

熱帯季節内振動に対する 冬季中高緯度大気の応答特性

Influence of the Tropical Intraseasonal Oscillation on the Extratropical Circulation in the Boreal Winter

山田賢⁽¹⁾・向川均

Ken YAMADA⁽¹⁾ and Hitoshi MUKOUGAWA

(1) 京都大学大学院理学研究科（現所属・気象庁）

(1) Graduate School of Science, Kyoto University, Japan
(Present Affiliation: Japan Meteorological Agency)

Synopsis

The influence of Madden-Julian Oscillation (MJO) on the extratropical circulation in the boreal winter (DJF) is statistically investigated using OLR data and JRA-55 reanalysis data during 35 years. We especially focus on response characteristics of atmospheric fields to the amplitude and polarity of MJO in each phase. It is found that the velocity potential field where its composited anomaly for the phase of MJO has statistical significance responds not only linearly to the amplitude but also symmetrically to the polarity. On the other hand, the stream function field has not such linear characteristics to the amplitude and polarity of MJO even though the composite anomaly has statistical significance. We also discuss relationship between the response characteristic of atmospheric anomaly fields to MJO and their formation mechanism based on the vorticity equation.

キーワード: 熱帯季節内振動, 中高緯度大気, テレコネクション

Keywords: tropical intraseasonal oscillation, extratropical circulation, teleconnection

1. はじめに

熱帯域の対流活動では、30-90日の周期で対流偏差が赤道上を東進する季節内振動（IntraSeasonal Oscillation: ISO）が卓越している。このISOは、熱帯季節内変動、あるいは、マッデン-ジュリアン振動（Madden-Julian Oscillation: MJO）とも呼ばれている（Madden and Julian, 1971; 1972）。

これまでの研究により、MJOは中高緯度大気にも影響を及ぼし、異常気象を引き起こす一つの要因であることが指摘されている。例えば、遠藤・原田（2008）は、MJOが冬季における日本の天候に及ぼす影響を吟味し、日本付近の地上気温がMJOの位相と対応して有意に変動することを指摘した。また、Mori and Watanabe（2008）は、MJOがPNAパターンの形成に重要な役割を果たしていることを示した。

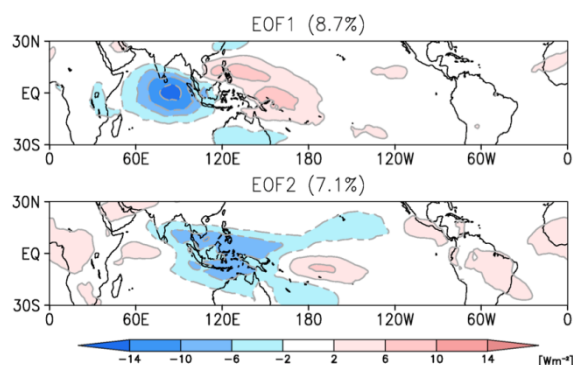


Fig. 1 Horizontal structure of EOF1 and EOF2 for 30-90 day bandpass filtered OLR in the tropical region (30°S-30°N). The contour interval is 4 Wm^{-2} from $\pm 2 \text{ Wm}^{-2}$. The contribution of each mode for the total variance is 8.7 % and 7.1 %, respectively.

しかしながら、MJOが中高緯度大気に及ぼす影響に関する従来の研究では、合成図解析や線形回帰分析に基づくものがほとんどであり、中高緯度大気偏差場と、MJOの振幅や位相極性との関係は明らかではない。例えば、Knutson and Weickmann (1987) などは、MJOの時間発展をいくつかの位相に分割し、それぞれの位相について中高緯度大気偏差場の合成図解析を行っているが、MJOの振幅と中高緯度大気偏差との関係については言及していない。一方、Matthews et al. (2000, 2004) などは、線形回帰により、MJOに伴うOLR偏差などと中高緯度大気偏差場との関係を調べているが、仮定した中高緯度大気応答の線形性の妥当性は明らかでない。さらに、MJOが中高緯度大気に与える影響は、必ずしもその位相極性に対して対称的ではない。例えば、遠藤・原田 (2008) の結果は、MJOのある位相とその逆位相とで個別に合成図を作成すると、大気下層気温の合成偏差の符号が両者で反対とはならない領域が中高緯度域に存在することを示している。

そこで本研究では、再解析データを用い、MJOの振幅と位相極性に対する中高緯度大気の詳細な応答特性について解析を行う。そのため、MJOの振幅に対して中高緯度大気が線形的に応答しているのか否か、あるいはその極性に対して対称的な応答をしているのか否かに着目して、統計的手法を用いた解析を実施した。なお解析は、特に北半球中高緯度への影響が顕著となる、北半球冬季を対象とした。

2. 使用データと解析手法

2.1 使用データ

本研究では、熱帯対流活動の指標としてNOAAの

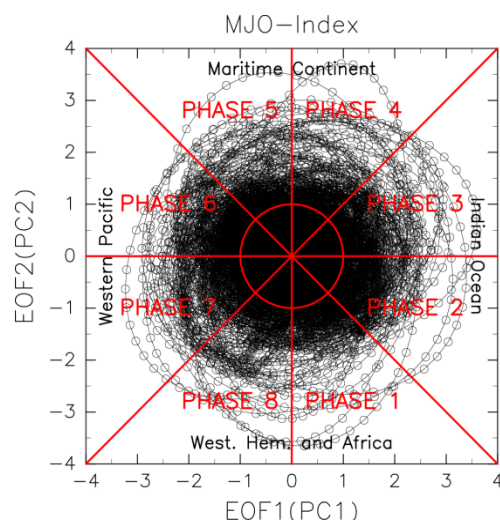


Fig. 2 Trajectory of MJO-index in phase space spanned by $(PC1^*, PC2^*)$ during a period from 1979 to 2013. The locations of 8 MJO phases (PHASE1-PHASE8), and the geographical locations of the associated enhanced convective activity are also designated.

