

アンサンブル予報データを用いた ブロッキング形成期の予測可能性に関する解析

竹村 和人*・向川 均

* 京都大学大学院理学研究科

要 旨

2007年12月に北大西洋～ヨーロッパ域で発生したブロッキングの形成期における予測可能性変動を、JRA25再解析/JCDASデータセット、および気象庁週間アンサンブル予報データを用いて調べた。その結果、このブロッキングの形成日以前を初期日とする予報では、ブロッキング強度の予測可能性が相対的に低くなることが示された。次に、Enomoto et al. (2007) の簡易感度解析、および300hPa高度場のスプレッドの解析より、高周波変動成分に比べ低周波変動成分が、このブロッキング形成時の予測可能性に大きな影響を与えていることが示された。さらに、高周波変動成分に比べ、低周波変動成分に伴う渦度フラックスの収束発散による高度場変化傾向の予測が、ブロッキング強度の予測により有意に関連していることが示された。

キーワード : ブロッキング, 予測可能性, アンサンブル予報

1. はじめに

中緯度域の上空では、偏西風と呼ばれる、強い西風が卓越している。しかしながら、ときとして偏西風の南北蛇行が大きく発達し、偏西風によって東進する総観規模擾乱がブロックされた状態が、数日～数週間、長い場合には1ヶ月以上持続することがある。このような状態をブロッキングと呼ぶ。ブロッキングは、その強い持続性により、発生域に高温、乾燥、低温、豪雪といった天候を持続させる。このため、ブロッキングの形成の予測は、中長期予報における最も重要な問題の1つである。しかしながら、先行研究により、ブロッキング形成期には予報誤差が大きくなることが指摘されている(例えば、Kimoto et al., 1992)。また、Tibaldi and Molteni (1990) や、Mauritsen and Källén (2004) は、数値予報モデルを用いて、ブロッキング形成の予測実験を行い、ブロッキングが形成する数日前からの予測において、ブロッキングの発生頻度が過小に予測される傾向があることを指摘している。しかしながら、ブロッキングの形成期における予報誤差の増大プロセスや、その原因は、完全に解明されてはい

ない。

一方、ブロッキングの形成メカニズムを調べた先行研究も多く存在する。これらの先行研究によって指摘された、ブロッキングの代表的な形成メカニズムを以下に示す。

[1] 低周波変動によるブロッキングの形成:

準定常ロスビー波のエネルギー伝播が、西風の弱い領域において局所的に阻害され、波活動が収束、蓄積することによって、ブロッキングが形成される(Nakamura et al., 1997)。

[2] 高周波変動によるブロッキングの形成:

総観規模擾乱に伴う渦度フラックスの収束発散による、低周波変動成分へのフィードバック効果によって、ブロッキングが形成される(Nakamura et al., 1997; Nakamura and Fukamachi, 2004)。

[3] 低/高周波変動の相互作用によるブロッキングの形成:

ブロッキング形成域の上流側において、低気圧が急激に発達することによって、その下流側で、低緯度側の低渦位大気が北向きに移流され、ブロッキング

が形成される (Lupo and Smith, 1995)。

これらの研究は、ブロッキングの形成が、複数の周期帯の大気運動が関与する複雑な力学プロセスであることを示している。

本研究では、JRA25 再解析/JCDAS データセット、および気象庁週間アンサンブル予報データを用いて、2007 年 12 月に北大西洋～ヨーロッパ域で発生したブロッキングの形成期における予測可能性変動を詳細に調べた。また、この事例について、先行研究で示された低周波/高周波変動によるブロッキング形成メカニズムのいずれが、ブロッキング形成期の予測可能性により大きな影響を与えるのかを調べた。

