

# 大気大循環モデルで表現される赤道域降水活動の解像度依存性

## A Resolution Dependence of Equatorial Precipitation Activities Represented in a General Circulation Model

- 山田由貴子, 北大理, 札幌市北区北 10 条西 8 丁目, E-mail: yukiko@ep.sci.hokudai.ac.jp  
高橋芳幸, 北大理, 札幌市北区北 10 条西 8 丁目, E-mail: yot@ep.sci.hokudai.ac.jp  
林祥介, 北大理, 札幌市北区北 10 条西 8 丁目, E-mail: shosuke@gfd-dennou.org  
石渡正樹, 北大地球環境, 札幌市北区北 10 条西 5 丁目, E-mail: momoko@ees.hokudai.ac.jp  
大淵濟, 地球シミュレータセンター, 横浜市金沢区昭和町 3173-25, E-mail: ohfuchi@jamstec.go.jp  
中島健介, 九大理, 福岡市東区箱崎 6-10-1, E-mail: kensuke@geo.kyushu-u.ac.jp  
Yukiko YAMADA, Graduate School of Sci., Hokkaido Univ., Sapporo 060-0810, Japan  
Yoshiyuki O. TAKAHASHI, Graduate School of Sci., Hokkaido Univ., Sapporo 060-0810, Japan  
Yoshi-Yuki HAYASHI, Graduate School of Sci., Hokkaido Univ., Sapporo 060-0810, Japan  
Masaki ISHIWATARI, Graduate School of Environmental Sci. Hokkaido Univ., Sapporo 060-0810, Japan  
Wataru OHFUCHI, The Earth Simulator Center, Yokohama 236-0001, Japan  
Kensuke NAKAJIMA, Faculty of Sci., Kyushu Univ., Fukuoka 812-8581, Japan

Aqua planet experiments are performed in order to investigate horizontal and vertical resolution dependencies of equatorial precipitation activities. The numerical model utilized is AGCM for Earth Simulator (AFES). The cumulus convective scheme is not used. With the increase of vertical resolution from 24 to 96 levels, there are not major differences in precipitation pattern. With the increase of horizontal resolution from T39 to T319, the eastward propagating envelope structures of the westward propagating individual grid-scale disturbances become evident.

### 1. はじめに

赤道域には, Madden-Julian 振動, スーパークラスター, クラウドクラスターと呼ばれる組織化した階層的な降水構造が存在すると言われている<sup>(1)</sup>. Madden-Julian 振動<sup>(2)</sup>は, 30–60 日で東進する東西波数 1 の水平スケールをもつ季節内変動である. スーパークラウドクラスターは, 水平スケール 3000–5000 km の赤道付近を東進する対流活動域であり, Madden-Julian 振動の対流活動域内に現れることから Madden-Julian 振動の内部構造と考えられている. さらにスーパークラスターの内部構造として, 水平スケール数 100 km で西進するクラウドクラスターが存在する.

これまでに行われている, これらの降水構造の階層性に注目した数値実験の結果からは, 大気大循環モデル中の降水分布パターンはモデルの数値スキームや物理過程の実装に強く依存することが分かってきている<sup>(3)(4)</sup>. しかし, 現在でもなお大気大循環モデルで表現されるべき降水分布パターンに関する意見の一致はみえておらず, 降水分布パターンの相違をもたらす力学についての理解も不十分である.

Yamada *et al.*<sup>(5)</sup> (以降 Y2005) は, 降水分布パターン形成の多様性を探る試みのひとつとして, 地球シミュレータの大気大循環モデル AFES を用いて, 鉛直および水平解像度を様々に変えた際の赤道域の階層構造の表現性に注目して数値実験を行った. その結果は, 水平解像度の向上に伴って格子点スケールの西進構造とそれを包絡する東進構造, という階層構造が次第に明瞭となるというものであった. Y2005 は, 水平分解能を上げることにより, 赤道波力学によって形成される東進構造とメソスケール力学によって形成され偏東風によって移流される西進構造とがスケールの分離され, 階層的に表現されるようになると予想している. しかし Y2005 の結果では, 東進構造を形成する力学と予想した wave-CISK 的構造は顕著に見られなかった. この原因として

は, 物理過程, 特に積雲パラメタリゼーションの設定 (Y2005 では Emanuel スキーム<sup>(6)</sup>) が wave-CISK が発現しにくいようになっていた可能性もあるが, また積雲パラメタリゼーションの設定パラメタの解像度依存性の問題と, 水蒸気移流と赤道域の力学とによって現れるであろう降水階層構造の解像度依存性の問題とが共存している可能性もある.