外向き長波放射量 (OLR) データの日平均値、大気循環場の解析には気象庁のJRA-55再解析データの日平均値を用いた。解析期間は1979年から2013年の35年間で、大気循環場の解析には12-2月のデータを使用した。また、気候値からの偏差場については、予め30-90日 band-pass filter (Duchon, 1979) を施した。

2.2 MJOの位相・振幅の決定

MJOの位相と振幅を決定するために、通年のOLR偏差を用いて30°S-30°Nの領域で、主成分分析 (EOF解析) を実施した。なお、OLR偏差を用いたのは、OLR偏差が対流強制のよい指標となるためである。その結果得られた、第一主成分 (EOF1) と第二主成分 (EOF2) は、それぞれインド洋域と海洋大陸域に対流活発域が存在するパターンを示す (Fig. 1)。なお、寄与率はそれぞれ8.7%と7.1%である。両者の偏差パターンは、東西方向にその位相がほぼ90°ずれており、MJOに伴う対流活動のゆっくりとした東進を表現している。次に、EOF1, EOF2に対するスコア $PC1, PC2$ を用いて、MJO-indexを次のように定める。

$$(PC1^*, PC2^*) = (PC1, \sqrt{\lambda_2/\lambda_1} PC2) \quad (1)$$

ここで、 λ_1, λ_2 は $PC1, PC2$ の分散の大きさを示す。また、 $PC1$ と $PC2$ の分散の違いを考慮して、 $PC2$ に $\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$ を掛けた $PC2^*$ を用いて MJO-index を定義した。なお MJO-index の振幅 A は、

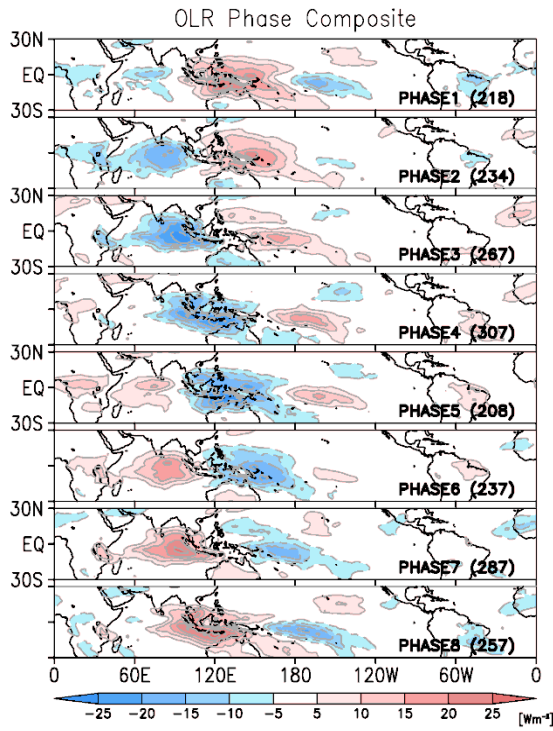


Fig. 3 Horizontal distribution of the composited OLR anomaly (DJF) for each PHASE in the tropical region (30°S-30°N). The contour interval is 5 Wm⁻². The number of days falling within each phase category is also given in the bottom right corner of each panel.

$$A = (PC1^*)^2 + (PC2^*)^2 \quad (2)$$

で定義する。Fig. 2は $PC1^*$ と $PC2^*$ で張られる位相空間でのMJO-indexの時間発展を示す。この位相空間において、振幅Aが1以上の領域を図のように8つに分割する (PHASE1-PHASE8)。

Fig. 3は、北半球冬季のデータを用いて作成した各位相領域でのOLR偏差の合成図を示す。各図右下の数字は、各位相での合成図解析で用いたデータ数であり、この値は各位相領域に軌跡が存在していた日数に等しい。この図から、PHASE1において西アフリカ-インド洋西部で発生した対流活発域が、PHASE3においてインド洋東部で極大となり、その後、海洋大陸域を経て太平洋西部へ東進していく様子が確認できる。また、ある位相とその逆位相 (例えばPHASE1とPHASE5) において、OLR偏差場は、極性が逆でほぼ同じ空間パターンを示すことがわかる。

2.3 応答特性の分類

MJOに対する大気循環場の応答特性を明らかにするために、全球の緯度-経度格子点において、MJO-indexの振幅に対して線形的か否か、および極性 (逆位相) に対して対称的か否かの判定を実施した。判

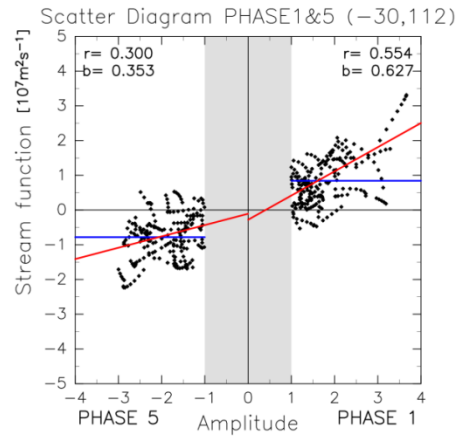


Fig. 4 Scatter diagram of streamfunction anomaly ($\times 10^7 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$) at 30°S, 122.5°E against the amplitude of MJO-index. The positive direction of the horizontal axis shows the amplitude in PHASE1 while the negative one shows the amplitude in PHASE5 with the opposite sign. Regression lines (red) and averages (blue horizontal lines) are obtained for each phase. Numbers at the top of this panel show the correlation (the first line) and the regression (the second line), respectively.