2. 使用データと解析手法

2.1 使用データ

1979 年 1 月から 2009 年 2 月までの JRA25 再解析/JCDAS データ (水平解像度: 1.25° , 鉛直層数: 1000 hPa から 0.4 hPa までの 23 層, 以下, 解析値), および, 2007 年 11 月から 2009 年 2 月までの気象庁週間アンサンブル予報データ (水平解像度: 1.25° , 鉛直層数: 1000 hPa から 100 hPa までの 10 層, 以下, 予測値) を用いた。ここでは、気候値を 1979 年 1 月～2006 年 12 月の日々の平均値に 60 日の low-pass filter (Duchon, 1979) を施した値で定義した。また、予測値の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含む 50 個の摂動ランの、合計 51 個であり、毎日 9 日間 (216 時間) の予測が実施されている。なお、以下の解析では、解析値ならびに予測値の日平均値を用いた。また、両データについて、ブロッキングや準定常ロスビー波列に対応した低周波変動成分を抽出するために、各変数に 5 日移動平均を施した値を用いた。一方、移動性擾乱に対応した高周波変動成分を抽出するために、元の日平均値より 5 日移動平均値を引いた値を用いた。ただし、予測値について、予測 1 日目までは予測値のみでは 5 日移動平均が計算できないため、必要となる初期値よりも前の期間については、解析値 (コントロールランの初期値で代用) を用いて、移動平均値を求めた。

2.2 ブロッキングの検出方法

解析するブロッキング事例の検出には、Pelly and Hoskins (2003) の力学的対流圏界面上の温位勾配の逆転を示すブロッキングの指標を用い、2007 年 12 月以降の冬季 (12 月～2 月) に発生した事例を検出した。以下では、検出した事例のうち、ブロッキング高気圧

に伴う高度場偏差が最も大きな値を示した、2007 年 12 月に北大西洋～ヨーロッパ域で発生したブロッキング事例に着目する。

3. 解析結果

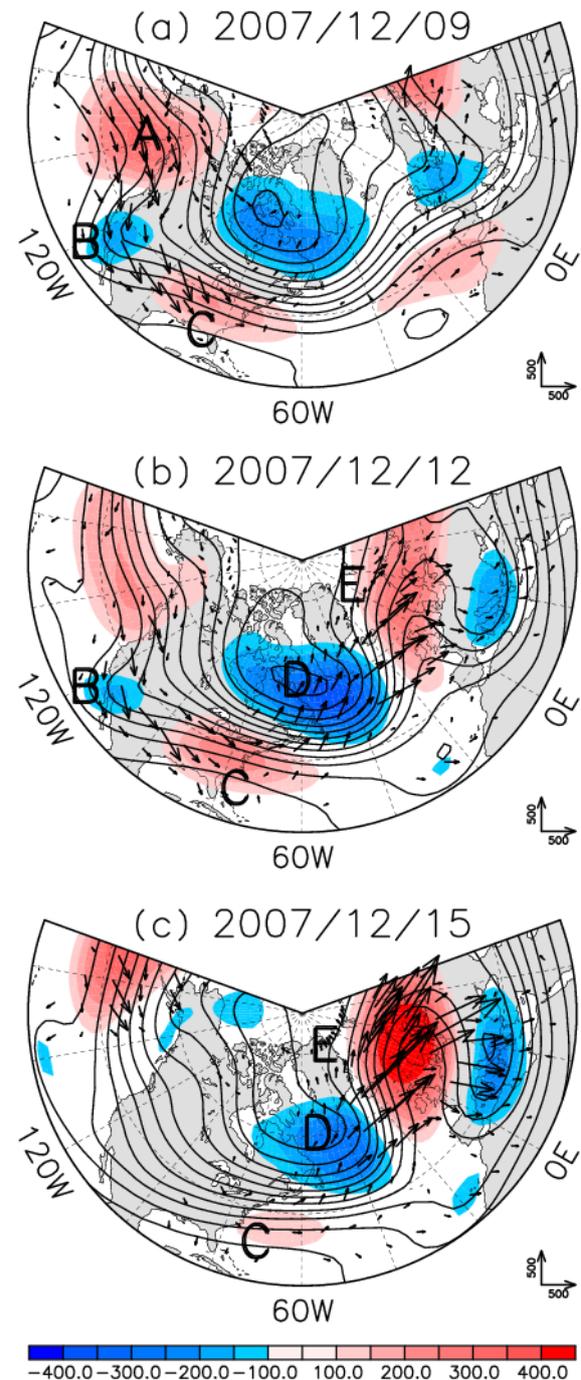


Fig. 1 Time evolution of 5-day mean 300-hPa height fields (contour interval: 120 m), anomalous fields (color shade), and the wave activity density flux (arrows: the reference arrow is $500 \text{ m}^2/\text{s}^2$) defined by Takaya and Nakamura (2001). (a) 9 Dec. (b) 12 Dec. (c) 15 Dec. 2007.

