

北半球冬季の Madden-Julian 振動の中高緯度成層圏への影響

梅津 浩典 ・ 伊藤 久徳 (九大院 ・ 理)

1 はじめに

Madden-Julian 振動 (MJO) は熱帯域で最も卓越する変動であり, 中高緯度にも影響を与えていることが知られている (Weickmann et al. 1985; Madden and Julian 1994)。最近では, MJO とテレコネクションとの関係についても盛んに研究されている。MJO と PNA (太平洋・北アメリカ振動) の関係を述べた論文は多くある (Kim et al. 2004; Mori and Watanabe 2008 など)。Mori and Watanabe(2008) は MJO の対流活発 (不活発) 域がベンガル湾 ~ 西太平洋に到達するとき, 負 (正) の PNA の頻度が最も高いことから, MJO が PNA 生成のトリガーになる可能性を示唆した。次に, MJO と NAO (北大西洋振動) の関係について Cassou(2008) は MJO の対流活発 (不活発) 域が海洋大陸にあるとき, 正 (負) の NAO の傾向になることを示した。続いて Lin and Derome(2009) は MJO の対流域がインド洋にあるとき, 正の PNA-like なパターンが現われ, その 10 ~ 15 日後に正の NAO-like なパターンになりやすいことを示した。しかし, これらの研究は対流圏で話が閉じていて, 成層圏を含めた解析は行われていない。

対流圏と成層圏の卓越モードのつながりについて Itoh and Harada(2004)(以後 IH04) は, 成層圏の EOF 第 1 モードである環状モード (AM) と対流圏の NAO との結合と, 成層圏の EOF 第 2 モードである W1 パターン (波数 1 モードパターン) と対流圏の PNA との結合を示し, 前者の結合パターンを第 1 モード, 後者を第 2 モードと名付けた。第 1 モードは 200 ~ 100 hPa で NAO から AM に遷移し, 第 2 モードは 150 hPa ~ 70 hPa で PNA から W1 パターンに遷移することを示した。また, 第 1 モードは対流圏・成層圏の変動が同時におこるモードである。一方, 第 2 モードは約 1 週間で対流圏から成層圏へ伝播したのうち, 成層圏で第 1 モードへ約 2 週間で時間遷移す

ることを示し, 卓越モードの時間的つながりについても示している。

これらの先行研究をつなげて考察すると MJO が成層圏に対しても何らかの影響を与えていると考えられるので, 本研究では MJO が与える影響を対流圏だけでなく成層圏も含めて解析する。対流圏だけでなく成層圏も解析領域に含めてより広い視野で見ることによって新たな発見があると考えられる。

2 データ

JRA-25/JCDAS 再解析データと NOAA/ESRL で作成された interpolated OLR (Outgoing Longwave Radiation) データの 2 種類のデータを使用した。前者のデータは 1000 hPa ~ 1 hPa の 22 層のジオポテンシャル高度・気温・流線関数のデータを日平均して使用した。格子間隔は 1.25 度間隔である。後者のデータは水平解像度 2.5 度 × 2.5 度の日平均データである。それぞれのデータ期間は 1979 年 ~ 2007 年 9 月である。解析期間は 1981 年 ~ 2005 年 9 月である。

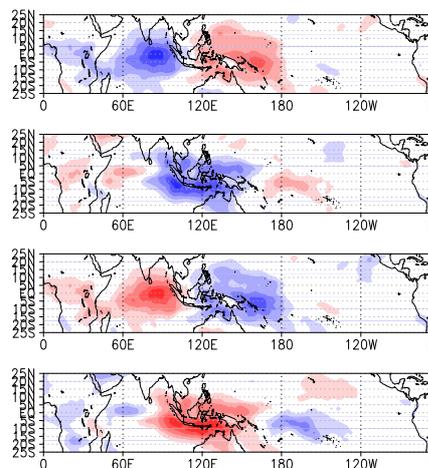


図 1: OLR 偏差 (W/m^2) のコンポジット図。上から phase 1, phase 3, phase 5, phase 7 である。青色は対流活発域, 赤色は対流不活発域を示す。

