

# MJO が PNA パターンの予測可能性に及ぼす影響

向川 均(京大・防災研)・林 麻利子\*(京大・院理; 現所属: 松江地方気象台)

## 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。

これまで、PNA 領域の潜在的な予測可能性 (potential predictability) は、例えば、Reichler and Roads (2003, 2004) らにより、北半球の他の地域に比べ高いことが示されている。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、これら過去の研究では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が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た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。

### 2.2 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 再解析データの 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: 120°E-60°W, 20°N-90°N, 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: 0°E-360°E, 30°S-30°N, 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、 $\sqrt{(pc1)^2 + (pc2)^2}$  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の 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 (図 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 の振幅が気候学的な標準偏差 ( $\sigma$ ) 未満の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  $1\sigma$  以上の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分かる. また, 図示しないが, 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 (e.g., Mori and Watanabe, 2008; 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.

そこで次に、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うまく行えると期待できる.

そこで、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.

条件 1: 予報 9 日以内に解析値の PNA index の絶対値が  $1\sigma$  を越える日が 5 日以上続く.

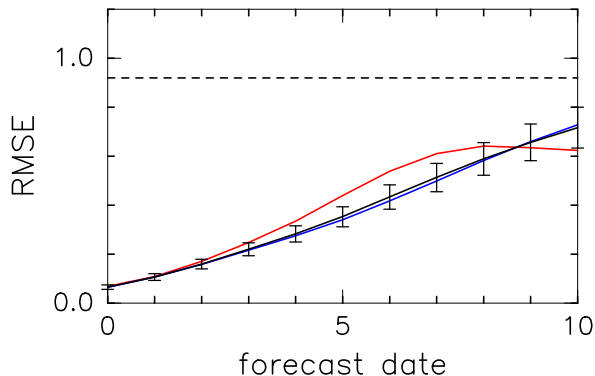


図 1: PNA index の予測誤差と初期日における MJO の振幅との関係. 赤線は MJO の振幅が予報初期日に  $1\sigma$  以上の予報事例の平均 (18 事例), 青線は  $1\sigma$  未満の予報事例の平均 (132 事例), 黒線は全ての予報事例の平均 (150 事例). エラーバーはブートストラップ法により評価した平均値の取り得る値の範囲 (信頼区間 99%) を表す. 点線は PNA index の標準偏差を表す. 横軸は予報期間 (日)

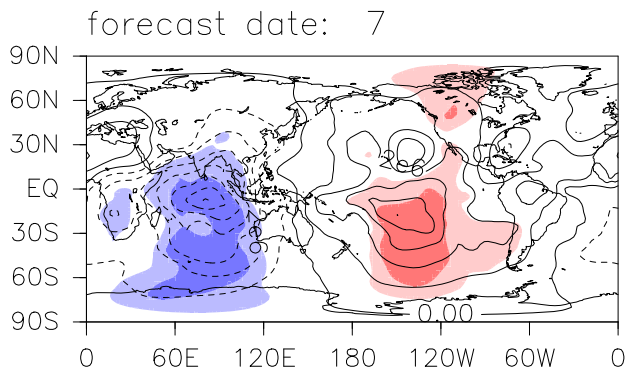


図 2: PNA イベントを含む予報事例で求めた、PNA index の 7 日目予測誤差に回帰した予報初期日における 7 日移動平均  $\chi^2_{200}$  偏差 (コンター). 点線は発散域を示す. コンター間隔は  $1.0 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , 薄い陰影は信頼度 95% 以上の領域を, 濃い陰影は信頼度 99% 以上の領域を表す.

