水惑星実験による熱帯域降水活動の放射冷却率鉛直分布依存性に関する研究

北海道大学 大学院理学研究科 地球惑星科学専攻
地球惑星流体科学講座 地球流体力学研究室

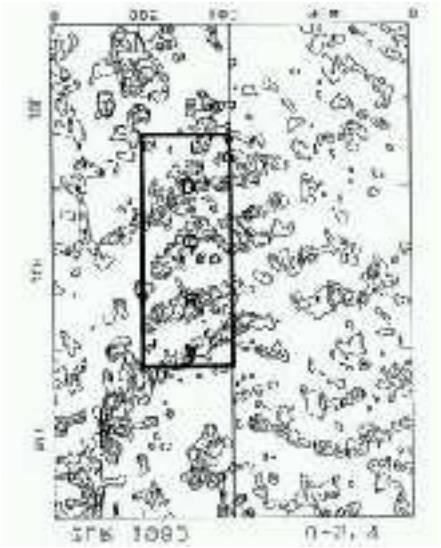
山 田　由 貴 子

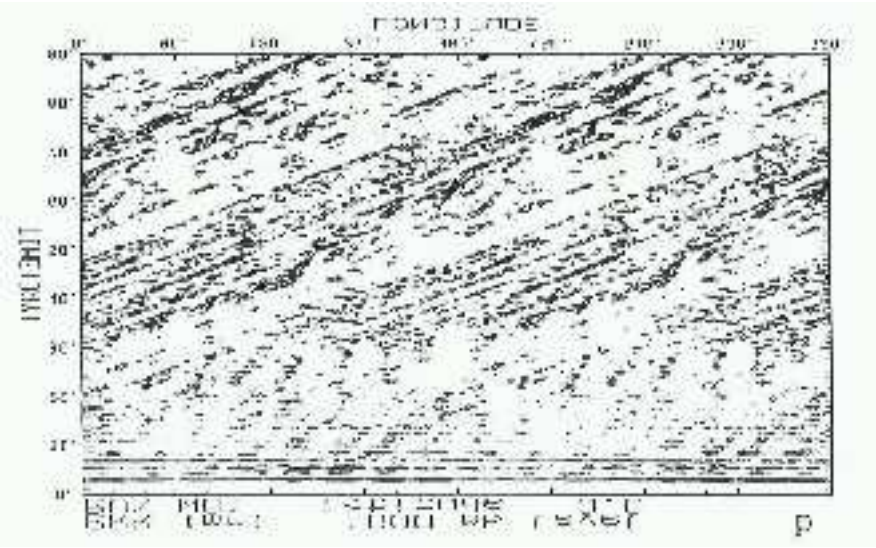
2003 年度 修士論文発表会
2004 年 2 月 4 日

1. はじめに: 赤道域の降水活動

- 現実大気の赤道における降水活動の階層構造
  - 観測により存在が示唆
    - クラウドクラスター (水平スケール **1000 km** 以下, **10 - 20 m/s** で西進)
    - スーパークラスター (水平スケール **3000 - 5000 km, 5 - 10 m/s** で東進)
    - **MJO (Madden-Julian Oscillation)** (東西波数 **1, 30 - 60** 日の周期で東進)
- 大気大循環モデルを用いた赤道域降水活動に関する実験
  - **Hayashi and Sumi (1986)** の初の水惑星 **GCM** 実験
    - 格子スケールの降水域, 降水活動の東西波数 **1** の変調
    - 大気に内在するメカニズムによって自発的に形成される構造の存在

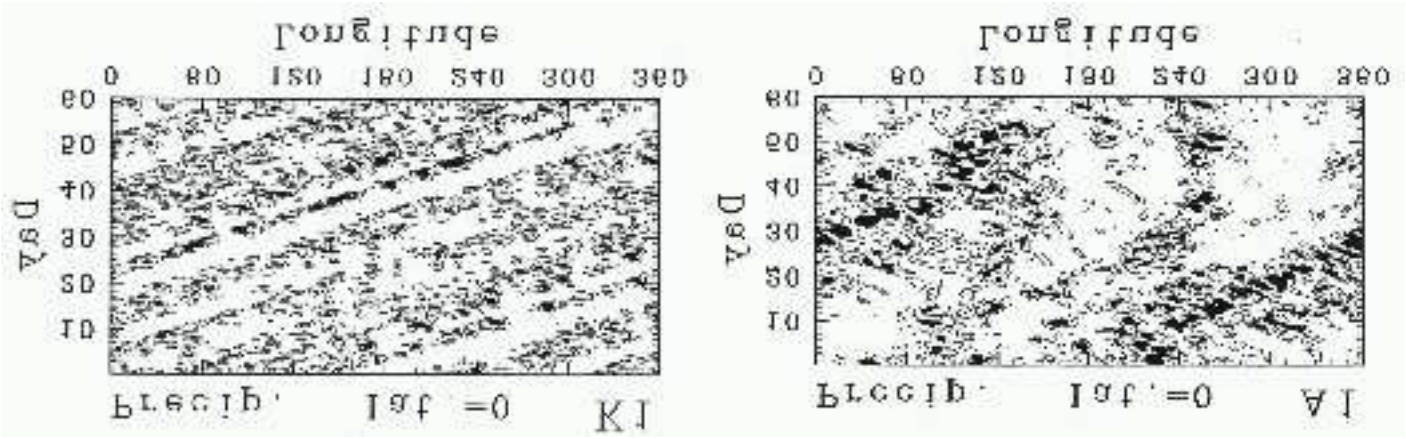
    - **(左) 観測: 赤道上の OLR の経度-時間図 (Nakazawa, 1988),**
      (右) GCM の結果: 赤道上の降水の経度-時間図 (Hayashi and Sumi, 1986)

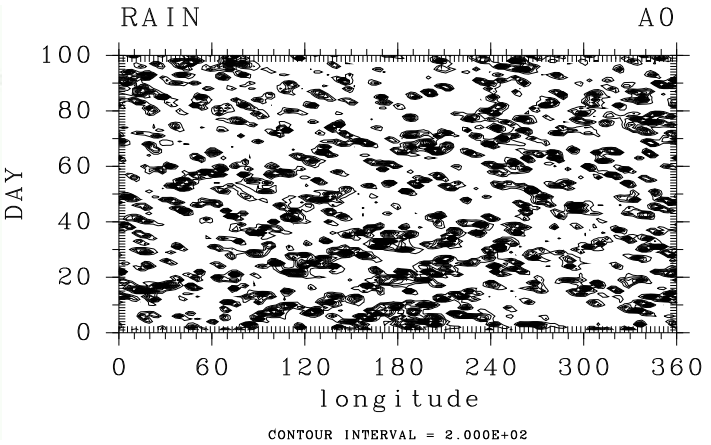




2. はじめに: モデルの課題

- その後の数多くの水惑星 GCM 実験
  - モデルの数値コードや物理過程の詳細が違うだけで, **Hayashi and Sumi (1986),** 観測のようにはならない
  - 赤道上の降水量の経度-時間図
    - **(左) NH1991a, Kuo スキーム, (中央) NH1991a,** 対流調節**, (右) H1998,** 対流調節





- 多くの **GCM** が赤道域降水活動をよく再現できていない
  - モデル相互比較プロジェクト で **15** 種類の **GCM** を比較 **(Slingo et al., 1996)**
  - 多くの **GCM** で **MJO** が観測より弱く, 進行速度速い

- 赤道域降水活動を説明する決定的な理論モデルがない
  - 赤道域降水活動を説明する数多くの理論が存在する
  - **wave-CISK, WISHE, cloud-radiative interaction, frictional wave-CISK,** 等など...

3. はじめに: 目的

目的

- **GCM のあるパラメタを変えた時に,**
  赤道域降水活動はどのように変わるか ?
  - 何をどれくらい変えるとどのくらい変わるか知りたい (定量的な評価)
  - 赤道域降水活動を記述する理論モデルの構築の一助
  - GCM, 現実大気の振舞を理解するための一助

本発表では,

- 水惑星 GCM 実験を行う
  - 放射冷却率鉛直分布のパラメタ実験. 赤道域降水活動への影響
  - 降水活動を生成維持するメカニズムの候補を挙げる

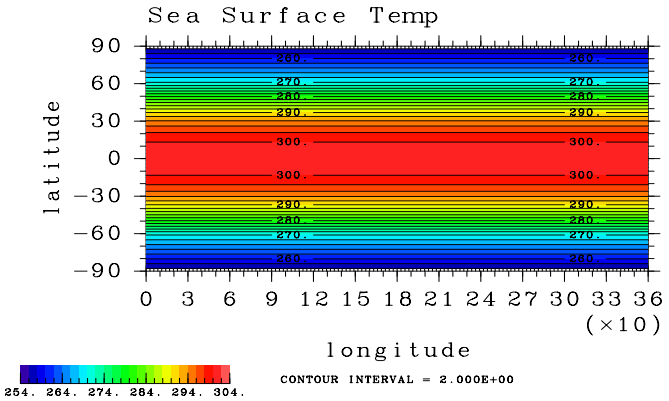
4. モデル

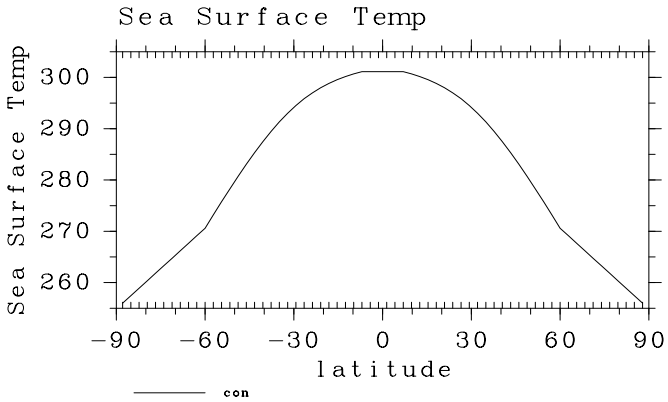
大気大循環モデル (GCM)

- 地球流体電脳倶楽部版 **AGCM5**
  - 解像度: **T42L16** (格子点数: 経度 **128**, 緯度 **64**, 高さ **16**)
  - 放射: 水蒸気 **3** バンドと乾燥空気 **1** バンドの計 **4** バンドに簡略化
  - 鉛直拡散: 全層で **Mellor and Yamada Level2**
  - 地上面フラックス: バルク法
  - 積雲パラメタリゼーション: **Kuo** スキーム, 対流調節

境界条件

- 全球を水で覆った地球 (水惑星)
- (下図) 海水面温度分布





5. 実験設定

長波放射の吸収

- 乾燥大気の吸収係数を変えた 5 ケース
- 赤道域降水活動に対する放射冷却率, 凝結加熱率鉛直分布の重要性
  - wave-CISK メカニズム
  - 観測と GCM の凝結加熱率鉛直分布の差を指摘 (Lin et al., 2004)