定に際して、Fig. 4のような、互いに逆位相の関係にある位相領域 (例えばPHASE1とPHASE5; 以下対応する二つの位相領域と記す) を組み合わせた散布図を用いた。なおFig. 4での赤線は、二つの位相領域 (PHASE1とPHASE5) のそれぞれのデータについて求めた回帰直線を示す。

MJO-indexの振幅に対する応答が線形的か否かは、各位相領域における気象要素とMJO-indexの振幅との回帰係数の統計的有意性から判断した。具体的には、回帰係数の統計的有意性が90%以上の場合、その格子点における応答は、MJO-indexの振幅に対して線形的であると判定する。

MJOの極性に対する応答が対称的か否かは、対応する二つの位相領域での回帰係数の差の統計的有意性から判断した。すなわち、回帰係数の差の統計的有意性が90%以上の場合、その格子点における応答は、MJOの極性に対して非対称的であると判定する。

以上の解析から、各緯度-経度格子点における応答特性を次の4つに分類した (Fig. 5)。

片線形応答 (応答特性A)

対応する二つの位相領域のうち、一方の位相領域では線形的に応答するが、その逆位相領域では線形的に応答しない場合。

両線形・対称応答 (応答特性B)

対応する二つの位相領域で線形的に応答し、かつ回帰係数の差が統計的に有意でない場合。

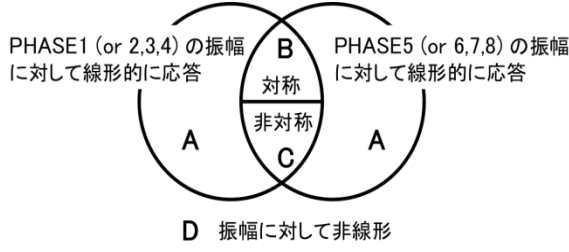


Fig. 5 Classification of the response of anomalies to the amplitude and polarity of MJO-index. Region A exhibits a linear response for only one phase; region B exhibits a linear response for both phases, and the difference between regressions for both phases has not statistical significance; region C exhibits a linear response for both phases, but the difference between regressions has statistical significance; region D exhibits a non-linear response.

両線形・非対称応答（応答特性C）

対応する二つの位相領域で線形的に回答し、かつ
回帰係数の差が統計的に有意な場合。

非線形応答（応答特性D）

対応する二つの位相領域の両方で線形的に回答し
ない場合。

なお、ある位相において、ある格子点での回答が、
応答特性A（ただし、その位相において線形回答を示
す場合）、応答特性B、あるいは応答特性Cに分類さ
れるとき、その回答はMJO-indexの振幅に対して線形
的である。

2.4 渦度収支解析

前節で分類した偏差場の応答特性と、その形成過
程との関係性を検討するため、渦度収支解析 (Cai and
Van Den Dool, 1994; Feldstein 2002; Mori and
Watanabe 2008) を実施した。この解析では、流線関
数偏差の季節内変動成分 ψ'_{iso} の時間変化を示す次式
の右辺各項を評価する。

$$\frac{\partial \psi'_{iso}}{\partial t} = \sum_{i=1}^6 \xi_i + R^* \quad (3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \nabla^{-2} \{ -\beta \mathbf{v}'_{iso} \} \\ \xi_2 &= \nabla^{-2} \{ -\mathbf{v}'_{iso} \cdot \nabla \zeta - \bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla \zeta'_{iso} \} \\ \xi_3 &= \nabla^{-2} \{ -(\zeta + f) \nabla \cdot \mathbf{v}'_{iso} - \zeta'_{iso} \nabla \cdot \bar{\mathbf{v}} \} \\ \xi_4 &= \nabla^{-2} \{ -\nabla \cdot (\mathbf{v}'_{iso} \zeta'_{iso}) \}_{iso} \\ \xi_5 &= \nabla^{-2} \{ -\nabla \cdot (\mathbf{v}'_{LH} \zeta'_{LH}) \}_{iso} \\ \xi_6 &= \nabla^{-2} \{ -\nabla \cdot (\mathbf{v}'_{iso} \zeta'_{LH}) - \nabla \cdot (\mathbf{v}'_{LH} \zeta'_{iso}) \}_{iso} \end{aligned} \quad (4)$$

であり、添字 *ISO* は季節内変動成分、添字 *LH* は
それ以外の変動成分（短周期および長周期の変動成
分）を示す。式(3)における R^* は、摩擦消散などの非
保存項に伴う残差である。また、 $\mathbf{v}$ は水平風ベクト
ル、 f はコリオリパラメータ、 β は $\partial f / \partial y$ 、 ζ は相対
渦度の鉛直成分を示す。一方、 $\bar{X}$ と X' は、物理量 X
の基本場（気候値）と偏差場を意味する。

なお、式(4)の各項の物理的意味は次の通りである。
 ξ_1 は季節内変動成分の南北風成分偏差による惑星渦
度の移流による渦度生成、 ξ_2 は気候場と季節内変動
成分との相互作用による渦度生成、 ξ_3 は発散による
渦度生成、 ξ_4 は季節内変動成分による渦度フラク
スの収束発散による渦度生成、 ξ_5 は季節内変動以外
の変動成分に伴う渦度フラクスの収束発散による
渦度生成、 ξ_6 は季節内変動成分とそれ以外の変動成
分との相互作用による渦度生成を表す。

