水惑星実験におけるマッデンジュリアン振動の発生・東進機構

高須賀 大輔 (東京大学大気海洋研究所 気候システム研究系 佐藤研究室)

1. はじめに

マッデンジュリアン振動 (Madden-Julian Oscillation; MJO) は、数千 km スケールで組織化した積雲群が 30-90 日周期でインド洋から西太平洋をゆっくりと 東進する現象として特徴付けられる。この固有の時空間スケールに起因して様々な気象・気候場に影響がもたらされるため、MJO の発生・東進過程に関する物理的理解は重要であり、その解明に向けて力学場・水蒸気場に着目した多くの説が提唱されてきた。

MJO の発生には、赤道域における circumnavigating Kelvin-wave (e.g., Knutson and Weickmann 1987) や、地表面からの熱フラックス・放射との相互作用下での気層の不安定化 (e.g., Benedict and Randall 2007)、温帯擾乱による力学強制 (e.g., Hsu et al. 1990) や中層湿潤化 (Nasuno et al. 2015) といったプロセスの関与が指摘されているが、季節性や海陸分布などの影響により個々の MJO は多様に振る舞うため、発生に本質的なメカニズムに関する議論は複雑化している。MJO の東進についても、境界層力学を考慮した赤道Kelvin 波と Rossby 波の相互作用 (e.g., Wang and Rui 1990) や、水蒸気変動に着目した moisture-mode (e.g., Sobel and Maloney 2013) など、いくつかの理論が与えられているが、統一的な理解には至っていない。

そこで本研究では、MJO の発生・東進過程におけるエッセンスを理解することを目的とし、季節固定かつ全球を海面とした理想化実験(水惑星実験)で自発的に生成されるMJO-likeな擾乱に伴う対流活動の発生と組織化過程で支配的に働くプロセス、および東進過程での水蒸気場と力学場の変動を中心に明らかにする(SST 分布に応じた MJO-like な擾乱の選択性の違いに関する議論も行ったが本稿では省略)。

2. モデル概要および実験設定

全球大気モデルNICAM (水平格子間隔は約56 km) による水惑星実験を行った。MJO-like な擾乱の自発的な生成は、1) 熱帯域での東西非一様な SST 分布と 2) 雲微物理スキーム (NSW6; Tomita 2008) の使用によって実現した。1) は Neale and Hoskins (2000) に準じ、南北対称かつ東西一様な分布 (赤道上で 300 K) に 30°N/S の範囲で最大振幅 2.0 K の cosine 型の

偏差場を付加したものとした。一方で、2)の妥当性は本研究の水平格子間隔では非自明だが、低解像度でもMJO-likeな擾乱の発生に対する雲過程の陽的な取り扱いの有効性が Takasuka et al. (2015)等で示唆されているため、本研究もそれに倣った。これをコントロール (CTL)実験とし、約220kmの水平格子間隔で等温静止大気から3年積分した結果を初期条件に用いて10年積分した。また、MJO-likeな擾乱の発生過程で働いていた一部のメカニズムを検証する感度実験も行った (KDAMP, LHFFIX実験;後述)。

3. CTL 実験の結果

15°N/S の OLR 偏差に対して Wheeler and Kiladis (1999) と同様のスペクトル解析を行った結果、赤道対称成分に周期 30-90 日、東西波数 1-6 で明瞭なシグナルが見られ、MJO-like な擾乱が卓越していることが確認された (図 1)。この擾乱を熱帯域の OLR 偏差のみを用いて対流活動の観点から抽出する方法を構築し、暖水域の西側領域で発生・東進する 34 事例の MJO-like な擾乱を抽出した。各々の発生日を基準(Day 0) としたラグコンポジット解析により、発生過程からその後の東進過程までを連続的に把握した。

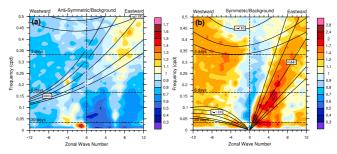


図 1 15°N/S の OLR の (a) 反対称成分 と (b) 対称成分 の波数-周波数領域でのスペクトル密度のバックグラウンドスペクトル密度に対する比

3.1 発牛過程

MJO-like な擾乱に伴う対流活動の顕在化前にあたる Day -9 から Day -5 にかけて、発生領域 (10°N/S, 110°E-140°E) の対流圏中層で水平移流による湿潤化傾向が明瞭に見られた。暖水域上の大規模な対流抑制域に対する Rossby 応答 (周期20-100 日成分) に伴う循環は 130°E-140°E の範囲でほぼ赤道対称に湿らせるとともに、混合 Rossby 重力波 (周期 5-15 日