積雲パラメタリゼーション

- Kuo スキーム, 対流調節 の 2 ケース
- 赤道域降水活動に対する積雲パラメタリゼーションの重要性

実験リスト

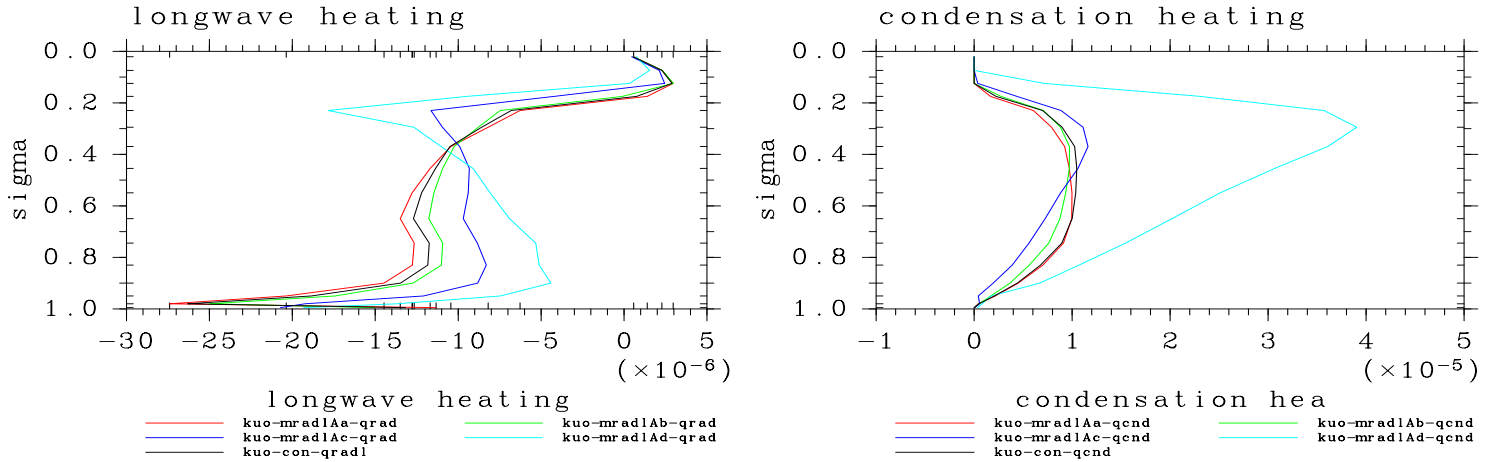
実験名	乾燥大気吸収係数 $(\overline{k}_{R,4})$	積雲パラメタリゼーション	備考
kuo-con	5.0×10^{-5}	Kuo スキーム	標準実験
kuo-mradlAa	6.0×10^{-5}	Kuo スキーム	
kuo-mradlAb	4.0×10^{-5}	Kuo スキーム	
kuo-mradlAc	2.0×10^{-5}	Kuo スキーム	
kuo-mradlAd	5.0×10^{-6}	Kuo スキーム	
adj-con	5.0×10^{-5}	対流調節	標準実験, H1998 と同じ実験
adj-mradlAa	6.0×10^{-5}	対流調節	
adj-mradlAb	4.0×10^{-5}	対流調節	
adj-mradlAc	2.0×10^{-5}	対流調節	
adj-mradlAd	5.0×10^{-6}	対流調節	

6. 結果: 放射冷却率, 凝結加熱率

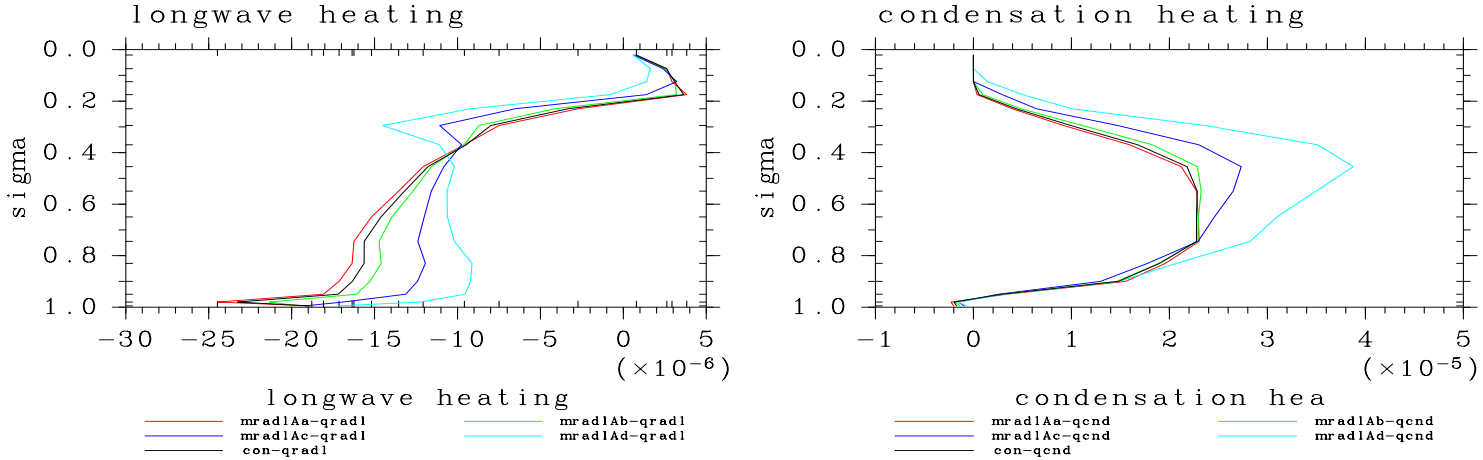
放射冷却率, 凝結加熱率：時間東西平均

- [a] は下層で最大値, [d] は上層で最大値を持つ
- **[a] 赤線: 下層最大, [b] 緑線: 中下層最大, [c] 青線: 中上層最大, [d] 水色線: 上層最大**

- (左) 放射冷却率 (Kuo スキーム), (右) 凝結加熱率 (Kuo スキーム)



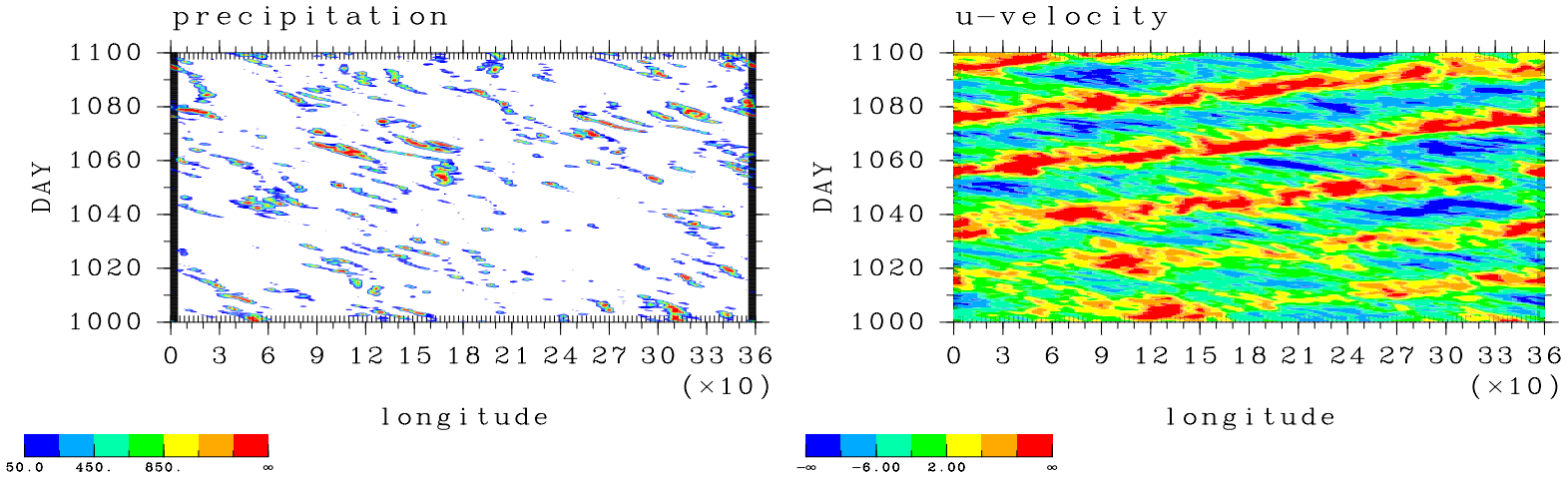
- (左) 放射冷却率 (対流調節), (右) 凝結加熱率 (対流調節)



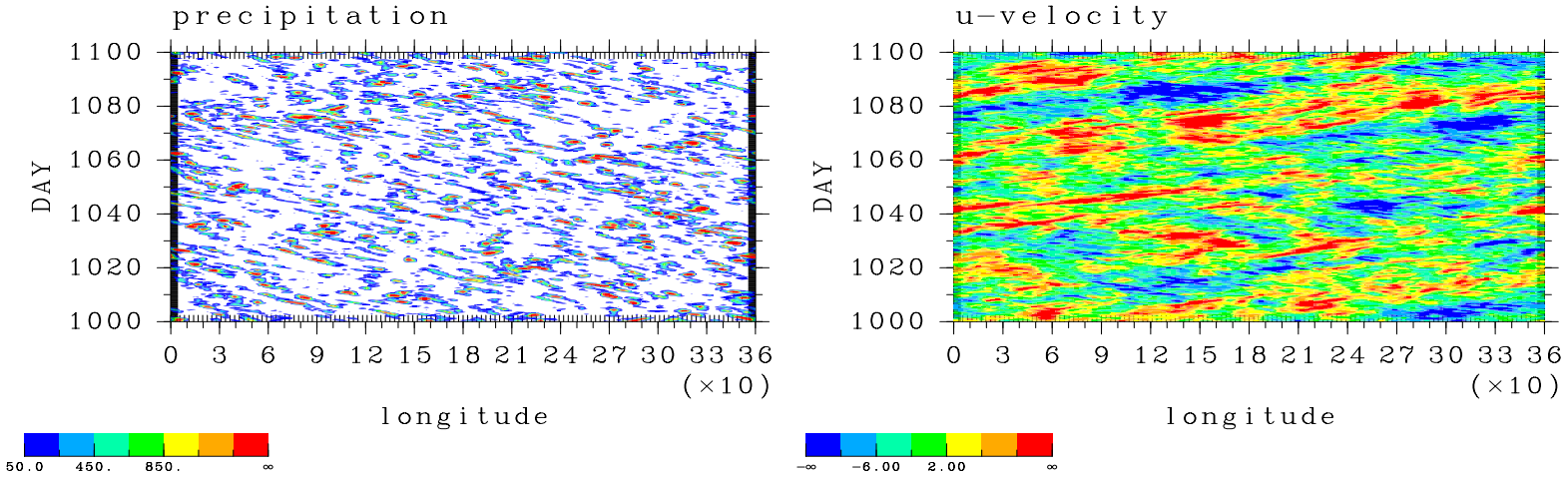
7. 結果: 標準実験

標準実験：赤道における経度-時間図

- (左) 降水 (Kuo スキーム), (右) 対流圏界面付近東西風偏差 (Kuo スキーム)



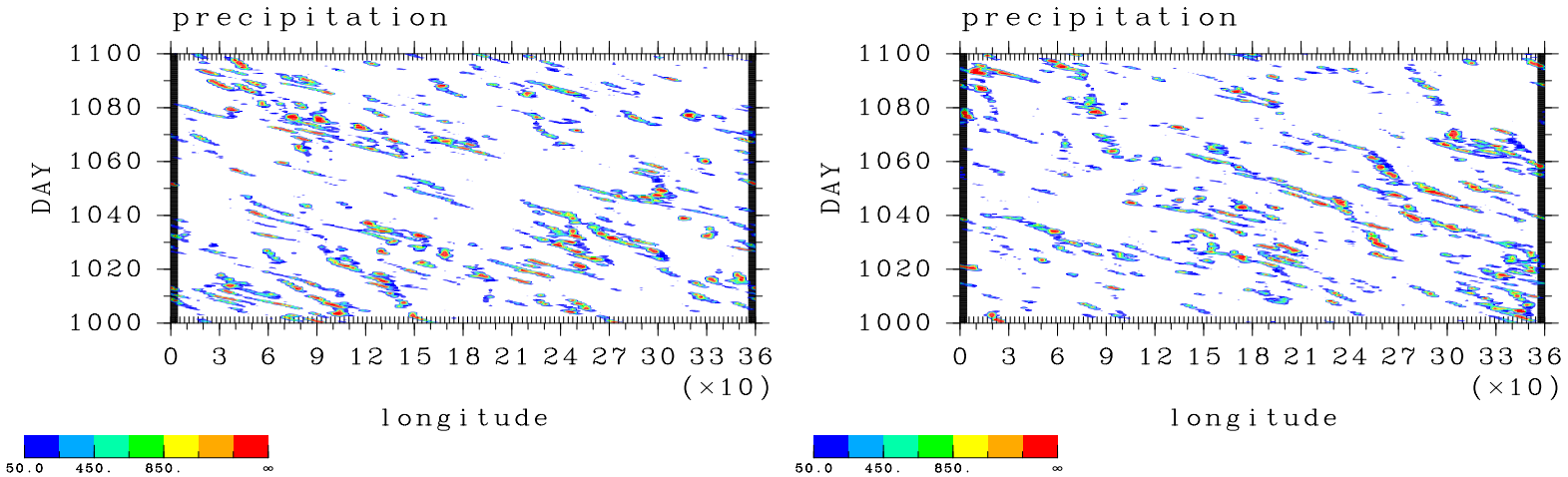
- (左) 降水 (対流調節), (右) 対流圏界面付近東西風偏差 (対流調節)