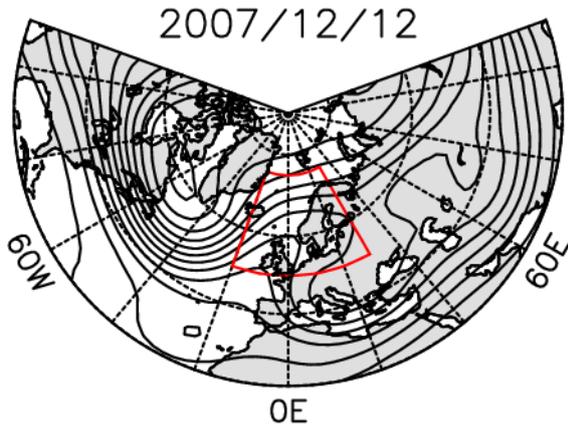


Fig. 2 Definition of blocking region (enclosed by a red curve). Contours show 5-day mean 300-hPa height field on 12 Dec. 2007.

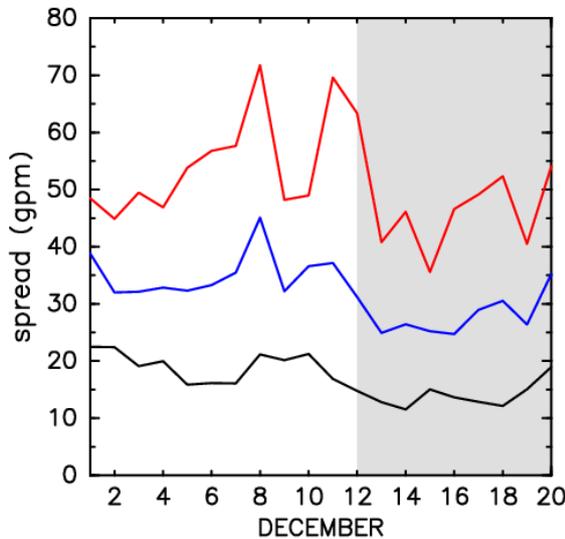


Fig. 3 Day 3 (black line), 5 (blue line), and 7 (red line) spread (m) of forecasted blocking strength from 1 Dec. through 20 Dec. 2007.

この事例におけるブロッキング形成期である、2007年12月9日から15日までの、3日ごとの300 hPa高度場の低周波変動成分を Fig. 1 に示す。気候値からの偏差場(カラー)に着目すると、北太平洋東部(図中の'A')～北米西部(図中の'B'), 東部(図中の'C')～北大西洋域(図中の'D')～ヨーロッパ域(図中の'E')にかけて、準定常ロスビー波列に対応した高度場偏差が見られ、そのエネルギー伝播が明瞭である(矢印)。これに伴って、ヨーロッパ域においてブロッキング高気圧(図中の'E')が形成、強化しているように見える。このことは、準定常ロスビー波のエネルギー伝播、すなわち低周波変動成分がブロッキングの形成に寄与していることを示している。以下では、ブロッキング高気圧が発現した12月12日をブロッキング形成日、プロ

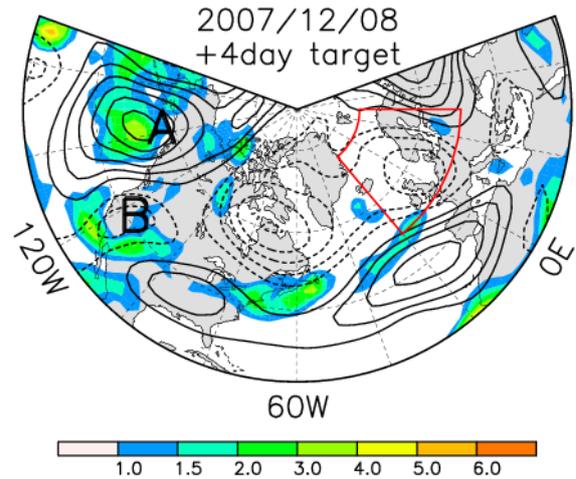


Fig. 4 High sensitivity regions on 8 Dec. 2007 (day-0) for the prediction of the day-4 blocking strength in the blocking region. The total energy is shown by color shades. Contour lines indicate 5-day mean 300-hPa height field on 8 Dec 2007.

