

成層圏突然昇温が北半球環状モードに与える影響 —2009年・2010年冬季の比較解析—

長田翔*・向川均・黒田友二**

* 京都大学大学院理学研究科

** 気象研究所

要 旨

2009年、2010年冬季における北半球環状モード (Northern hemisphere Annular Mode: NAM) の予測可能性変動を、気象庁1ヶ月アンサンブル予報データ、および6時間毎のハインドキャストデータを用いて調べた。特に、NAMの極性と振幅を表すNAM指数の予測可能性変動と、成層圏突然昇温 (Stratospheric Sudden Warming: SSW) との関連に着目して解析を行った。その結果、成層圏におけるNAM指数の予測可能性はSSWの発生と密接に関連していることがわかった。さらに、アンサンブル予報における対流圏NAM指数の予測スプレッドは、SSW発生前に比べ発生後で小さくなる傾向にあることが示された。これらの事実は、SSWがNAM指数の予測可能性に影響を与えていることを示唆している。

キーワード: 北半球環状モード, 予測可能性, アンサンブル予報

1. はじめに

北半球冬季の中高緯度大気循環変動での卓越変動モードである北半球環状モード (Northern hemisphere Annular Mode: NAM) は、中高緯度における異常気象の主要因であり、そのメカニズムや予測可能性を解明することは重要な課題である。

Baldwin and Dunkerton (1999, 2001) は、NAMの極性と振幅を表すNAM指数が、成層圏突然昇温 (Stratospheric Sudden Warming: SSW) に伴い成層圏で大きな負の値となり、その後10日から60日程度の時間スケールで、負のNAM指数が成層圏から対流圏へと下方伝播する傾向にあることを示している。このため、対流圏NAM指数の予測可能性もSSWの影響を受けることが考えられる。実際、Mukougawa et al. (2009) は、成層圏に負のNAM偏差 (東風偏差) が存在するときは、正のNAM偏差 (西風偏差) が存在するときと比べ、上部対流圏NAM指数の予測精度が有意に改善されることを明らかにした。しかしながら、SSW前後におけるNAM指数の予測精度の違いについて解析された事例は少なく、さらに、対流圏NAM指数の予測可能性が、SSWの振舞いにどのように依存しているのかは明らかではない。そこで本研

究では、SSWが異なる振舞いを示した2009年と2010年に着目し、気象庁1ヶ月アンサンブル予報結果と、気象研究所/気象庁統一大気大循環モデル (AGCM) による予報実験 (以下、MRI/JMA予報実験) 結果を用いて、両SSW前後でのNAM指数の予測可能性変動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

再解析データとして、1979年1月から2010年5月までのJRA-25/JCDASデータ (水平格子間隔は1.25度、鉛直層は1000 hPaから0.4 hPaまでの23層) を用いた。気候値は、1979年1月から2008年12月までの日々の平均値に、60日低周波フィルター (Duchon, 1979) を施した値で定義した。また、予報データとして、2009年と2010年の冬季 (1月から2月) を初期値とする気象庁1ヶ月アンサンブル予報データを用いた。この予報は毎週水曜と木曜に実施され、アンサンブルメンバー数は25 (1個のコントロールラン、24個の摂動ラン) である。初期摂動はBGM (Breeding of Growing Mode) 法によって作成されている。この1ヶ月予報は週に2回しか実施されないため、これを補完するた

めに、MRI/JMA予報実験結果を利用した。この予報実験では、積分初期時刻を6時間毎に与え、それぞれ摂動を含まない初期値から積分を行った。また、LAF (Lagged Average Forecast) 法に基づき、毎日18UTCから直近の5日間を初期時刻とする20個の予報実験結果を用いてアンサンブルメンバーを毎日構成した。なお、気象庁1ヶ月アンサンブル予報およびMRI/JMA予報実験では、海面水温偏差をその初期値偏差で固定して与えている。

2.2 NAM指数

本研究では、1979年11月から2008年4月までのJRA-25/JCDASデータセットを用いて、以下のようにしてNAMパターンを定義した。まず、11月から4月までの北緯20度以北の各気圧高度面における月平均高度偏差場に対してEOF解析を行った。その結果得られるEOF第1主成分に対して回帰した各気圧面での高度偏差をNAMパターンと定義した。このようにして定義したNAMパターンに日々の高度偏差場を以下のように射影し、各気圧面 l におけるNAM指数 ($NAM_l(t)$) を求めた。

