

熱帯季節内振動がPNAパターンの予測可能性に及ぼす影響

向川均・林麻利子*

* 大阪管区气象台

要 旨

北半球冬季の対流圏中高緯度域における主要なテレコネクションパターンである Pacific/North American (PNA) パターンの予測可能性について、1992年から2001年までの十年間について気象庁気候情報課が実施したアンサンブルハインドキャスト実験結果を用いて解析した。特に、対流圏熱帯域における主要変動モードである Madden-Julian Oscillation (MJO) がPNAパターンを励起する可能性を示したMori and Watanabe (2008) の結果を参考にして、PNAパターンの予測可能性と、MJOの位相や振幅との関連に注目して解析を行った。その結果、PNAパターンの予測誤差は、予報初期日にMJOに伴う活発な対流域がインド洋や西太平洋域に存在するとき大きくなることが示された。

キーワード: PNAパターン, MJO, 予測可能性, 準定常ロスビー波

1. はじめに

中高緯度大気における主要な低周波変動モードの一つであるPNAパターンが存在する領域では、北半球冬季において高度場変動が大きく、予報誤差も他の領域に比べて大きい。このためPNAパターンの予報誤差は、北半球全体の予報誤差にも大きな影響を与えるため、PNAパターンの実際的な予測可能性を明らかにすることは重要である。

例えば、Reichler and Roads (2003, 2004) は、PNA領域の潜在的な予測可能 (potential predictability) が北半球の他の地域に比べ高いことを示している。また、負のPNAパターンを予測する場合、正のPNAパターンと比べ、PNA領域の予測可能性が低くなることも示されている (Palmer, 1988)。しかしながら、これらの過去の研究では予報値と解析値との比較がなされていないため、PNAパターンの実際的な予測可能性については議論されていない。またこれまでの研究では、PNAパターンの予測可能性がどのような力学的要因に依存しているのか、さらに、なぜ予測可能性がパターンの極性に依存するのかは明らかにされていない。

そこで本研究では、気象庁気候情報課で実施されたアンサンブルハインドキャスト実験結果を用いて11月から3月における北半球冬季のPNAパターンの

予測可能性を検討した。特に、熱帯域における主要変動モードであるMJO (Madden-Julian Oscillation) がPNAパターンの形成に重要な役割を果していることを示したMori and Watanabe (2008: 以下, MW08) の研究を参考にして、MJOがPNAパターンの予測誤差に及ぼす影響について詳しい解析を行った。

2. データと解析手法

2.1 データ

1992年から2001年までの10年間について気象庁気候情報課で実施された、アンサンブルハインドキャスト実験結果を用いた。この実験で使用されたモデルの水平解像度はTL159、鉛直層数は40である。アンサンブルメンバー数は、摂動を加えないコントロールラン1個と、SV法により作成された摂動を加えた10個の摂動ランの合計11個である。ここでは、冬季 (11月~3月) のPNAパターンの予測可能性を調べるため、予報初期日が11月~3月の予報 (10月31日から3月30日を初期日とする予報) 150個を使用した。

本研究では、予測精度をアンサンブル平均値で評価した。検証データには、JRA-25再解析データを用いた。PNAパターンに対応する低周波成分を取り出すため、各変数には7日の移動平均を施した。ただし、2日予報までは予測値のみでは7日移動平均が計算で

きないため、初期値より以前の期間については再解析データを用いて7日移動平均を求めた。

2.1 解析手法

ここではMW08に従い、以下のようにPNA index, およびMJOの振幅と位相を定義した。まず, PNAパターンを定義するため, JRA-25再解析データにおける500hPa高度場の日々の偏差場に対して10日のlow-pass filter (Duchon, 1979) を施した。ここで偏差場は日々の気候値からの差として定義した。次に, この値に対してEOF解析(領域: 120E-60W, 20N-90N, 期間: 1979~2006年の11月から3月)を行い, EOF第1主成分としてPNAパターンを定義した。このように定義したPNAパターンに, 7日移動平均した500hPa高度場偏差を射影した値で定義したPNA indexを用いてPNAパターンの予測精度を評価した。