ックキング高気圧が形成された $50^{\circ} \text{N} \sim 75^{\circ} \text{N}$, $20^{\circ} \text{W} \sim 30^{\circ} \text{E}$ をブロッキング領域 (Fig. 2 の赤線で囲った領域) と定義し、さらに、この領域における 300 hPa 高度場偏差の低周波変動成分の平均値をブロッキング強度と定義する。

はじめに、この事例におけるブロッキング形成の予測可能性を、ブロッキング強度のスペードを用いて評価する。ただし、スペードは、各アンサンブルメンバー間のばらつきの指標であり、次式で定義される:

$$S \equiv \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - F_m)^2} \quad (1)$$

ここで、 N はアンサンブルメンバー数、 F_i は各アンサンブルメンバーの予測値、 F_m はアンサンブル平均を表す。一般に、スペードが大きければ予測可能性は低く、小さければ高い。Fig. 3 に、12月1日から20日までの、初期日ごとのブロッキング強度予測値のスペードの変動を示す。この図より、ブロッキング形成日である12月12日よりも前の数日間、スペードが増大していることが分かる。この結果は、ブロッキング形成期に予報誤差が増大することを示した先行研究(例えば、Kimoto et al., 1992)の結果と整合的である。以下では、スペードが大きき値を示した12月8日を初期日とするアンサンブル予測に着目した解析を行う。

まず、Enomoto et al. (2007) の簡易感度解析により、予測4日目(12月12日:ブロッキング形成日)のブロッキング領域における摂動を最も大きくする、すな

わちブロッキング形成の予測に最も大きな影響を与えるような高感度領域を検出した。ここで、摂動はコントロールランからのずれで定義し、解析に用いるメンバーは、コントロールランおよび反相関（摂動の空間パターンは同じで、符号が逆）のメンバーを除く、互いに独立な 25 メンバーを用いた。また、摂動のノルムは乾燥全エネルギーで定義した。すなわち、予測 4 日目のブロッキング領域における乾燥全エネルギーノルムを最大にするような、高感度領域を求めた。

解析結果を Fig. 4 に示す。この図より、高感度領域（カラー）は、北太平洋東部～北米西部にかけて分布しており、その周辺には準定常ロスビー波列に伴う高度場偏差が発達していることが分かる。得られた高感度領域は、高/低気圧性偏差の中心付近（図中の'A'、'B'）とほぼ対応していることから、波列の振幅の違いが、ブロッキング形成の予測に大きな影響を与えた可能性が考えられる。

そこで以下では、準定常ロスビー波列に沿った 300 hPa 高度場のスプレッドの時間変動を調べる。ここで、波列に並行な線を、12 月 8 日から 15 日で平均した、300 hPa 高度場偏差の低周波変動成分（Fig. 5 のコンター）に伴う偏差の中心を結ぶ直線（Fig. 5 の赤点線）で定義した。この線に沿った、300 hPa 高度場のスプレッドの経度-時間断面図を Fig. 6 に示す。さらに、この期間における、波列に沿った 300 hPa 高度場偏差の低周波変動成分の経度-時間断面図を Fig. 7 に示す。Fig. 6 と Fig. 7 の比較より、初期日あるいは予測期間の前半には、 110° W 付近の低気圧性偏差の領域にスプレッドの大きな領域が存在するが、予測 4 日目（12 月 12 日）では、より下流側の 70° W 付近、予測 6 日目（12 月 14 日）では、 20° W 付近でスプレッドが拡大していることが分かる。また、予測 6 日目（12 月 14 日）のスプレッドの極大域は、検証領域（ 20° W～ 30° E）のやや上流側に位置しているが、検証領域でもスプレッドは拡大している。また、Fig. 7 からは、北太平洋東部域からヨーロッパ域への準定常ロスビー波のエネルギー伝播（Fig. 7 の黒点線の矢印）が見られる。一方、Fig. 6 からも、この群速度とほぼ一致する速度で、スプレッドの大きな領域も下流側へ伝播していることが分かる（Fig. 6 の黒点線の矢印）。さらに、スプレッドの極大域における、スプレッドの等値線は、各経度でほぼ時間軸（縦軸）と平行である。このことは、個々のスプレッドの極大域が経度方向に移流されるのではなく、準定常的であることを意味している。また、 150° W 付近、および 110° W 付近に見られるスプレッドの極大域は、準定常ロスビー波に伴う高/低気圧性偏差の