$$NAM_l(t) = \frac{(\mathbf{Z}A_l(t) \cdot \boldsymbol{\psi}_l)}{(\boldsymbol{\psi}_l \cdot \boldsymbol{\psi}_l)} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{Z}A_l(t)$ は高度 l における日々の高度偏差場、 $\boldsymbol{\psi}_l$ は気圧面 l でのEOF第1主成分に対する月平均高度偏差場の回帰場、また、 $(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})$ はベクトル \mathbf{a} と \mathbf{b} との内積を示す。NAM指数の値が正(負)のとき、極渦が強い(弱い)、つまり北緯60度付近の帯状風が西(東)風偏差となるように、その符号を決めた。本研究ではNAM指数の低周波変動成分に着目するため、NAM指数に7日移動平均を施した値を用いて解析を行った。ただし、予報2日目までは、予測値のみでは予測値の7日移動平均が計算できないため、初期値より前の期間について解析値を用いて移動平均値を求めた。

2.3 2乗平均スプレッドと2乗平均誤差

NAM指数の予測スキルの評価には、以下の式で定義される2乗平均スプレッド (Mean Square Spread: MSS) と2乗平均誤差 (Mean Square Error: MSE) を用いた。

$$MSS \equiv \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (e_i^j(t) - \overline{e_i(t)})^2 \quad (2)$$

$$MSE \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\overline{e_i(t)})^2 \quad (3)$$

ここで、 $e_i^j(t)$ は i 番目のアンサンブル予報における j 番目のメンバーの予測誤差、 $\overline{e_i(t)}$ は i 番目の予報におけるアンサンブル平均の予測誤差、 M は各アンサンブル予報のメンバー数(気象庁1ヶ月アンサンブル予報データでは $M=25$ 、MRI/JMA予報実験データでは $M=20$)、 N はアンサンブル予報の数をあらわす。一般に、スプレッドが大きければ予測の信頼度が低く、小さければ高い。また、誤差が大きければ予測の精度が低く、小さければ高いことをあらわしている。MSS及びMSEは、2000年から2010年までの各冬季(11月から4月)におけるNAM指数の標準偏差の2乗で規格化した。

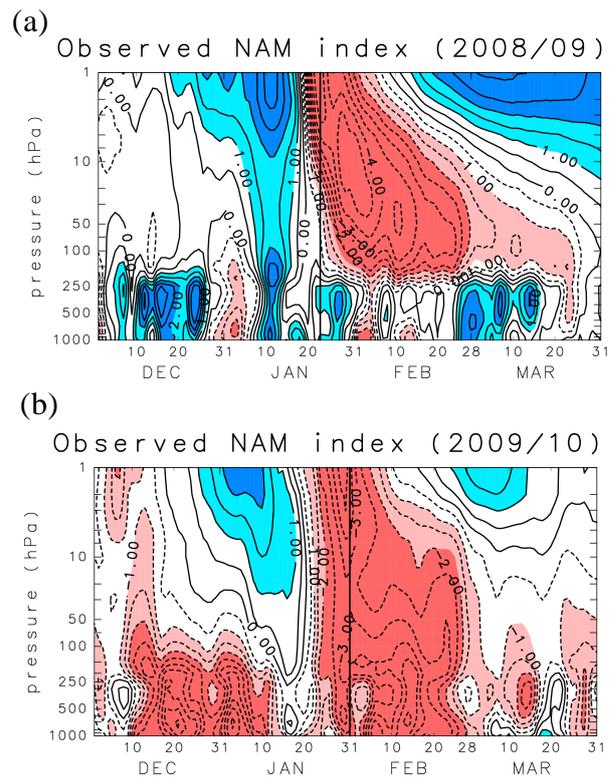


Fig. 1 Time-height cross section of NAM index during Dec. 2008 - Mar. 2009 (a) and Dec. 2009 - Mar. 2010 (b). Contour interval is 0.5. Regions where the absolute value of the NAM index is larger than 2.0 (1.0) is heavily (lightly) shaded. The vertical solid lines indicate the date when each SSW becomes mature phase.

3. 解析結果

まず、2009年と2010年の各冬季における成層圏突然昇温 (SSW) と、NAM指数変動について調べた。2009年では1月下旬に波数2型のSSWが発生した。Fig. 1a は、2008年12月から2009年3月の期間における