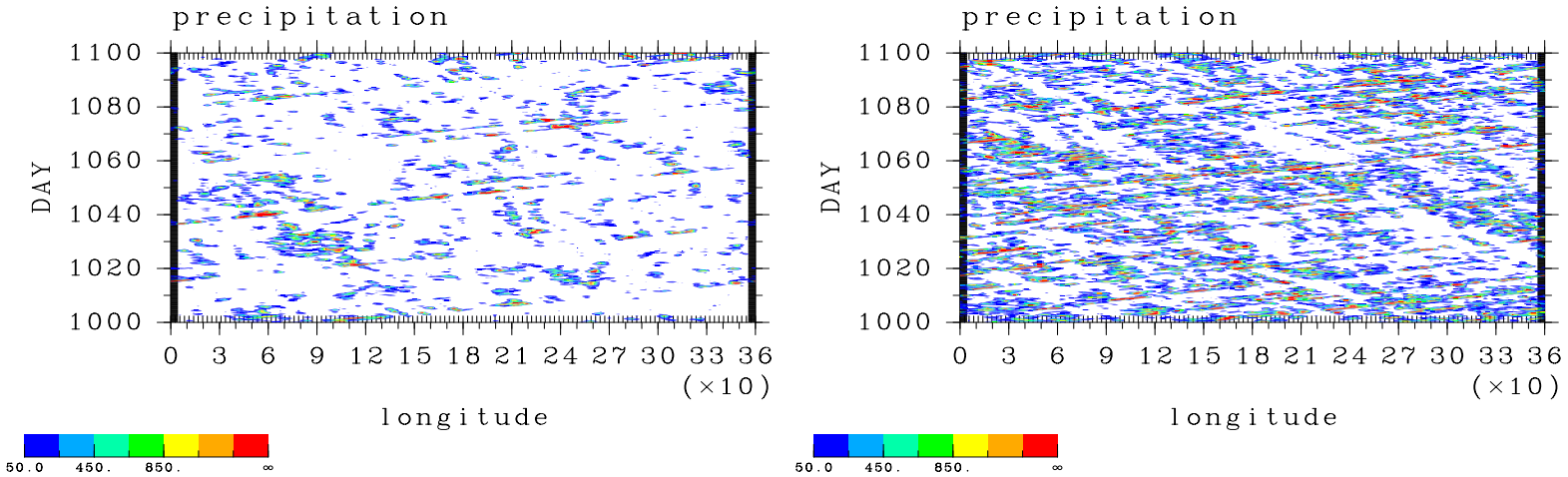
8. 結果: 乾燥大気吸収係数変更実験 1

赤道における降水の経度-時間図 (Kuo スキーム)

- (左) [a] 下層最大実験, (右) [b] 中下層最大実験



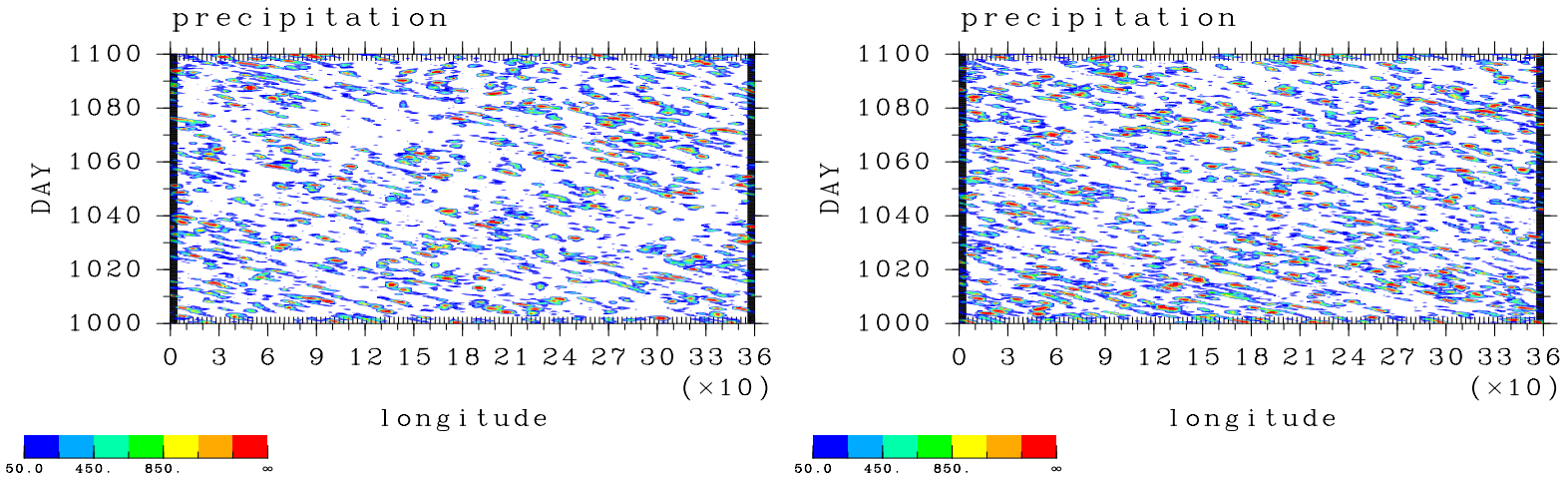
- (左) [c] 中上層最大実験, (右) [d] 上層最大実験



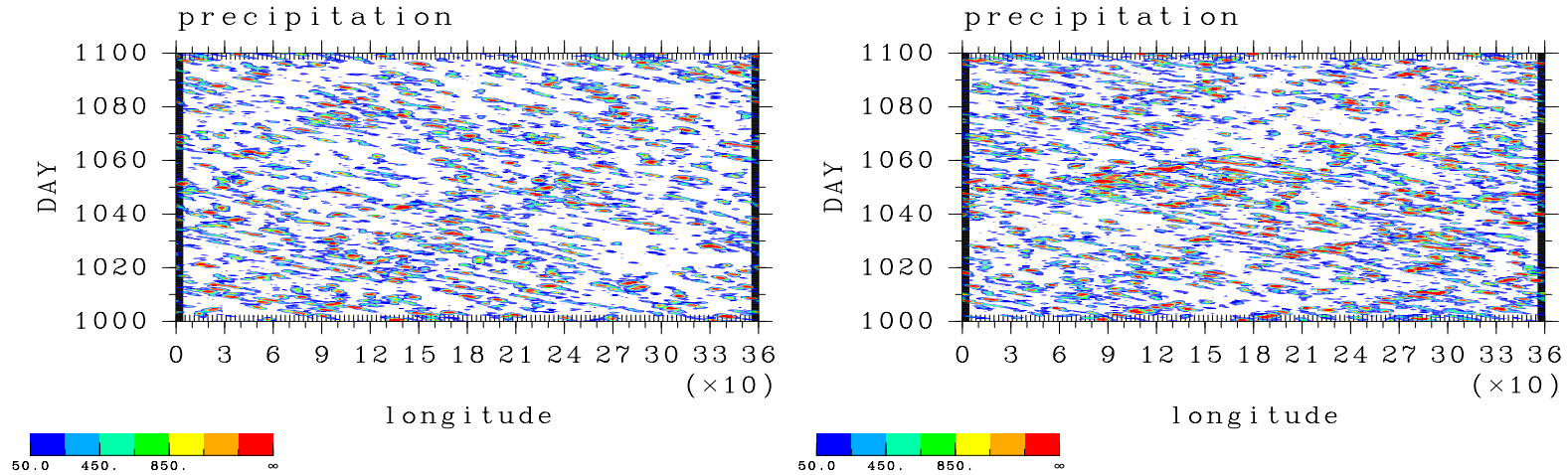
9. 結果: 乾燥大気吸収係数変更実験 2

赤道における降水の経度-時間図 (対流調節)

- (左) [a] 下層最大実験, (右) [b] 中下層最大実験



- (左) [c] 中上層最大実験, (右) [d] 上層最大実験



10. 結果: まとめ

Kuo スキームを用いた実験

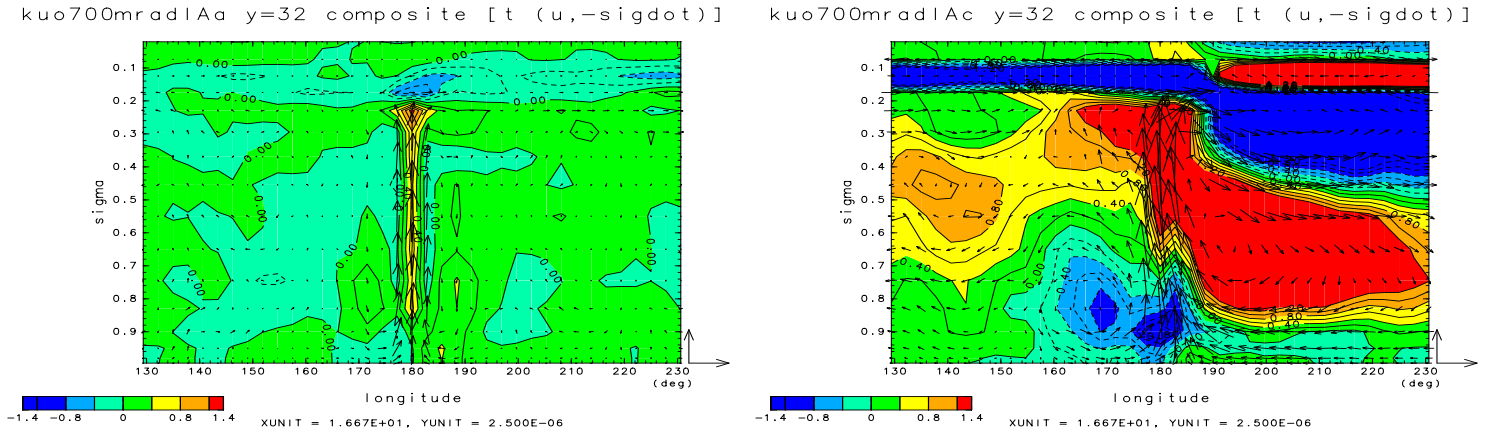
- 特徴的な降水活動：
  - 格子スケールの降水域：西進(約 7 m/s) あるいは, 東進 (約 23 m/s)
  - 東西波数 1 の変調構造：東進 (約 23 m/s)
- 放射冷却率が上層で最大値を持つ実験では,
  - 格子スケールの降水域：西進 → 東進

