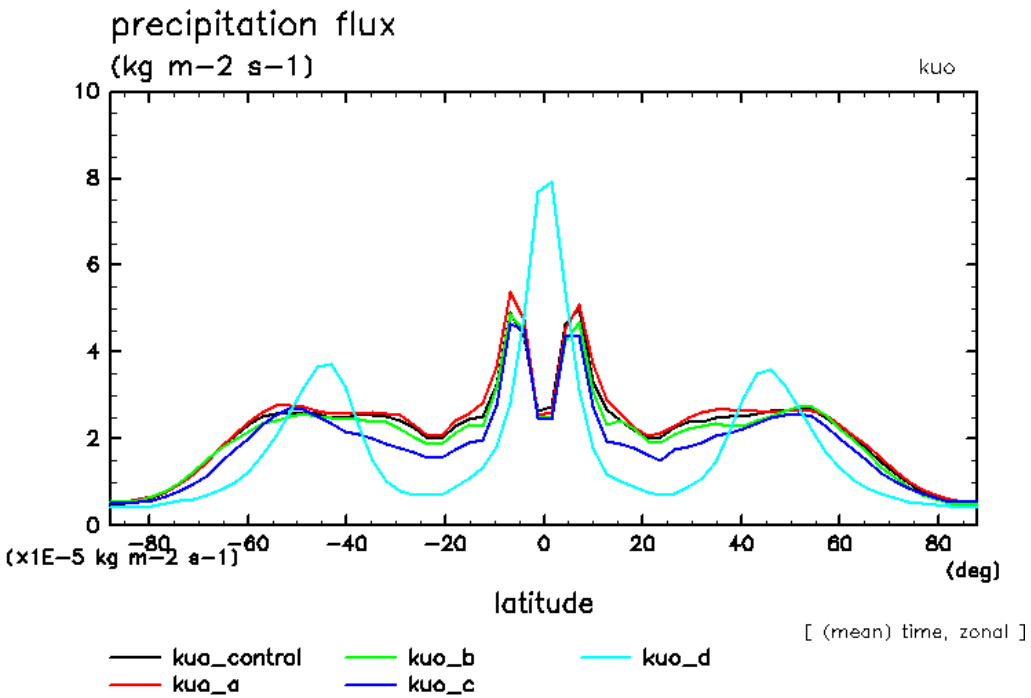
$C_D|\vec{v}|$ を固定する

E: 蒸発量, C_D:バルク係数, ρ: 密度
q*:地表面飽和比湿, q_a: 大気の比湿

放射冷却率依存性実験（KUOスキーム）

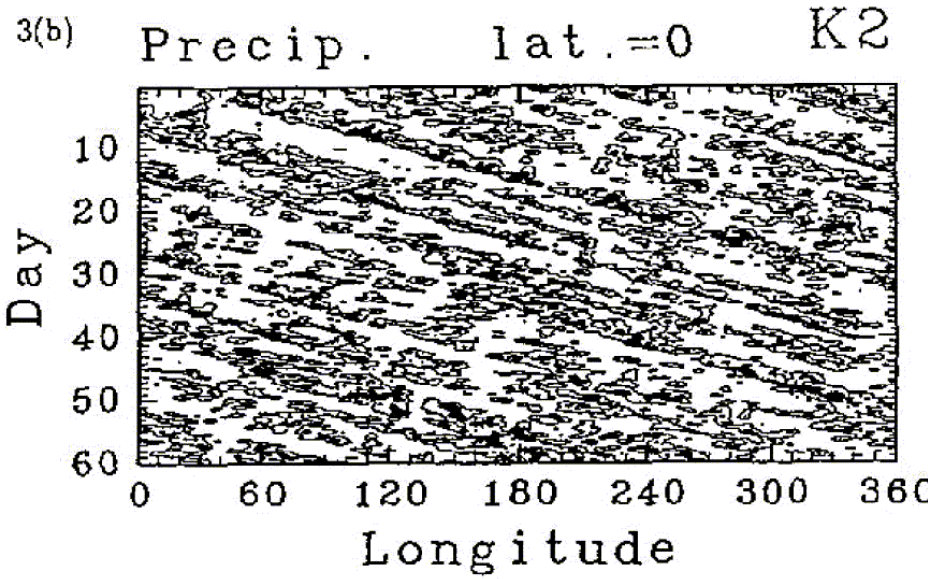
- 降水量 (全球平均、東西平均)



