

2010 年夏にヨーロッパ・ロシア域で発生した 持続的なブロッキングのメカニズムと予測可能性

藤井晶⁽¹⁾・黒田友二⁽²⁾・向川均

(1) 京都大学大学院理学研究科

(2) 気象研究所

要 旨

2010 年 6 月中旬から 8 月中旬にかけて東ヨーロッパ・ロシア西部で発生したブロッキングの形成・持続メカニズムと予測可能性について、大気の高周波変動成分に注目して解析を行った。気象研究所大気大循環モデル (MRI/JMA-AGCM) によるハインドキャスト実験データの解析から、7 月下旬にブロッキングがヨーロッパ域 (30°E 付近) からロシア域 (50°E 付近) に遷移する期間のブロッキングの予測精度が顕著に悪化することを定量的に示すことができた。さらに気象庁現業 1 ヶ月アンサンブル予報データを用いて 7 月下旬の大気循環場について解析した結果、ロシア域でのブロッキング強化は、ブロッキングのすぐ上流側に位置するイタリア上空のトラフの発達と有意に関連していることが明らかになった。このことは、7 月下旬のロシア域におけるブロッキングの形成には、そのすぐ上流側に位置する近傍の循環場偏差が重要な役割を果たしていたことを示している。

キーワード: ブロッキング, 上流の低気圧性偏差, 予測可能性

1. はじめに

2010 年 6 月から 8 月にかけて、東ヨーロッパ・ロシア西部を中心に非常に強く持続的なブロッキングが発生した。このブロッキングは、持続期間が 1 ヶ月以上であったこと (Matsueda, 2011)、ロシアで発生したブロッキングの中ではこれまでで最も強かったこと (Wiedenmann et al., 2002)、そして、このブロッキングに伴う非常に強い熱波によってユーラシア大陸の広い領域で異常高温となったこと (Barriopedro et al., 2011) などの顕著な特徴を伴っていた。このため、このブロッキングは非常に特異なイベントであると考えられる。

そこで、本研究では、2010 年夏 (6 月–8 月) の持

続的なブロッキングの形成・持続メカニズムを解明し、イベントの予測可能性を評価するため、再解析データと予報データを用いた解析を実施した。過去のブロッキングに関する研究で、ブロッキングの形成・持続には、周期約 10 日以上の大気低周波変動成分と総観規模擾乱で代表される高周波変動成分との相互作用が重要であることが示されているので (Nakamura et al., 1997)、ここでは低周波変動成分と高周波変動成分とに分離して解析を行い、それぞれの役割について考察した。先行研究の中には、2010 年の海面水温偏差がこのイベントの発生に寄与していたこと (森ほか, 2012) や、熱帯の対流活動がブロッキング形成に影響を及ぼしたこと (小寺ほか, 2012) が示唆されているが、本研究では中高緯度大気内部

変動の観点からブロッキングの維持・形成メカニズム、および予測可能性について解析を行う。海面水温などの境界条件や熱帯大気循環変動がこのブロッキングイベントに及ぼした影響については今後解析していく予定である。

2. データと解析方法

本研究では3つのデータを使用した。まず、2010年5月から9月までのJRA-25/JCDAS再解析データセット(Onogi et al., 2007)を、2010年の大気循環場の特徴を捉えるために使用した。このデータは6時間毎(00, 06, 12, 18UTC)に、1000hPaから0.4hPaまでの23層の等圧面で、東西南北1.25度の格子点上で与えられる。一方、予測可能性を評価するために、気象庁現業1ヶ月アンサンブル予報データセットと、気象研究所大気大循環モデルを用いたハインドキャスト実験データを用いた。気象庁1ヶ月アンサンブル予報は、毎週水曜日と木曜日の12UTCを初期時刻として、気象庁予報モデル(GSM0803C)を用いて実施される。モデルの水平解像度はT159で、鉛直層数は0.4hPaまでの24層である。予報初期データは気象庁全球客観解析(GANAL)で与えられ、海面水温は時間変化する気候値と初期時刻における偏差場を加えた値で規定される。アンサンブルメンバーは24個の摂動ランと摂動を含まない1個のコントロールランで構成される。ここで、初期擾乱は、Breeding of Growing Mode (BGM)法を用いて生成され、南緯20度以北の全層で与えられる。予報期間は816時間(34日間)で、出力は6時間毎に、1000hPaから1hPaまでの22層の等圧面上で、水平解像度2.5度の緯度経度格子点上で与えられる。この気象庁現業1ヶ月アンサンブル予報データは毎週2回しか実施されないため、予測可能性の初期時刻依存性を解析することは困難である。このため、気象研究所/気象庁大気大循環モデル(MRI/JMA-AGCM GSM0305)を用いて、2010年6月1日00UTCから2010年8月15日18UTCまでの期間について、6時間毎(00, 06, 12, 18UTC)の初期時刻から948時間(39.5日間)のハインドキャスト実験を行った。このモデルの水平解像度は約200km(TL95)で、鉛直層数は0.4hPaまでの40層(気圧-シグマハイブリッド鉛直座標)である(Kuroda, 2010)。初期値はGANALで与えられ、初期摂動は含