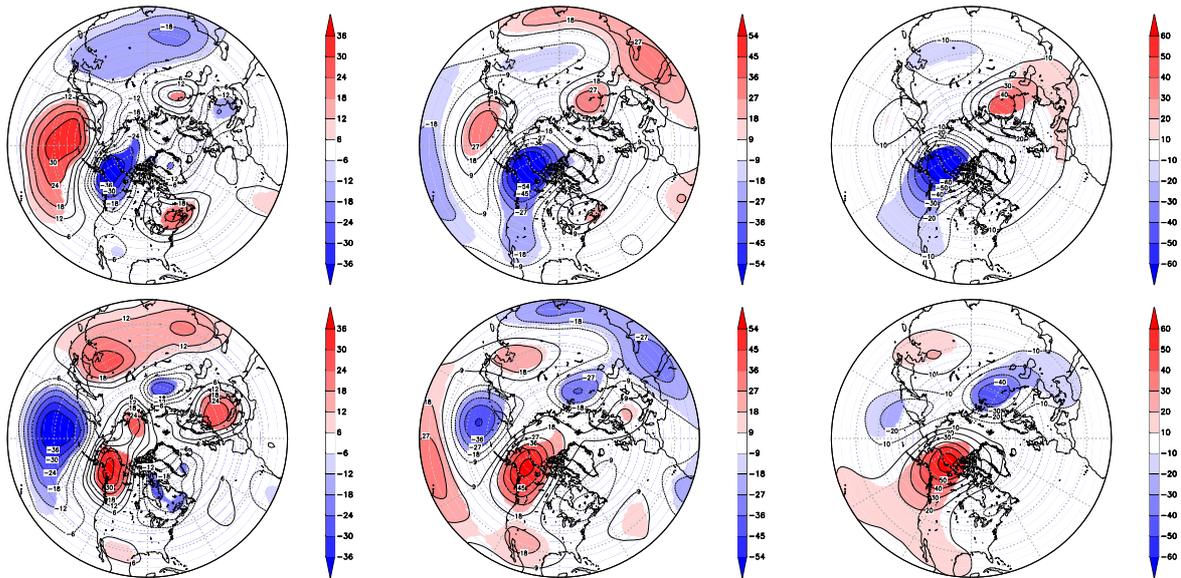


図 2: 左)500 hPa 面, 中央)150 hPa 面, 右)70 hPa 面のコンポジット図。コンターは高度偏差 (m) を示し, カラーは 90 % 有意な高度偏差を示す。上段は phase 2, 下段は phase 6。

3 解析方法

赤道域において, 南北平均した生の OLR データとその時間平均の差をとることにより偏差を求めた。さらにその偏差を 30~60 日のバンドパスフィルターに通す。この偏差に対して EOF 解析を行う。EOF 第 1 モードと第 2 モードの寄与率は 27%, 20% である。これら 2 つのモードを用いて MJO を 8 つの位相に分けた。このとき EOF 第 1 モードと EOF 第 2 モードの時間係数の極大と極小がそれぞれの 1 標準偏差をこえているもの (十分に MJO の振幅が大きいもの), かつ第 2 モードが第 1 モードに対して 1/4 周期 (5~15 日) 遅れているもの (すなわち MJO がスムーズに東進しているもの) を選んだ。phase 1~5 に対して 20 事例, phase 5~1 に対して 19 事例得た。MJO の各位相についてジオポテンシャル高度の気候値からの偏差を 30~60 日のバンドパスフィルターに通したのに対してコンポジット解析を行った。気候値は 1979 年~2005 年までの各日平均の 31 日移動平均とした。図 1 のように phase 1 は対流活発域がインド洋, phase 3 は海洋大陸, phase 5 は西太平洋, phase 7 は日付変更線の東にあるときに対応している。また, 事例数を自由度として有意水準 10% で t 検定を行った。本研究では, PNA パターンについてアリュシャン領域で正 (負) の高度偏差の場合を正 (負)

の PNA パターンと呼ぶ。また, W1 パターンについては北アメリカ側が負 (正) の高度偏差の場合を正 (負) の W1 パターンと呼ぶことにする。

4 結果

4.1 500 hPa から上層へのコンポジット図 (phase 2,6)

図 2 は, phase 2 と phase 6 の 500 hPa 面, 150hPa 面, 70hPa 面におけるコンポジット図である。500 hPa 面の phase 2 ではこれまでの先行研究と同様にアラスカ, 北アメリカで本来の PNA パターンより位相が北にずれている正の PNA-like なパターンが得られた。上層に目を移していくと, 150hPa 面と 70hPa 面の間で正の PNA-like なパターンから正の W1 パターンへの遷移が見られた。一方で phase 2 の反対称の位相である phase 6 では負の PNA-like なパターンが得られ, このパターンも 150hPa 面と 70hPa 面の間で負の W1 パターンへの遷移が見られた。この結果は, IH04 と整合的な結果である。phase 2 と phase 6 の MJO の反対称な位相で対流圏から下部成層圏の偏差の分布と振幅の大きさは反対称となっている。