そこで本研究は, Y2005 と同じ条件で, 積雲パラメタリゼーションを用いずに水平・鉛直解像度を変えた実験を行い, より単純な設定の元での降水階層構造の解像度依存性について検討する.

### 2. モデルと解析手法

#### 2.1 モデルと実験設定

モデルと解像度, 及び実験設定は, 積雲パラメタリゼーションを使用しないという点を除いて, Y2005 と同様である.

使用したモデルは, AFES (地球シミュレータ用に CCSR-NIES AGCM ver 5.4.02 の並列化効率を高めたモデル) である<sup>(7)</sup>. 力学過程は, 静力学平衡を仮定したプリミティブ方程式であり, 支配方程式は, Krishnamurti *et al.*<sup>(8)</sup> の渦度, 発散の式で表される. 水平離散化はスペクトル変換法<sup>(9)</sup>, 鉛直  $\sigma$  座標の離散化にはロレンツ格子<sup>(10)</sup>, 時間積分にはセミインプリシット法を用いている. 物理過程は, Nakajima and Tanaka<sup>(11)</sup> の放射スキーム, Mellor-Yamada level-2 の鉛直拡散スキーム<sup>(12)</sup> を用いている. 降水は大規模凝結スキーム<sup>(13)</sup> のみにより生じることとする. Y2005 とは異なり, 積雲パラメタリゼーションは用いない.

解像度は, 水平解像度を T39 から T319, 鉛直解像度を L24 から L96 に変えた (Table.1). 48 層における大気層の厚さは, 最下層では 20 m であり, 対流圏中層から成層圏中層にかけては約 1000 m である. 96 層における大気層の厚さは, 最下層では 10 m であり, 対流圏中層から成層圏中層では約 500 m である. 水平解

像度 T39 における水平格子間隔は約 330 km であり, T159 では約 80 km である.

境界条件として, Neale and Hoskins<sup>(14)</sup> の提唱する東西一様, 南北対称の海水面温度分布を持つ水惑星条件を与えた (Fig.1).

時間積分は 3 年半行った. 初期条件は T39L24 の解像度で 300 K 等温静止大気から開始して 10 年積分した最後の年を各解像度に内挿したものを用いた. 次節以降の実験結果における平均値は, 実験の最後の 3 年間のデータから計算する.

Table.1 The list of the experiments.

resolution	T39	T79	T159	T319
24 Level	T39L24			
48 Level	T39L48	T79L48	T159L48	T319L48
96 Level	T39L96			

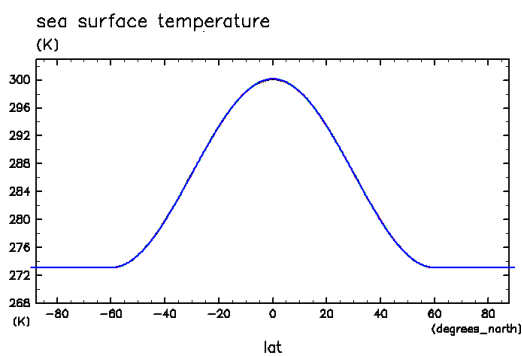


Fig.1 Meridional distribution of zonally averaged sea surface temperature [K].

## 2.2 時空間スペクトル解析手法

赤道域降水構造と赤道波との対応を明らかにするために, 3 節では Takayabu<sup>(15)</sup>, Wheeler and Kiladis<sup>(16)</sup> に従って計算した波数-振動数パワースペクトル解析の結果について議論する. 解析手法の概略は以下である.