対流調節を用いた実験

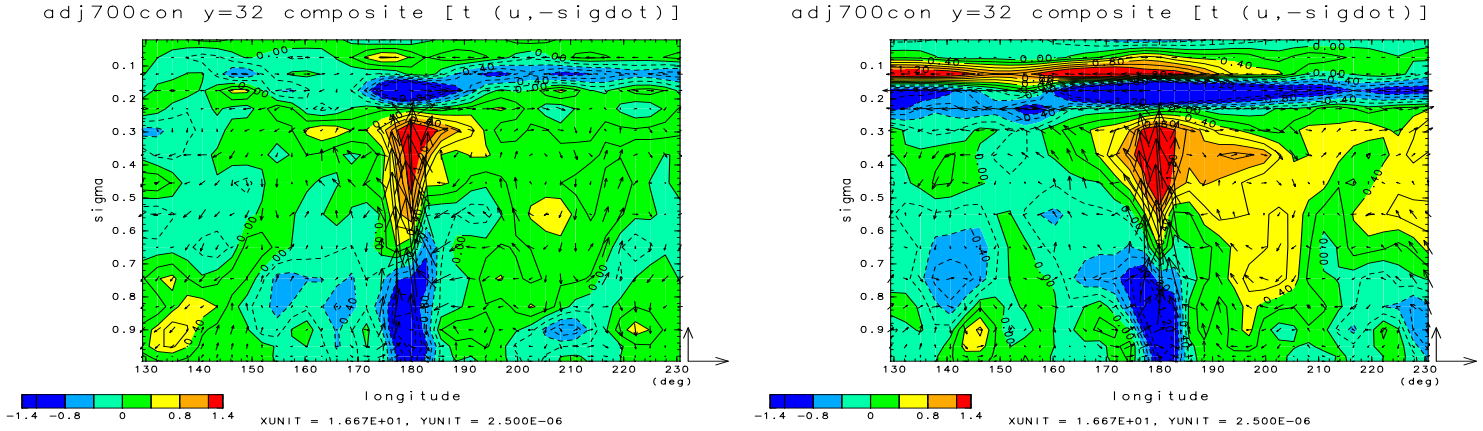
- 特徴的な降水活動：
  - 格子スケールの降水域：西進 (約 7 m/s)
  - 降水活動域の東進：東進 (約 12 m/s)
  - 東西波数 1 の変調構造：降水の図には見られない
- 放射冷却率が上層で最大値を持つ実験では,
  - 降水活動域の東進： 東進弱 → 東進強

11. 議論: コンポジット解析

- 降水量に準拠した温度場, 流れ場 (Kuo スキーム)
  - (左) 降水域の西進が顕著な実験, (右) 降水域の東進が顕著な実験



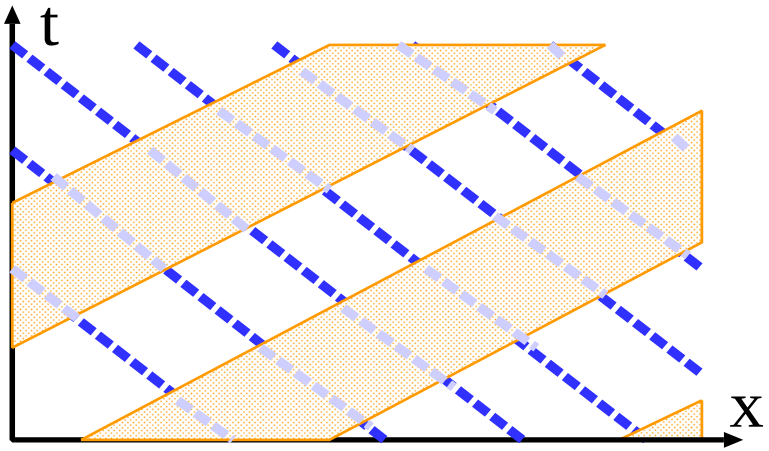
- 降水量に準拠した温度場, 流れ場 (対流調節)
  - (左) 降水域の西進を選びだしたもの, (右) 降水活動域の東進を選びだしたもの



12. 議論: 降水域を生成維持する機構 1

Kuo スキームを用いた実験

- 格子スケール降水域の西進 (約 7 m/s)
  - CIFK (第 1 種条件付き不安定) による可能性
    - コンポジット解析: 上昇流域地面に垂直
    - 東西平均の下層風(赤道付近 (緯度 - 7 ~ 7 度)): 4 ~ 7 m/s
- 格子スケール降水域の東進 (約 23 m/s)
  - wave-CISK による可能性
    - コンポジット解析: 上昇流域西傾
    - 放射冷却率が上層で最大値を持つ実験で強く現れる
- 東西波数 1 の変調 (約 23 m/s)
  - moist Kelvin である可能性
    - dry Kelvin (40 m/s) より遅い
    - 東西波数 1 の循環構造の影響を受け, 降水を抑制される
    - (右図) 実験 kuo-con における赤道上の降水と下降流域の時間変動の概念図. 橙色の陰影部は下降流域, 青色線は降水域, 灰色線は下降流によって降水の抑制される領域



13. 議論: 降水域を生成維持する機構 2

対流調節を用いた実験

- 格子スケール降水域の西進 (約 7 m/s)
  - CIFK による可能性
    - コンポジット解析: 上昇流域地面に垂直
    - 東西平均の下層風(赤道付近 (緯度 - 7 ~ 7 度)): 4 ~ 7 m/s
- 降水活動域東進 (約 12 m/s)
  - wave-CISK による可能性
    - コンポジット解析: 上昇流域西傾
    - 放射冷却率が上層で最大値を持つ実験で強く現れる

14. まとめと課題

まとめ

- 放射冷却率を変えた時に赤道域降水活動は？
  - 水惑星 GCM 実験における赤道域降水活動を調べた
  - 降水域を生成維持する機構として考えられるものを考察
    - パラメタをどれくらい変えると降水活動がどのくらい変わるか？→ 目安くらいはついた？
    - 格子スケールの降水域が, どのパラメタの時に西進/東進するか評価できない

課題

- 赤道域降水活動を記述する理論モデル構築のためには？
- GCM, 現実大気の振舞の理解のためには？
  - さらに多くのパラメタ実験
    - 物理過程, 境界条件, 解像度などを変更
  - 理論的な立場からのアプローチ
    - 物理過程をさらに簡略化したモデル
    - 降水活動の速度, 強度の定量的評価

まだまだまだまだまだ, 道のりは遠い...

15. 参考文献

- Hayashi, Y.-Y. and A. Sumi, 1986: The 30-40 day oscillations simulated in an ‘‘aqua planet’’ model. J. Meteor. Soc. Japan, 64, 451-467.
- Hosaka, M., M. Ishiwatari, S. Takehiro, K. Nakajima, Y.-Y. Hayashi, 1998: Tropical precipitation patterns in response to a local warm SST area placed at the equator of an aqua planet. J. Met. Soc. Japan, 76, 289-305. (H1998)
- Lin, J., Mapes, B., Zhang, M., Newman, M., 2004: Stratiform precipitation, vertical heating profiles, and the Madden-Julian Oscillation. J. Atmos. Sci., Submitted.
- Numaguti, A. and Y.-Y. Hayashi, 1991a: Behaviors of cumulus activity and the structures of circulations in an ‘‘aqua planet’’ model. Part I: The structure of super clusters. J. Meteor. Soc. Japan, 69, 541-561. (NH1991a)
- Slingo, J. M., Sperber, K. R., Boyle, J. S., Ceron, J. -P., Dix, M., Dugas, B., Ebisuzaki, W., Fyfe, J., Gregory, D., Gueremy, J. -F., Hack, J., Harzallah, A., Inness, P., Kitoh, A., Lau, W. K. -M., McAvaney, B., Madden, R., Matthews, A., Palmer, T. N., Park, C. -K., Randall, D. and Renno, N., 1996: Intraseasonal oscillations in 15 atmospheric general circulation models: results from an AMIP diagnostic subproject. Clim. Dyn., 12, 325-357.
- 地球流体電脳倶楽部, 1997: 「地球流体電脳倶楽部版 AGCM5」, http://www.gfd-dennou.org/arch/agcm5

ポスター概要紹介

(ポスター概要紹介) 原稿

- (はじめに名前とタイトルは言うのか？)

- 赤道域の降水活動には, 階層的な構造が存在すると言われています. しかし, 多くの大気大循環モデルではこの構造は必ずしもうまく再現されていません.
- 大気大循環モデルや赤道域の降水活動の振舞を理解するための試みとして, 赤道域降水活動の放射冷却率鉛直分布依存性に注目して数値実験を行いました.
- 境界条件は全球が水で覆われているとしました.実験は, モデルの長波放射スキームの乾燥大気の吸収係数を変えて行いました.
- この実験結果の図は, 積雲パラメタリゼーションに **Kuo** を用いた実験の赤道における降水の時間変動を示しており, 縦軸は時間, 横軸は経度を表しています.
- 格子点数点で表現される格子スケールの降水域は, 放射冷却率が中層で最大値を持つ実験では西進し, 上層で最大値を持つ実験では東進するという結果が得られました.
- これらの降水域に対してコンポジット解析を行いました. その結果, 降水域を生成維持するメカニズムとして, 西進する降水域は, **CIFK**, 東進する降水域は, **wave-CISK** が考えられます.
- 詳細は, ポスター会場でお話します.

(制限時間 **2** 分だけど, 原稿は **1** 分半)

水惑星実験による熱帯域降水活動の放射冷却率鉛直分布依存性に関する研究

□ 背景

- 赤道域に存在が示唆されている, 降水活動の階層構造
- 大気大循環モデルでは, 必ずしもよく再現されていない

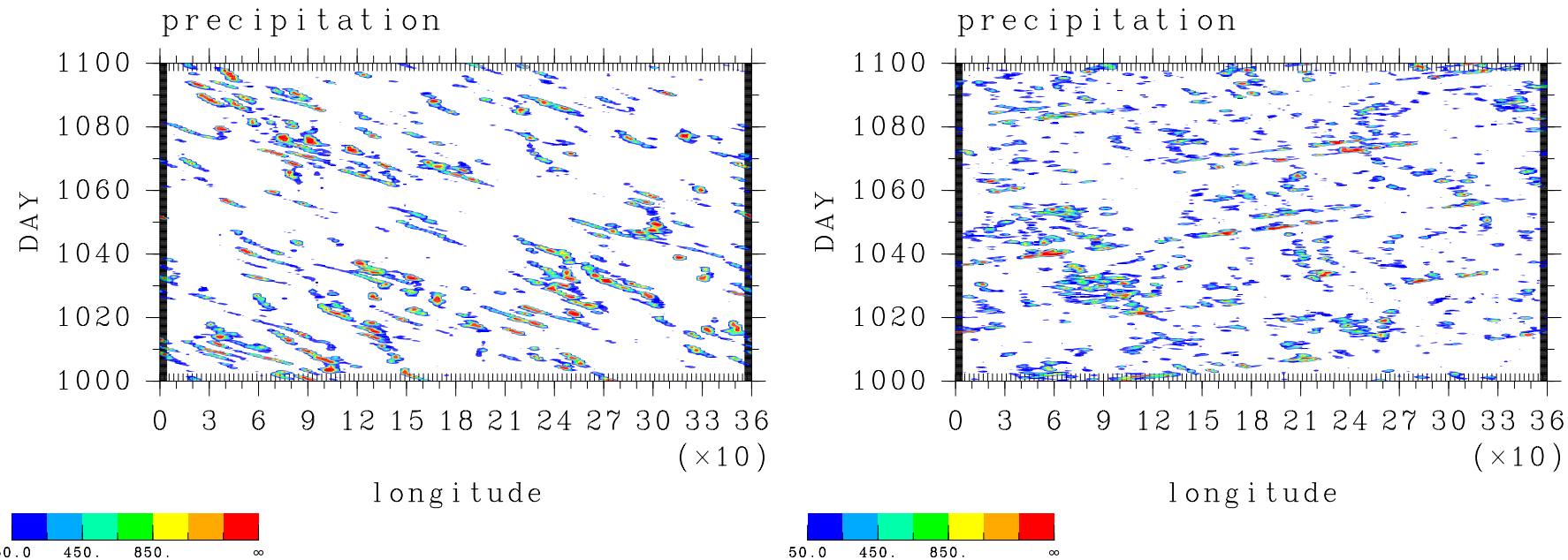
□ 目的

- 放射冷却率の鉛直分布の違いにより, 数値モデルで実現される赤道域の降水活動はどのように変わるか？

□ 大気大循環モデルを用いた数値実験

- 境界条件: 全球が水で覆われているとする (水惑星)
- 長波放射スキームの乾燥大気の吸収係数を変える

□ 結果



赤道における降水の経度-時間図. 積雲パラメタリゼーションに **Kuo** スキームを用いた場合.
(右図) 中層で放射冷却率が最大値を持つ実験, (左図) 上層で放射冷却率が最大値を持つ実験.