4.2 10 hPa 面のコンポジット図

図3, 4は10 hPa面のコンポジット図である。対流圏で正のPNA-likeなパターンが現れるとき(phase 2), 10 hPa面のphase 3で正のW1パターンが生じる。このW1パターンは北緯70度あたりに作用中心をもつ。一方で, 対流圏で負のPNA-likeなパターンが現れるとき(phase 6), 同じphase 6で負のW1パターンが生じた。この結果は, 正のPNAより負のPNAが成層圏に速く波が鉛直伝播している可能性を示唆している。また, 正のW1パターンはphase 4でAMに遷移していたが, 負のW1パターンは負のAMに遷移しなかった。このことからMJOが極渦の強化に影響を与えている可能性が示唆された。MJOの反対称な位相(例えばphase 2と6,3と7)で対流圏から下部成層圏まで偏差の分布は反対称となっていたが, 10 hPa面では非対称となっていた。

ここまでの結果で疑問な点が3つある。1つ目はPNAパターンがW1パターンになぜ遷移するのかということ, 2つ目は10 hPa面において正のW1パターンがphase 3で生じたのに対し負のW1パターンはphase 6で生じるのか, すなわち正のPNAより負のPNAのほうが成層圏に波が速く鉛直伝播するのはなぜかということである。最後に正のW1パターンは正のAMに遷移する一方で, なぜ負のW1パターンは負のAMに遷移しないのかということである。1つ目と2つ目の疑問にせまるためにE-Pフラックスの鉛直成分によるコンポジット解析を行った。ここで, 時間平均場を基本場とした解析手法であるwave activity flux(Takaya and Nakamura 2001)による解析を用いなかったのは, 成層圏では波の波長が非常に大きく基本場の変化が対応する擾乱の変化と比べてずっとゆっくりであるという仮定が成り立たないために成層圏の解析には向かないという理由と, wave activity fluxの式の対称性より偏差分布が対称なもの解析には向かないという理由のためである。3つ目の疑問については今後の課題とする。