1. 降水量の 1 年間 (1040-1400 日), 緯度 15S-15N のデータを 30 日ずつずらしながら, 90 日セグメントごとに区切った 10 セットのデータを作成する.
2. 最小二乗法を用いて平均および線形のトレンドを除く.
3. スペクトル推定誤差を抑える為に平滑化を行う. スペクトルウィンドウにはハミングウィンドウを用いた.
4. 各緯度, およびセグメントごとに, 経度と時間について FFT を行い, 波数-周波数スペクトル (時空間スペクトル) を得る.
5. 得られた時空間スペクトルの緯度, セグメントのそれぞれを足しあわせ, 以下の 3 種類のデータを作成する.

$$A_{\text{SYM}}(\phi) = (A(\phi) + A(-\phi))/2 \quad (\text{対称成分}),$$

$$A_{\text{ASM}}(\phi) = (A(\phi) - A(-\phi))/2 \quad (\text{反対称成分}),$$

$$A(\phi) = A_{\text{ASM}}(\phi) + A_{\text{SYM}}(\phi)$$

6. A に対して, 波数および周波数方向に 1-2-1 移動平均を 40 回かけ, バックグラウンドスペクトルを作成する.
7. 時空間スペクトルの対称成分  $A_{\text{SYM}}$  からバックグラウンドスペクトルを割る.

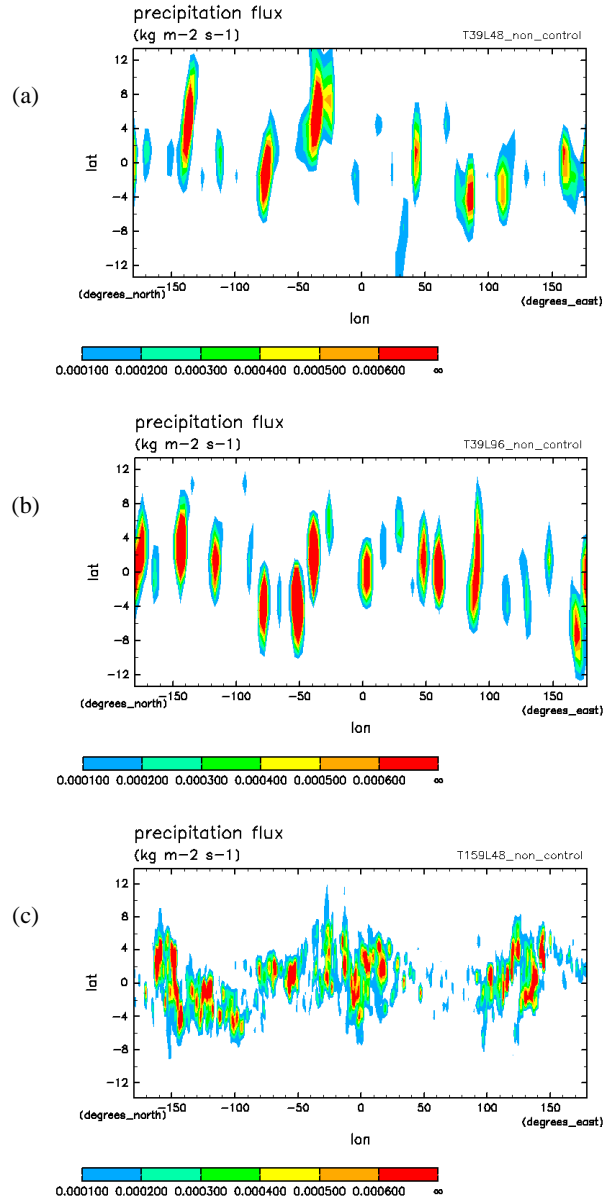


Fig.2 Snapshots of global 6 hour mean precipitation [ $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]: (a) T39L48, (b) T39L96, (c) T159L48.

## 3. 実験結果

Fig.2 は, 北緯 15 - 南緯 15 における降水の水平分布図である. T39L48, T39L96 実験では, 赤道域において格子点数で表される水平スケール数千 km の降水域が点在している (Fig.2(a,b)). 水平解像度を上げた実験 (T159L48) では, 赤道域において水平スケールのより小さい (数 100 km) の降水域が表現されている (Fig.2(c)). ただし, このような降水域は東西に一樣に分布する訳ではなく, 降水活動の活発な領域と不活発な領域とが存在する.