一方, MJOを, JRA-25再解析データの日々の200hPa速度ポテンシャル偏差に30-90日のband-pass filterを施した値についてEOF解析(領域: 0E-360E, 30S-30N, 期間: 1979~2006)を行った結果得られる第1モードと第2モードで定義した。日々のMJOの振幅は, それぞれのモードに伴う主成分スコア $pc1$ と $pc2$ を用いて, $\{(pc1)^2+(pc2)^2\}^{1/2}$ で定義する。ただし以下では, ハインドキャスト実験期間の冬季(1979年~2006年の11月~3月)における標準偏差で規格化した値を冬季におけるMJOの振幅の指標とした。

3. 結果

3.1 全予報事例の解析

まず, MW08により指摘されたPNAパターンとMJOとの関係が, PNAパターンの予測可能性に影響を与えている可能性を吟味するため, 全150予報事例を用いてPNA indexの予測誤差と予報初期日におけるMJOの振幅との関係について調べた(Fig. 1)。黒線は全150事例で平均したPNA indexの予測誤差, 青線は予報初期日にMJOの振幅がその平均値に気候学的な標準偏差 σ を加えた値よりも小さな予報事例について平均したPNA indexの予測誤差, 赤線は予報初期日のMJOの振幅が平均値よりも 1σ 以上大きい予報事例について平均したPNA indexの予測誤差を示す。予報初期日のMJOの振幅が大きな場合(赤線)には, 予報7日目までのPNA indexの予測誤差は, 全事例で平均した予測誤差に比べて有意に大きいことがわかる。また, 図示はしないが, 予報事例を予報初期日のMJOの位相($pc1$ と $pc2$ の符号)で分類して同様の解析を行った結果, 予報初期日にMJOに伴う対流活発域がインド洋あるいは, インドネシア域に存在する場合には, 予報7日目までのPNA index

の予測精度が悪いことが示された。これらの結果は, PNAが形成される1週間程度前にMJOに伴うベンガル湾付近での発散風偏差によりPNAパターンがトリガーされるというMW08の指摘から予期される結果とは矛盾するようである。

3.2 PNAパターン形成期の予報事例の解析

一方, PNAの形成・維持・減衰プロセスではそれぞれ異なる力学的プロセスが関与していることが考えられる(MW08; Feldstein, 2002)。従って, PNAのライフサイクルを考えない前節の解析では, 全てのプロセスがPNA indexの予測誤差成長に影響を与えるため, 得られた結果を解釈することが困難となる。このため, PNA形成期に着目し, この期間におけるPNA indexの予測誤差成長に関与する力学的プロセスについて検討した。またこの形成期に着目することで, MW08の研究結果との対比も行うことができ期待できる。

まず, MW08を参考にして, 解析値のPNA indexが次の2つの条件を満たした場合に顕著なPNAパターンが形成されたと考え, PNA(形成)イベントに対応する予報事例を抽出した。

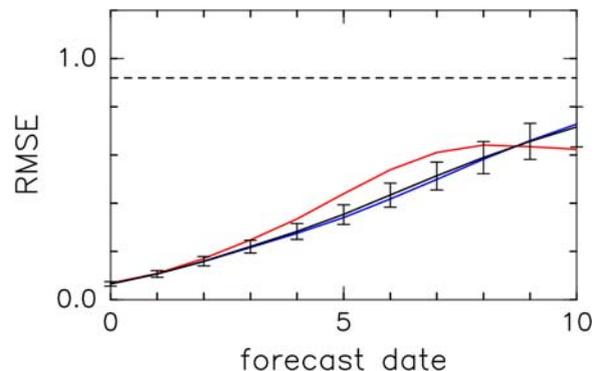


Fig. 1 Time evolution of the averaged forecast error of PNA index. The x-axis is the forecast period in days. The red (blue) line corresponds to the average of 18 (132) forecasts of which amplitude of MJO at the initial time of forecast is larger (smaller) than 1σ from the average. The black line shows the averaged forecast error for all (150) forecasts. The error bars indicate the range of the average with 99% statistical significance estimated by a resampled procedure as in Mukougawa, et al. (2009). The dotted line shows the standard deviation of PNA index.