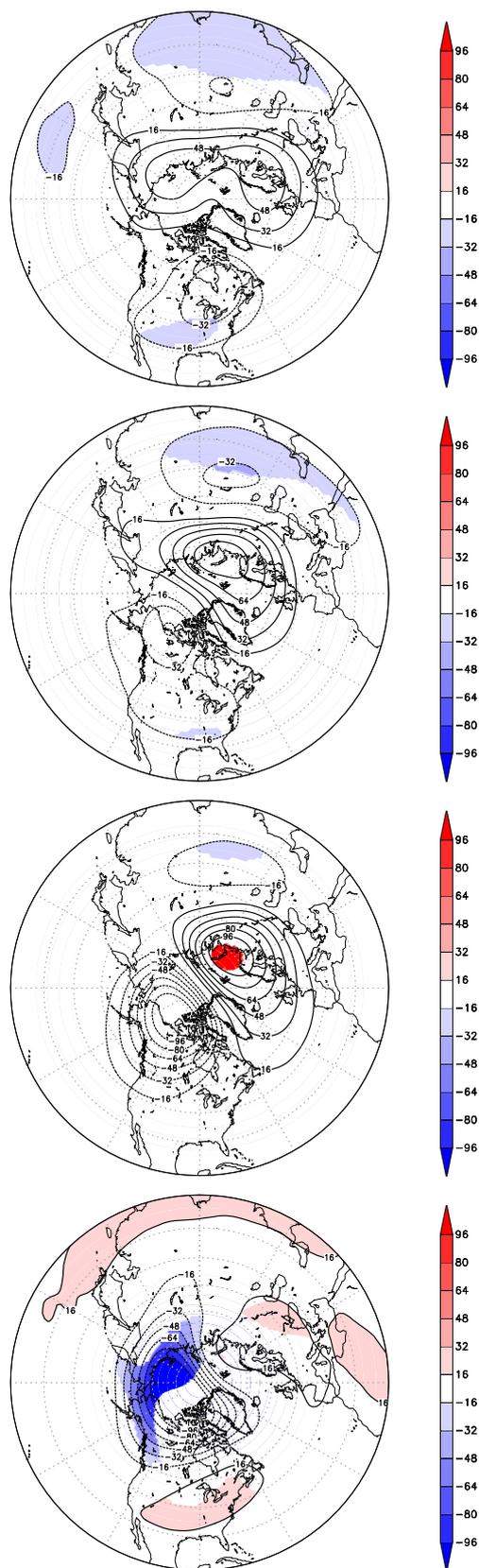


図3: 10 hPa面のジオポテンシャル高度のcomposite図。コンターは高度偏差(m)を示し, カラーは90%有意な高度偏差を示す。上から phase 1, 2, 3, 4である。

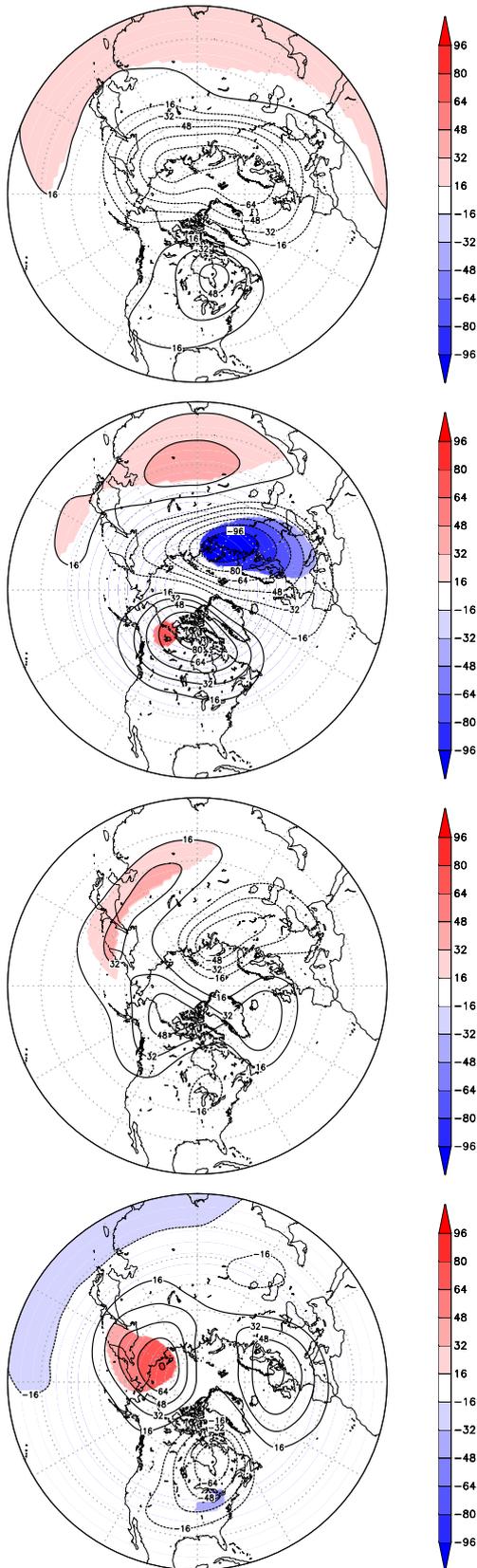


図 4: 10 hPa 面のジオポテンシャル高度の composite 図。コンターは高度偏差 (m) を示し、カラーは 90% 有意な高度偏差を示す。上から phase 5, 6, 7, 8 である。

4.3 鉛直成分の E-P フラックスによる解析

E-P フラックスの鉛直成分は簡略化して書くと次の 4 つの項に分けることができる。

$$\begin{aligned} \overline{v'T'} &= \overline{([v]' + v^{*'})([T]' + T^{*'})} \\ &= \overline{[v]'[T]'} + \overline{v^{*'}[T]'} + \overline{[v]'T^{*'}} + \overline{v^{*'}T^{*'}} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 v は南北風、 T は気温、 $[\]$ は時間平均すなわち気候値、 $*$ は時間平均からの偏差、 $'$ は東西平均、 $'$ は東西平均からの偏差を表す。本研究では右辺 1 項目、2 項目、3 項目、4 項目を F_1 , F_2 , F_3 , F_4 とする。 F_1 は気候平均場によって生じる E-P フラックス、 F_2 , F_3 は気候平均場と偏差場との相互作用によって生じる E-P フラックス、 F_4 は偏差場によって生じる E-P フラックスである。 F_1 は定常場なので無視し、 F_2 , F_3 , F_4 を計算した。 F_2 , F_3 , F_4 の和を F_{total} とする。