まない(コントロールランのみ)。海面水温は、気象庁現業1ヶ月アンサンブル予報と同様に与えた。予測結果は、1000hPaから0.5hPaまでの24層の等圧面上で、経度1.875度毎のガウス緯度上において6時間間隔で出力されたが、ここでは、2.5度毎の緯度経度格子点上に水平内挿したデータについて解析を行った。また、Kuroda(2010)に従い、ある初期時刻の直前の5日間に実施した20個のハインドキャスト実験結果を用いてアンサンブルを構成し、予測可能性の時間変動を評価した。このようなアンサンブル手法はLAF(Lagged Averaged Forecasting)法と呼ばれる。

本研究では、循環偏差場を低周波変動成分と高周波変動成分とに分離して解析するために、6時間毎に与えられる再解析データと予報データのそれぞれについて、ランチョス低周波濾波フィルターを適用し、低周波変動成分を抽出した。高周波変動成分は元の偏差場から低周波変動成分を差し引いた残差として定義する。ここで用いたランチョス低周波フィルターのカットオフ周期は8日である(データウィンドウ幅は16日)。なお、予報データの予報初期期間に上記のランチョス低周波フィルターを施す際、予報の初期時刻以前のデータも必要となるが、その期間については、再解析データを用いてフィルタリングを行った。また、本研究では気候値として、1979年1月から2006年12月までの日々の平均値に対し、60日をカットオフ周期とするランチョス低周波フィルターを施した値を使用した。偏差場は元のデータから気候値を差し引いた残差として定義した。

解析では、まず初めに、Matsueda(2011)に従い、ブロッキング発生領域の経度-時間発展を調べた。ここでは、ブロッキングの発生を判断するため、以下の基準を用いた(Matsueda, 2011)。この判定基準では、まず各時刻、各経度について60°N付近を中心とする2つの500hPa高度場の南北勾配に関するインデックスGHGS, GHGN

$$GHGS = \frac{Z500(\varphi_0) - Z500(\varphi_S)}{\varphi_0 - \varphi_S} \quad (1)$$

$$GHGN = \frac{Z500(\varphi_N) - Z500(\varphi_0)}{\varphi_N - \varphi_0} \quad (2)$$

$$\left(\begin{array}{l} \varphi_N = 77.5^\circ\text{N} \pm \Delta, \varphi_0 = 60.0^\circ\text{N} \pm \Delta \\ \varphi_S = 40.0^\circ\text{N} \pm \Delta \\ \Delta \text{は緯度間隔で, } \Delta = 0^\circ, 2.5^\circ, 5.0^\circ \end{array} \right)$$

を各 Δ について求める。そして、ある一つの Δ について、

$$\begin{aligned} GHGS &> 0 \quad \text{かつ} \\ GHGN &< -5.0 [\text{m/緯度}] \end{aligned} \quad (3)$$

の条件を満たした場合に、その時刻のその経度でブロッキングが発生したと判断する。ただし、Matsueda (2011) では低周波フィルターを施していない高度場についてこれらのインデックスを定義したが、本研究では、ブロッキングが大気の長周期変動であることを考慮し、500hPa 高度場の低周波変動成分を用いてブロッキングの発生を定義した。