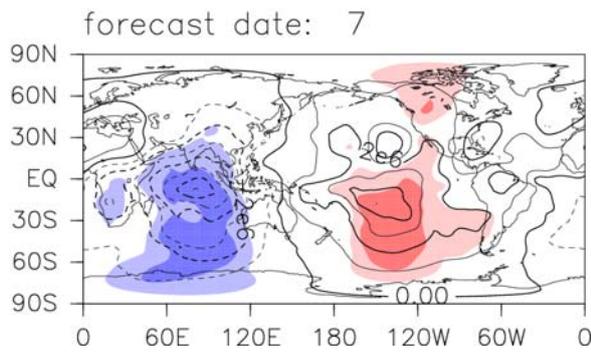


Fig. 2 Regressed 7-day averaged X200 anomaly at the initial time of forecast with respect to day-7 forecast error of PNA index for PNA events. Regions with negative anomalies correspond to divergent regions. Contour interval is $1 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$. Anomalies in heavy (lightly) shaded regions are statistically significant at 99(95)% confidence level.

- 条件1: 予報9日以内に解析値のPNA indexの絶対値が 1σ を越える日が5日以上続く。
 条件2: 条件1を満たし始める最初の日の前4日間は、解析値のPNA indexの絶対値が連続して 1σ 未満である。

また、条件1を満たし始めた最初の日をPNAイベントのオンセットと考える。なお、PNA indexの標準偏差は、ハインドキャスト予報実験が実施された期間である1992年から2002年までの1, 2, 3, 11, 12月（ただし、2002年11, 12月は除く）の期間のデータを用いて計算した。条件1はMW08で採用された条件と同じである。一方、条件2によって、予報初期日に既にPNAイベントがオンセットしている事例を排除した。この2つの条件により、予報9日目までにPNAイベントが形成される事例として48の予報事例を抽出した。

まず、PNAパターン形成期におけるPNA indexの予測誤差の変動にMJOが果たす役割を明らかにするため、PNAイベントの全48事例を用いてPNA indexの予測誤差と200hPa速度ポテンシャル(X200)偏差との関係を回帰分析により調べた。Fig. 2は、予報7日目のPNA indexの予測誤差の大きさに回帰させた、予報初期日における解析値のX200偏差場を示す。インド洋で発散域、太平洋で収束域が広がり、MJOに似た波数1の大きな構造を持つ有意な偏差場領域が熱帯付近に広く存在していることがわかる。一方、予報初期日の回帰図では細かな空間構造が顕著で、有意な偏差領域もほとんど存在しない。Fig. 2に見られる波数1の大きな空間構造をもつ偏差場は、予報3日目以降に顕著になり、予報7日目で最も有意な領域

が拡大した。このことから、予報初期日の発散場は予報7日目のPNAパターンの予測誤差に最も有意に関係していることがわかる。従って以下では、予報7日目の予測誤差の大きさに着目して解析を行う。なお、全予報事例（150事例）を用いてFig. 2と同様の解析を行ったが、PNA indexの予測誤差と有意に関連する200hPa発散場偏差は予報初期日にはほとんど存在しなかった。このことは、MW08の結果から予期されるように、PNAパターン形成期にのみ、熱帯域の大規模発散場がPNA領域に大きな影響を与えていることを示唆している。

次にPNAパターン形成期の予測誤差成長を詳しく調べるため、PNAイベントの予報事例を、予報7日目におけるPNA index 予測誤差の全48事例の平均値 μ^* と標準偏差 σ^* を用いて、以下のように区別して解析した。すなわち、予報7日目の予測誤差が $\mu^* + \sigma^*$ 以上の場合を予測誤差の大きな事例、 $\mu^* - \sigma^*$ 以下の場合を予測誤差の小さな事例とした。予報7日目に予測誤差が大きかった場合のほとんどを占める負のPNAパターン（北太平洋で高気圧偏差）を予測する事例で平均した、200hPa流線関数偏差 ($\varphi 200$)と、それに伴う波活動度フラックスの時間発展をFig. 3に示す。解析値では、予報初期日からMW08が指摘したアジアジェット上を伝播するRossby波列が存在し、それに伴うエネルギー伝播により、北太平洋領域で高気圧偏差が成長し、そこからさらに下流へエネルギーが射出されることで負のPNAパターンが形成される様子がみてとれる。一方、予測値では、予報3日目以降、アジアジェット上のRossby波列の伝播が弱まり、北太平洋領域へ伝播するエネルギーフラックスが解析値に比べて小さくなり、北太平洋上の高気圧性偏差も成長しない。また、図示はしないが、予報7日目に予測誤差が小さかった場合のほとんどを占める正のPNAパターンを予測する事例では、アジアジェット上を北太平洋領域まで伝播するRossby波列をうまく再現していた。従って、アジアジェット上のRossby波列の再現性がPNAパターン形成期におけるPNA indexの予測可能性に大きな影響を与えていると考えられる。