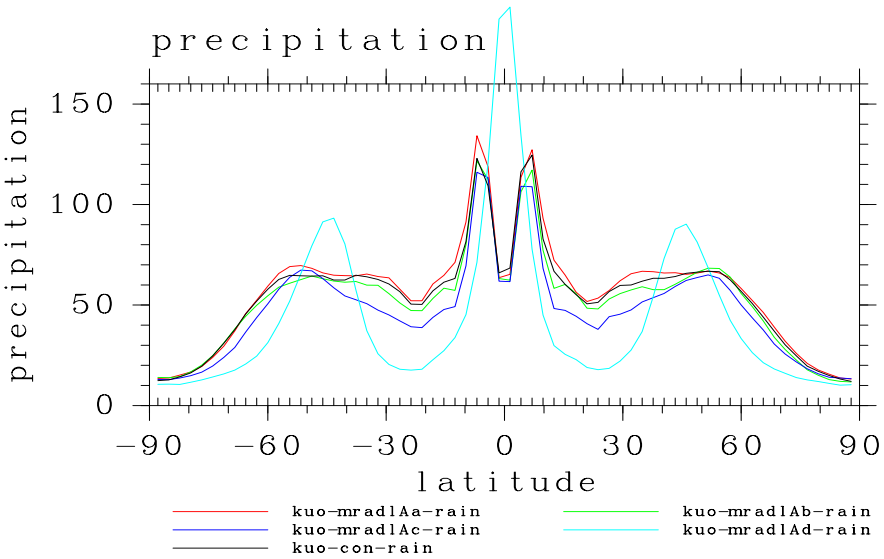
- 格子スケールの降水域
  - 中層で放射冷却率が最大値を持つ実験：西進
  - 上層で放射冷却率が最大値を持つ実験：東進
- コンポジット解析による, 降水域を生成する機構の考察
  - 西進する格子スケールの降水域：**CIFK (第 1 種条件付き不安定)**
  - 東進する格子スケールの降水域：**wave-CISK**

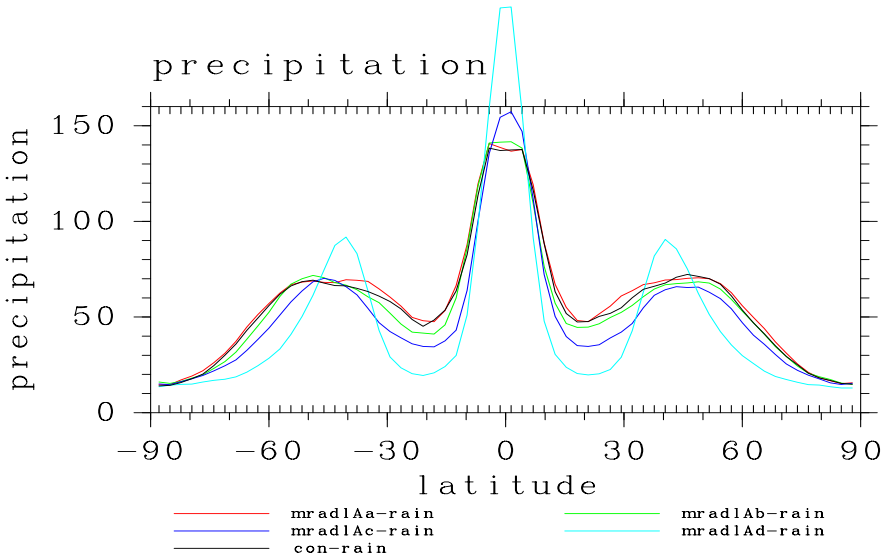
付録

(付録) 結果: 降水量の時間東西平均

降水量：時間東西平均

- (左) Kuo スキーム, (右) 対流調節

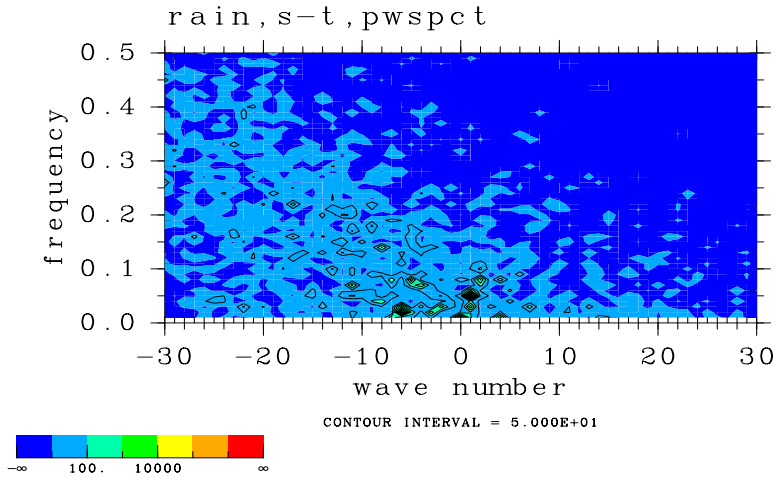


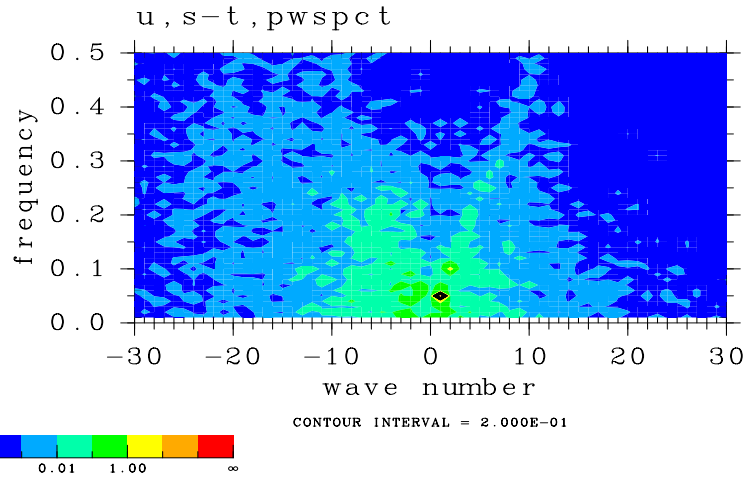


(付録) 結果: 標準実験 2

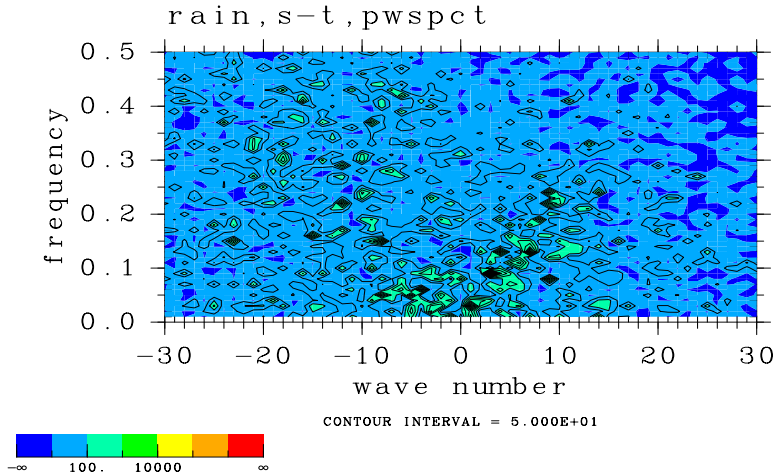
標準実験：赤道上の時空間スペクトル

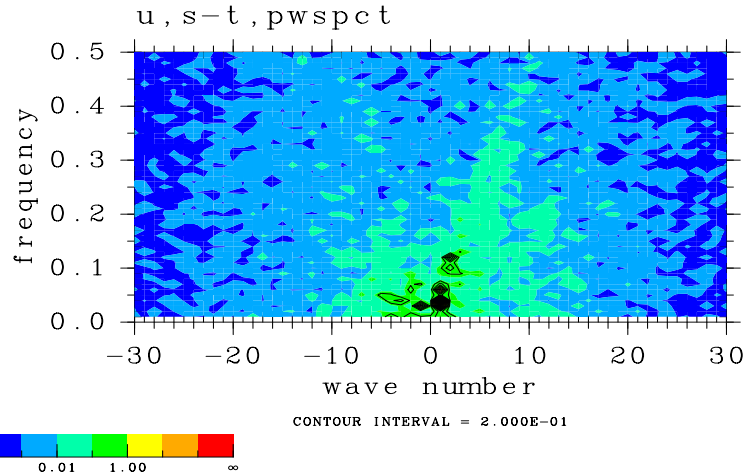
- (左) 降水 (Kuo スキーム), (右) 対流圏界面付近東西風偏差 (Kuo スキーム)





- (左) 降水 (対流調節), (右) 対流圏界面付近東西風 (対流調節)

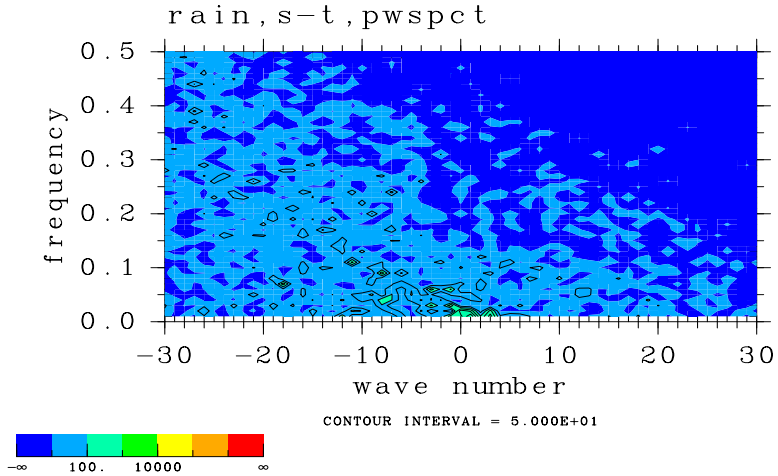


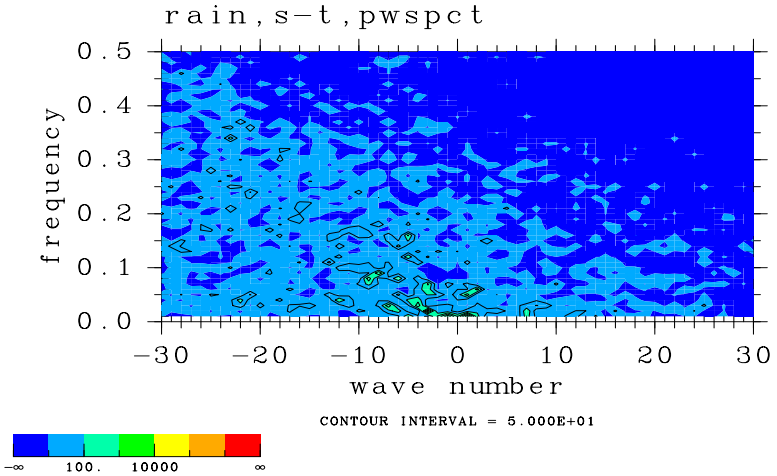


(付録) 乾燥大気吸収係数変更実験 3

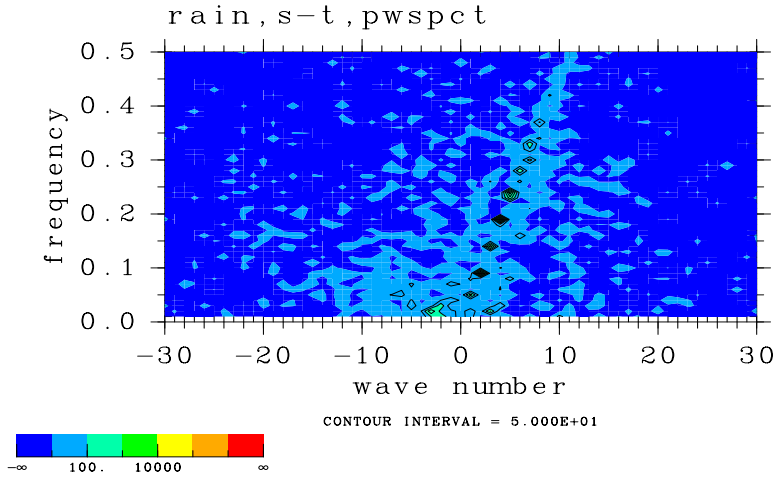
赤道上の降水の時空間スペクトル (Kuo スキーム)