次に、上記の MRI/JMA-AGCM ハイインドキャスト実験結果を用いて構成したメンバー数 20 のアンサンブル予報でのブロッキングの予測精度の評価方法について説明する。本研究では、予測精度を定量的に評価するため、Matsueda (2011) に従い、各経度について、以下で定義されるブライア・スコア

$$\text{Brier Score} = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} (f_i - a_i)^2 \quad (4)$$

を使用した。ここで、 N_x は再解析データにおいてブロッキングの存在が確認された経度方向の格子点数、 i は再解析データでブロッキングの存在が確認された経度方向の格子点、 a_i は再解析データの各格子点での値（ブロッキングが発生したと判断された格子点で $a_i = 1$ とする）、 f_i はメンバー数 20 のアンサンブル予報結果から求められる格子点 i におけるブロッキング発生予測確率で、

$$f_i = \frac{M}{20} \quad (5)$$

で定義した。式(5)で、 M はブロッキングを予測したアンサンブルメンバーの数を表す。ここでは実際にブロッキングが存在した領域においてブライア・スコアを評価したので、経度方向の格子点数 N_x は時間的に一定ではないことに注意する。式(4)で定義されたブライア・スコアの値が 0 に近いほど予測精度が良く、1 に近いほど予測精度が悪いことを意味する。

最後に、気象庁現業 1 ヶ月アンサンブル予報を用いて行った、ずれ回帰分析 (Mukougawa, 2005) について説明する。ここでは、7 月末のブロッキングの発達と持続に注目するために、7 月 21 日 12UTC を予報初

期時刻とする気象庁現業 1 ヶ月アンサンブル予報データ (メンバー数 25) を用いて、再解析データでブロッキング強度 I が最大となった時刻におけるロシア域の高度場偏差予測値と、それより以前の時刻における高度場偏差予測値との回帰を求めた。ここで、ブロッキング強度 I は、National Weather Service の Climate Prediction Center と同様に、各 Δ について式 (1) で求められる $GHGS$ のうち最大の値で定義した。また、ブロッキング強度の領域平均 $\bar{I}$ は、ブロッキングが発生したと判断された格子点でのブロッキング強度 I をロシア域 (35°E-55°E; Fig 1 参照) で領域平均して求めた。ただし、発生していないと判断された格子点では $I = 0$ とした。さらに、 $\bar{I}$ が極大となった時刻 (7 月 25 日 12UTC) を基準として、ずれ回帰分析を行った (Fig 2)。

3. 結果

3.1 2010 年のロシアブロッキングの時間発展

2010 年夏 (6 月–8 月) のブロッキング発生領域の時間発展を Fig 3 に示す。発生領域は式(3)に基づき定

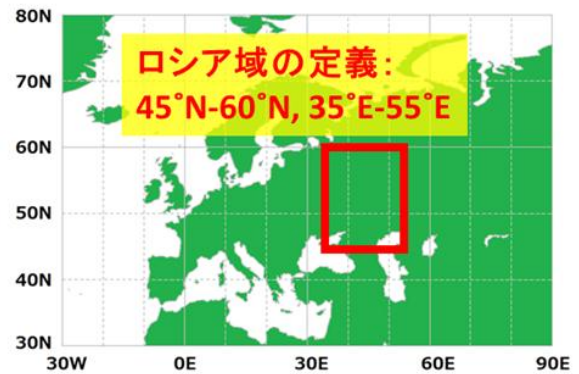


Fig. 1 Russian region defined in this study is enclosed by a red rectangular.

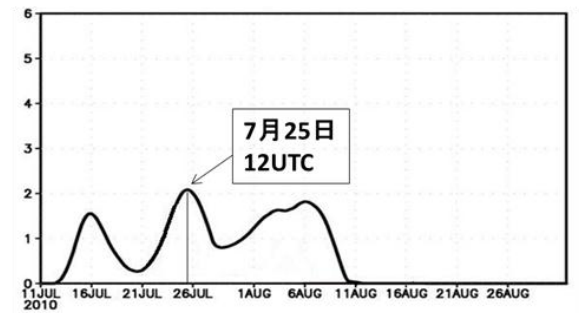


Fig. 2 Time series of areal-mean blocking strength $\bar{I}$ obtained from JRA-25/JCDAS reanalysis data set.