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  $1\sigma$  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で，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する．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の予測誤差の大きさにMJO が果たす役割り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( $\chi_{200}$ )偏差との関係を回帰分析により調べた．図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 $\chi_{200}$ 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の大きな構造を持ち，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．図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)を用いて図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予報初期日の200hPa発散場偏差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( $\mu^*$ )と標準偏差( $\sigma^*$ )を用いて，以下のように事例を区別して解析した．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( $\psi_{200}$ )偏差と，それに伴う波活動度フラックスの時間発展を図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，図4に予測誤差の大きな事例における， $\chi_{200}$ 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．図3と比較すると，これらの収束・発散領域は， $\psi_{200}$ 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．また図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る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， $30^{\circ}\text{N}$ ， $0^{\circ}$ – $60^{\circ}\text{E}$ 付近に存在する収束と発散が弱まり，図3では，この付近のエネルギー伝播も弱まっている．実際， $30^{\circ}\text{N}$ ， $0^{\circ}$ – $60^{\circ}\text{E}$ 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

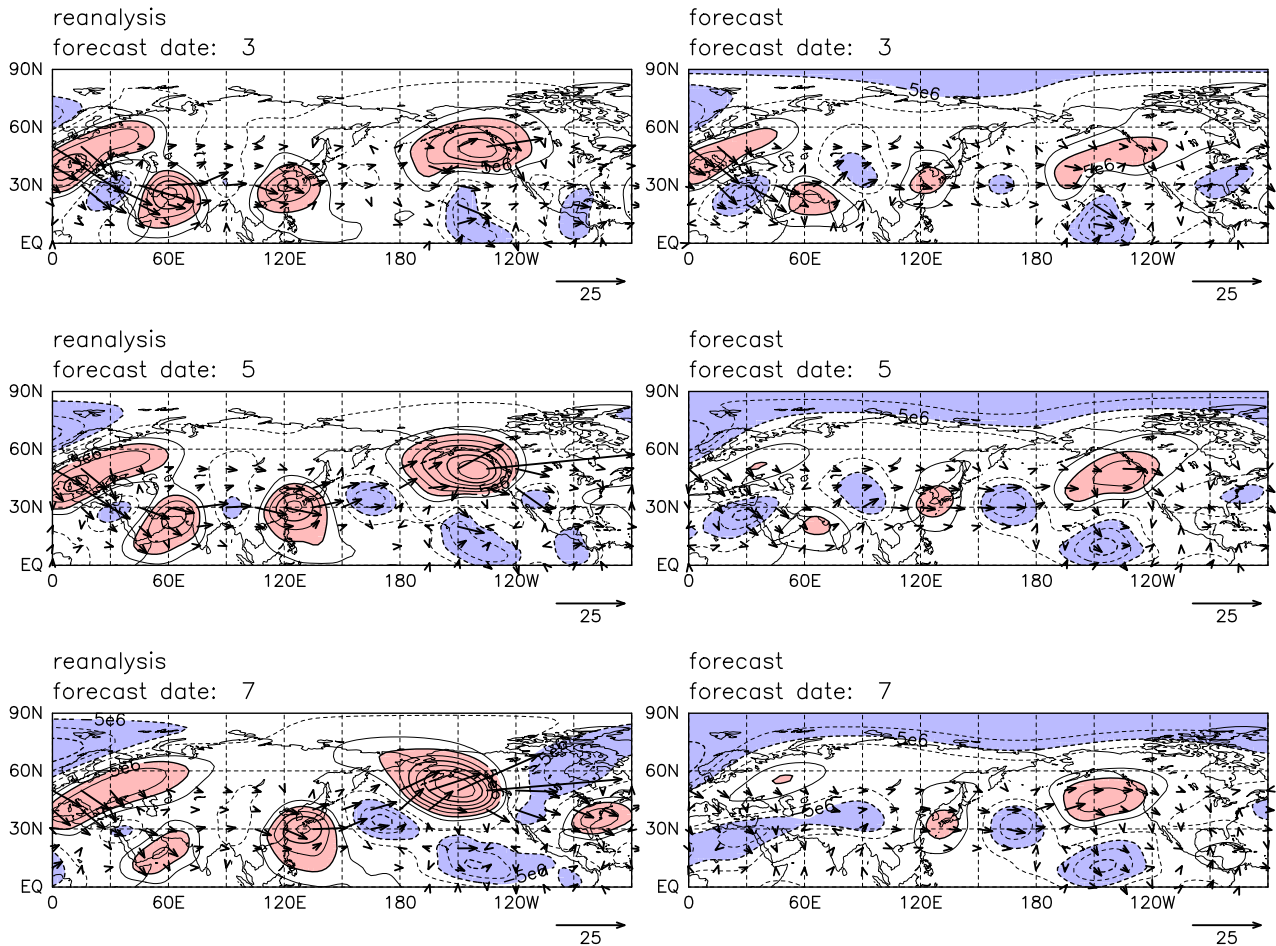


図 3: 予報 7 日目の PNA index 予測誤差が大きく、負の PNA イベントを予測した事例で平均した  $\psi_{200}$  偏差 (コンター) . コンター間隔は  $2.5 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  . 偏差の大きさが  $5 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  以上の領域を色塗りした .  $0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  のコンターは省略した . ベクトルは同じ事例で平均した偏差場に伴う波活動度フラックス ( $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$ ;  $60^\circ \text{N}$  以北は図示しない) . ベクトルの大きさを右下隅の矢印で示す . 左列が解析値, 右列が予報値. 上段から, 予報 3 日目, 5 日目, 7 日目の値を示す .

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,  $60^\circ \text{W}$ – $60^\circ \text{E}$  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  $30^\circ \text{N}$ ,  $0^\circ$ – $60^\circ \text{E}$  付近に存在する収束と発散の弱まりの直接の原因とも考えられる .

そこで, 図 5 に, 赤道上での  $\psi_{200}$  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  $60^\circ \text{W}$  から  $60^\circ \text{E}$  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  $6^\circ/\text{day}$  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,  $40^\circ \text{N}$ ,

$30^\circ \text{E}$  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者で, 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について詳細に検討した . 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