Fig.3(a) は, 標準実験 (T39L48) の赤道上経度時間断面図である. 格子点スケールの降水域には, 西進構造と東進構造との両方が存在し, これら 2 つの水平スケールは同程度 (数千 km 程度) である. 東進する降水域の移動速度は, 約 16 m/s である. 時空間スペクトル図においては, 15-25 m/s の位相速度に対応するシグナ

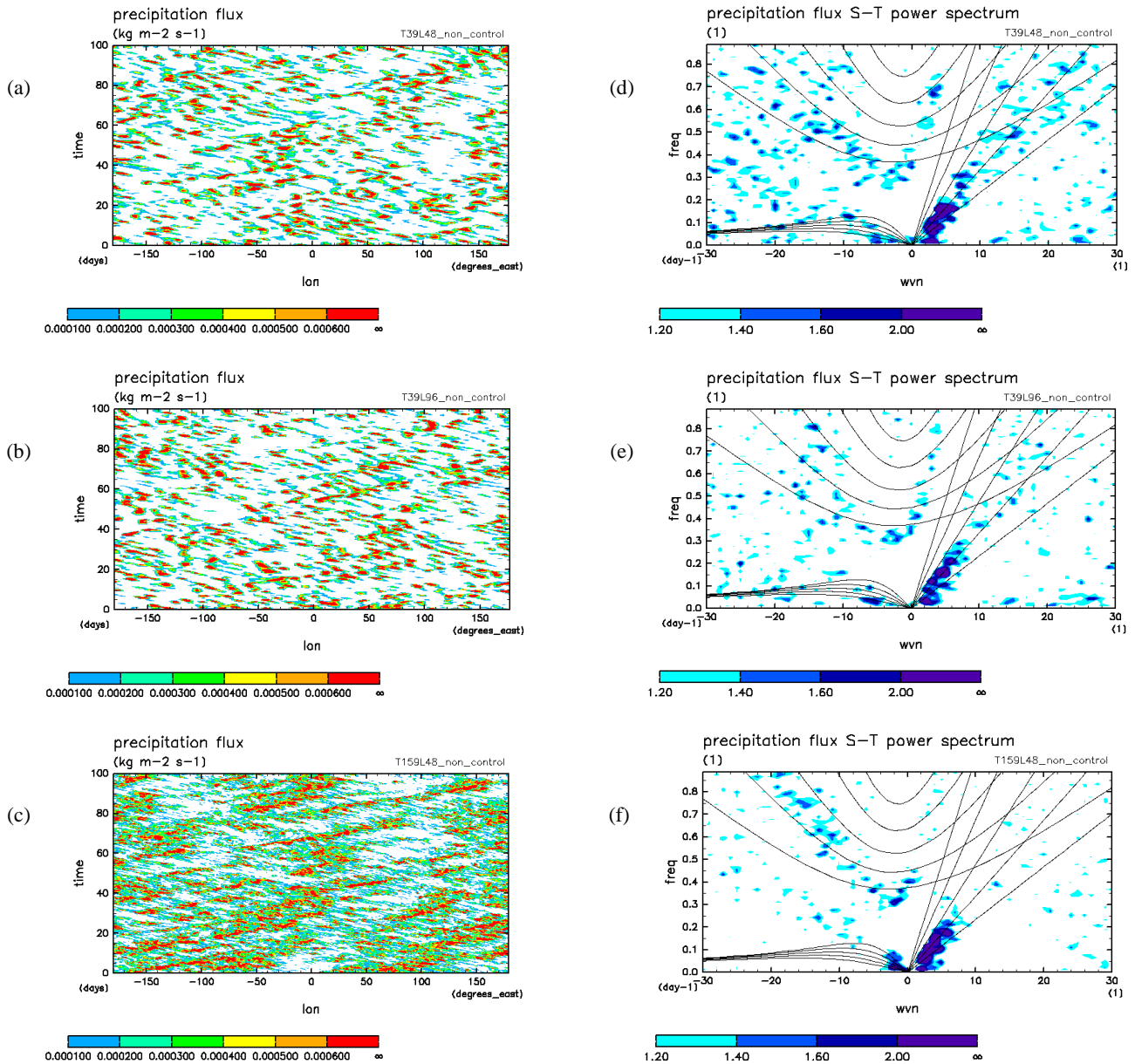


Fig.3 Temporal variations of equatorial precipitation [ $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ] for the last 100 days of experiments: (a) T39L48, (b) T39L96, (c) T159L48, and zonal wavenumber-frequency power spectra of tropical precipitation: (d) T39L48, (e) T39L96, (f) T159L48. Superimposed lines in (d), (e), and (f) are the dispersion curves of the odd meridional mode-numbered equatorial waves for five equivalent depths of  $h = 12, 25, 50, 100$  and  $200$  m.

