

2010 年夏のロシアブロッキングのメカニズムと予測可能性

Mechanism and Predictability of the Persistent Blocking over Russian Region in the Summer of 2010

藤井晶⁽¹⁾・向川均・黒田友二⁽²⁾

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

(1) 京都大学大学院理学研究科

(2) 気象研究所

(1) Graduate School of Science, Kyoto University

(2) Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Synopsis

We investigate the mechanism and predictability of a strong and persistent blocking residing over Russia from late-July to mid-August of 2010 using a reanalysis dataset and two kinds of forecast datasets. It is found that the following different mechanisms contributed to the enhancement of the blocking: During a maintenance period of the blocking in the end of July, when the predictability of the blocking was much reduced in comparison with the adjacent periods, an anticyclonic vorticity forcing associated with horizontal divergence in the upper troposphere due to a deepening trough upstream of the blocking was a predominantly important factor for the blocking formation; during another maintenance period in early-August, an anticyclonic vorticity forcing produced by the interaction between the climatological horizontal convergence and the coexisting anticyclonic anomaly in the upper troposphere over the western part of the Eurasian continent was a key to maintain the blocking. These maintenance mechanisms are also found to be inherent to the Russian blocking in the summer of 2010.

キーワード: 異常気象, 熱波, ブロッキング, 予測可能性

Keywords: anomalous weather, heat wave, blocking, predictability

1. はじめに

2010年6月下旬から8月中旬にかけて, 東ヨーロッパ・ロシア西部を中心にブロッキングが発生し, 各地に異常高温をもたらした (Fig. 1). 1か月以上にわたり持続したこのブロッキングは, これまで夏季にユーラシア西部で発生したブロッキングの中では持続期間が最も長く, また, ブロッキング強度 (熱帯大気への張り出し) も過去最大を記録した. このような顕著な特徴を持った事例であったため,

その発生・持続要因や予測可能性に関して既に次のような研究結果が発表されている.

Dole et al. (2011) は, 2010年の外部強制力 (海面水温, 北極海の海水面積, 温室効果ガス濃度) が, 同年夏季のブロッキングの発生や熱波の強さにどの程度影響していたのかをモデルシミュレーションにより調べ, ロシア西部の高気圧偏差や熱波の強さは, これら三つの境界条件によって強制されたのではなく, 大気の内力学によって駆動されていたことを示した. しかしながら, Dole et al. (2011) は, 論文

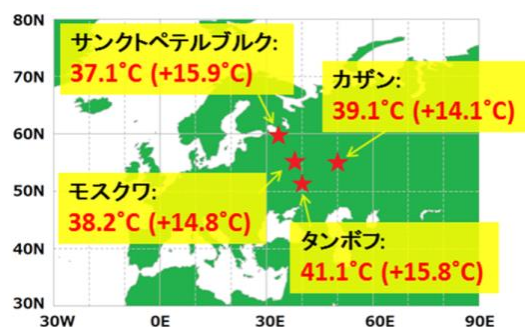


Fig. 1 Observed maximum temperature during a period from June to August 2010 based on Barriopedro et al. (2011). The anomaly from the climatology is shown in parentheses.

では考慮していない大気と陸地面との相互作用の重要性, すなわち, ユーラシア西部での高温の持続に伴って発生した干ばつが熱波をより一層強化した可能性があることを示唆している. また, 海面水温とブロッキングの発生頻度との関連について, Schneidereit et al. (2012) は, 1989年~2010年の再解析データを用いて統計的解析を行い, 夏季にラニーニャ現象が発生した年には, 30°E~60°Eの経度帯でブロッキング発生頻度が有意に増加することを示し, 2010年夏季の長寿命ブロッキングがラニーニャ現象に伴う海面水温偏差の影響を受けた可能性があることを示唆している.

一方, 2010年夏季の長寿命ブロッキングの予測可能性について, Matsueda (2011) は, 各国の現業予報機関のアンサンブル予報データを用いた解析を行った. その結果, 2010年夏季の事例は他のブロッキング事例に比べ予測可能性が高いが, 8月上旬のブロッキング持続期には30°E~45°Eの経度帯で予測可能性が悪化することを示した. この経度帯におけるブロッキングの予測可能性の悪化について, Matsueda (2011) は, ブロッキングのすぐ南西に位置するトラフの予測が困難であったことが原因であると示唆しているが, トラフがどのようにブロッキングの予測精度に影響を及ぼしたのかは明らかでない. また, これまでの研究では, 2010年夏季のブロッキングの発生や持続に寄与するメカニズムについても明らかにされていない.

