

全球雲解像モデル NICAM を用いた水惑星実験による海面水温 変動と熱帯の湿潤対流活動の共鳴時空間スケールの決定

末松 環

東京大学大気海洋研究所

1. はじめに

本研究は非静力学正 20 面体格子大気モデル (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model; NICAM) を用いた水惑星実験を行うことで、海面水温 (Sea Surface Temperature; SST) 変動と熱帯域の湿潤対流活動度の変動が共鳴する時定数と空間スケールを決定し、活発な湿潤対流を伴う熱帯大気の最も顕著な季節内振動であるマッデン・ジュリアン振動 (Madden-Julian Oscillation; MJO) の理解を深めることを目的とした。

2. 背景

MJOは主に北半球冬季にインド洋から西太平洋へ対流活動がゆっくりと東進する現象で、30日～90日おきに発生を繰り返す、熱帯大気循環の鼓動の様な現象として認識されている。しかし、先行研究から示唆されるように対流の通過経路、現象の継続期間の日数、開始位置、終息位置などが異なり、MJOイベントは多種多様である。そのためMJOの本質的特徴そのものについては論争が続いており、Madden and Julian (1971)の発見から50年近く経つ現在でも、MJOは定義する事すら難しいとされている。

先行研究によりMJOは北半球冬季、次いで北半球夏季に最も活発であることが知られている (Zhang and Dong 2004)。これらは赤道域から極域に向かう南北の大気大循環であるHadley循環が片半球で強化されている時期に当たる。また、対流活動のMJOへの発達については赤道域の東西の大気大循環として知られるWalker循環を強化するような東西経度のある海面水温 (Sea Surface Temperature; SST) の分布が重要であることが示唆されている (Suematsu and Miura 2018, Suematsu and Miura *in prep.*)。これらの結果を受けMJOの発生にはHadley循環、Walker循環の強化とそれらの変動が重要な役割を果たしていることが考えられる。本研究ではこれらの大循環に伴う対流活動がSSTの変動によってどのような影響を受けるかを調べることでMJOへの理解を深めることを目指した。

手法としてはMJOの再現に成功例 (Miura et al. 2007等)のある全球雲解像モデルNICAMを用いて、様々な周期でSST変動を与えた水惑星でどのような対流活動が励起されるかを調べる。特にSSTの南北傾度と東西傾度がMJOのような対流活動に寄与する海面水温の時空間パターンを調べる。また、時期的にはMJOが最も活発なのが北半球冬季、次いで北半球夏季となっていることを踏まえ、SSTの分布により熱的赤道を赤道からずらし、片半球の大気大循環が強化される実験も行い、大気大循環の南北非対称性が大規模な対流活動を維持することにどのような影響を与えるかについて調べた。

3. モデル設定

本研究では陸面の無い水惑星の設定で NICAM の実験を行なった。海面水温は図 1 のように三つの SST 分布の実験を行なった。一つ目は東西一様な南北傾度のある SST 分布で Hadley 循環を駆動するような SST 分布 (Hadley 循環駆動 SST; H-SST)、二つ目は暖水域のある Walker 循環を駆動するような SST 分布 (Walker 循環駆動 SST; W-SST) に SST で、三つ目は両者を足し合わせた SST 分布 (Hadley-Walker 循環駆動 SST; HW-SST) を与える実験を行なった。これらの実験は SST を時間変化させずに SST を固定して行なった。SST 分布の作成方法については、SST の南北傾度は SST の気候値の第一調和関数で与え、暖水域はガウス分布で与えた。また、SST 固定実験では SST の南北傾度と暖水域の SST 最大経度を赤道から緯度 7° ずらした赤道非対称にした SST 分布の場合についても実験を行い SST の赤道非対称性の影響についても調べた。SST 固定実験はそれぞれ 120 日の積分期間で行った。これらの実験は全て静止大気から計算を始め、スピナップ期間を 30 日として残り 90 日間を解析期間とした。