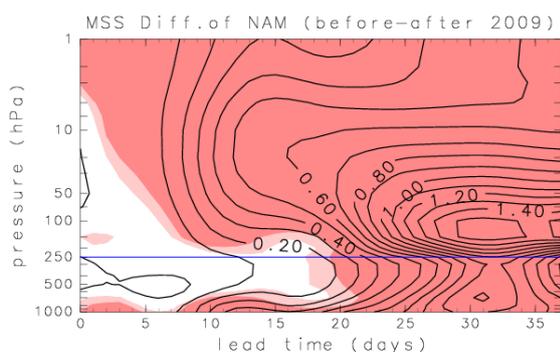
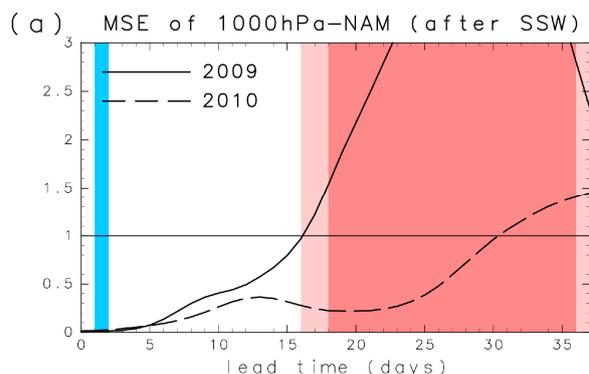


Fig. 2 Lead time-height cross section for the difference between MSS of the NAM index for forecasts starting before the mature phase of the SSW and that for forecasts starting after the mature phase of the SSW occurring in 2009. Contour interval is 0.1. Regions where the difference is statistically significant at 99 (95)% by Student's t-test are shaded heavily (lightly).

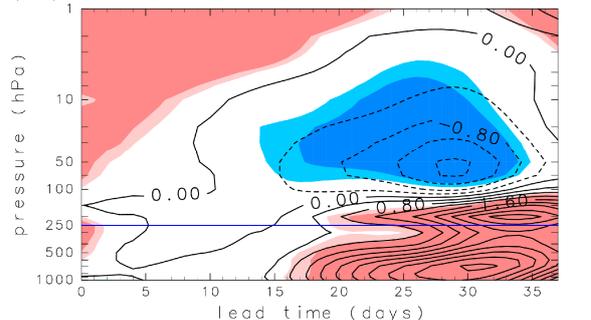
NAM指数 (解析値) の時間高度断面図を示している。SSWに伴い、成層圏では顕著な負のNAM指数を観測したが、負の値は対流圏にまでは下方伝播しなかった。一方、2010年の1月下旬には波数1型のSSWが発生し、SSWの後、成層圏と対流圏でNAM指数は大きな負の値となった (Fig. 1b)。以上より、2009年と2010年とでSSWは異なる振舞いを示していたことがわかる。

次に、これら冬季におけるNAM指数変動の予測可能性について解析を行った。本研究では2つの予報データを用いて解析を行ったが、これらの予報データではモデル及び初期摂動の作成手法が異なるため、得られた結果は必ずしも両者で一致しなかった。よって、以下では2つのデータで共通して得られた特徴についてのみ示す。また、以下の図では、MRI/JMA予報実験結果から得られた解析結果を示す。

はじめに、2009年と2010年とで同様に見られた特徴を示す。Fig. 2は、2009年のSSWの最盛期より前の日を初期日とする予報で平均したMSSから、SSW最盛期後を初期日とする予報で平均したMSSを引いた値の時間高度断面図である。正の値は、SSW前の予報に比べ、SSW後の予報でNAM指数予測スプレッドが小さいことを示している。また両者の差が統計的に有意な領域に陰影を施した。有意性はt検定に基づく。このFig. 2より、SSW前の予報に比べて、SSW後の予報は成層圏及び対流圏でNAM指数の予測スプレッドが有意に小さいことがわかる。これと同様の結果が2010年でも得られた。つまり、SSW後の予報は、SSW前の予報に比べ、成層圏及び対流圏で予測信頼度が有意に高いことが示された。



(a) MSE of 1000hPa-NAM (after SSW)



(b) MSE(afterSSW:2009) - MSE(afterSSW:2010)

Fig. 3 Time evolution of MSE of 1000-hPa NAM index averaged for forecasts starting after the mature phase of the SSW. The solid (broken) line denotes that for 2009 (2010) winter. The time intervals when the difference between the two MSEs is statistically significant at 99 (95)% are heavily (lightly) shaded. (b) Lead time-height cross section for the difference between MSE of the NAM index averaged for forecasts after the mature phase of the SSW in 2009 and that in 2010. Contour interval is 0.4, and statistically significant regions are shaded in the same format as in (a).