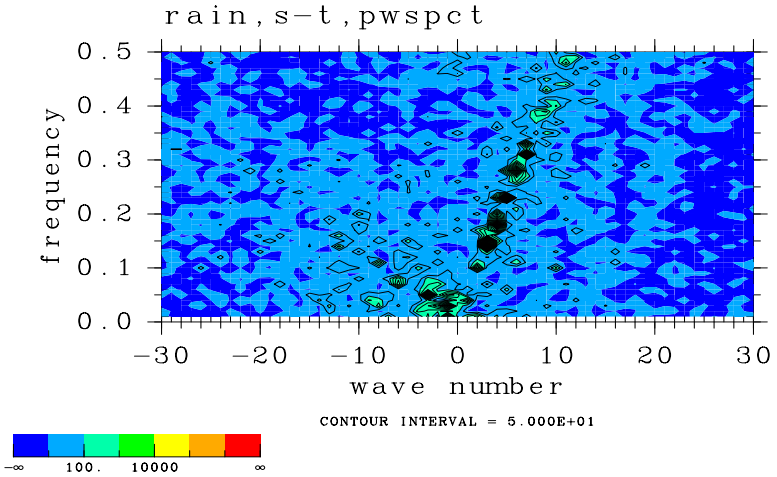
- (左) [a] 下層最大実験, (右) [b] 中下層最大実験





- (左) [c] 中上層最大実験, (右) [d] 上層最大実験

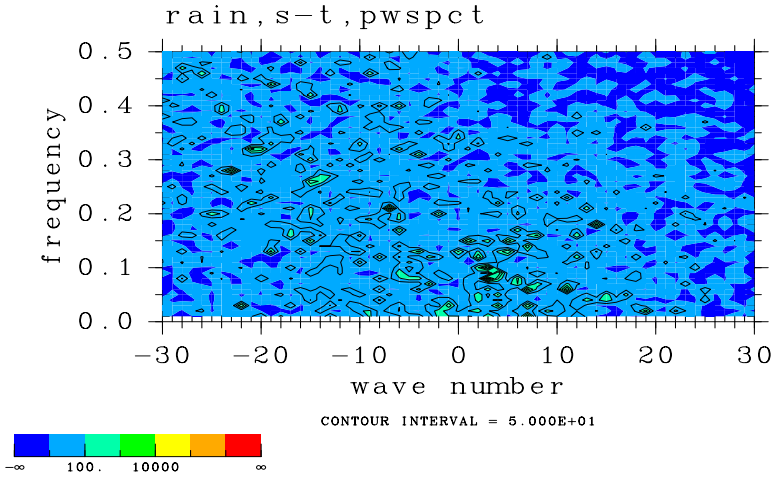


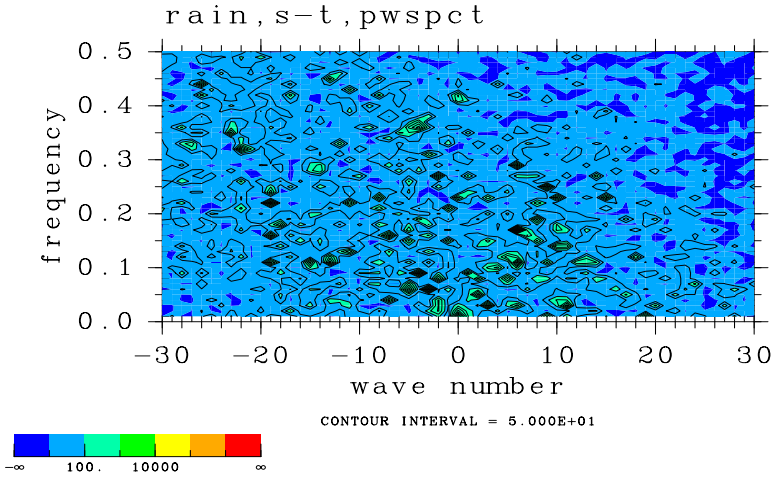


(付録) 乾燥大気吸収係数変更実験 4

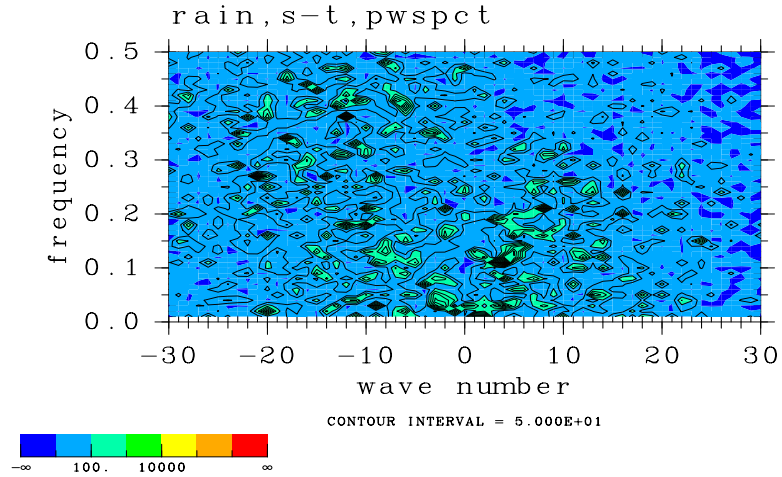
赤道上の降水の時空間スペクトル (対流調節)