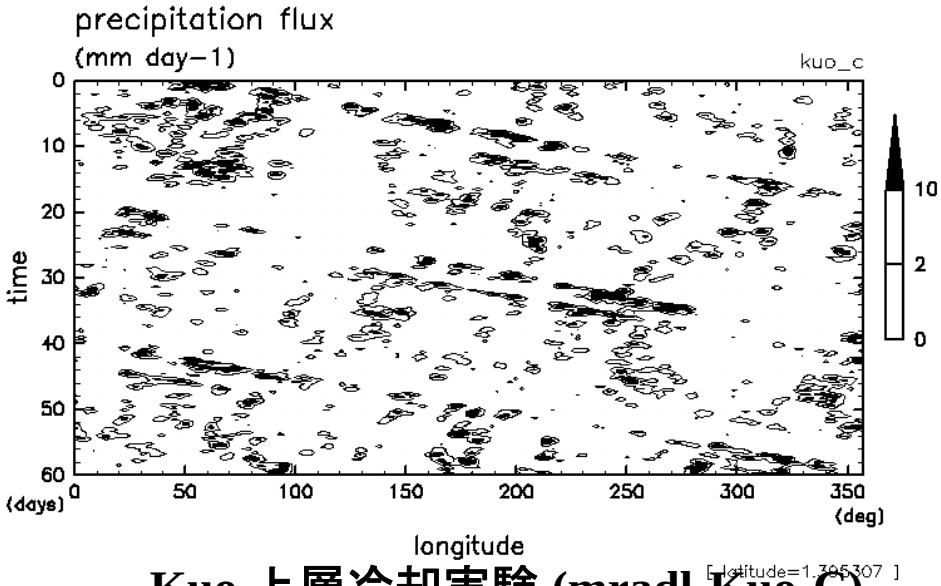


Numaguti and Hayashi (1991) 比較

- 降水量赤道上経度時間図



Numaguti and Hayashi (1991)

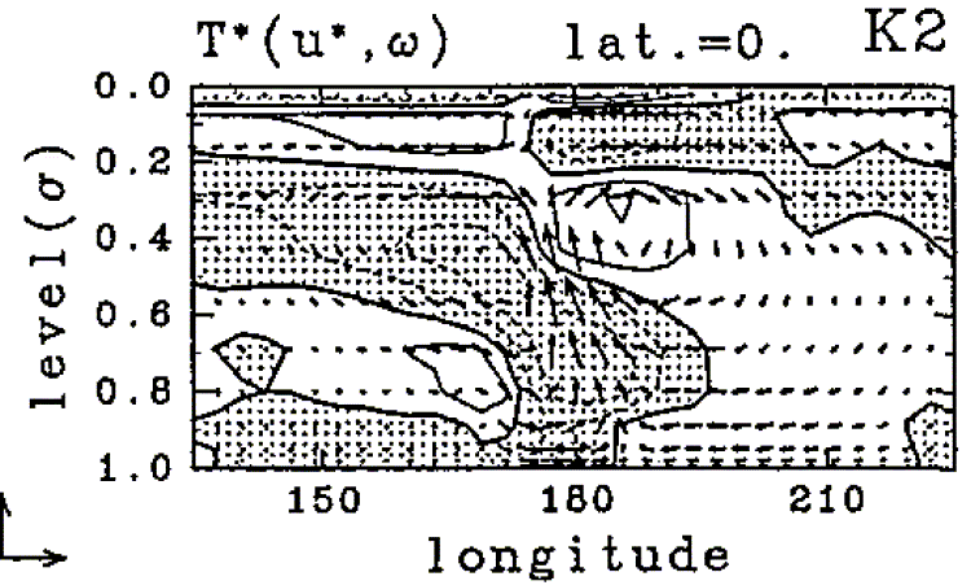


Kuo 上層冷却実験 (mradl-Kuo-C)