義した。また、前述したように、本研究では高度場の低周波変動成分を用いてブロッキングの発生を定義した。しかし、Matsueda (2011) と同様に、6 月末の大西洋上（10°E 付近）のブロッキングがヨーロッパ域（30°E 付近）へ遷移していく様子、ヨーロッパ域のブロッキングが7月末まで持続するという特徴、そして7月末にブロッキングが二つの領域（20°E 付近と 50°E 付近）に分岐するという3つの特徴を捉えられている。

次に、6 月後半（Fig 4a, b）と7月末（Fig 4c, d）における 500hPa 高度場の特徴を述べる。6 月後半は、大西洋で発生したブロッキングがヨーロッパへ遷移する期間にあたる（Fig 3）。低周波変動成分に注目すると、6 月 18 日 00UTC（Fig 4a）には大西洋上で強いリッジが発達しているが、それが次第に衰退すると同時にユーラシア大陸上でリッジが形成されていく様子（Fig 4b）が確認できる。色塗りした領域で示される高周波変動成分に着目すると、特に Fig 4a で示された 6 月 18 日 00UTC では、他の期間に比べ、その活動が比較的活発であったことが分かる。したがって、6 月後半の大西洋ブロッキングの形成と持続には高周波擾乱の寄与が大きいと考えられる。一方、30°E 付近を中心に持続していたブロッキングが 20°E 付近と 50°E 付近に分岐する7月末では、30°E 付近に存在する双極子型のブロッキング（Fig 4c）が東進しながらオメガ型のブロッキング（Fig 4d）へと遷移していく様子が確認できる。そして、高周波変動成分

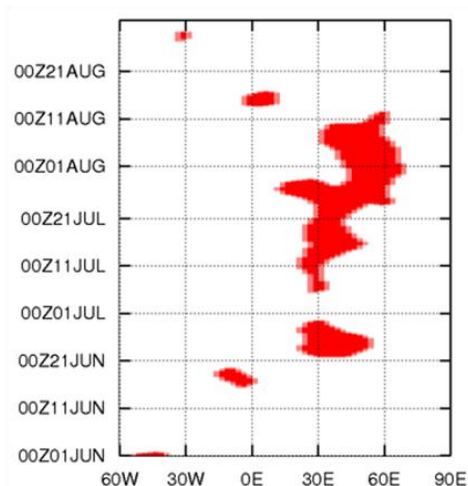


Fig. 3 Time-longitude cross section of the observed blocking occurrence in the summer (JJA) of 2010. The blocking regions are colored red.

は、6 月後半に比べてその活動が弱く、また、移動性高低気圧性偏差はブロッキングから離れた領域を東進するという特徴が見てとれる。したがって、7 月末のブロッキングの発達と持続には、高周波変動成分ではなく低周波変動成分の寄与が大きかったと推測できる。

3.2 ロシアブロッキングの予測可能性

次に、予報データを用いた解析結果について述べる。まず、MRI/JMA-AGCM ハインドキャスト実験（LAF 法、アンサンブル数 20）を用いて、2010 年のイベントの予測精度の時間変動を調べた（Fig 5a, b）。LAF 法によるアンサンブル予報のブロッキング予測精度を、式(5)で定義したブライア・スコアを用いて評価した。また、式(4)の N_x が $N_x \geq 3$ を満たす場合、つまり、ブロッキング領域が経度方向に 5 度以上の拡がりをもつ場合についてのみ予測精度を評価した。

Fig 5b から、3 つの時期（6 月 27 日頃、7 月 21 日頃、8 月 10 日頃）では、予測期間が短くても予測精度が顕著に悪いということが分かる。それぞれの期間を期間 A, B, C と呼ぶ。Fig 3 と比較すると、期間 A は大西洋上のブロッキングがヨーロッパ域へ遷移した直後の持続期、期間 B はヨーロッパ域からロシア域へブロッキングが遷移した時期、期間 C はロシアブロッキングの終息期に対応する。期間 C で予測精度が悪化する傾向は Matsueda (2011) でも示唆されていたが、本研究では、その傾向を定量的に示すことができた。また、終息期でもブロッキングの予測精度が悪化することは興味深い。