本研究では、これらの項を、季節内変動成分に伴
う線形項 ($\xi_L = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3$)、季節内変動成分に伴う
非線形項 ($\xi_N = \xi_4$)、季節内変動以外の変動成分を含
むすべての項と摩擦消散などの非保存項との合計で
表現される残差項 ($R = \xi_5 + \xi_6 + R^*$) の3つに大別し
た。つまり、式(4)の右辺を、次の式(5)

$$\frac{\partial \psi'_{iso}}{\partial t} = \xi_L + \xi_N + R \quad (5)$$

のように表現した。なお、流線関数偏差の時間変化
項 $\partial \psi'_{iso} / \partial t$ は中央差分を用いて計算し、それより ξ_L
と ξ_N を差し引くことで残差項 R を求めた。さらに、
MJOのそれぞれの位相毎に、各項を合成して解析を
行った。

3. 中高緯度大気の応答特性

本章では、MJOに対する速度ポテンシャル偏差場
と流線関数偏差場の応答特性を記述する。なお、以
下では中高緯度への応答が顕著であったPHASE3と、
その逆位相のPHASE7の結果について示す。それぞ
れの位相において、対流発域はインド洋東部、太平
洋西部に存在し、対象となるデータ数（日数）は267
と287である（Fig. 3参照）。

3.1 速度ポテンシャル偏差場

対流圏上層（200hPa）の速度ポテンシャル (χ_{200})
偏差場の応答特性の結果をFig. 6 に示す。Fig. 6a と
Fig. 6b は、それぞれPHASE3とPHASE7での χ_{200} 偏
差の合成図（等値線および陰影）を示し、合成偏差
の大きさの統計的有意性が90%以上の領域に色を付
けた。また、各位相において、MJO-indexの振幅対
して χ_{200} 偏差が線形応答する領域を斜線で示した。

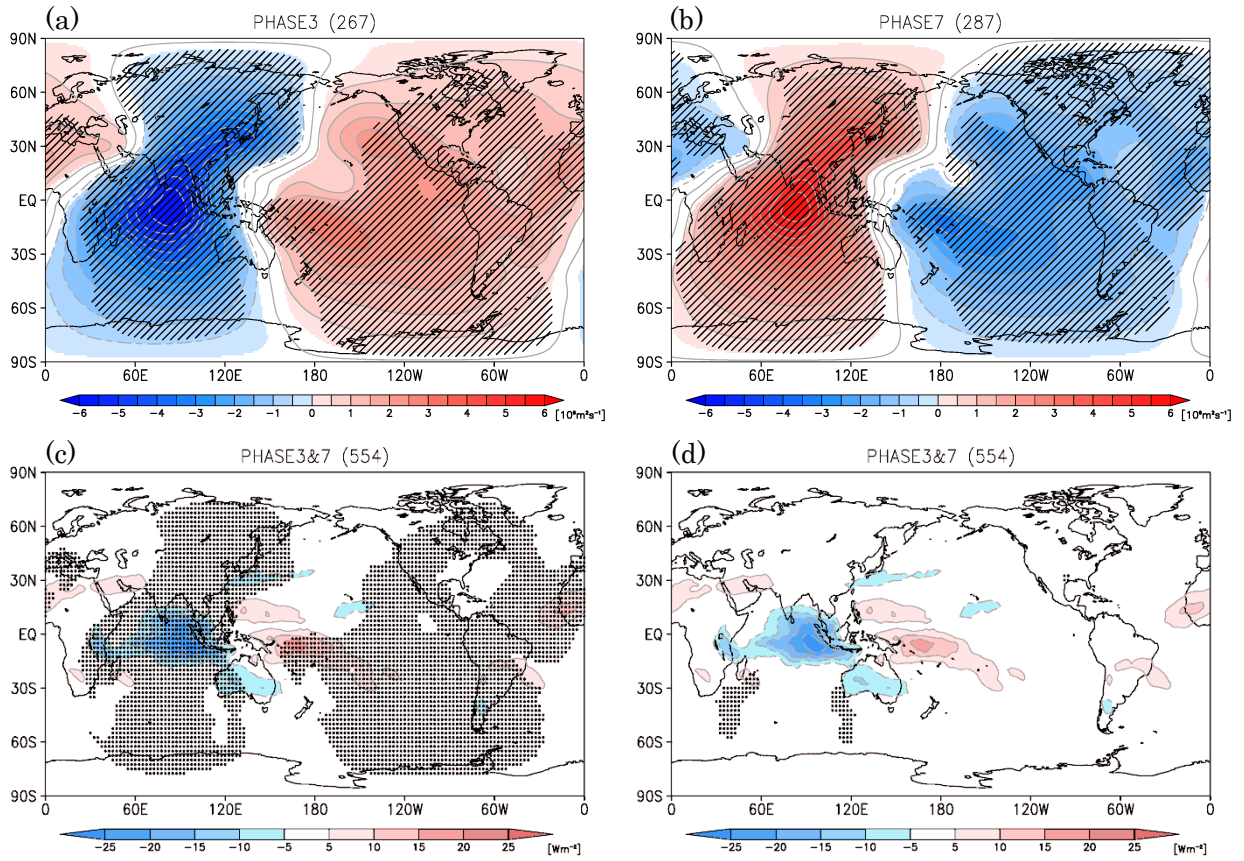


Fig. 6 (a) Composited velocity potential anomaly at 200 hPa for PHASE3. The contour interval is $0.5 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Significant anomalies at 90% confidence level are colored. Shaded regions show the linear response to the amplitude of MJO-index. The number at the top of the panel indicates is the number of days to construct the composite. (b) as in (a), except for PHASE7. (c) Regions are dotted when the response of the velocity potential anomaly to the MJO-index is linear and symmetric (B in Fig. 5) for PHASE3 and 7. Composited OLR anomalies in PHASE3 are colored with contours (the contour interval is 5 W m^{-2}). The number in top of figure is number of case that use for analysis in PHASE3 and PHASE7. (d) as in (c), except for both-side linear and asymmetric response (region C in Fig.5).