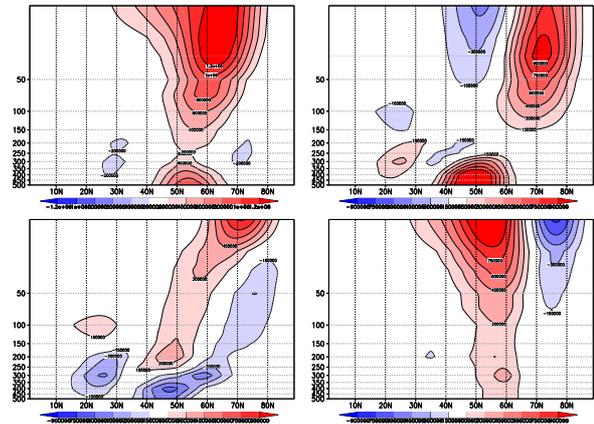


図 5: E-P フラックスの鉛直成分の phase 6 と phase 2 の差 (m^3/s^2)。左上の図は F_{total} 、右上の図は F_2 、左下の図は F_3 、右下の図は F_4 のそれぞれを示す。最上部は 10 hPa で最下部は 500 hPa である。赤い(青い)カラーは phase 2 より phase 6 ほうがの鉛直フラックスが大きい(小さい)ことを示す。フラックスの差は $\sqrt{p_0/p}$ 倍している。

図 5 は F_{total} , F_2 , F_3 , F_4 の phase 6 と phase 2 の差を示す。図より対流圏界面より上層では F_2 , F_4 が F_3 より大きくなっている、 F_3 の寄与は小さいと考えられる。 F_2 , F_4 の寄与が大きいようだが、値が大きくなる気圧面が異なっている。 F_2 は 30 hPa ~ 70 hPa でフラックスの差が大きくなっているが、 F_4 は上部のみで鉛直フラックスの差が大きくなっている。したがって W1 パターンには F_4 より F_2 が重要だと考えられるので、 F_2 について考察していく。

4.4 なぜ、PNAはW1パターンに遷移するのか

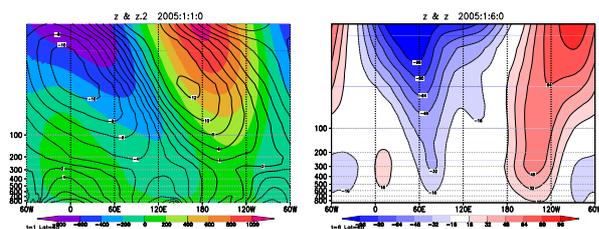


図 6: 左) 冬季平均 (12月~2月) の東西平均からの偏差。北緯 65 度の経度高度断面図である。コンターは気温偏差 (K), カラーは高度偏差 (m) である。右) phase 6 の北緯 65 度の経度高度断面図。カラーは高度偏差 (m) を表す。

図 6 の左図のカラーは $[Z]'$, コンターは $[T]'$ を示し, 右図のカラーは phase 6 の Z^{*l} に相当するものを示している。左図を見ると日付変更線から西経 120 度にかけて成層圏では定常的に西傾したアリューション高気圧があり, その西側に 90 度位相がずれた正の気温偏差がある。phase 6(2) において日付変更線から西経 120 度にかけて存在する PNA の北アメリカ上偏差は成層圏まで等価順圧な構造をもつ高気圧性偏差 (低気圧性偏差) をもっている。この状況から phase 6(2) において F_2 は次のようなメカニズムで生成し W1 パターンが生成すると考えられる。

- (1) 対流圏界面付近でアリューション高気圧上に PNA による Z^{*l} の正 (負) の偏差場が重ねあわされる。
- (2) Z^{*l} の場によって正の気温偏差領域において $v^{*l} > 0 (v^{*l} < 0)$ が生成する。
- (3) (2) によって正 (負) の E-P フラックスの鉛直成分 F_2 が生じる。
- (4) (3) によって成層圏の波の活動度を強め (弱め), 成層圏のアリューション上に正 (負) の高度偏差が生じ W1 パターンが生成する。