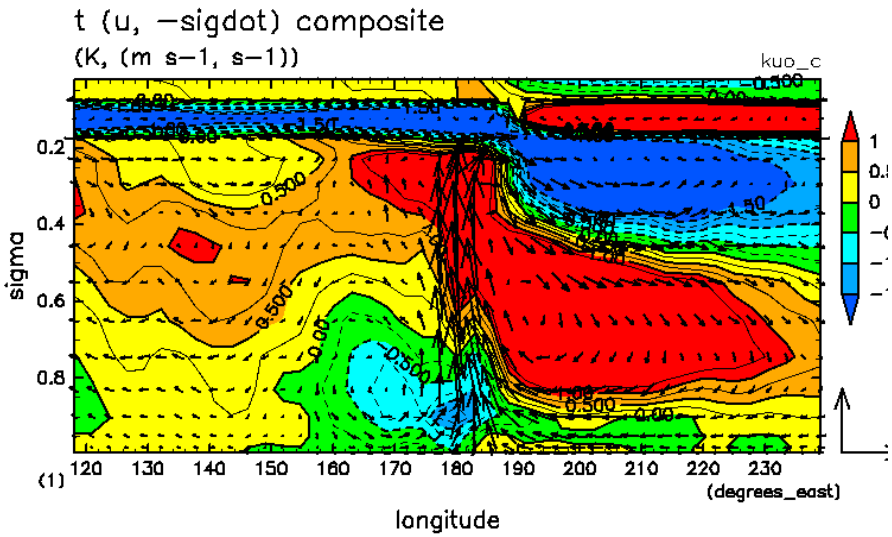
- NH91にくらべ
  - 降水域がとぎれとぎれ
  - 東西波数1の東進以外は、むしろ西進

Numaguti and Hayashi (1991) 比較

- コンポジット鉛直循環構造



Numaguti and Hayashi (1991)



Kuo 上層冷却実験 (mradl-Kuo-C)

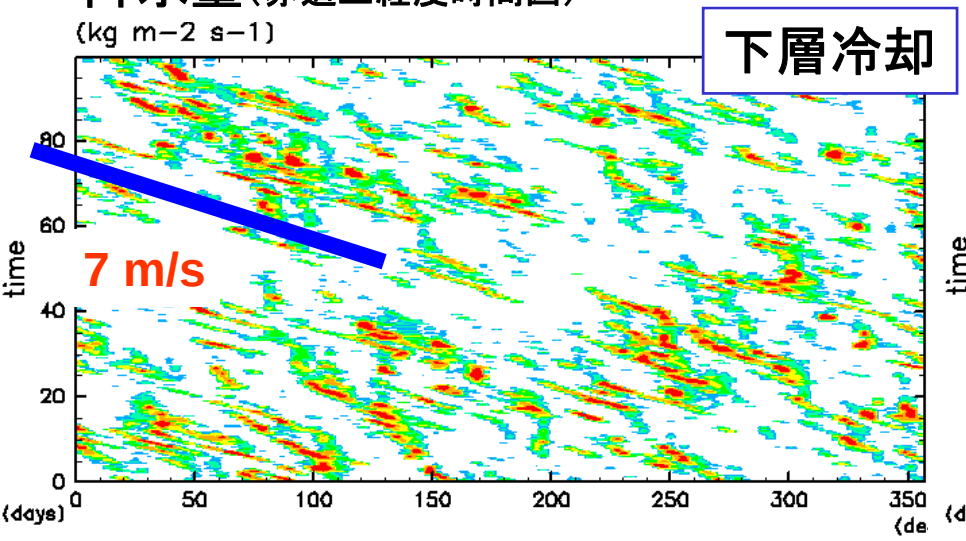
- NH91にくらべ
  - 対流圏鉛直波数2構造が強い
    - 東側の上層低温が強い
    - 西側の上層高温も強い
  - 東西に広がっている(閉じてない)