この図より、PHASE3とPHASE7の合成図は、ほぼ同じ空間パターンを示し、極性が逆であることがわかる。また、両位相とも対流活発域（不活発域）に対応する発散場（収束場）が中高緯度域にまで広がっている。この東西波数1の特徴は、Madden and Julian (1972) で示されたMJOの特徴と一致する。

一方、MJO-indexの振幅に対して線形的に応答する領域（斜線部領域）に着目すると、両位相とも、合成偏差の大きさが統計的に有意な領域（色の付いた領域）のほぼ全てで、 χ_{200} は線形的に応答していることがわかる。

さらにFig. 6c で、PHASE3とPHASE7の両位相で線形的かつ対称的に応答する領域（両線形・対称応答：応答特性B）にドットを施した。また、両位相で線形的ではあるが、非対称的に応答する領域（両線形・非対称応答：応答特性C）をFig. 6dに示した（ドット領域）。なお、これらの図には、対流強制との

対応関係を吟味するため、PHASE3におけるOLR偏差の合成図を合わせて図示する（PHASE7は、ほぼ逆パターンを示す）。

これらの図から、 χ_{200} 偏差場のほとんどは両線形・対称応答を示すことがわかる。実際、両線形・対称応答領域が、インド洋東部に存在する対流偏差域の南北方向や、太平洋西部の対流偏差域の西側の南北方向に広がっている（Fig. 6c）。なお、両線形・非対称応答領域は、インド洋の一部の領域を除いてほとんど存在しない（Fig. 6d）。

3.2 流線関数偏差場

対流圏上層（200hPa）の流線関数（ ψ_{200} ）偏差場の応答特性をFig. 7に示す。Fig. 7aとFig. 7bは、それぞれPHASE3とPHASE7での ψ_{200} 偏差の合成図（等値線および陰影）を示し、合成偏差の大きさの統計的有意性が90%以上の領域に色を付けた。また、各