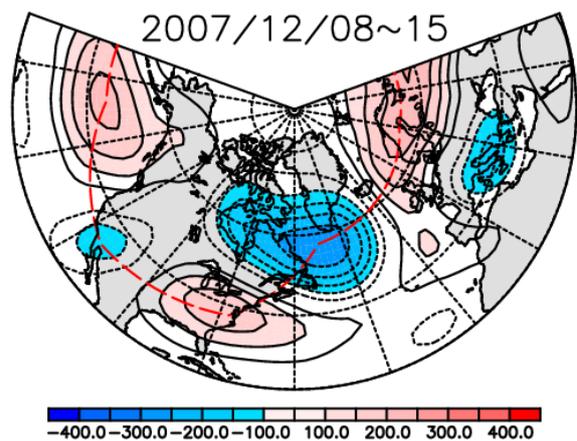


Fig. 5 5-day mean 300-hPa height anomaly averaged from 8 Dec 2007 through 15 Dec. 2007. The red dashed line indicates a path connecting each centers of the anomaly.

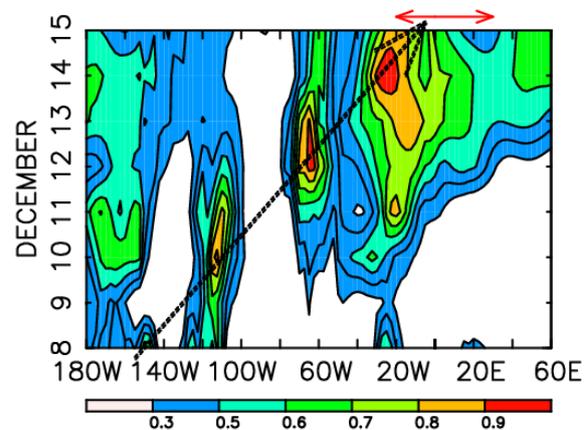


Fig. 6 Hovmöller diagram of the ensemble spread (color shade) of predicted 300-hPa height field along the red dashed line shown in Fig. 5 for the forecast starting from 8 Dec. 2007. The spread for each day has been normalized by its maximum value over the Northern Hemisphere (20° N- 90° N). A red two-headed arrow indicates the longitudinal domain of the blocking region.

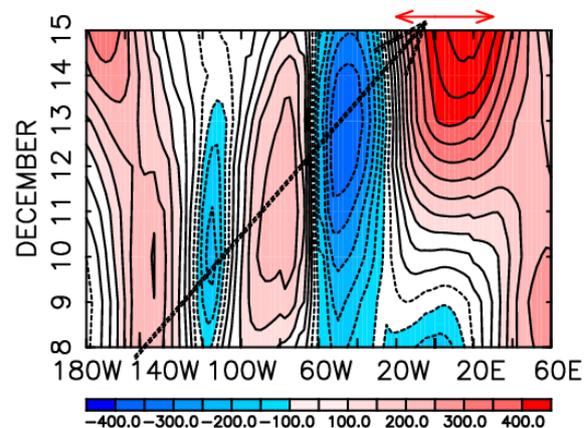


Fig. 7 As in Fig. 6, but for the 5-day mean 300-hPa height anomaly (m) from 8 Dec. 2007 through 15 Dec. 2007.