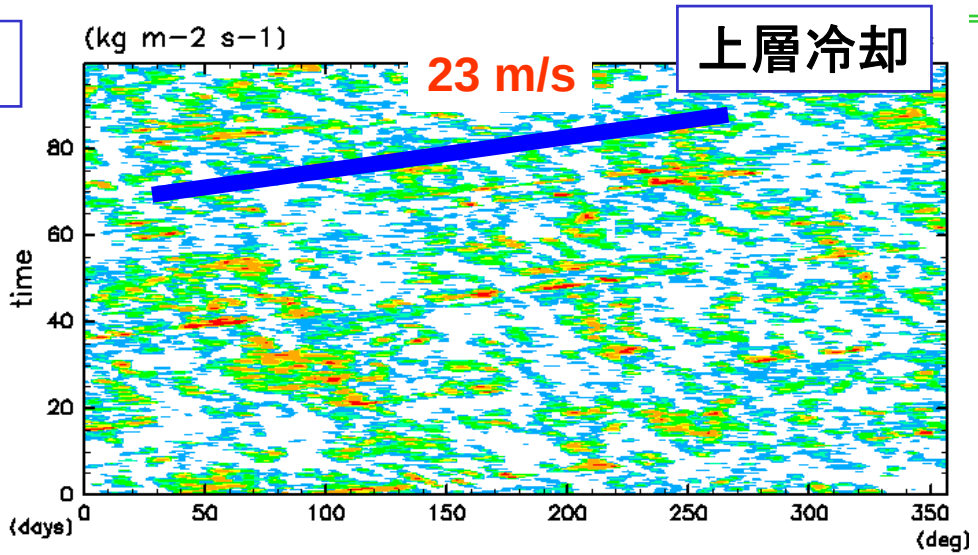
地球流体電脳倶楽部版 AGCM5.3

- 計算順序
  - 物理過程1
    - 放射（簡易4色バンド）
    - 鉛直拡散（Yamada&Mellor Level2）
    - 地表面過程（Louis）
  - 力学過程
  - 物理過程2（調節）
    - 積雲（Kuo）
    - 大規模凝結
    - 乾燥対流調節

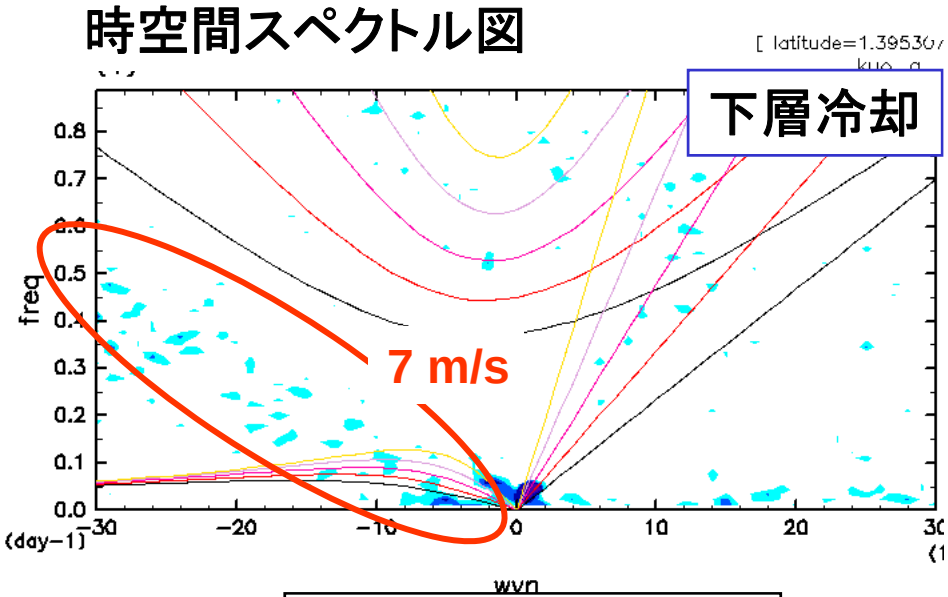
放射冷却率依存性実験:
これまでの結果（KUO）

降水量(赤道上経度時間図)