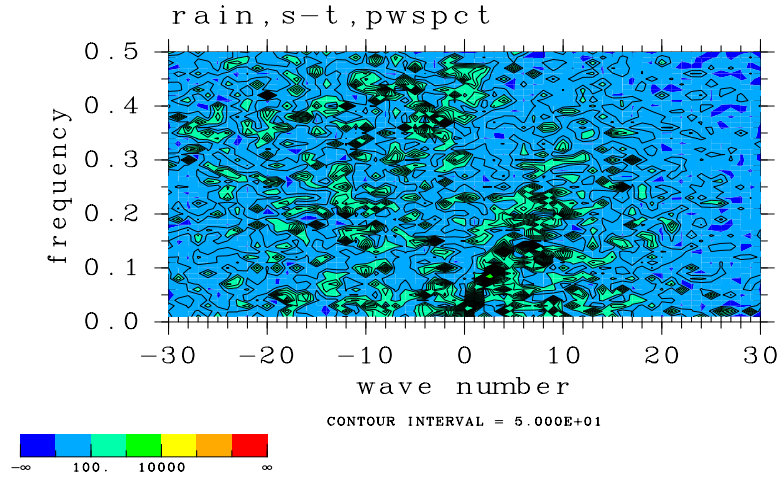
- (左) [a] 下層最大実験, (右) [b] 中下層最大実験





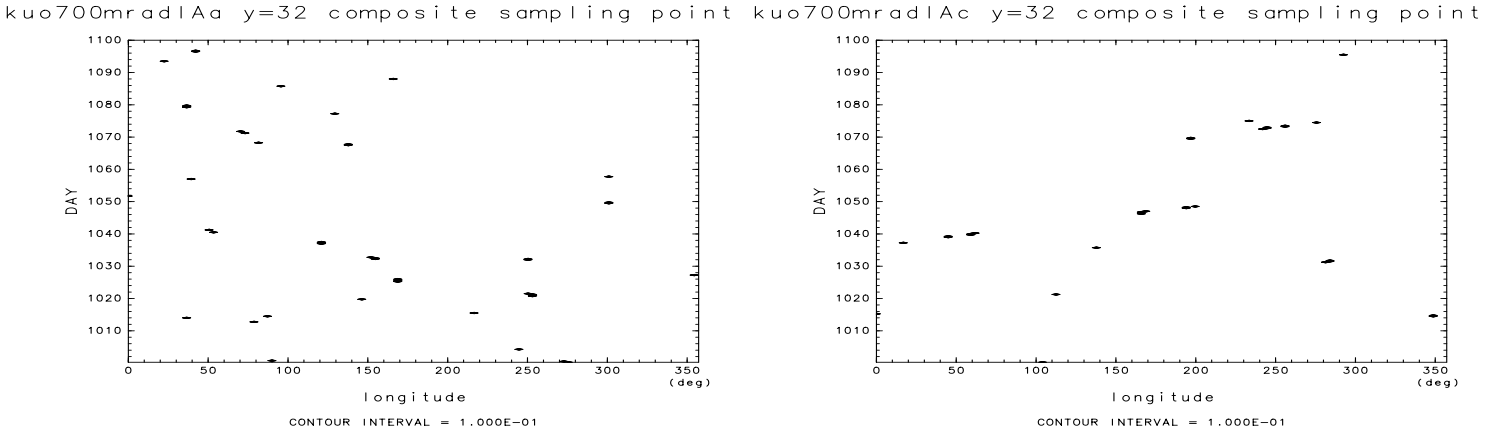
- (左) [c] 中上層最大実験, (右) [d] 上層最大実験



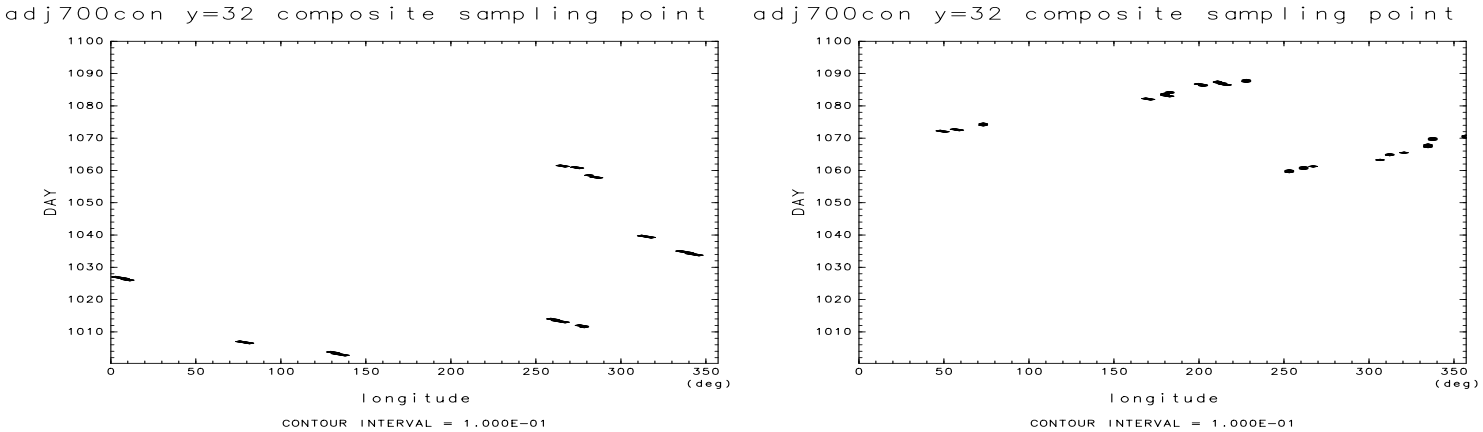


(付録) 結果: コンポジット解析 2

- コンポジットの参照点 (Kuo スキーム)
  - (左) 降水域の西進が顕著な実験, (右) 降水域の東進が顕著な実験

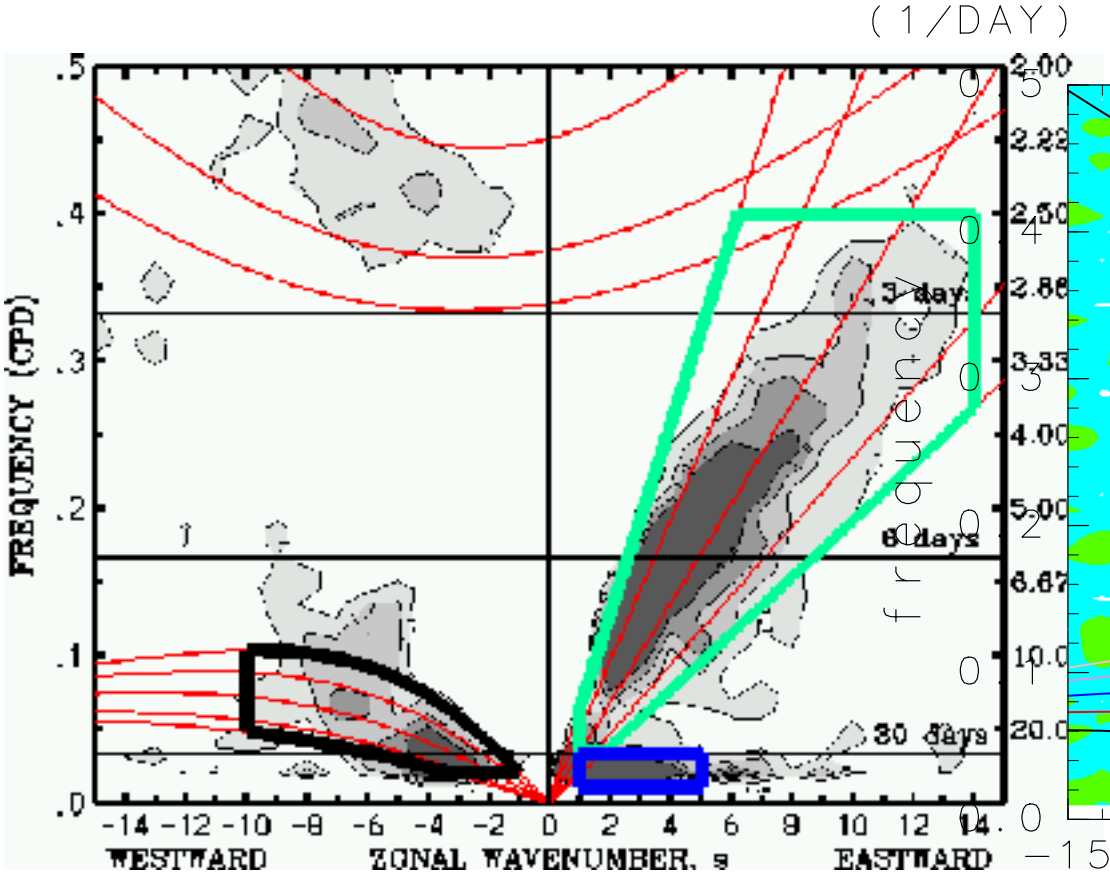


- 降水量に準拠した温度場, 流れ場 (対流調節)
  - (左) 降水域の西進を選びだしたもの, (右) 降水活動域の東進を選びだしたもの

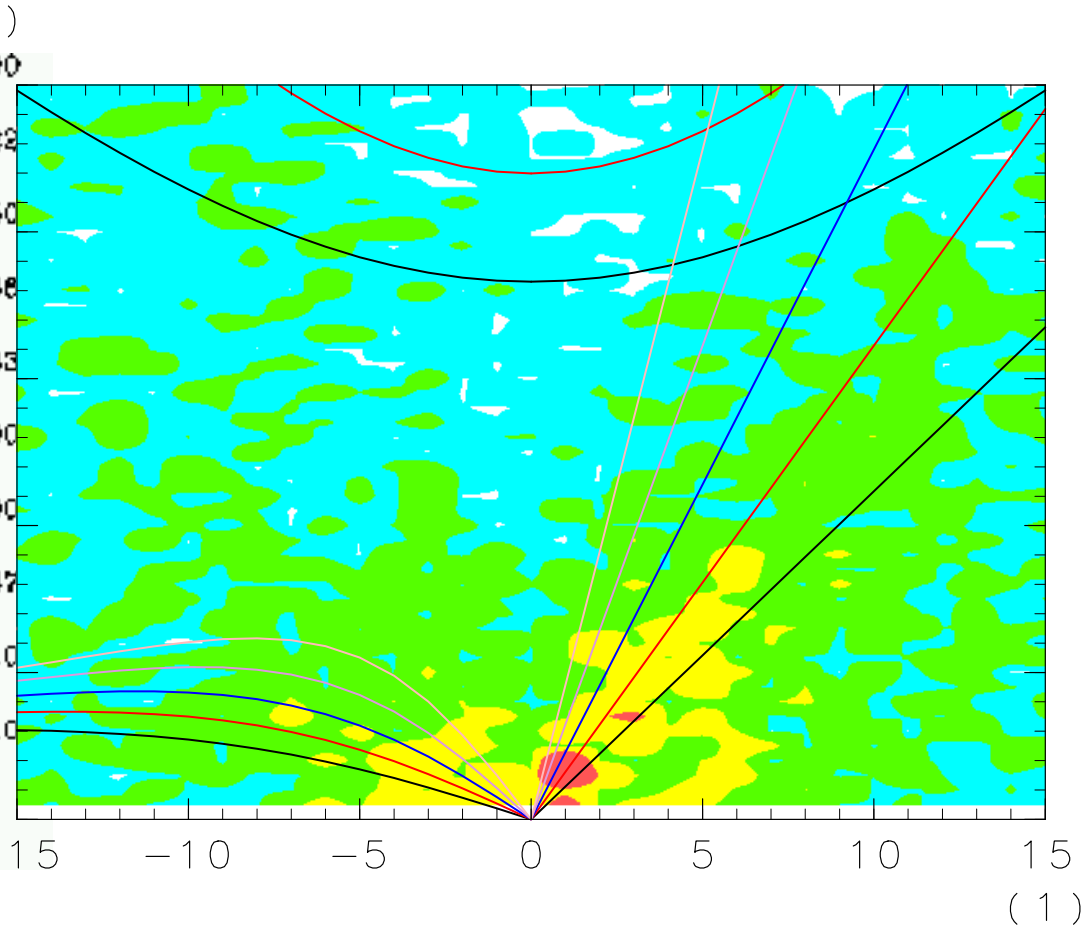


(付録) 赤道上の時空間スペクトル

- 観測との比較



Wheeler and Kiladis (1999)
赤道上 **OLR** 時空間スペクトル
from: http://www.cdc.noaa.gov/map/clim/olr_modes/



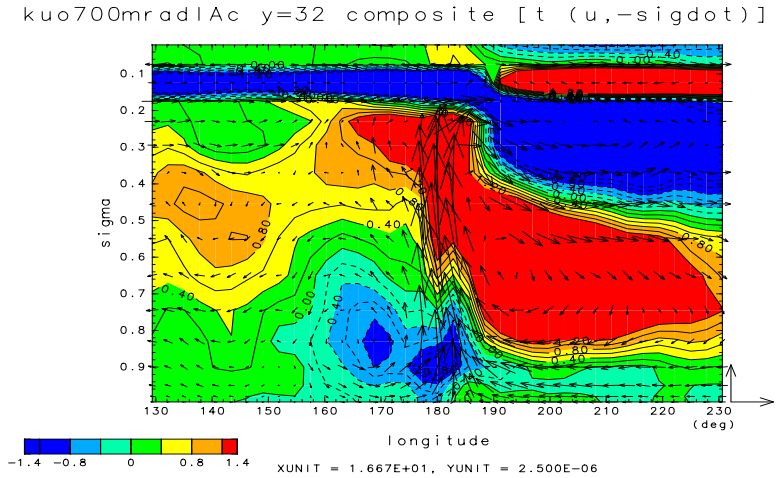
標準実験 (対流調節) : 赤道上の時空間スペクトル

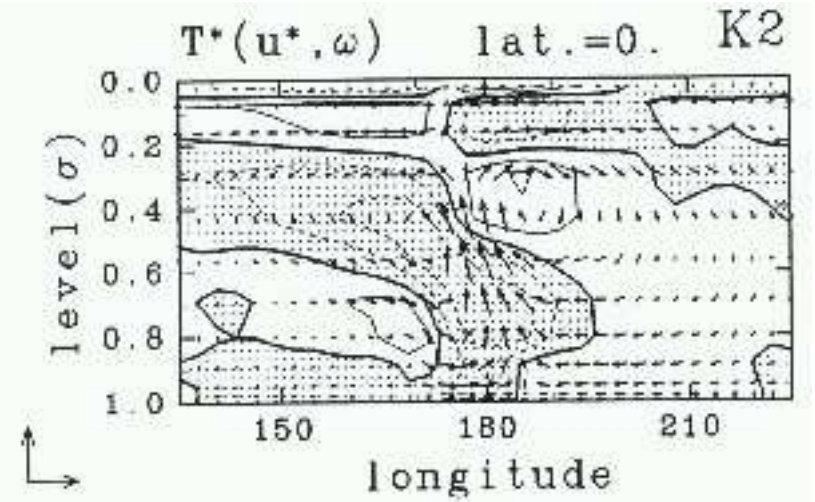
対流圏界面付近東西風 (対流調節)

(付録) 結果: コンポジット解析

降水量に準拠したコンポジット解析

- 温度場, 東西流鉛直流の経度-高さ図
  - (左) 実験 **kuo-mradlAa** (格子スケール降水域の東進が顕著な実験)
  - (右) **NH1991a** (Kuo スキームを用いた実験)