3.3 7 月末のブロッキング強化に関連する循環場の特徴

以上の再解析データの解析結果から、2010 年夏のユーラシア域ブロッキングイベントが約 2 ヶ月間（Fig 3）にも及ぶ長寿命となったのは、ブロッキングが 7 月末にヨーロッパ域からロシア域に遷移しながら持続したことと関連していると考えられる。ここでは、7 月下旬を初期時刻とする気象庁現業 1 ヶ月アンサンブル予報データを用いて、この時期におけるロシアブロッキングの強化と関連する低周波変動成分の特徴について解析する。また、前節のハインドキャスト実験の解析結果から、この時期（期間 B）のブロッキング予測精度は比較的悪いことが示され

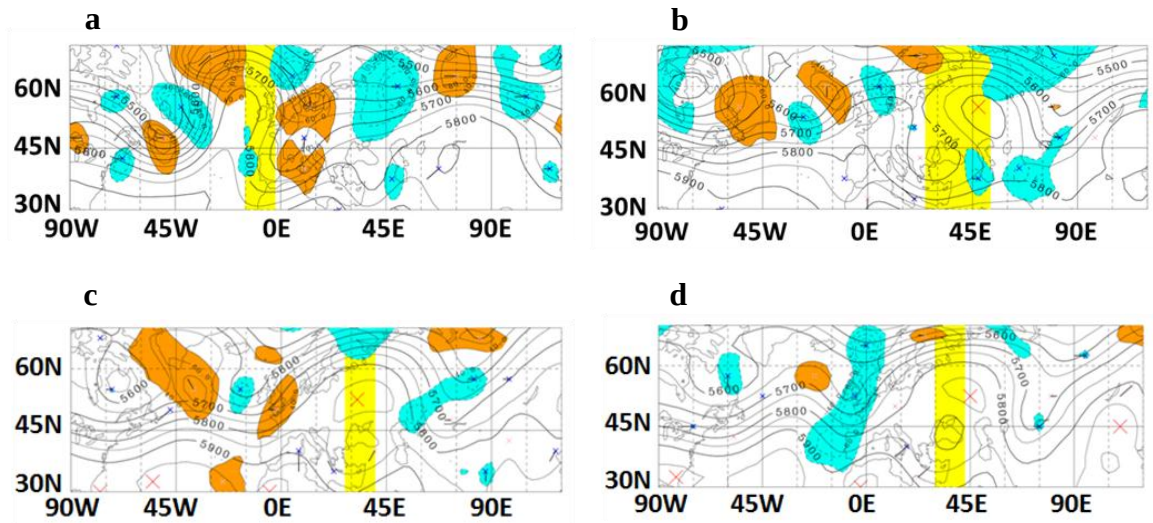


Fig. 4 Observed 500-hPa geopotential height fields (m) at (a) 00UTC 18 June, (b) 00UTC 25 June, (c) 00UTC 20 July, and (d) 00UTC 25 July, 2010. Contours show low-frequency components of the geopotential height. Orange and light blue shadings indicate anticyclonic and cyclonic high-frequency height anomaly with the magnitude larger than 40 m, respectively. Longitudinal zones colored yellow are blocking regions, and red crosses show grid points with local height maximum of the low-frequency components over the nearby $20^{\circ} \times 20^{\circ}$ square.

ている。

以下では、7月末のロシア域の予測精度が比較的良好い7月21日を初期日とするアンサンブル予報データを詳細に解析した。Fig 6に、このアンサンブル予報（メンバー数25）の500hPa高度場予測値の低周波変動成分を用いて実施した、ずれ回帰分析の結果を示す。この期間でブロッキング強度が極大となる7月25日12UTC（Fig 2）をkey dayとして解析した。Fig 6cおよび6dから、key dayにおけるロシア域のブロッキング強度予測値は、その1~2日前（7月23日12UTCおよび7月24日12UTC）でのイタリア付近の低気圧性偏差予測値と有意水準95%以上で統計的に有意に関連していることが分かる。この有意性はStudent-tテストにより検定した。また、回帰場での低気圧性偏差（Fig 6c, d）は、アンサンブル平均予測場（Fig 6a, b）における低気圧性偏差場よりもやや東にずれていることも分かる。一方、それより上流側の大気循環場偏差の予測場とブロッキング強度との相関は有意でない。

以上より、ロシア域のブロッキングは、リッジのすぐ上流側に存在するトラフがより強く、しかも、アンサンブル平均予測場で存在するイギリス上空の低気圧性偏差の南東側に位置するイタリア上空で低気圧性偏差が存在するときに、より発達することが示された。このイタリア上空に存在する低気圧性偏