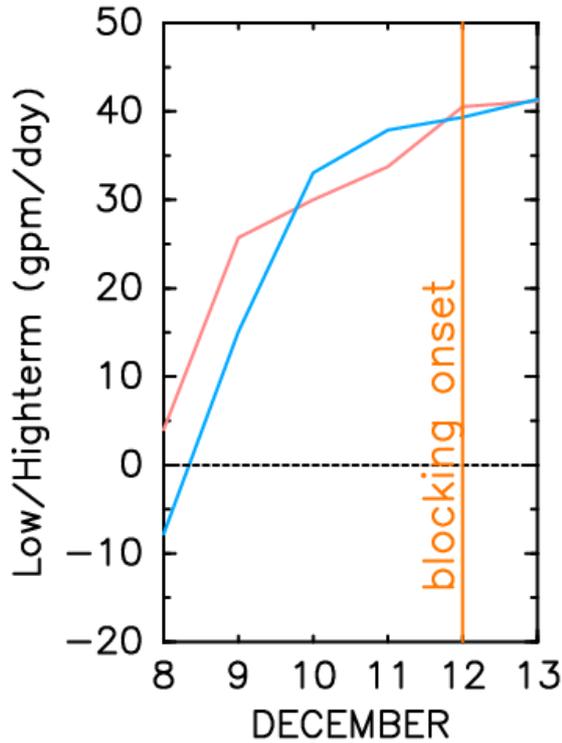


Fig. 8 Time evolution of the observed Low-term/High-term (m day^{-1} , aqua/pink line) averaged over the blocking region from 8 Dec. 2007 through 13 Dec. 2007. Orange line indicates the onset day of the blocking.

中心付近とほぼ対応している。このことは、これらのスプレッドの極大域は、予測された準定常ロスビー波の振幅の各メンバー間での差を示していると考えられる。一方、 70° W 付近、および 20° W 付近に見られるスプレッドの極大域の位置は、準定常ロスビー波の節の部分に対応している。このことから、準定常ロスビー波のエネルギー伝播の予測において、各メンバー間でロスビー波の位相に差が生じ、これに伴って、波の節にあたる領域でスプレッドが増大したと考えられる。以上の結果より、準定常ロスビー波のエネルギー伝播、すなわち低周波変動成分を予測できるか否かが、ブロッキング形成の予測に大きな影響を与えている可能性が示唆された。

さらに、ブロッキング強度の予測が、低周波/高周波変動成分のどちらにより鋭敏に依存するのかを、相関解析の手法を用いて定量的に調べた。この解析では、アンサンブルメンバー間で、低周波/高周波変動成分に伴う渦度フラックスの収束発散項（以下では、それぞれ Low-term/High-term と呼ぶ）の予測値と、予測されたブロッキング強度との相関を調べた。ここで、Low-term と High-term は次式で定義される。

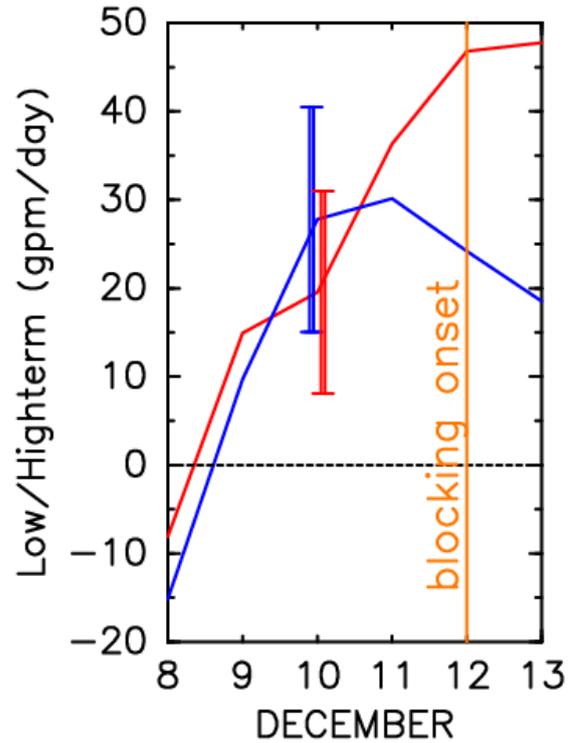


Fig. 9 As in Fig. 8, but for ensemble average of the predicted Low-term/High-term (m day^{-1} , blue/red line) for the forecast starting from 8 Dec. 2007. Blue (red) error bar on day-2 forecast (10 Dec. 2007) indicates ± 1 standard deviation from the ensemble average.

$$\begin{aligned} \text{Low-term} &= \nabla^{-2} \left[-\nabla \cdot (v_L' \zeta_L') \right]_L \\ \text{High-term} &= \nabla^{-2} \left[-\nabla \cdot (v_H' \zeta_H') \right]_L \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{v} (m/s) は水平風を表すベクトル、 ζ ($1/\text{s}$) は相対渦度の鉛直成分、 L (H) は変数の低 (高) 周波変動成分、プライム記号は偏差成分を表す。