3.3 Rossby波列の成因と予測誤差

つぎに、Rossby波列の再現性に影響を与える力学要因を調べるため、Fig. 4に予測誤差の大きな事例における、X200偏差と発散風偏差の時間発展を示す。解析値では、Rossby波列が存在するアジアジェット上に水平スケールが比較的小さな発散・収束域が存在している。Fig. 3と比較すると、これらの収束・発散領域は、X200偏差場の西側に位置していることがわかる。従って、基本流による渦度移流効果を考慮

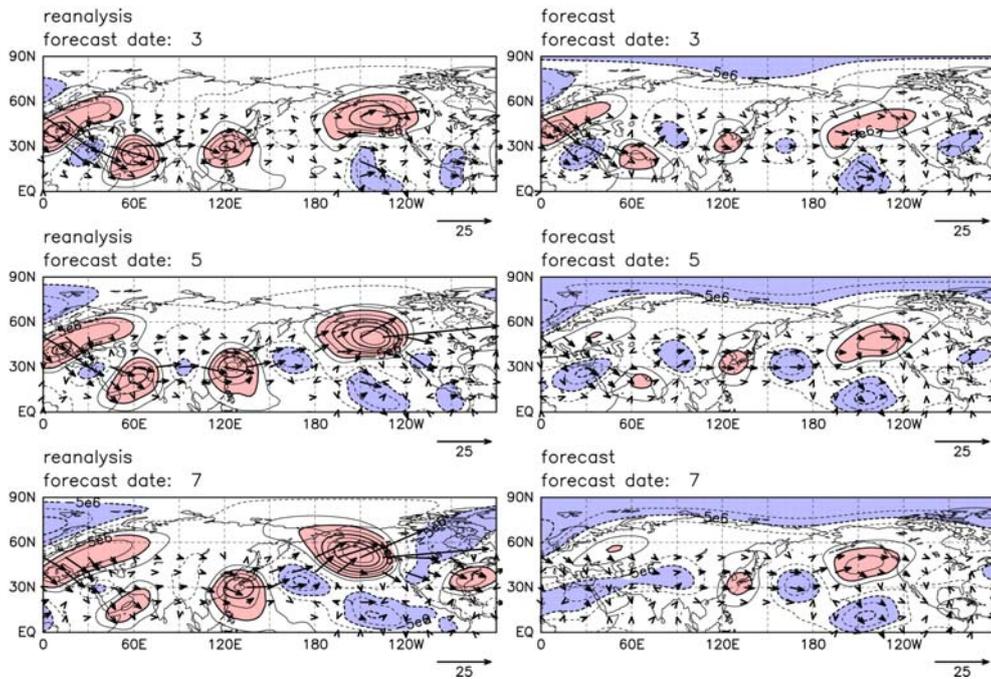


Fig. 3 Composites ϕ_{200} (contour) anomalies for forecasts with large prediction error of day-7 PNA index for negative PNA events. Contour interval is $2.5 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$. Regions where the magnitude of anomaly is larger than $5 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ are shaded. Arrows show the corresponding wave-activity flux anomalies. The magnitude of the reference vector is shown in the lower right corner. Wave-activity fluxes poleward of 60N are not shown.