差の強化は、イギリス付近に存在するトラフ軸を北西から南東方向に傾斜させることにより、トラフ軸からその北東側に位置するロシアブロッキング領域へ向かう準定常ロスビー波の波活動度フラックスを増大させて、ロシア域のブロッキングを強化していると考えられる。また、7月24日12UTCの500hPa高度場の再解析データでも、ブロッキングの上流側のトラフはイギリスからイタリア域へと、北西から南東へ傾いており、準定常ロスビー波がロシア域のブロッキングへ伝播している様子が確認できた（図は省略）。

4. 結論

2010年夏季にユーラシア域では1ヶ月以上の持続性を持つ強いブロッキングが出現し、ロシア域に顕著な高温偏差をもたらした。本研究では、このブロッキングの形成・持続のメカニズム、およびその予測可能性を明らかにするために、JRA-25/JCDAS再解析データセット、気象庁現業1ヶ月アンサンブル予報結果、気象研究所/気象庁大気大循環モデルを用いて独自に実施したハインドキャスト実験結果を用いて解析を行った。

再解析データを用いて500hPa高度場を解析したところ、6月後半から7月末にかけては周期8日以下の

高周波変動成分の活動が活発で、ブロッキングの形成と維持に高周波変動成分が重要な役割を果たしていることが示唆された。一方、7月後半にヨーロッパ域のブロッキングがロシア域へと東に遷移したときには、高周波変動成分の活動度は弱く、周期8日以上、低周波変動成分がロシア域のブロッキングの形成と持続に寄与していたことが示唆された。

ハインドキャスト予報実験に基づくアンサンブル予報結果の解析から、2010年6月末と7月末のブロッキングの遷移期と、8月中旬のロシア域の終息期に、ブロッキングの予測精度が悪化することが示された。

気象庁現業1ヶ月アンサンブル予報結果に基づくずれ回帰分析の結果から、7月末のロシア域でのブロッキング強度が極大となった日における500hPa高度場予測値は、その1~2日前のブロッキングの上流側に位置するイタリア上空での低気圧性偏差と有意に関連していることが明らかになった。一方、その低気圧性偏差よりもさらに上流側の循環場偏差との相

関は有意ではない。このことは、7月末のロシア域におけるブロッキングの形成には、大西洋など上流・遠方からの準定常ロスビー波の伝播ではなく、ブロッキングのすぐ近傍の上流側に位置する循環場偏差が重要な役割を果たしていたことが考えられる。

今後は、気象庁現業1ヶ月アンサンブル予報結果を用いて、非断熱加熱分布や降水分布について同様のずれ回帰分析を行い、イタリア上空の低気圧性偏差の形成メカニズムの解明を目指した解析を行う。また、波活動度フラックスを解析することにより、この低気圧性偏差がロシア域ブロッキングを強化する過程を定量的に評価する。一方、高周波変動成分がロシア域ブロッキングに果たす役割についても解析する予定である。最近、小寺ほか(2012)が、2010年7月後半に熱帯域での対流活動が活発になり、同時期にアフリカ大陸や西ヨーロッパなどの広い経度帯で対流活動が北上したことを示している。このような熱帯域での対流活動の変化とロシア域における