12月8日から13日までの期間において、解析値に基づいて求められた、Low-term (水色線)、High-term (桃色線) の時間変動を Fig. 8 に示す。また、Fig. 9 に、12月8日を初期日とするアンサンブル予報を用いて求めた、Low-term (青線)、High-term (赤線) の初期日～予測5日目までのアンサンブル平均値を示す。ただし、ここで示した Low-term, High-term の値は、ブロッキング領域 ($50^\circ \text{ N} \sim 75^\circ \text{ N}$, $20^\circ \text{ W} \sim 30^\circ \text{ E}$) で式 (2) の値を平均した値である。はじめに、解析値の時系列 (Fig. 8) を見ると、予測期間である12月9日から12日の期間では、Low-term (水色線)、High-term (桃色線) はともに正のほぼ同じ値を示していることが分かる。このことは、低周波/高周波変動成分に伴う渦度フラックスの収束発散は、ブロッキング高気圧を

強める効果を持ち、その大きさがほぼ同じであることを示している。一方、12月8日からの予測2日目におけるアンサンブル平均値 (Fig. 9) は、Low-term (青実線)、High-term (赤実線) とともに正の値であるが、両者ともに解析値に比べてやや小さい。また、予測2日目における両者のスプレッドは、ほぼ同じであることが分かる (青色、赤色で示したエラーバー)。しかしながら、Low-term (High-term) の2日目の予測値と、ブロッキング強度の4日目 (12月12日: ブロッキングの形成日) の予測値との相関係数 R_L (R_H) を調べた結果、 R_L (= 0.77) は R_H (= 0.17) に比べ、かなり高い値を示していることが分かった。しかも、 R_L については、99% 以上の有意水準で統計的に有意である。この結果は、この事例において、ブロッキング強度の予測は、Low-term、すなわち低周波変動成分の予測に鋭敏に関連する可能性を示唆している。また、この結果は、上で述べた簡易感度解析、および 300hPa 高度場のスプレッドを用いた解析による定性的な結果と整合的である。

4. まとめ

本研究では、1979年から2009年までの31年間のJRA25再解析/JCDASデータ、および2007年11月以降の気象庁週間アンサンブル予報データを用いて、2007年12月に北大西洋～ヨーロッパ域で発生したブロッキングの形成期における予測可能性変動について詳しい解析を行った。特に、低周波/高周波変動のいずれが、ブロッキング形成期の予測可能性により大きな影響を与えるのかについて調べた。

はじめに、ブロッキング形成期の予測可能性変動を、気象庁週間アンサンブル予報データを用いて評価した。その結果、ブロッキング形成日以前の数日間を初期日とするアンサンブルメンバー間で、予測されたブロッキング強度 (本研究で定義した、ブロッキング高気圧の発達度合を表す指標) のスプレッドが増大していることが分かった。このことは、ブロッキング形成日以前を初期日とする数値予報では、ブロッキング強度の予測可能性が低いことを示している。また、この結果は、ブロッキング形成期における予報誤差の増大を指摘した先行研究 (たとえば、Kimoto et al., 1992) の解析結果と整合的である。

次に、スプレッドが大きな値を示した、ブロッキング形成日以前を初期日とするアンサンブル予報に着目した解析を行った。まず、ブロッキング形成の予測に最も大きな影響を与える高感度領域を、Enomoto et al.

(2007) の簡易感度解析により調べた。その結果、ブロッキング形成域の上流側の、北太平洋東部～北米西部付近に、高感度領域が検出され、その領域では、低周波変動成分と対応する、準定常ロスビー波列に伴う高度場偏差が発達していた。このことは、準定常ロスビー波列に伴う摂動が、ブロッキング形成の予測に大きな影響を与えている可能性を示している。さらに、300 hPa 高度場のスプレッドの時間発展を調べた結果、準定常ロスビー波の波活動度が伝播する方向に、群速度とほぼ一致する速度で、スプレッドの大きな領域が下流側に伝播する様子が捉えられた。また、スプレッドの極大域は、準定常ロスビー波列に伴う高度場偏差の中心付近、および波列の節にあたる部分に存在していた。このことから、各アンサンブルメンバー間での準定常ロスビー波列の振幅の差、および波列の位相の差によって、スプレッドが拡大したと考えられる。この結果より、準定常ロスビー波列の伝播をうまく予測できたか否かが、ブロッキング強度の予測に大きな影響を与えていることが考えられる。以上の結果は、ブロッキング形成の予測が、低周波変動成分の予測に鋭敏に関連することを定性的に示していると考えられる。