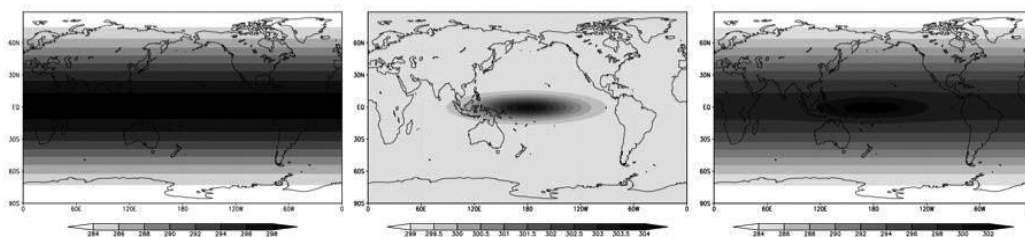


図 1 SST 固定実験の SST (K) 分布。H-SST (左)、W-SST (中)、HW-SST (右)。

次に HW-SST 分布を様々な周期で南北に移動させる実験を対流活動が海面水温変動と共鳴する時間スケールを調べることを目的として行なった (図 2)。南北の SST の移動範囲は地球の熱的赤道の季節変化と合わせて $7^{\circ} S-7^{\circ} N$ の範囲で移動させた。変動周期は 60 日、120 日、180 日、240 日、360 日の実験を行い、積分期間は周期 240 日実験までは 120 日間、周期 360 日実験については 180 日間積分を行なった。SST 変動実験は全て赤道対象な状態から始め、初期条件は HW-SST 固定実験の最終日から始めた。

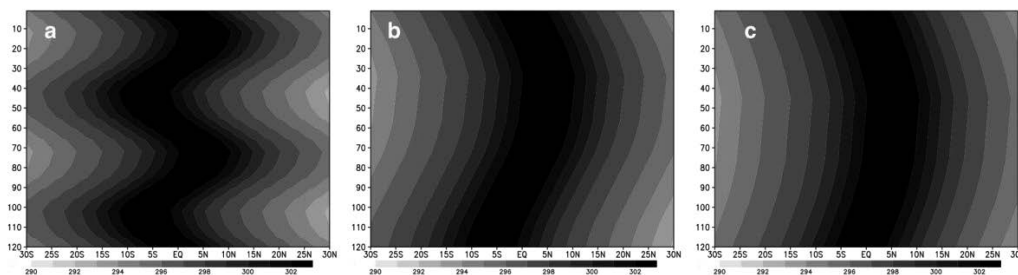


図 2 SST 変動実験の SST (K) の時間変化の例。図には経度 180° での SST の時間変化(日)時間-経度断面図に示す。図はそれぞれ 60 日周期 (a)、180 日周期 (b)、240 日周期 (c) の SST の時間変化を示す。

これらの実験解像度は全て水平約 250km で鉛直には最下層からモデルトップが約 38km になるように徐々に層厚が厚くなる鉛直層を 40 層とっている。海面水温の変動に対する対流活動の応答を見ることを目的としたため太陽放射は春分の値に固定した。各種物理過程については、雲微物理過程には NSW6 スキーム (NICAM Single Moment Water 6; Tomita 2008)、乱流スキームには MYNN (Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino) 乱流モデル (Mellor and Yamada 1982; Nakanishi and Niino 2009)、放射伝達モデルには MSTRN (Sekiguchi and Nakajima 2008) を用いた。またオゾン分布についてはオゾン分布の気候値の赤道対称な緯度の平均値を与える分布を用いた。

4. 結果

SST 固定実験の結果を海面気圧 (sea level pressure; SLP) の時間変化を経度-時間断面図に示す (図 3、図 4)。これらを見比べると、どの場合についてもゆっくりと東進する低気圧のシグナルが現れている。異なる SST 分布では H-SST 実験では東西一様に近い状態から東進システムが発達し連続的に全球を一周するように東進している。それに対し W-SST や HW-SST 実験では暖水域の中心付近 (180°) から東進システムが発達するが、暖水域で停滞する傾向にあった。また、W-SST、HW-SST 実験では H-SST 実験では見られなかった SLP の高い領域が現れ、大規模な下降流域が形成されるようになったと考えられる。W-SST と HW-SST を比べると HW-SST の方が低気圧のシグナルが強くなる傾向にあった。この結果を踏まえ、SST 変動実験では HW-SST の SST 分布を緯度方向に変化させる実験を行うこととした。赤道対称実験 (図 3) と赤道非対称実験 (図 4) では大きな差は見られなかったが、いずれの SST 分布の実験についても低気圧のシグナルが強くなっていることが確認できた。