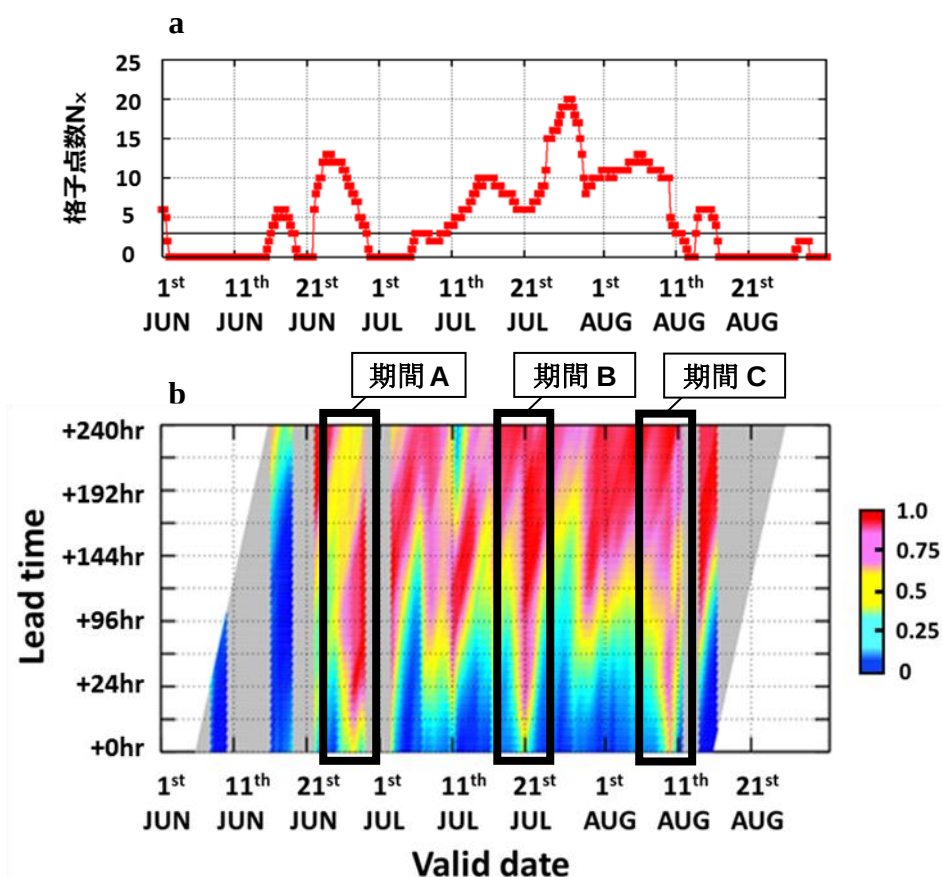


Fig. 5 Time variation of the predictability of the Euro-Russian blocking event estimated by a hindcast experiment performed on MRI/JMA AGCM (TL95L40). Shading in (b) indicates Brier Score defined by Eq. (4) over the Atlantic-Eurasian region (30°W - 90°E) with a condition of $N_x \geq 3$. The time variation of N_x is shown in (a).