成分) に伴う北よりの風は 110°E-125°E の範囲で赤 道の南側の湿潤化に寄与していた (図 2)。この結果 中層が広く湿潤化することで深い対流の発生に好都 合となった場に、低圧偏差を伴う circumnavigating Kelvin-wave が貫入し、大規模な境界層収束を通じて 対流活動がトリガーされた。なお、温帯擾乱の寄与 は本研究では小さかった。対流活動の組織化には、 前半は潜熱フラックス (LHF)、後半は雲-放射による フィードバックが重要であることも明らかとなった。

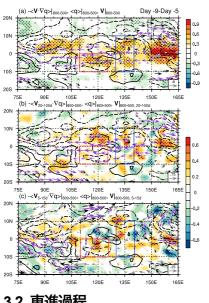


図 2 (a) 800-500 hPa で平均した 水平風と同範囲 で鉛直積分した 水蒸気量および 水蒸気水平移流 (b) 周期 20-100 日成分 (c) 周期 5-15 日成分 の 水平風とそれに 伴う水蒸気移流 (全て偏差量)

3.2 東進過程

3次元水蒸気場と下層渦度の関連性から、MJO-like な擾乱の東進を力学的に説明することを試みた。東 進開始段階 (Day 0-Day 6) と最盛期 (Day 7-Day 13) ではMJO-likeな擾乱に伴う対流活動に対する力学場 の応答が異なるため、両者を区別して解析した。

Matsuno-Gill 応答が明瞭でない東進開始段階では、 対流中心の前面で湿潤化傾向と低気圧性循環の生成 傾向の極大が見られ、湿潤領域と東西方向の収束に 伴う上昇流偏差に対応していた (図 3(a), (b))。鉛直移 流で中上層に効率的に水蒸気が蓄積し、維持・強化 される上昇流偏差によって下層渦度のストレッチ効 果が促進されていたと考えられ、発達と東進を説明 できる。最盛期には対流中心西側で Matsuno-Gill 応 答に伴う低気圧性循環が明瞭で、対流中心付近の湿 潤領域に対応した低気圧性循環の生成傾向 (主にス トレッチ効果)がその東進を説明していたが、水平 移流による湿潤化傾向が湿潤領域の前面かつ極側で 卓越するため、MJO-like な擾乱は準定常的に東進・ 極側へ拡大していた (図 3(c), (d))。

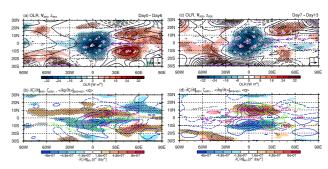


図3(a)(c) 対流中心に沿って平均した OLR, 850 hPa 水平 風, ジオポテンシャル高度偏差。(b)(d) 850 hPa 渦度傾向, 渦度 (ピンク), 800-400 hPa 水蒸気傾向 (黄緑), 水蒸気量 偏差 (青)。(a)(b)は東進開始段階、(c)(d)は最盛期に対応。

4. 発生機構を検証した感度実験の結果

20°N/S, 0°-60°E で水平風・比湿を CTL 実験の気候 値にナッジングして circumnavigating Kelvin-wave を 抑制した KDAMP 実験を行った。KDAMP 実験では CTL 実験よりも MJO-like な擾乱に対応したスペク トルピークでの周期が長く (図 4)、circumnavigating Kelvin-wave は MJO-like な擾乱の発生を強制し、周 期の効率的な決定に寄与していたことがわかった。

また、全球でLHFをCTL実験の気候値に固定し、 LHF のフィードバックを除去した LHFFIX 実験から、 LHF は MJO-like な擾乱に伴う対流活動の組織化の 素早い進行に寄与していたことが示唆された。

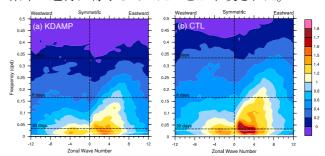


図415°N/SのOLRの対称成分の波数-周波数領域でのス ペクトル密度 (a) KDAMP 実験 (b) CTL 実験

5. まとめ

MJO-like な擾乱の発生過程では、1) Rossby 応答と 混合 Rossby 重力波に伴う循環による中層の湿潤化、 2) circumnavigating Kelvin-wave の貫入による対流活 動の効率的な励起、3) LHF と雲-放射フィードバッ クによる対流活動組織化のスムーズな進行が重要で あった。東進過程の解析からは、湿潤領域と対応し た上昇流偏差による下層渦度のストレッチ効果を考 えることで、水蒸気の効果を含めた力学的な観点で のMJO-likeな擾乱の東進の解釈可能性が示唆された。