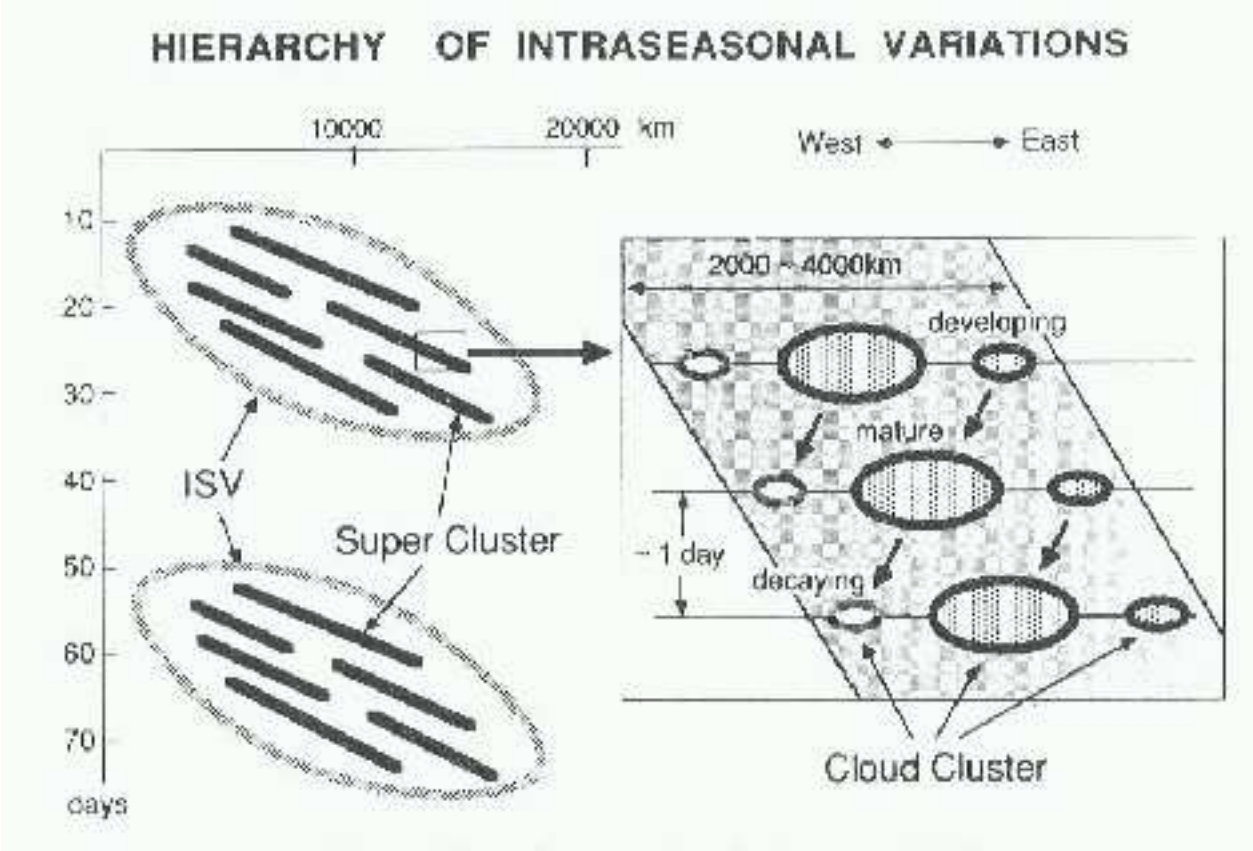




(付録) スーパークラスター, MJO

スーパー(クラウド)クラスター

- **Hayashi and Sumi(1986) の数値実験による予測**
- **Hayashi and Nakazawa (1989) の観測による証明**
  - クラウドクラスターは偏東風に流されて西進
  - 積雲の生成機構によってスーパークラスターは東進
  - **MJO** の対流活発領域内に存在



Nakazawa(1988)

(付録) moist-Kelvin

- 凝結によって変質を受けた波動.

- **reduced gravity**
  - 浅水系で考えると...

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -g\frac{\partial h}{\partial x}$$
$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -g\frac{\partial h}{\partial y}$$
$$\frac{\partial h}{\partial t} + H\nabla\cdot\boldsymbol{v} = Q = \alpha\nabla\cdot\boldsymbol{v}$$

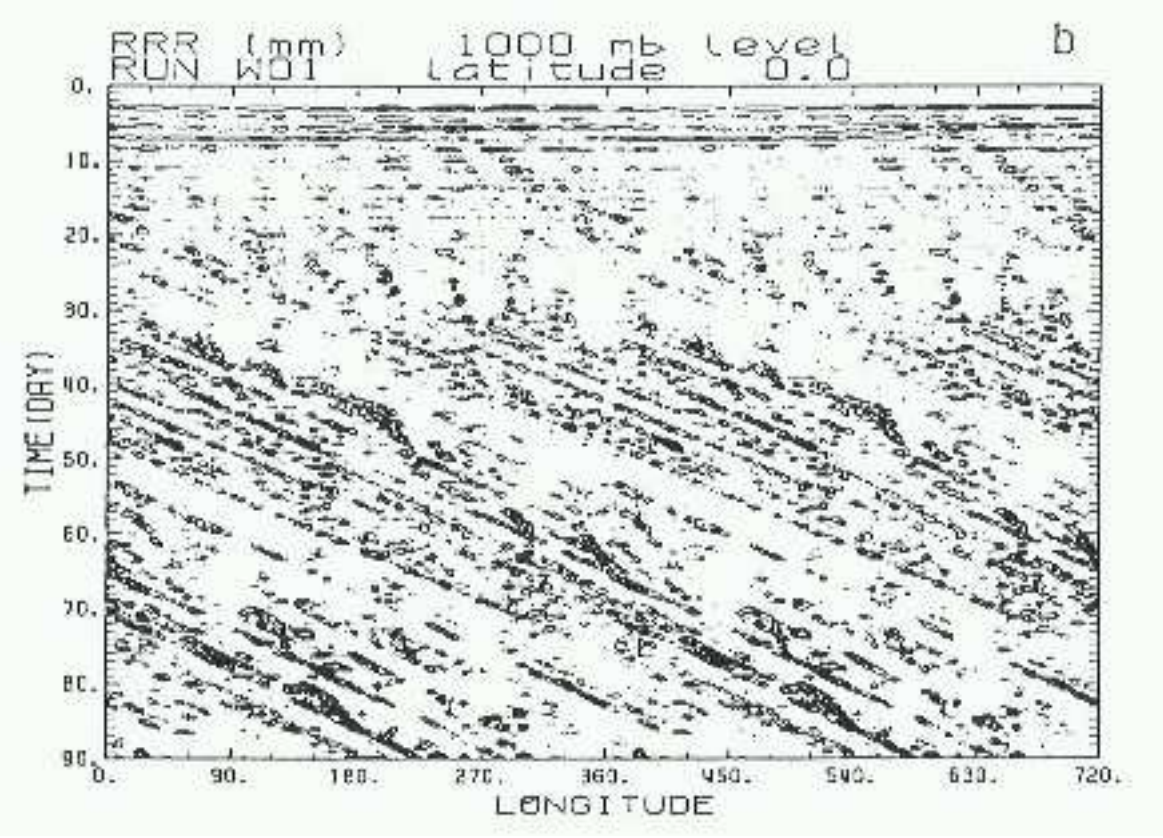
  - 重力波の速度

$$C = \sqrt{g(H-\alpha)} = \sqrt{g\frac{H-\alpha}{H}H} = \sqrt{g'H}$$

(付録) 過去の数値実験

Hayashi and Sumi (1986)

- 熱帯降水活動に関するはじめての **GCM** 実験
- 境界条件**:** 水惑星
- 結果
  - 格子スケール降水域の東進**:** スーパークラスターと呼んだ
  - 東西波数 **1** の変調**: MJO** に対応するものであると主張
  - 大気に内在するメカニズムによって自発的に形成される構造があることを示唆



(付録) wave-CISK

wave-CISK

- 波動にともなう上昇流と積雲活動の結合によって波動擾乱を強めるプロセス
- 凝結加熱率が下層より上層で最大値を持つほど, 傾圧第 2 モードの波動が強く励起され, 傾圧第 1 モードの波動との結合による不安定を起こすのに適している **(Lau and Peng, 1987; Chang and Lim, 1988)**
- **wave-CISK** による循環は, 第 1 モードと第 2 モードの位相のずれのため, 上層に向かって西に傾いている

Kelvin wave-CISK の線形モデル (Lau et al., 1988)

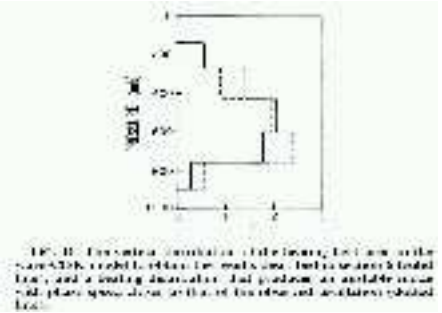
$$\left.\begin{aligned} \partial_t u &= -\partial_x \Phi \\ \partial_t T &= -\omega(\partial_p \bar{T} - \kappa \bar{T}/p) + Q/c_p \\ \partial_x u &= -\partial_p \omega \\ \partial_p \Phi &= -RT/p \end{aligned}\right\}. \qquad (2)$$

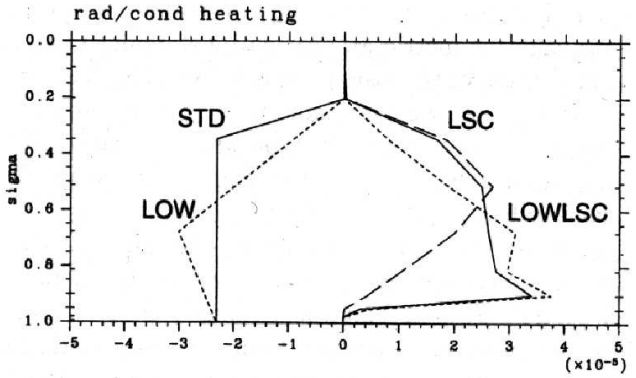
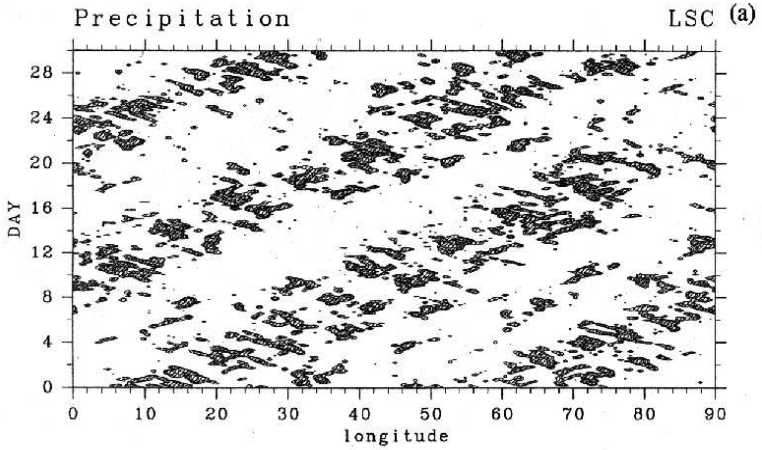
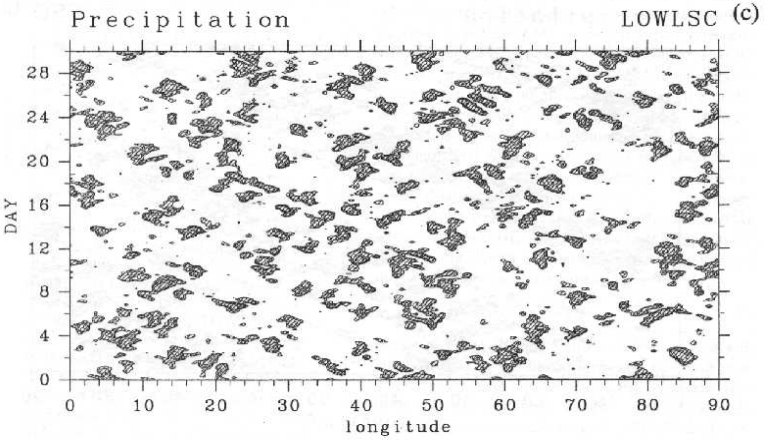
Subscripts denote differentiation; the notation follows standard meteorological conventions. We set $Q = Q_0 f(p)$ with

$$Q_0 = L\nabla \cdot \left(\int_0^{p^*} r(p)\mathbf{v}(p)\,dp/p_* \right)$$

$$= -L \int_0^{p^*} r(p)\partial_p \omega\, dp/p_*, \qquad (3)$$

$$\int_0^{p^*} f(p)\,dp/p_* = 1, \qquad (4)$$



(付録) 凝結加熱率と長波放射加熱率

- 長波放射鉛直分布を変えてみた実験
  - **Numaguti and Hayashi (2000)** (上図: Fig 1, 下図: Fig 2 (a), (b))