そこで, 本研究では, 再解析データと予報データを用いて, 2010年7月~8月にロシア西部で1か月以上持続したロシアブロッキングに注目し, その持続メカニズムの解明と予測可能性に関し詳細な解析を行う. 先に述べたように, 先行研究の中には, 2010年の海面水温偏差がブロッキングの発生・持続に寄与していたこと (Schneidereit et al., 2012; 森ほか, 2012) や, 熱帯の対流活動がブロッキングの形成に影響を

及ぼしたこと (小寺ほか, 2012) など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本事例を解析する.

2. データ及び解析手法

2.1 データ

本研究では三つのデータを使用した. まず, 2010年夏季の大気循環場の特徴を捉えるために2010年5月から2010年9月まで期間のJRA-25/JCDAS再解析データ (Onogi et al., 2007) を使用した. この再解析データは6時間毎 (0000, 0600, 1200, 1800UTC) に, 1000hPaから0.4hPaまでの23層の等圧面で, 緯度経度1.25度間隔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か月アンサンブル予報データと, 気象研究所/気象庁統一大気大循環モデルによるハインドキャスト予報実験データを使用した.

気象庁現業1か月アンサンブル予報は, 毎週水曜日と木曜日の1200UTCを初期時刻として, 数値予報モデル (GSM0803C) を用いて実施された. 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. 予報初期値は気象庁全球客観解析データ (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を固定して与えた場で規定される. 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. 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, データは6時間毎に, 1000hPaから1hPaまでの22層の等圧面上で, 緯度経度2.5度間隔の格子点上で与えられる.

気象庁現業1か月アンサンブル予報データは週2回しか実施されないため, 予測可能性の時間変動を解析するのは困難である. そのため, 気象研究所/気象庁統一大気大循環モデル (MRI/JMA-AGCM GSM0305) を用いて, 2010年6月1日0000UTCから2010年8月15日1800UTCまでの期間について, 6時間毎

(0000, 0600, 1200, 1800UTC) の初期時刻から948時間 (39.5日間) のハインドキャスト予報実験を行った. このモデルの水平解像度は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か月アンサンブル予報と同様に与えている. 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るが, ここでは, 緯度経度2.5度間隔の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個の予報ランを用いてアンサンブルメンバーを構成して使用した。このアンサンブル手法はLagged Average Forecasting (LAF) 法と呼ばれる。

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), 本研究でも同様に、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を行った。すなわち、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、ランチョス低周波フィルターを適用して低周波変動成分を抽出し、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した。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の期間に上記のランチョス低周波フィルターを施す場合、予報初期時刻以前の期間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。

気候値は、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。

2.2 ブロッキングの検出

本研究では、Tibaldi and Molteni (1990) を参考に、500hPa高度場の南北勾配を用いてブロッキングの検出を行った。この検出手法では、各経度において60°N付近を中心とする500hPa高度場の南北勾配に関する二つのインデックス

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

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

を利用する。ここで、 $\varphi_N = 80.0^\circ\text{N} \pm \Delta$, $\varphi_0 = 60.0^\circ\text{N} \pm \Delta$, $\varphi_s = 40.0^\circ\text{N} \pm \Delta$ であり、緯度間隔 Δ を、 0° , 2.5° , 5° の3通りで与え、それぞれについてGHGSとGHGNを求め、少なくとも一つの Δ に対して、

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

の条件を満たした場合に、ブロッキングが発生したと判断した。Matsueda (2011) は2010年夏季のブロッキングを検出する際に、低周波フィルターを施していない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。

ブロッキング強度 I は、National Weather Service (NWS) Climate Prediction Center (CPC) と同様に、各 Δ に対して式 (1) により与えられるGHGSの最大値 $GHGS_{\max}$ で定義した。すなわち、ブロッキングが発生した経度では $I = GHGS_{\max}$, ブロッキングが発生していない経度では $I = 0$ となる。

2.3 渦度収支解析

本節では、ブロッキングの持続要因を調べるために実施した渦度収支解析 (Cash and Lee, 2000; Mori and Watanabe, 2008) について説明する。気圧座標系におけるプリミティブ方程式系での渦度方程式を用いると、等圧面高度場偏差の低周波変動成分 Z_L の時間変化は、

$$\frac{\partial Z_L}{\partial t} = \frac{f_0}{g} \sum_{i=1}^7 \xi_i + R \quad (4)$$