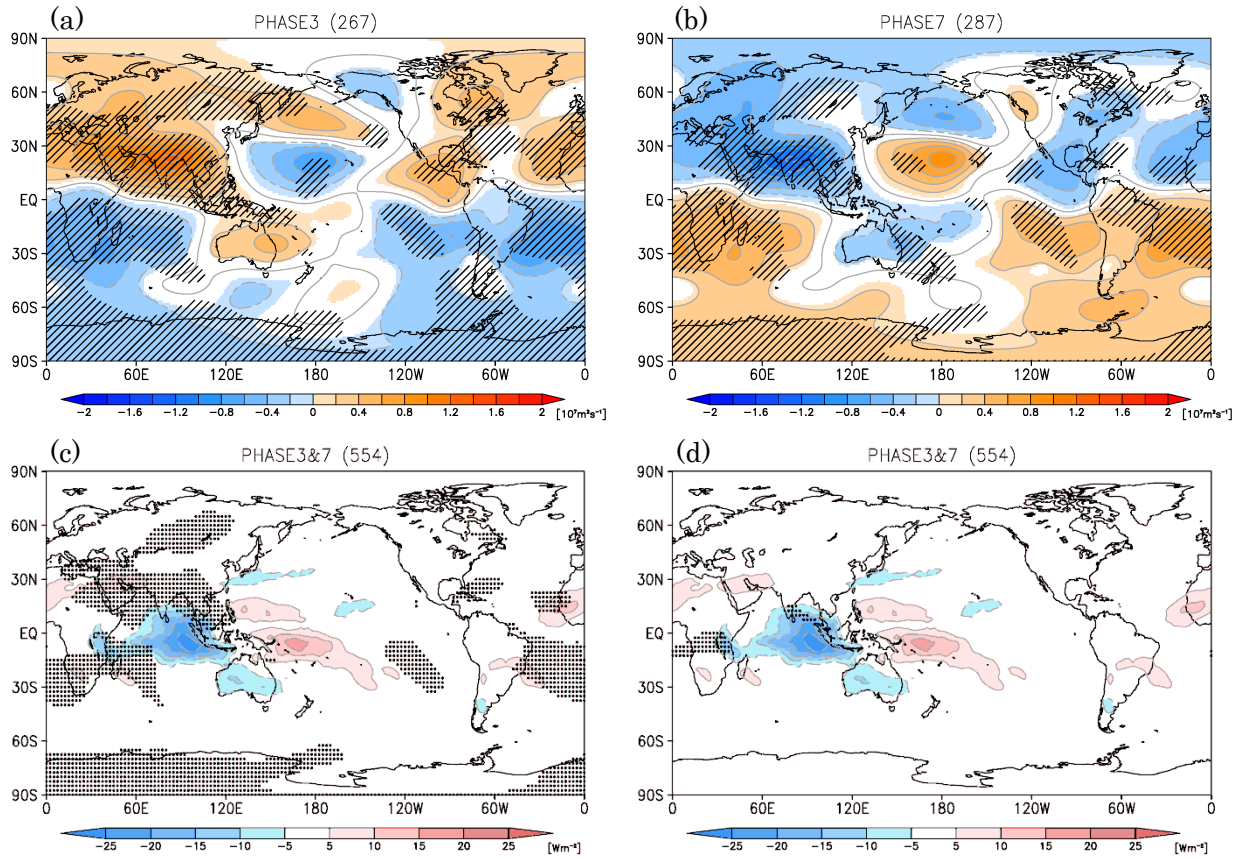


Fig. 7 as in Fig. 6, except for the streamfunction anomaly at 200 hPa. The contour interval in panel (a) and (b) is $0.2 \times 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

位相において、MJO-indexの振幅に対して ψ_{200} 偏差が線形応答する領域に斜線を施した。

これらの図より、PHASE3とPHASE7の合成図は、極性が逆ではほぼ同じ空間パターンを示すことがわかる。また、低緯度域に着目すると、PHASE3 (PHASE7) では、インド洋東部の対流活発域（不活発域）に対応するように、南北両半球のインド洋亜熱帯域に高（低）気圧性偏差の対が存在する。一方、太平洋西部の対流不活発域（活発域）と対応する低（高）気圧性偏差の対も、太平洋亜熱帯域に確認できる。これらの偏差は、対流強制に対する大気の典型的な応答パターンである、Matsuno-Gillパターン (Matsuno, 1966; Gill, 1980) として理解できる。

一方、北半球中高緯度域では、PHASE3 (PHASE7) において、太平洋北部に高（低）気圧性偏差、アラスカに低（高）気圧性偏差、北米大陸東部に高（低）気圧性偏差と、波列状の偏差パターンの存在が確認できる。なお、この波列パターンはMatthews et al. (2004) やMori and Watanabe (2008) が指摘した、MJOと関連するPNAパターンに対応すると考えられる。

次に、MJO-indexの振幅に対して線形的に応答する

領域（斜線部領域）に着目すると、合成偏差の大きさが統計的に有意な領域（色の付いた領域）において ψ_{200} は必ずしも線形的に応答していないことがわかる。例えば、PHASE3の北半球側に着目すると、インド洋亜熱帯域の高気圧性循環偏差と太平洋亜熱帯域の低気圧性循環偏差の中心部分は線形的に応答しているのに対し、中高緯度の波列パターンを示す循環偏差の中心部分は、そのほとんどで線形応答していないことがわかる。PHASE7においてもその傾向はほぼ同様であるが、太平洋亜熱帯域に存在する循環偏差の対の中心部分など、PHASE3と比べて線形応答を示す領域が一部異なっている。

Fig. 7c で、PHASE3とPHASE7の両位相で線形的かつ対称的に応答する領域（両線形・対称応答：応答特性B）にドットを施した。一方、両位相で線形的ではあるが、非対称的に応答する領域（両線形・非対称応答：応答特性C）をFig. 7dのドットで示す。なお、これらの図にPHASE3でのOLR偏差場の合成図も示す。