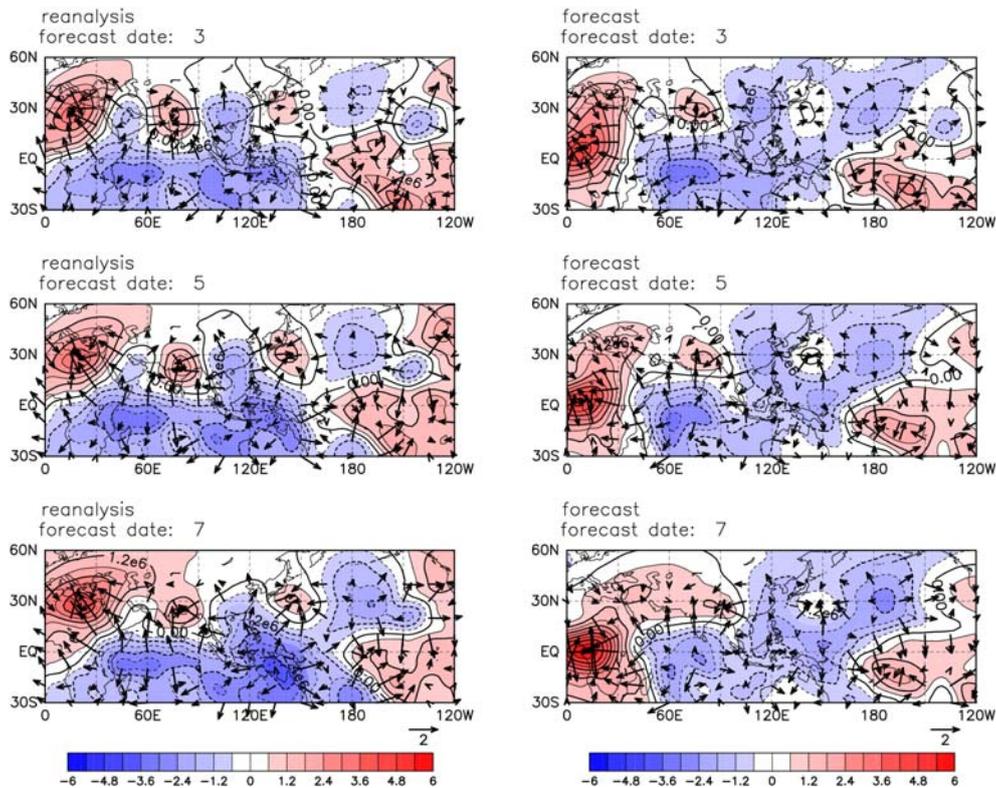


Fig. 4 As in Fig. 3, but for X200 anomalies (contour). Contour interval is $0.6 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$. Negative values correspond to divergence. Arrows show corresponding divergent wind anomalies. The magnitude of the reference vector is shown in the lower right corner. Divergent winds poleward of 45N are not shown.

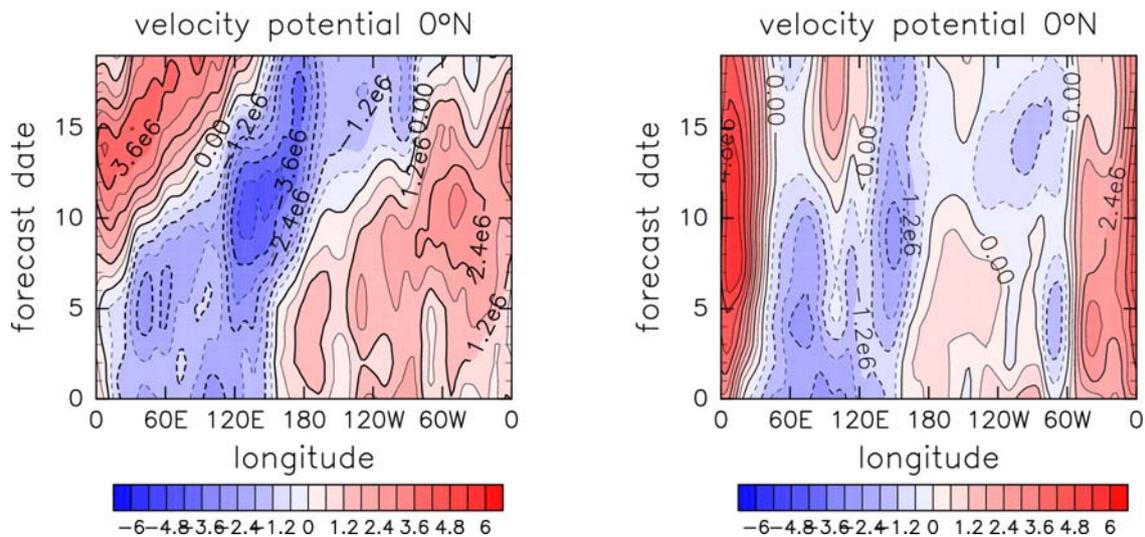


Fig. 5 Composites of X200 anomalies along the equator for the forecasts with large forecast error of day-7 PNA index for negative PNA events. Left (right) panel shows the analysis (forecast). Contour interval is $0.6 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$. Negative values correspond to divergence.