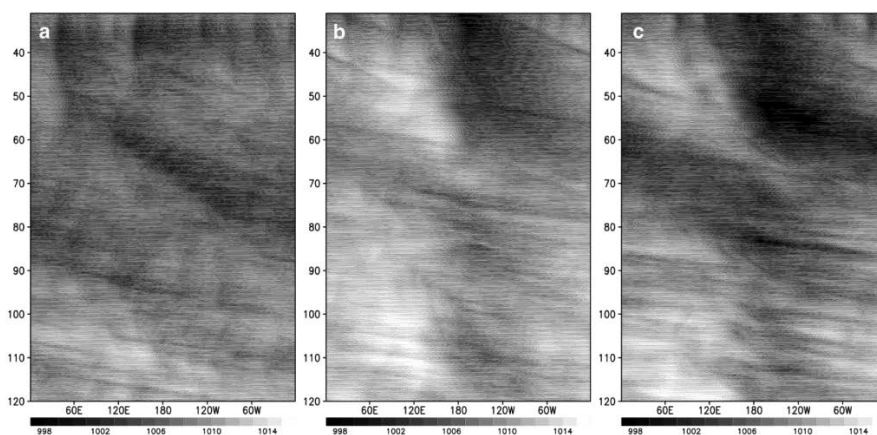


図 3 SST 固定実験の赤道域 (5° S-5° N) の海面気圧 (hPa) の時間変化 (日)。図はそれぞれ H-SST 実験 (a)、W-SST 実験 (b)、HW-SST 実験 (c) の結果を示す。

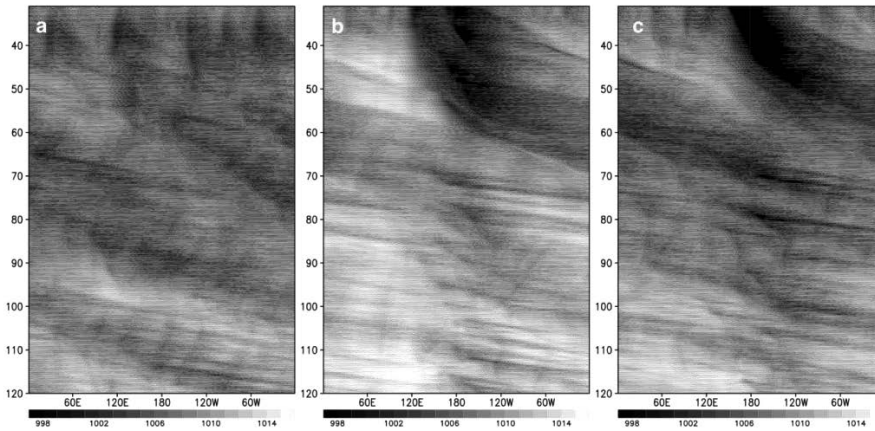


図 4 図 3 と同じ。但し SST 分布を赤道非対称にした場合について示す。

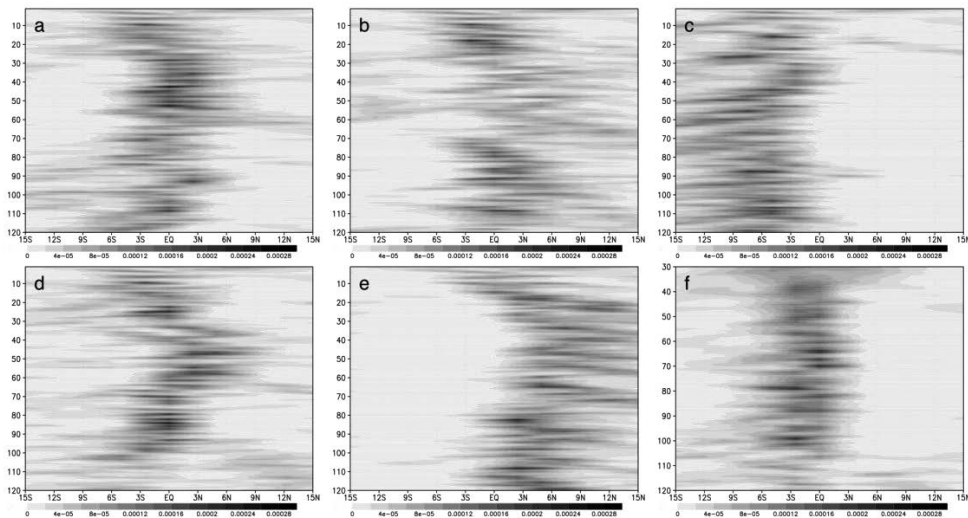


図 5 東西平均した赤道域(15° S-15° N)の降水量($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)の積分 1 日目から 1 2 0 日目までの時間変化。図はそれぞれ 60 日周期(a)、120 日周期(b)、180 日周期(c)、240 日周期(d)、360 日周期(e)と、南北対称 HW-SST 固定実験(f)の結果を示す。