ルが存在し (Fig.3(c)), このシグナルは赤道ケルビン波の分散曲線に乗る。西進する降水域に対応するスペクトルシグナルは、波数  $-10$  から  $-30$  の領域に広く分布している。

鉛直解像度を上げた場合では (T39L96), 赤道上経度時間断面図, 時空間スペクトル図において, 降水分布パターン, スペクトルのシグナルに標準実験と大きな違いは認められない (Fig.3(b),(e)). この傾向は 鉛直解像度を下げた場合 (T39L24) でも同様であった (図は示さない)。

水平解像度を上げると (T159L48), 水平スケール数千 km の連続的に降水が持続する東進構造が明瞭になる (Fig.3(c)). Fig.3(c) の拡大図 Fig.4 から, この東進構造の内部構造として, 水平スケール約  $200$  km の西進構造が存在していることが分かり, 明確な階層性が現れる。東進する降水域の移動速度は, 約  $16$  m/s である

(Fig.3(c)). 時空間スペクトル図においては, 標準実験と同様に約  $15 - 25$  m/s の位相速度に対応するシグナルが存在する。このシグナルは赤道ケルビン波の分散曲線に乗る (Fig.3(f)). 西進する降水域は, 時空間スペクトル図において移動速度  $8 - 10$  m/s と  $15 - 20$  m/s に対応する領域にシグナルを持つ (Fig.3(f)).  $15 - 20$  m/s の位相速度に対応するシグナルは西進重力波の分散曲線に乗る。  $8 - 10$  m/s という移動速度は下層の背景風の平均東西風風速とほぼ等しく (Fig.5), CIFK (conditional instability of the first kind)<sup>(19)</sup> によって成長した積雲活動が偏東風によって移流されている可能性が考えられる。

東進構造に共通する循環場の特徴を明らかにするためにコンボジット解析を行った。コンボジットの参照とする点は, 東進する降水域に沿う (Fig.6(a)). この参照点は下層  $850$  hPa では東西

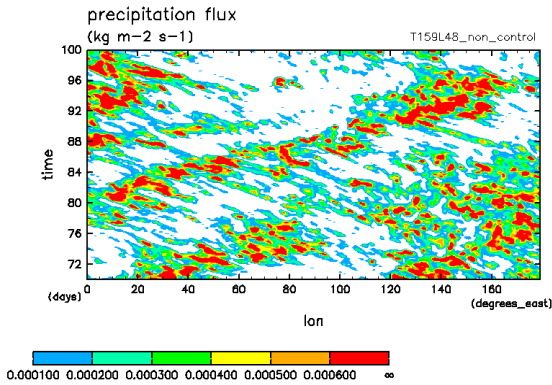


Fig.4 A magnified view of Fig.5(c).

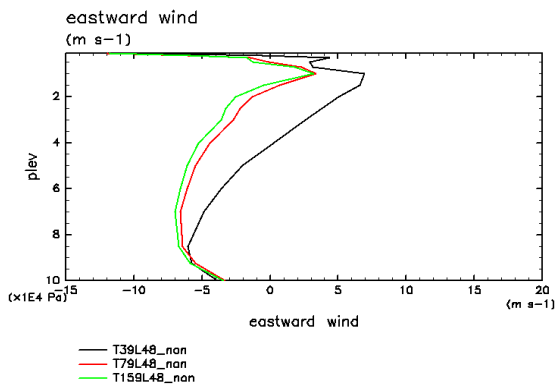


Fig.5 Vertical distributions of zonally averaged eastward wind [m/s] at the equator.

風の収束域となっている。コンポジット図では、温度場、流速場に位相の西傾が見られ、wave-CISK<sup>(17)</sup>の示唆する構造<sup>(18)</sup>となっている (Fig.6(b)).