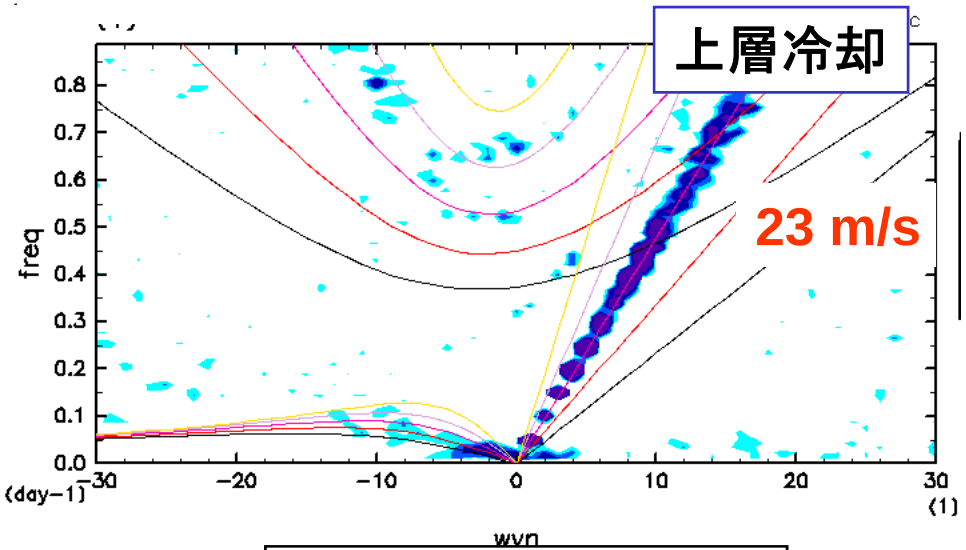




時空間スペクトル図



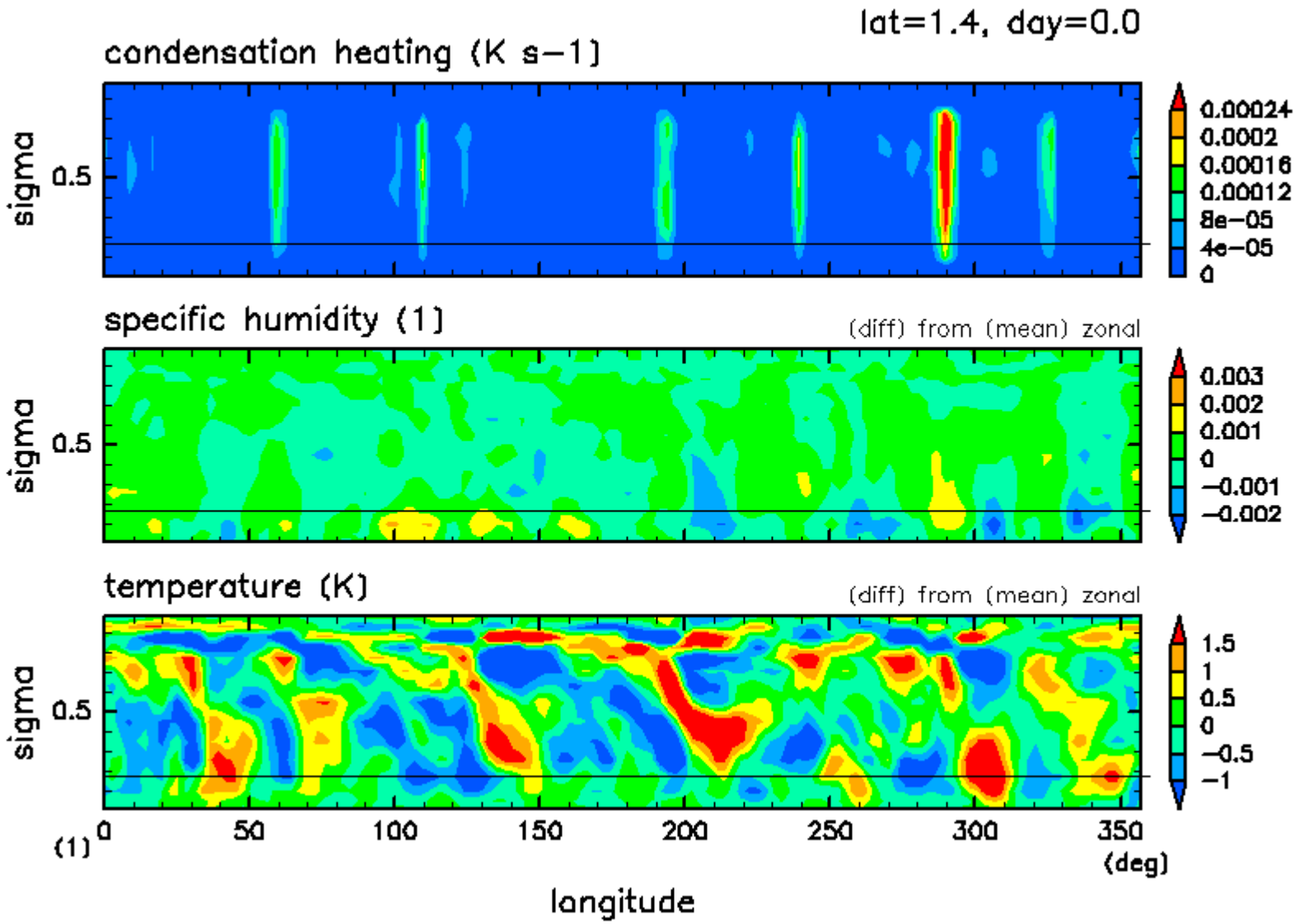