これらの図から、 ψ_{200} 偏差場の応答特性は地域に依存することがわかる。実際、両線形・対称応答領域はインド洋亜熱帯域などのごく一部の領域に限定

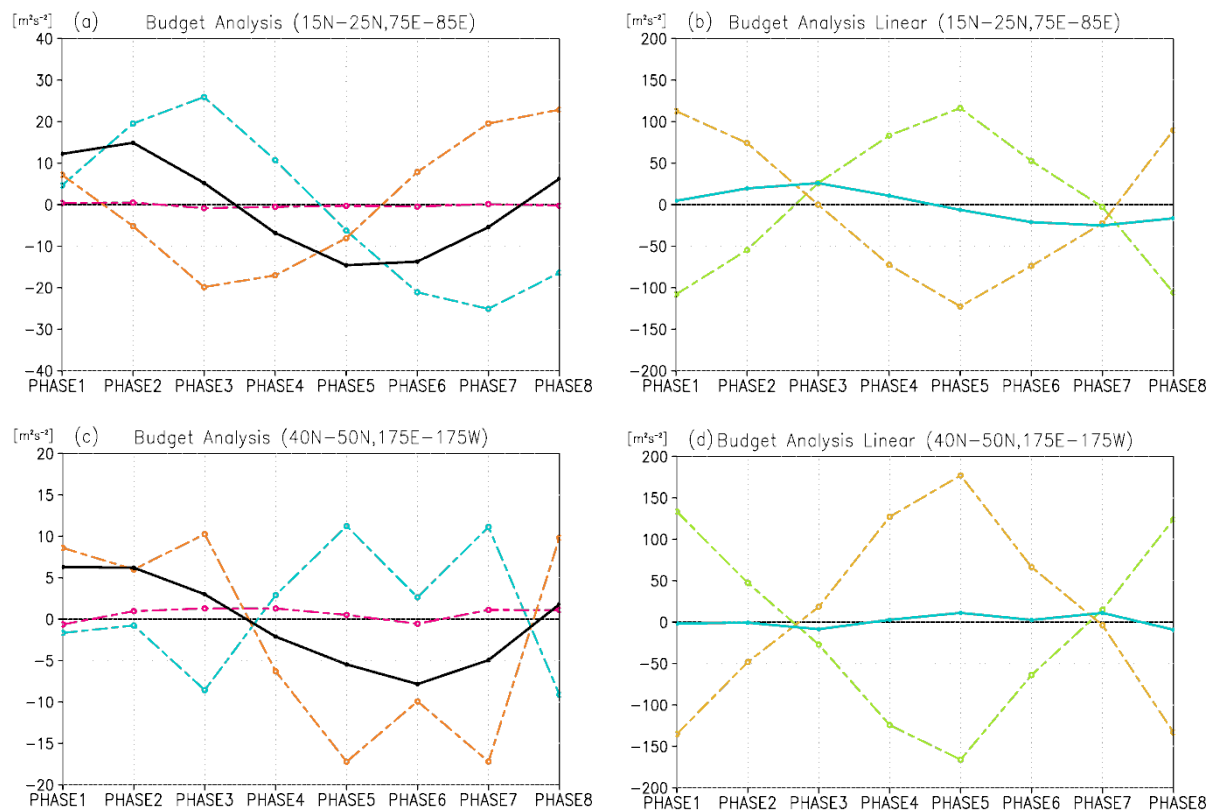


Fig. 8 Vorticity budget composited for each MJO PHASE and averaged over the Northern Indian Ocean (15°N-25°N, 75°E-85°E; panel (a) and (b)), and the North Pacific (40°N-50°N, 175°E-175°W; panel (c) and (d)). (a) and (c) The black solid line is time tendency of the streamfunction, the blue dotted line is term ξ_L in Eq. (5), the red dotted line term ξ_N in Eq. (5), and the orange dotted line term R in Eq. (5). (b) and (d) The blue solid line is term ξ_L in Eq. (5) (the same as to the blue dotted line in panel (a) and (c)), the green dotted line term $\sum_{i=1}^2 \xi_i$ in Eq. (4), and the yellow dotted line is term ξ_3 in Eq. (4).

されている (Fig. 7c) . ただし, アフリカ大陸の一部の領域を除いて, 両線形・非対称応答する領域はほとんど存在しない (Fig. 7d) . また, これら以外の領域で, PHASE3もしくはPHASE7で線形応答していた領域の応答特性は片線形応答 (応答特性A) で特徴付けられる. 例えば, 北半球側の太平洋亜熱帯域の循環偏差や, 太平洋北部の循環偏差の東側の一部がそれに対応する (Fig. 7a, b) . 一方, 北半球中高緯度における波列パターンを中心部分のほとんどは, 両位相ともに線形応答しておらず, 非線形応答 (応答特性D) に分類できる (Fig. 7a, b) .

4. 渦度収支解析

本章では, MJOに対する対流圏上層の流線関数偏差場の応答特性と, その形成過程との関連性を検討するために実施した渦度収支解析の結果を示す. なお, 特にPHASE3とPHASE7の応答特性について議論するが, 偏差場の形成過程を吟味するため, それぞれの直前の位相に相当するPHASE2とPHASE6につ

いて, 式(4)と式(5)に基づき200hPa等圧面で渦度収支解析を行った. ここでは北インド洋亜熱帯域 (15°N-25°N, 75°E-85°E) , および太平洋北部 (40°N-50°N, 175°E-175°W) の各領域で平均した値を示す.

まず, 式(5)に基づき, 北インド洋亜熱帯域における循環偏差 (両線形・対称応答) の各位相での合成場について解析を行った結果をFig. 8a, b に示す. Fig. 8a は黒実線で ψ_{200} の時間変化項($\partial\psi'_{iso}/\partial t$), 青破線で季節内変動成分に伴う線形項 (ξ_L), 赤破線で季節内変動成分に伴う非線形項 (ξ_N), 橙破線で残差項 (R) を示す. PHASE2とPHASE6の位相では, 非線形項と残差項は線形項に比べて小さく, 線形項が流線関数偏差の時間変化の主要因であることがわかる. また, 両位相での線形項の大きさは $20\text{m}^2\text{s}^{-2}$ 程度と等しく, 対称的である. これらのことは, この領域における循環偏差場がPHASE3とPHASE7の両位相において, 線形的, かつ対称的に応答していた事実と整合している.

一方, Fig. 8b は, Fig. 8aの青実線で示された線形

項 (ξ_L) を式(4)に基づき, 移流項 ($\sum_{i=1}^2 \xi_i$; 緑破線) と発散項 (ξ_3 ; 黄破線) に分けて解析した結果を示す. PHASE2とPHASE6の位相では, 発散項と線形項は同符号であることがわかる. これより, PHASE3, およびPHASE7での循環偏差場の主要な形成要因は, 発散項であることがわかる.

次に, 太平洋北部の循環偏差 (非線形応答) に関する解析結果をFig. 8c, d に示す. まず, Fig. 8cより, PHASE2とPHASE6の両位相で残差項が卓越していることがわかる. 残差項は, 季節内変動以外の変動成分に伴う非線形力学過程を含んでいる. 従って, 非線形力学過程が卓越するために, 応答は非線形的となったと考えられる. 実際, この循環偏差はストームトラック領域に存在し, 中高緯度域の総観規模擾乱に伴う非線形力学過程が, その形成プロセスに大きく関与していると推測できる. なお, Fig. 8dより, この領域では, 移流項と発散項とがほぼバランスしていたため, 線形項は残差項に比べて小さな値となっていたことがわかる.