#### 4. 議論とまとめ

積雲パラメタリゼーションを用いずに行った本実験では、鉛直解像度を変えても降水分布パターンに顕著な違いは見られなかった。一方で Emanuel スキームを用いた Y2005 では、降水強度の比較的弱い領域が広く分布し、西進する降水強度の強い領域の出現頻度は低くなるという結果を得た。Y2005 の結果は、積雲パラメタリゼーションの内部パラメタの鉛直解像度依存性により、鉛直解像度向上に伴って、生じた不安定をすぐに解消して積雲が生成されやすくなった結果、降水域が広く分布するようになったと想像できる。

水平解像度を変えた場合には、本実験、Y2005 とともに、格子点スケールの西進する降水域とそれを包絡する東進する降水域、という階層的構造が現れたが、Y2005 は本実験に比べて階層性は明瞭ではなく、東進包絡構造の東西スケールが Y2005 の方が広い (Y2005 では 10,000 km)、という点で異なる。東進構造に準拠したコンポジット図では、本実験は循環構造の位相の西傾が見られた一方で、Y2005 は位相の西傾は見られなかった。また低水平解像度の標準実験においても、本実験では同程度の水平スケールを持つ西進する降水域と東進する降水域との両方が存在していたが、Y2005 では標準実験において西進する降水域が顕著に見られ、東進する降水域はあまり見られない。これらのことから、水平解像度向上に伴う階層構造の表現は、モデルにおいて

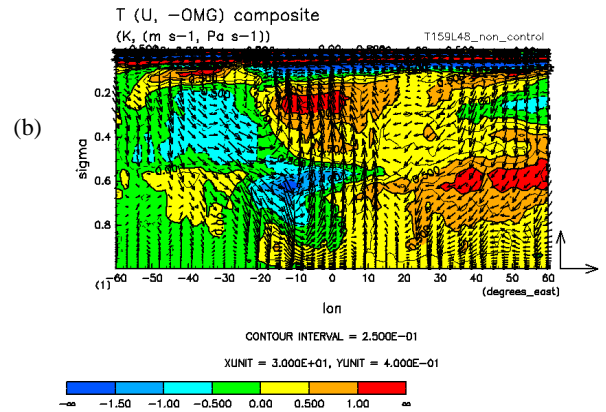
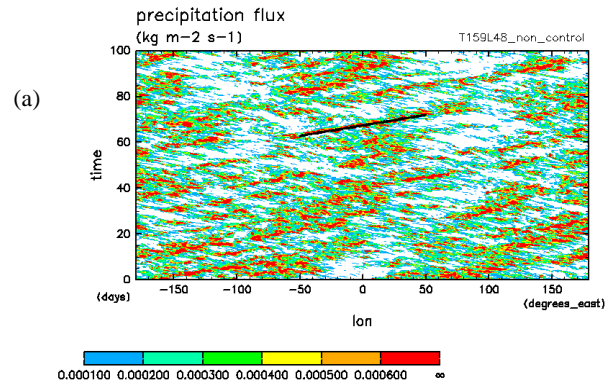


Fig.6 (a) Reference points for composite superimposed on longitude-time distribution of precipitation at the equator. (b) Longitude-height sections of temperature (contour) and wind vectors at the equator in composites with reference to eastward moving precipitation and eastward wind structure shown (a). Zonal mean values are subtracted. Areas with negative temperature anomaly are shaded. Contour interval is 0.25K. The unit vectors shown at the right side bottom represent 30 m/s and 0.4 Pa/s.

wave-CISK と整合的な東進構造が発現しやすい状況にある場合に、より明瞭となる可能性が考えられる。

本実験において、東進構造の内部構造として存在する西進する降水域は、時空間スペクトル図において、西進重力波の分散曲線に乗るシグナルと下層の背景風の平均東西風風速とほぼ一致するシグナルとが存在する。一方で、Y2005 では、西進重力波の分散曲線に乗るシグナルがほとんど見られず、下層の背景風の平均東西風風速とほぼ一致するシグナルしか存在しない。本結果と Y2005 の相違の原因を調査することは、西進する降水域の生成維持メカニズムを理解する手がかりとなるかもしれない。