次に、ブロッキング形成の予測が、予測された低周波/高周波変動成分のどちらにより鋭敏に関連するかを、低周波/高周波変動成分に伴う渦度フラックスの収束発散量を用いた相関解析により調べた。具体的には、アンサンブルメンバー間で、低周波変動成分に伴う渦度フラックスの収束発散 (Low-term) の予測値と、ブロッキング強度の予測値との相関係数 R_L 、および、高周波変動成分に伴う渦度フラックスの収束発散 (High-term) の予測値と、ブロッキング強度の予測値との相関係数 R_H を求めた。その結果、 R_L (= 0.77) が、 R_H (= 0.17) に比べ大きく、また、統計的に有意な値を示していた。このことから、ブロッキング形成の予測が、Low-term、すなわち低周波変動成分の予測により鋭敏に関連することが示唆された。また、この結果は、簡易感度解析、および 300 hPa 高度場のスプレッドの解析による定性的な結果と整合的であった。

謝 辞

本研究では、JRA25再解析/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、JRA25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、気象庁週間アンサンブル予報データは、気象庁と (社) 日本気象協会の研究協力の枠組みである「気象研究コンソーシ

アム」を通して提供された。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

- Duchon, C. E. (1979): Lanczos filtering in one and two dimensions. *J. Applied Met.*, Vol. 18, pp. 1016-1022.
- Enomoto, T., Ohfuchi, W., Nakamura, H. and Shapiro, M. A. (2007): Remote effects of tropical storm Cristobal upon a cut-off cyclone over Europe in August 2002. *Meteorol. Atmos. Phys.*, Vol. 96, pp. 29-42.
- Kimoto, M., Mukougawa, H. and Yoden, S. (1992): Medium-range forecast skill variation and blocking transition: A case study. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 120, pp. 1616-1627.
- Lupo, A. R. and Smith, P. J. (1995): Planetary and synoptic-scale interactions during the life-cycle of a mid-latitude blocking anticyclone over North Atlantic. *Tellus*, Vol. 47A, pp. 575-596.
- Mauritsen, T. and Källén, E. (2004): Blocking prediction in an ensemble forecasting system. *Tellus.*, Vol. 56A, pp. 218-228.
- Nakamura, H. and Fukamachi, T. (2004): Evolution and dynamics of summertime blocking over the Far East and the associated surface Okhotsk high. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 130, pp. 1213-1233.
- Nakamura, H., Nakamura, M. and Anderson, J. L. (1997): The role of high- and low-frequency dynamics in blocking formation. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 125, pp. 2074-2093.
- Pelly, J. L. and Hoskins, B. J. (2003): A new perspective on blocking. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 60, pp. 743-755.
- Takaya, K. and Nakamura, H. (2001): A formulation of a phase-independent wave activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 58, pp. 608-627.
- Tibaldi, S. and Molteni, F. (1990): On the operational predictability of blocking. *Tellus.*, Vol. 42A, pp. 343-365

Predictability of the Onset of Atmospheric Blocking Events Examined by One-week Ensemble Forecast Dataset

Kazuto TAKEMURA* and Hitoshi MUKOUGAWA

* Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

The variation of predictability of the large-scale atmospheric motions during the onset period of atmospheric blocking event occurring over the Euro-Atlantic sector in December 2007 is examined using JRA25/JCDAS data set and one-week ensemble forecast data set provided by the Japan Meteorological Agency. First, it is found that the predictability before the onset of the blocking event is comparatively limited. Second, a simple sensitivity analysis and the time evolution of the spread indicate that low-frequency variations significantly affect the predictability of the occurrence of the blocking event in comparison with high-frequency variations. Finally, the predicted vorticity flux divergence by the low-frequency variation, rather than the high-frequency variation, is found to significantly correlate with the predicted blocking strength.

Keywords: blocking, predictability, ensemble forecast