次に, 第3章で示された, 速度ポテンシャル偏差場と流線関数偏差場の応答特性の違いについて考察する. ここでは, 前者は南北両半球の広い範囲でMJOの振幅に対して線形的に応答していたのに対し, 後者で線形応答していたのは, 北インド洋亜熱帯域などの対流偏差のごく近傍に限られていたことを比較検討する. まず, MJOに伴う対流偏差場は鉛直流偏差を通じて速度ポテンシャル場を直接的に強制することを考慮すると, 速度ポテンシャル場が線形的に応答することは比較的理解しやすい. 一方, 速度ポテンシャル場は, それに伴う発散風による渦管生成によって流線関数偏差場を間接的に強制する. 従って, 発散風に伴う渦度生成, すなわち発散項が, 流線関数偏差の形成で主要な役割を果たす領域では, 流線関数偏差場も線形的に応答すると期待できる. 実際, 発散項が卓越する北インド洋亜熱帯域での流線関数偏差場は線形応答していた. 一方, 発散項の役割が二次的な, 太平洋北部での流線関数偏差場は線形応答しない.

5. 結論

本研究では, MJOの振幅と位相極性に対する, 北半球冬季の中高緯度大気循環場の詳細な応答特性を明らかにするために, OLRデータ, およびJRA-55再解析データを用いて解析を行った.

まず, 季節内変動成分を取り出すため, 30-90日 band-pass filter を施した熱帯域のOLR偏差について主成分分析を行い, その結果得られる第一主成分と第二主成分からMJOを定義した. このように定義し

たMJOは, 赤道域をゆっくりと東進する対流活発域として特徴付けられる. また, それぞれの主成分に対応するスコアからMJOの振幅と位相を決定した. そして, MJOの位相毎に, 速度ポテンシャル偏差と流線関数偏差の季節内変動成分が, MJOの振幅に対し線形的に応答しているか否か, あるいはMJOの位相極性に対し対称的に応答しているか否かについて統計的に判定した. また, その結果に基づき, 応答特性を4つに分類した.

その結果, 速度ポテンシャル偏差場は, 高緯度域にまで広がる合成偏差の大きさが統計的に有意な領域のほぼ全てにおいて, 振幅に対し線形的に応答していることが示された. しかも, MJOの位相が反転しても, 偏差場の空間構造はほぼ不変で, その極性のみが反転していた.

一方, 流線関数偏差場は, 合成偏差の大きさが統計的に有意な領域でも, MJOの振幅に対して必ずしも線形的に応答しないことが明らかになった. 偏差が線形的に応答し, かつ位相の反転に対しても対称的な応答を示す領域は, インド洋亜熱帯域や海洋大陸付近など, ごく一部の低緯度域に限られる. 一方, 北太平洋域から北米領域にかけて連なる波列状の偏差パターンが存在する中高緯度域では, 各位相で線形的に応答する領域は限定的であり, しかも, 位相反転に対し対称応答を示す領域はほとんど存在しない.

次に, 流線関数偏差場の応答特性と, その形成過程との関連性を検討するため, 渦度収支解析を実施した. その結果, 偏差が両線形・対称応答を示したインド洋亜熱帯域では, 偏差場の形成に季節内変動成分に伴う線形力学過程が主要な役割を果たしていることが明らかになった. 一方, 線形応答を示さない太平洋北部の偏差場の形成には, 総観規模擾乱などの季節内変動以外の変動成分に伴う非線形力学過程の寄与が支配的であった. このように, 偏差場の応答特性は, その形成過程を通じて理解可能であることが示唆された.

最近, 熱帯域における対流活動に伴う非断熱加熱が中高緯度大気に及ぼす影響を, 線形傾圧モデル (LBM) を用いて評価する (例えば Mori and Watanabe 2008) ことがしばしば行われるようになってきた. 本研究で得られた詳細な偏差場の応答特性は, このような評価方法の妥当性を考慮する際の重要な情報を与えている.

参考文献

遠藤洋和・原田やよい (2008): マッデン・ジュリアン振動と冬期の日本の天候および循環場との関係.

- 天気, 第55巻, pp. 159-171.
- Cai, M. and Van Den Dool, H.M. (1994): Dynamical decomposition of low-frequency tendencies, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 51, pp. 2086-2100.
- Duchon, C.E. (1979): Lanczos filtering in one and two dimensions, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 18, pp. 1016-1022.
- Feldstein, S.B. (2002): Fundamental mechanisms of the growth and decay of the PNA teleconnection pattern, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 128, pp. 775-796.
- Gill, A. (1980): Some simple solutions for heat-induced tropical circulation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 106, pp. 447-462.
- Knutson, T.R. and Weickmann, K.M. (1987): 30-60day atmospheric oscillations: Composite life cycles of convection and circulation anomalies, *Monthly Weather Review*, Vol. 115, pp. 1407-1436.
- Madden, R.A. and Julian, P.R. (1971): Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 28, pp. 702-708.
- Madden, R.A. and Julian, P.R. (1972): Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 29, pp. 1109-1123.
- Matsuno, T. (1966): Quasi-geostrophic motions in the equatorial area, *Journal of the Meteorology Society of Japan*, Vol. 44, pp. 25-43.
- Matthews, A.J. (2000): Propagation mechanisms for the Madden-Julian Oscillation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 126, pp. 2637-2651.
- Matthews, A.J., Hoskins, B.J. and Masutani, M. (2004): The global response to tropical heating in the Madden-Julian Oscillation during the northern winter, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 130, pp. 1991-2011.
- Mori, M. and Watanabe, M. (2008): The growth and triggering mechanisms of the PNA: A MJO-PNA coherence, *Journal of the Meteorological Society Japan*, Vol. 86, pp. 213-236.

(論文受理日 : 2015年6月5日)