このメカニズムは Takaya and Nakamura(2008) などが述べたユーラシア大陸上の惑星波上向き伝播の変調メカニズムと同様である。本研究ではこのメカニズムが太平洋で起こっている可能性を示唆しているが, 3次元 E-P フラックス (Plumb 1985) などでさらなる解析が必要である。

4.5 非対称の考察

図 5 は phase 2 のときより phase 6 のほうが鉛直フラックスが大きいことを示している。フラックス F と波活動度 A の間には $F = C_g A$ (C_g : 群速度) の関係が成り立っている。ここで, 図 2 より対流圏から下部成層圏まで MJO の反対称な位相で振幅・偏差分布ともに反対称になっているので, 波活動度は phase 2 と phase 6 でほとんど等しいと考えられる。ゆえに phase 2 より phase 6 のときのほうが群速度が大きくなり, 正の PNA より負の PNA のほうが波が速く鉛直伝播したと考えられる。従って正の W1 パターンが phase 3 で生じたのに対し, 負の W1 パターンは phase 6 で生じたと考えられる。ここでは, 波活動度を phase 2 と 6 で等しいと考えたが, 実際は波活動度を見積もらなければならない。それは今後の課題にしたい。

5 まとめと今後の課題

先行研究をつなげて考察することから MJO は成層圏に対して何らかの影響を与えていると考えられる。そこで, MJO をカテゴリーに分けて, MJO が与える影響を対流圏だけでなく成層圏も含めたコンポジット解析によって調べた。結果は次のように得られた。

対流圏で正と負の PNA-like なパターン, 成層圏で正と負の W1 パターン・正の AM が現れることから MJO が対流圏だけでなく成層圏にも影響を与えていることが示された。特に MJO が極渦強化に影響を与えている可能性が示唆された。

正の PNA-like なパターンのときより負の PNA-like なパターンのときのほうが成層圏に波が速く鉛直伝播しているように見えた。

E-P フラックスの鉛直成分の解析から惑星波上向き伝播の変調のメカニズムによって PNA から W1 パターンの遷移が起こる理由を説明した。また, 正の PNA のときより負の PNA のときの波の鉛直伝播が大きいことを示した。

今後の課題は以下の 3 点である。1 点目は 2 次元の E-P フラックスから Plumb(1985) などの 3 次元の E-P フラックスを用いてより詳細な解析をすることである。2 点目は 4.5 節で phase 2 と phase 6 で等しいと仮定した波活動度をしっかり

見積もることである。3点目は正の W1 パターンは正の AM に遷移した一方で、負の W1 パターンから負の AM パターンへの遷移が見られなかった理由を考察することである。

謝辞

今回の研究集会参加にあたり、京都大学防災研究所より旅費の補助を受けました。本集会開催の代表者である岩崎 俊樹教授（東北大学院理学研究科）に感謝いたします。また、本研究に対するさまざまな貴重なコメントを戴きました。この場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- Cassou C., 2008: Intraseasonal interaction between the Madden-Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation. *Nature*, **455**, doi:10.1038/nature07286.
- Kim, B.-M., G.-H. Lim, and K.-Y. Kim, 2006: A new look at the midlatitude-MJO teleconnection in the Northern Hemisphere winter. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 485-503.
- Itoh, H., and K. Harada, 2004: Coupling between tropospheric and stratospheric leading modes. *J. Climate*, **17**, 320-336.
- Lin H., G. Brunet, and J. Derome, 2009: An observed connection between the North Atlantic Oscillation and the Madden-Julian oscillation. *J. Climate*, **22**, 364-380.
- Madden, R. A., and P. R. Julian, 1994: Observation of the 40-50-day tropical oscillation - A review. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 814-837.
- Mori, M., and M. Watanabe, 2008: The Growth and Triggering Mechanisms of the PNA: A MJO-PNA coherence. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 213-236.
- Plumb, R. A., 1985: On the three-dimensional propagation of stationary waves. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 217-229.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2001: A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasi-geostrophic eddies on a zonally basic flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 608-627.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2008: Precursory changes in planetary wave activity for midwinter surface pressure anomalies over the Arctic. *J. Meteorol. Soc. Japan.*, **86**, 415-427.
- Weickmann, K. M., G. R. Lussky, and J. E. Kutzbach, 1985: Intraseasonal (30-60 day) fluctuations of outgoing longwave radiation and 250 mb streamfunction during Northern winter. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 941-961.