背景風移流CIFK的



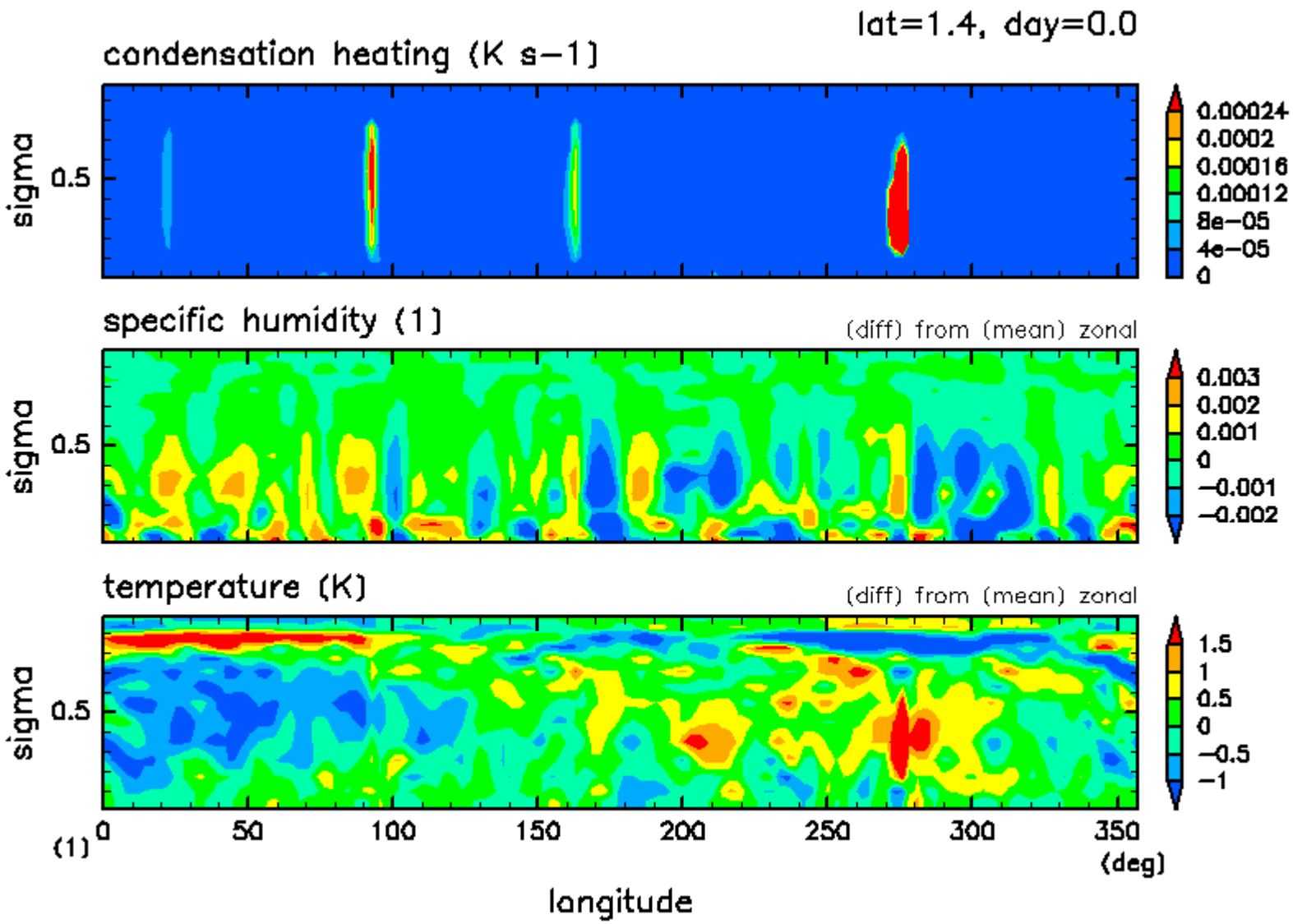
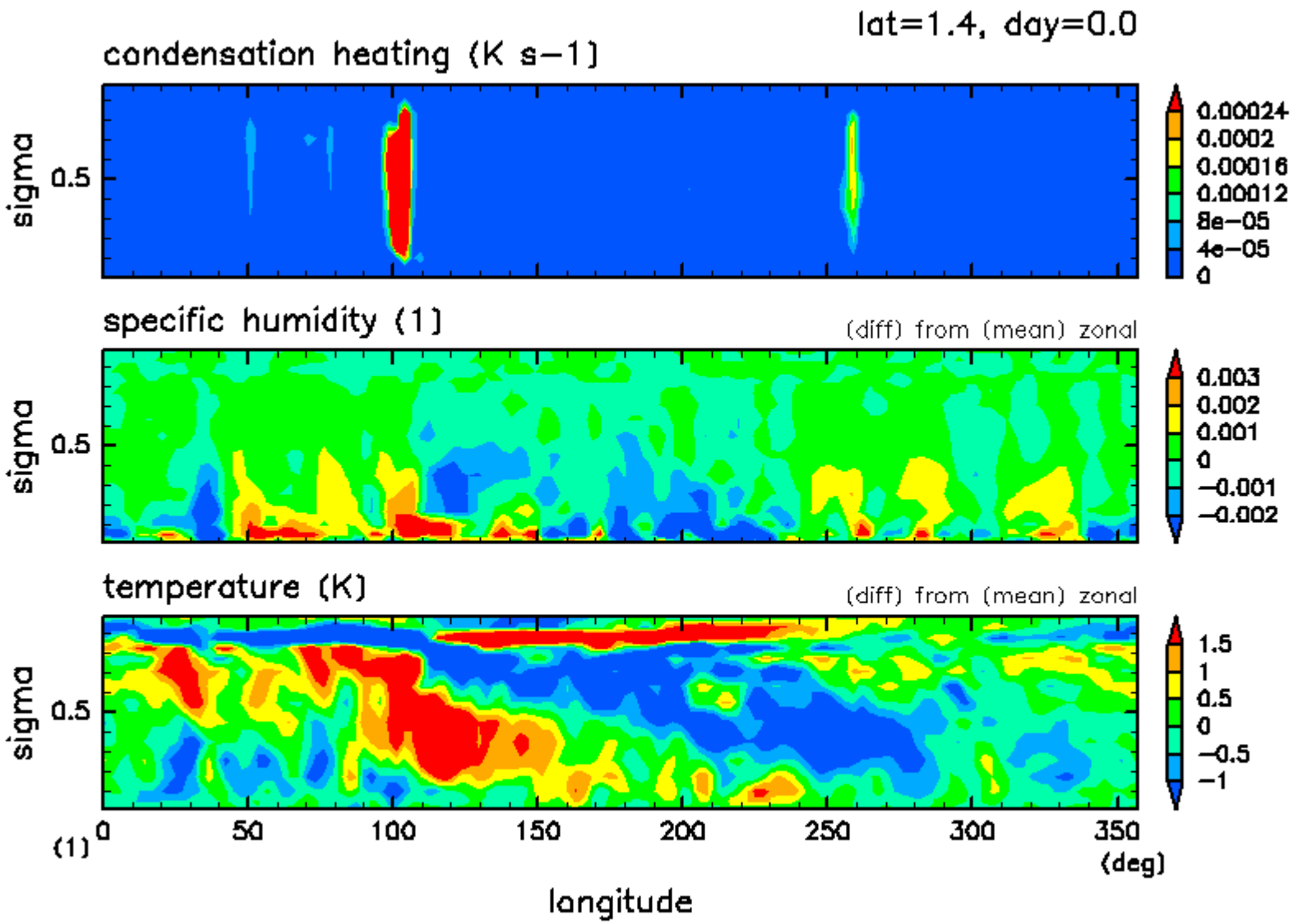
Kelvin wave-CISK的

拡散係数固定実験

1 倍（固定標準実験）



放射冷却率依存性実験 (Kuo, 下層冷却)



放射冷却率依存性実験 (Kuo, 上層冷却)