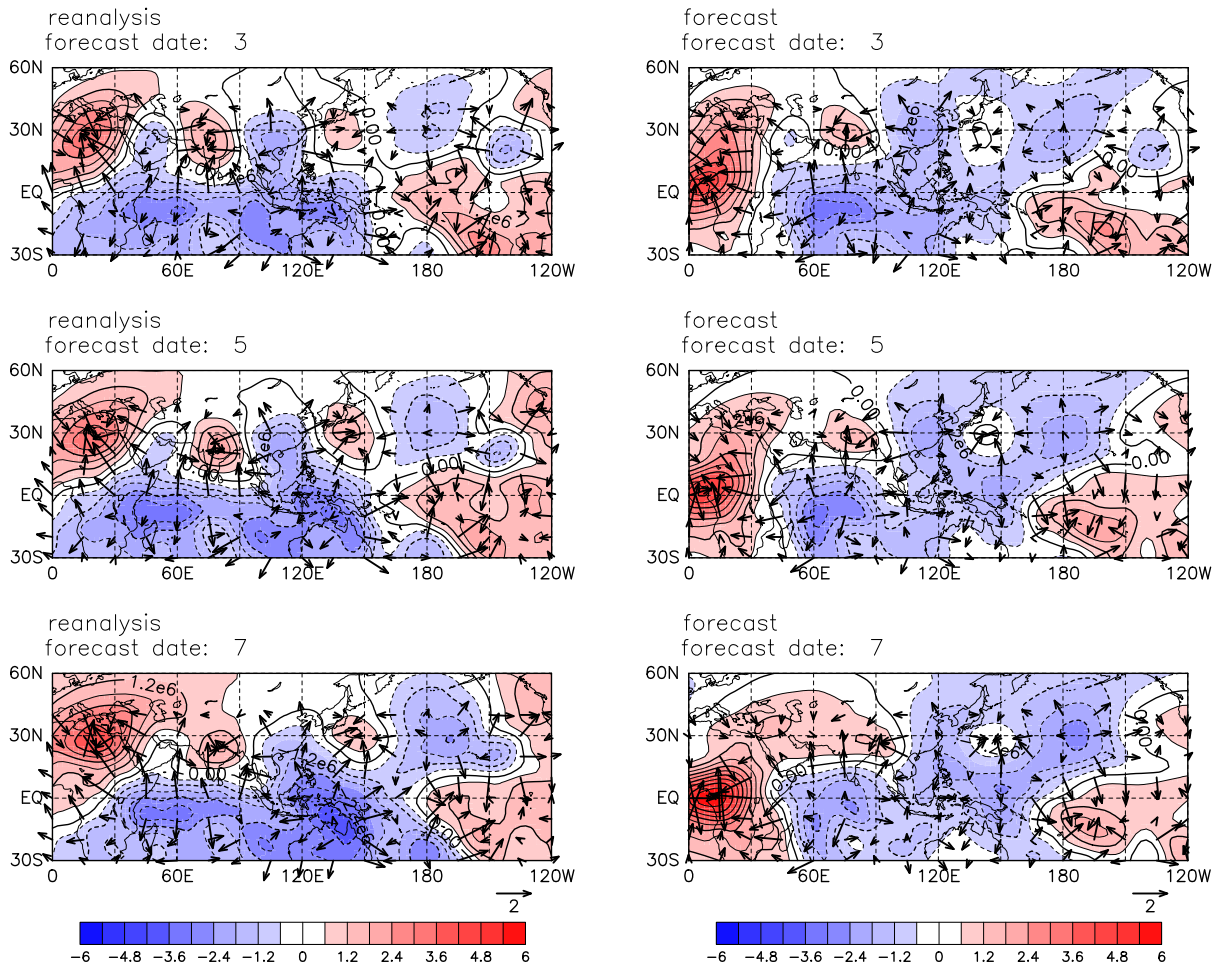


図 4: 図 3 と同じ, ただし,  $\chi_{200}$  偏差 (コンター; コンター間隔は  $0.6 \times 10^6 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ .) と,  $\psi_{200}$  偏差 (ベクトル; 単位は  $\text{ms}^{-1}$  で  $45^\circ \text{N}$  以北は省略した).  $\chi_{200}$  が負の値は発散を表す. 発散風の大きさを右下隅のベクトルで示す.

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 の予測誤差は大きいことが示された. また, 予報初期日に対流活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, 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図解析を行った. 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

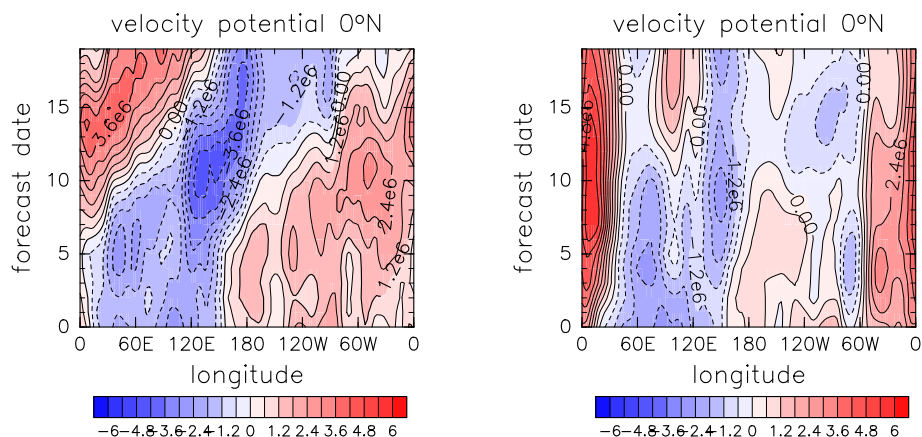


図 5: 予報 7 日目の PNA index 予測誤差が大きく、負の PNA イベントを予測した事例で平均した  $\chi_{200}$  偏差の赤道上での経度-予報時間断面図．コンター間隔は  $0.6 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ． $\chi_{200}$  が負の値は発散を表す．左図が解析値，右図が予測値．

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 パターンの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，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. Applied Met.*, **18**, 1016–1022.
- Feldstein, S. B., 2002: Fundamental mechanisms of the growth and decay of the PNA teleconnection pattern. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **128**, 775–796.
- 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.
- Palmer, T. N., 1988: Medium and extended range predictability and stability of the Pacific/North American mode. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **114**, 691–713.
- Reichler, T., and J. O. Roads, 2003: The role of boundary and initial condition for dynamical seasonal predictability. *Nonlinear Proc. Geophys.*, **10**, 211–232.
- Reichler, T., and J. O. Roads, 2004: Time-Space Distribution of Long-Range Atmospheric Predictability. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 249–263.