次に SST 変動実験の結果を対流活動の指標となる東西平均した降水量の赤道域での時間変化から示す(図 5)。SST の変動周期が短い周期 60 日実験(図 5 a)及び 120 日実験(図 5 b)では降水域が赤道上に分布する傾向にあり、降水の南北非対称性の小さい分布をとるという結果になった。周期 180 日実験(図 5 c)では降水が積分期間の全期間に渡って南半球側に偏った分布を示したが、積分期間中に熱的赤道が南半球に位置していたのは最後の 30 日間のみである。よって周期 180 日実験では熱的赤道を対流活動が追ったとは考えにくい結果となった。SST 変動実験の初期条件を作った南北対称な HC-SST 固定実験(図 5 f)の結果を見ると降水域が赤道から 3° S の間に分布

しており南半球側に偏っていることが分かる。南北対称な実験設定のもとでこのような非対称な降水分布が現れる原因は特定できていないが、周期 180 日実験では対流域が南半球に偏った初期条件が影響していた可能性がある。それに対し、周期 240 日実験(図 5d)及び 360 日実験(図 5e)では SST の変動を応用な降水域の南北の移動が見られた。特に周期 360 日実験では降水域の北上幅が大きく他の実験では降水が殆ど見られていない緯度帯まで降水域が達していたことが見て取れる。これらの結果から対流活動が全球規模で SST の変動に同期できる時間スケールは 240 日以上のおよそとした変動周期となっていることが示唆された。

5. まとめと今後の課題

本研究の実験結果により対流活動の SST 変動への同期は 240 日以上のおよそとした周期に限られることが示され、SST の時間変化への対流活動が同期には SST の時間変化の周期に依存性があることが示唆された。この結果は大規模な循環が SST の変動に追従する時間スケールに対応していることが考えられる。このような大規模な循環とそれに伴う対流活動の SST への応答の時間スケールを特定することは、大規模な循環の変動に伴い発生する MJO などの諸現象を理解するためにも重要だと考えられる。

本研究では水平解像度 250km と粗い解像度で実験を行い対流活動に SST 変動の間時間スケールへの依存性があるかどうかを調べたが、雲解像モデルとして積雲パラメタリゼーションを用いずに NICAM を用いるには解像度の不足があった。今後は本研究で得られた結果と整合的な結果がより高い解像度で得られるかなどを検証していきたいと考えている。また、SST の他にも今回の実験では春分値に固定していた短波放射の変動の時間スケールへの対流活動の依存性なども今後調べていきたいと考えている。

6. 謝辞

本研究は平成 29 年度後期及び平成 30 年度前期の若手・女性利用推薦課題の採択課題として行われ、数値実験は東京大学情報基盤センターの Oakforest-PACS (OFP) を利用させて頂きました。NICAM の実験実行の仕方についての助言を 高須賀大輔氏、中江寛大氏、宮川智己准教授から助言を頂きました。また、OFP 上で NICAM を走らせる上での技術的な助言を八代尚氏から頂きました。実験設計や計算結果については三浦裕亮准教授と議論させて頂き貴重なご意見を賜りました。この場を借りて本研究を遂行するにあたりご支援くださった方々に熱く御礼を申し上げ、感謝の意を表します。

参 考 文 献

Madden, R.A. and P.R. Julian, 1971: Detection of a 40–50 Day Oscillation in the Zonal Wind in the Tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 28, 702–708

Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*, 20, 851–875.

Miura, H., et al., 2007: A Madden-Julian Oscillation Event Realistically Simulated by a Global Cloud-Resolving Model. *Science*, 318, 1763–1765

- Nakanishi, M., and H. Niino, 2009: Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer, *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 895-912.
- Sekiguchi, M., and T. Nakajima, 2008: A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 109, 2779-2793.
- Suematsu, T., and H. Miura, 2018: Zonal SST Difference as a Potential Environmental Factor Supporting the Longevity of the Madden–Julian Oscillation. *J. Climate*, 31, 7549–7564.
- Suematsu, T. and H. Miura: Modulation of MJO propagation speed by the fluctuation of zonal SST gradient driven large-scale zonal circulation. *J. Climate*, (in preparation)
- Tomita, H., and M. Satoh, 2004: A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn. Res.*, 34, 357-400.
- Tomita, H., 2008: New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86, 121-142.
- Zhang, C. and M. Dong, 2004: Seasonality in the Madden–Julian Oscillation. *J. Climate*, 17, 3169–3180