このことは、SSW後は対流圏から成層圏への惑星規模波の上方伝播が弱まることの原因であると考えられる。すなわち、惑星規模波の上方伝播が弱まると成層圏では放射過程が支配的となり、帯状風の時間変動も小さくなるため、NAM指数の時間変動も小さくなる。従って、NAM指数の予測スプレッドもSSW最盛期以降は小さくなると思われる。

次に、2009年と2010年とで有意に異なる特徴について示す。Fig. 3aは、各冬季におけるSSW後の予報で平均した1000 hPaでのNAM指数のMSEの時間発展を示している。実線が2009年、破線が2010年である。この図から、2009年にはリードタイム16日でMSEが1.0 (NAM指数の気候学的分散) を上回るのに対し、2010年にはリードタイム30日付近でMSEが1.0を上回っている。従って、2010年は2009年に比べて、1000 hPa NAM指数の予測可能な期間が約2週間程度長か

ったことがわかる。さらに、リードタイム16日目以降における両者の差は統計的に有意である。一方、Fig. 3b に、この両者の差の時間高度断面図を示す。この図から、リードタイム16日以降では、2010年は2009年に比べ、1000 hPaから対流圏上層におけるNAM指数のMSEが有意に小さいことがわかる。つまり、SSWの後の期間で、成層圏のみが負のNAM偏差となった2009年に比べ、対流圏まで負のNAM偏差となった2010年における対流圏NAM指数の予測精度が有意に高かったことがわかる。

4. まとめ

成層圏突然昇温 (SSW) が北半球環状モード (NAM) の予測可能性に与える影響を調べるため、2009年と2010年冬季の気象庁1ヶ月アンサンブル予報結果、及び気象研究所/気象庁統一AGCMを用いた予報実験結果を用いて解析を行った。特に、SSW前後でのNAM指数の予測可能性変動について詳しい解析を行った。

まず、JRA-25/JCDASデータセットを用いた解析の結果、2009年では1月下旬に波数2型のSSWが発生し、おもに成層圏のみで顕著な負のNAM偏差となったことがわかった。一方、2010年では1月下旬に波数1型のSSWが発生し、負のNAM偏差は対流圏にまで広がった。

次に、予報データを用いて各冬季におけるNAM指数の予測可能性について解析を行った。まず、SSW後を初期値とする予報は、SSW前を初期値とする予報に比べてNAM指数の予測スプレッドが有意に小さいことがわかった。この結果は Mukougawa et al. (2009) の結果と整合的である。

また、SSW後の予報における対流圏NAM指数の予測誤差は、2009年に比べ2010年で有意に小さいことがわかった。このことから、SSWの振舞いが異なる2009年と2010年とで、SSWが対流圏NAM指数の予測可能性に異なる影響を与えている可能性が示唆される。

対流圏NAM指数変動は、成層圏循環以外に、全球

の海面水温分布や、海氷・積雪分布などの陸面状態等の要因にも影響される。従って、今後は、これらを気候値で与えた予報実験、あるいは、成層圏を解像しないモデルでの予報実験を行い、SSWが対流圏NAM指数の予測可能性に与える影響についてさらに解析を進めていく必要がある。

謝 辞

本研究ではJRA-25/JCDASデータセットを用いた。このデータセットは、気象庁、および電力中央研究所による、JRA-25長期再解析プロジェクトにより提供された。また、本研究で使用した気象庁1ヶ月アンサンブル予報データセットは、「気象研究コンソーシアム」の枠組みにより、気象庁より提供された。図の作成には、地球流体電脳ライブラリを用いた。開発者の方々に深く感謝する。

参考文献

- Baldwin, M.P. and Dunkerton, T.J. (1999): Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere, *J. Geophys. Res.*, Vol. 104, pp. 30937-30946.
- Baldwin, M.P. and Dunkerton, T.J. (2001): Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes, *Science*, Vol. 294, pp. 581-584.
- Duchon, C.E. (1979): Lanczos filtering in one and two dimensions, *J. Applied Meteor.*, Vol. 18, pp. 1016-1022.
- 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, pp. 861-870.

**Predictability of Stratospheric Sudden Warmings and Northern Annular Mode
--Intercomparison between 2009 and 2010 Winters--**

Sho NAGATA*, Hitoshi MUKOUGAWA and Yuhji KURODA**

* Graduate School of Science, Kyoto University

** Meteorological Research Institute

Synopsis

Predictability of the Northern hemisphere Annular Mode (NAM) during 2009 and 2010 winters is examined using JMA (Japan Meteorological Agency) 1-month ensemble forecast dataset and a series of hindcast experiment conducted every 6 h. In particular, we focus on the dependence of the variation of the NAM index predictability on the Stratosphere Sudden Warming (SSW). It is found that the predictability of the stratospheric NAM index is intimately related to the occurrence of the SSW. Moreover, the ensemble spread of the tropospheric NAM index after the SSW becomes smaller than that before the SSW. These facts indicate the influence of the SSW to the predictability of the NAM index.

Keywords: Northern hemisphere Annular Mode, predictability, ensemble forecast