すると、アジアジェット上のRossby波は発散・収束に伴う渦度生成により形成されていることがわかる。実際、アジアジェット上の Rossby wave source の形成には、低周波成分の発散風に伴う発散・収束による渦度生成項の寄与が最も大きいことが示される。またFig. 4は、この発散・収束はさらに上流側のアフリカ北部や地中海領域から伝播する波列に伴って生じていることも示唆される。従って、アジアジェット上のRossby波列は、MW08により指摘されたMJOに伴うベンガル湾付近の発散風による渦度移流だけではなく、さらに上流側の領域から射出されたRossby波がアジアジェット上に捕捉されて形成された可能性も考えられる。

一方、予測値を見ると、予報3日目以降、30N, 0E-60E付近に存在する収束と発散が弱まり、Fig. 4では、この付近のエネルギー伝播も弱まっている。実際、30N, 0E-60E付近で、解析値に比べ予測値のRossby wave sourceは小さくなっていった。従って、予測では発散風の再現性が悪いため、Rossby wave sourceの再現も悪くなり、アジアジェット上のRossby波の伝播が弱まり、PNAパターンの形成がうまく再現できないためにPNA indexの予測誤差が大きくなったと考えられる。さらに予測値では、赤道域で予報2日目以降、60W-60Eでの収束域が、解析値に比べ急速に発達していることがわかる。このことが30N, 0E-60E付近に存在する収束と発散の弱まりをもたらした直接の原因とも考えられる。

そこで、Fig. 5に、赤道上でのX200偏差の経度-時間断面を示す。この図からも予報2日目以降の予

測値では、赤道域の60Wから60Eにおいて、収束域が解析値に比べ急速に発達していることがわかる。さらに、解析値ではMJOに対応する波数1の構造を持つ発散場が約6度/dayの速さで東進しているにもかかわらず、予測値ではこの発散場の東進をうまく表現できていない。つまり、MJOの東進をうまく予測できなかったために、40N, 30E付近の発散場の再現性が悪くなり、その領域から伝播するアジアジェット上のRossby波束をうまく再現できなかった可能性が考えられる。一方、予測誤差の小さな事例では、解析値と予測値の両方で、赤道域にMJOに対応する発散場の構造は存在しなかった。このため、発散場の再現性も良かったと考えられる。

4. まとめ

1992年から2001年までの10年間の期間について実施された気象庁1ヶ月アンサンブルハインドキャスト実験データを用いて、冬季(11月から3月)における日々のPNAパターンの予測可能性を詳細に検討した。赤道域のMJOが中高緯度のPNAパターンの形成に関連していることを示したMW08の結果を考慮して、特に、MJOがPNAパターンの予測可能性に与える影響について詳しく解析した。

まず、全150事例を用いた解析から、予報初期日に大振幅のMJOが存在する場合、予報7日目までのPNA indexの予測誤差は大きくなることが示された。また、予報初期日に対流発域がインドネシア領域やインド洋に存在する場合にも、予測誤差が大きく

なる傾向にある。

次に、MW08の結果と比較するために、PNA indexが予報9日目までに単調増加または単調減少する予報をPNA形成イベント予報事例として抽出し、PNAパターン形成期における予測誤差に着目して解析を行った。まず回帰分析を行った結果、これらの事例では、PNA indexの予測誤差は予報初期日における熱帯域での大規模な対流圏上層発散場と有意に関係していることが示された。この発散場はMJOと良く似た東西波数1の構造を持つ。このことから、MJOはPNAパターン形成期の予測誤差成長に、有意な影響を与えていると考えられる。この予報初期日の対流圏上層の発散場とPNA indexの予測誤差との相関は予報7日目に最も有意となり、予報初期日に対流圏上層の発散場の中心がインドネシア領域あるいはインド洋に存在する場合には、PNAパターンの予測誤差が大きくなることが示された。