今後は、本実験と Y2005 における階層構造の表現の違いについて、積雲パラメタリゼーションを用いた Y2005 の結果と本結果との隔たりを埋めるパラメタ依存性実験を行い、wave-CISK 理論を念頭においた結果の整理と解析を行っていく予定である。また、本実験におけるコンポジット解析は、水平スケール数千 km の構造に対して適用したが、今後は時空間スケールの小さい構造に対してより詳細な解析を行うことも今後の課題である。

参考文献

- (1) Nakazawa, T., "Tropical super clusters within intraseasonal variations over the western Pacific", *J. Met. Soc. Japan*, **66**(1988), 823–839.
- (2) Madden, R. A., Julian, P. R., "Description of global scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period", *J. Atmos. Sci.*, **29**(1972), 1109–1123.
- (3) Chao, W.-C. and Deng, L., "Tropical Intraseasonal Oscillation, Super Cloud Clusters, and Cumulus Convection Schemes. Part II: 3D Aquaplanet Simulations", *J. Atmos. Sci.* **55**(1998), 690–709.
- (4) Lee, M.-I., Kang, I.-S., Kim, J.-K. and Mapes, B.E., "The influence of cloud-radiation interaction on simulating tropical intraseasonal oscillation with the Atmospheric General Circulation Model", *J. Geophys. Res.*, **106**(2001), 14219–14233.
- (5) Yamada, Y., Sampe, T., Takahashi, Y. O., Yoshioka, M. K., Ohfuchi, W., Ishiwatari, M., Nakajima, K. and Hayashi, Y.-Y., "A resolution dependence of equatorial precipitation activities represented in a general circulation model", *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, **54**(2005), accepted.
- (6) Emanuel, K. A., "A scheme for representing cumulus convection in large-scale models", *J. Atmos. Sci.*, **48**(1991), 2313–2335.
- (7) Ohfuchi, W., Nakamura, H., Yoshioka, M.K., Enomoto, T., Takaya, K., Peng, X., Yamane, S., Nishimura, T., Kurihara, Y., and Ninomiya, K., "10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator: Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator)", *J. Earth Simulator*, **1**(2004), 8–34.
- (8) Krishnamurti, T.N., Bedi, H.S., and Hardiker, V.M., "An Introduction to Global Spectral Modeling", *Oxford University Press*, 1998, p.253.
- (9) Orszag, S.A., "Transform method for calculation of vector-coupled sums: Application to the spectral form of the vorticity equation", *J. Atmos. Sci.*, **27**(1970), 890–895.
- (10) Arakawa, A. and Suarez, M.J., "Vertical differencing of the primitive equations in sigma coordinates", *Mon. Wea. Rev.*, **111**(1983), 34–35.
- (11) Nakajima, T., and Tanaka, M., "Matrix formulation for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **35**(1986), 13–21.
- (12) Mellor, G.L., and Yamada, T., "A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers", *J. Atmos. Sci.*, **31**(1974), 1791–1806.
- (13) Le Treut, H., and Li, Z.-X., Sensitivity of an atmospheric general circulation model to prescribed SST changes: feedback effects associated with the simulation of cloud optical properties. *Clim. Dyn.*, **5**(1991), 175–187.
- (14) Neale, R.B., and Hoskins, B.J., "A standard test for AGCMs including their physical parameterizations: I: The proposal", *Atmos. Sci. Lett.*, **1**(2000), 101–107.
- (15) Takayabu, Y. N., 1994; "Large-scale cloud disturbances associated with equatorial waves. Part I: spectral features of the cloud disturbances", *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**(1994), 433–449.
- (16) Wheeler, M., and Kiladis, G.N., "Convectively coupled equatorial waves: Analysis of clouds and temperature in the wavenumber-frequency domain", *J. Atmos. Sci.*, **56**(1999), 374–399.
- (17) Hayashi, Y., "A theory of large-scale equatorial waves generated by condensation heat and accelerating the zonal flow", *J. Meteor. Soc. Japan*, **48**(1970), 140–160.
- (18) Numaguti, A. and Hayashi, Y.-Y., "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**(1991a), 541–561.
- (19) Bretherton, C., "A theory for nonprecipitating moist convection between two parallel plates. Part I: thermodynamics and "linear" solutions", *J. Atmos. Sci.*, **44**(1987), 1809–1827.