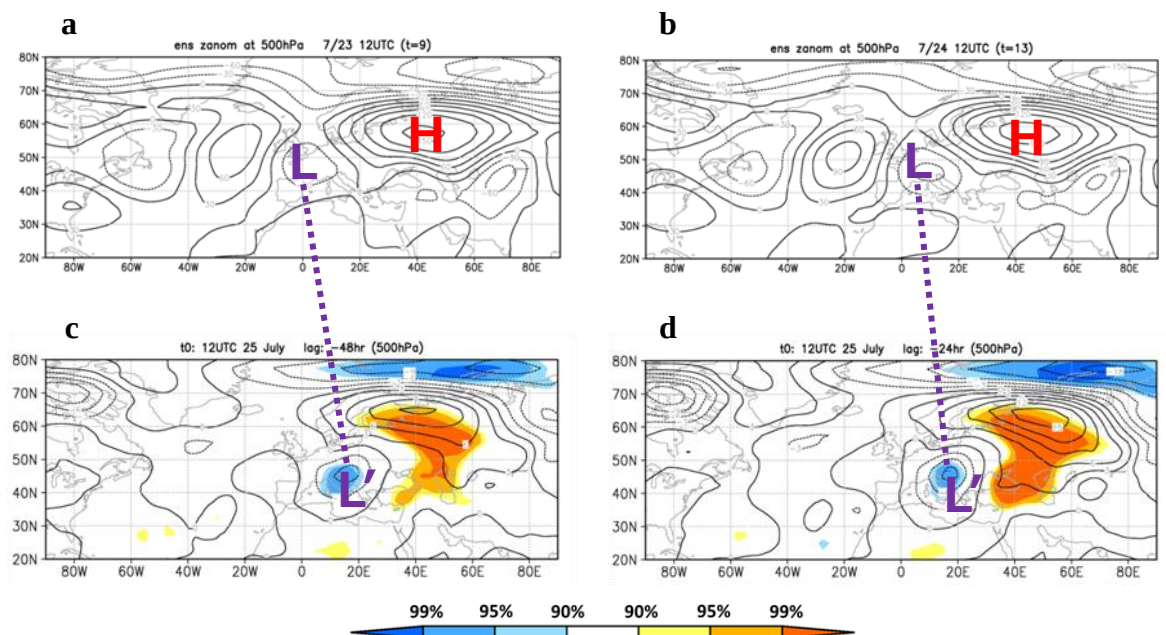


Fig. 6 Time-lagged regression of the predicted low-pass filtered 500-hPa geopotential height anomaly (m) using all ensemble members of a 1-month forecast starting from 1200UTC 21 July, 2010. The top panels show predicted ensemble-mean fields (m) at (a) 1200UTC 23 July and (b) 1200UTC 24 July. The bottom panels represent the regressed anomaly (contours) at (c) 1200UTC 23 July and (d) 1200UTC 24 July with respect to the predicted blocking strength at 1200UTC 25 July. Color shades indicate a statistical significance of the regressed anomaly.

強いブロッキングの形成・維持との関係についても今後解析を進めていく予定である。

謝 辞

本研究ではJRA-25/JCDAS再解析データセットを用いた。このデータセットは気象庁及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、地球電脳ライブラリ、及びGrADSを用いた。開発者の方々に深く感謝する。

引用文献

- Barriopedro, D., E. M. Fischer, J. Luterbacher, R. M. Trigo, and R. García-Herrera (2011): The Hot Summer of 2010: Redrawing the Temperature Record Map of Europe, *Science*, vol 332, pp 220-224, doi: 10.1126/science.1201224.
- Kuroda, Y. (2010): High initial-time sensitivity of

medium-range forecasting observed for a stratospheric sudden warming, *Geophys. Res. Lett.*, vol 37, L16804, doi: 10.1029/2010GL044119.

Matsueda, M. (2011): Predictability of Euro-Russian blocking in summer of 2010, *Geophys. Res. Lett.*, vol 38, L06801, doi: 10.1029/2010GL046557.

Mukougawa, H., H. Sakai, and T. Hirooka (2005): High sensitivity to the initial condition for the prediction of stratospheric sudden warming, *Geophys. Res. Lett.*, vol 32, L17806, doi: 10.1029/2005GL022909.

Nakamura, H., M. Nakamura, and J. L. Anderson (1997): The Role of High- and Low-Frequency Dynamics in Blocking Formation, *Mon. Wea. Rev.*, vol 125, pp 2074-2093.

Wiedenmann, J. M., A. R. Lupo, I. I. Mokhov, and E. A. Tikhonova (2002): The Climatology of Blocking Anticyclones for the Northern and Southern Hemispheres: Block Intensity as a Diagnostic, *J. Clim.*, vol 15, pp 3459-3743.

小寺 邦彦・向川 均・藤井 晶 (2012) : 2010 年 7 月の日本の猛暑の出現と熱帯循環場の急変, 気象

研究ノート「2010 年夏 日本の猛暑」, 印刷中。

(論文受理日 : 2012 年 7 月 17 日)

森 正人・渡部 雅浩・木本 昌秀 (2012) : 大気大循環モデルを用いた 2010 年夏季の天候再現実験, 平成 23 年度「長期予報と大気大循環」研究集会報告書, 印刷中。

Mechanism and Predictability of Persistent Blocking over Euro-Russian Region in Summer Season 2010

Aki FUJII⁽¹⁾, Yuji KURODA⁽²⁾ and Hitoshi MUKOUGAWA

(1) Graduate School of Science, Kyoto University

(2) Meteorological Research Institute

Synopsis

We investigate the mechanism and predictability of a strong persistent Euro-Russian blocking in summer (JJA) of 2010 using a reanalysis dataset and two kinds of forecast datasets. It is found that when the blocking resides over the Atlantic from mid-June to late-June, synoptic eddies contribute to maintain the blocking. On the other hand, low-frequency disturbances play an important role in the blocking maintenance from late-July to mid-August when the blocking is located over western Russia. The analysis on the forecast datasets indicates that the predictability of the blocking in late-July when the blocking shifts its location from western Europe to Russia is much reduced in comparison with the other periods. This might be related to the short time-scale of the triggering process of the blocking shift by a Rossby wave packet emanating from the adjacent upstream cyclonic anomaly over Italy.

Keywords: blocking, upstream cyclonic anomaly, predictability