さらに、MJOがPNA indexの予測誤差に与える影響を力学的に解釈するために、予報7日目の予測誤差が大きな事例と小さな事例のそれぞれについて合成解析を行った。その結果、予測誤差が大きな事例では、PNAパターンの形成に寄与するアジアジェット上を伝わる準定常Rossby波列が正しく再現されていないことが示された。従って、アジアジェット上の準定常Rossby波列の再現性がPNAパターン形成期の予測誤差に大きな影響を与えていると考えられる。さらに、このRossby波列は、MW08で指摘されたMJOに伴うベンガル湾付近での発散風偏差だけではなく、さらに上流側の北アフリカ大陸付近で、ヨーロッパ域から南東に射出されたRossby波列がアジアジェットに捕捉されることにより形成されていることが示唆された。一方、予測でMJOの東進をうまく再現できない場合、このRossby波列の捕捉の再現性も悪くなる。従って、PNAパターン形成期の予測誤差成長には、MW08で指摘されたMJOに伴うベンガル湾付近での発散風の再現性よりも、さらに上流側でRossby波列がアジアジェットに捕捉されるかどうか大きな影響を与えていると考えられる。また、このRossby波列の捕捉にはMJOの東進の再現性が影響を及ぼす可能性が示された。従って、予報初期日に大振幅のMJOが存在すると、MJOの東進をうまく予測できないため、PNA indexの予測誤差が大きくなると考えられる。

一方、PNAパターン形成期における予測誤差の地理的分布を詳細に検討すると、このRossby波束以外に、北太平洋域での誤差成長プロセスも重要であった。従って、今後、北太平洋域での基本場からのエネルギー変換や渦度収支を解析する必要がある。また、本研究ではPNAパターンの形成期に焦点を絞り

解析を行ったが、維持期や減衰期では異なるメカニズムが支配的となるため、維持・減衰期におけるPNAパターンの予測可能性については別の観点からの解析も必要である。

謝 辞

アンサンブルハインドキャスト実験結果を提供頂いた気象庁気候情報課の皆様へ深く感謝する。図の作成には地球流体電脳ライブラリを用いた。

参考文献

- Duchon, C. E. (1979): Lanczos filtering in one and two dimensions, *J. of Applied Meteor.*, Vol. 18, pp. 1016-1022.
- Feldstein, S. B. (2002): Fundamental mechanisms of the growth and decay of the PNA teleconnection pattern, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 128, pp. 775-796.
- Mori, M. and Watanabe M. (2008): The growth and triggering mechanism of the PNA: A MJO-PNA coherence, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 86, pp. 213-236.
- Mukougawa, H., Hirooka, T. and Kuroda, Y. (2009): Influence of stratospheric circulation on the predictability of the tropospheric Northern Annular Mode, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 36, L08814, doi:10.1029/2008GL037127.
- Palmer, T. N. (1988): Medium and extended range predictability and stability of the Pacific/North American mode, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 114, pp. 691-713.
- Reichler, T. and Roads, J. O. (2003): The role of boundary and initial condition for dynamical seasonal predictability, *Nonlinear Proc. Geophys.*, Vol. 10, pp. 211-232.
- Reichler, T. and Roads, J. O. (2004): Time-Space distribution of long-range atmospheric predictability, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 61, pp. 249-263.

On the Influence of Tropical Intraseasonal Oscillation on the Predictability of PNA pattern

Hitoshi MUKOUGAWA and Mariko HAYASHI*

* Osaka District Meteorological Observatory

Synopsis

The predictability of the Pacific/North American (PNA) pattern, which is one of the most dominant extratropical teleconnection patterns in the boreal winter, is examined using ensemble hindcast experiments conducted by the Japan Meteorological Agency during 10 years from 1992 to 2001. Since Mori and Watanabe (2008) proposed a triggering mechanism of the PNA pattern by the Madden-Julian Oscillation (MJO) in the tropics, we examine the dependence of the predictability of the PNA pattern on the phase and the activity of the MJO. It is found that the prediction error of the PNA pattern becomes large when the active convective region associated with the MJO resides over the Indian Ocean or the Maritime Continent at the initial time of forecast.

Keywords: PNA pattern, MJO, predictability, quasi-stationary Rossby wave