で記述される。ただし、 f_0 は緯度55度におけるコリオリパラメータ、 g は重力加速度、 R は残差 (渦度の鉛直移流項、傾斜項、摩擦消散項をむ) で、 $\xi_i (i = 1, \dots, 7)$ は、

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \nabla^{-2} (-\beta v_L) \\ \xi_2 &= \nabla^{-2} (-[\bar{V}] \cdot \nabla \zeta_L - V_L \cdot \nabla [\bar{\zeta}]) \\ \xi_3 &= \nabla^{-2} (-\bar{V}^* \cdot \nabla \zeta_L - V_L \cdot \nabla \bar{\zeta}^*) \\ \xi_4 &= \nabla^{-2} \{-(f + \bar{\zeta}) \nabla \cdot V_L - \zeta_L \nabla \cdot \bar{V}\} \\ \xi_5 &= \nabla^{-2} \{-\nabla \cdot (V_L \zeta_L)_L\} \\ \xi_6 &= \nabla^{-2} \{-\nabla \cdot (V_H \zeta_H)_L\} \\ \xi_7 &= \nabla^{-2} \{-\nabla \cdot (V_L \zeta_H)_L - \nabla \cdot (V_H \zeta_L)_L\} \end{aligned}$$

である。ここで $V = (u, v)$ は水平速度ベクトル、 ζ は相対渦度で、 $\bar{X}$ は日々の気候値 (X は任意の物理量) を表し、 X_L 及び X_H はそれぞれ偏差場の低周波変動成分及び高周波変動成分を表す。また、 $[X]$ は X の東西平均場、 X^* は $[X]$ からのずれ成分、 f は緯度変化するコリオリパラメータ、 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ は水平微

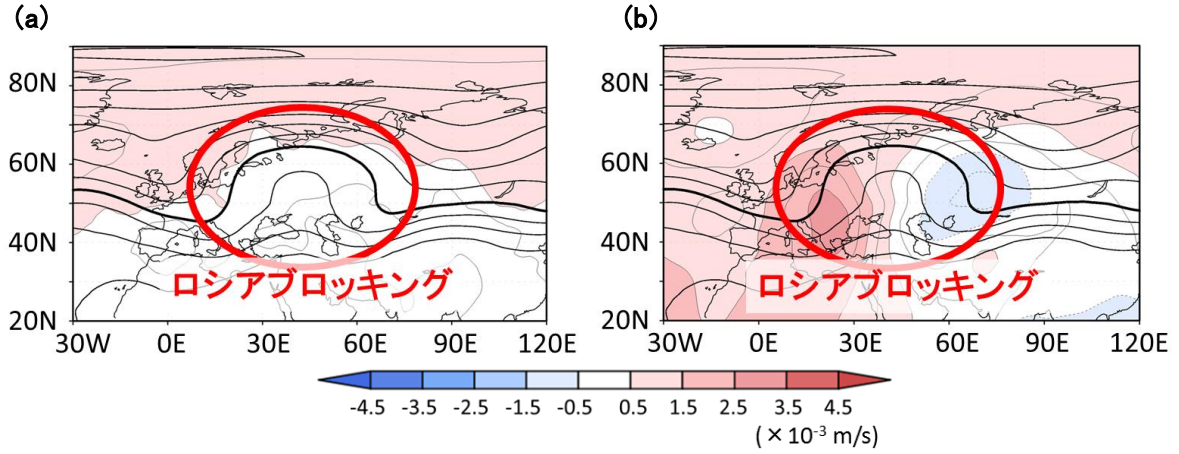


Fig. 2 Horizontal distribution of the residual term R (a) and the horizontal divergence term ξ_4 at 250 hPa averaged over a period from 0000UTC 16 July to 1800UTC 15 August (color shade). Regions with anti-cyclonic (cyclonic) forcing are shaded by warm (cool) colors. The 250-hPa geopotential height field averaged over the same period is shown by contours (contour interval is 100 m; the bold line indicates 10700 m).

分演算子である。

各渦度収支項の物理的意味は次の通りである。まず、 ξ_1 は低周波変動成分の南北風による惑星渦度の移流、 ξ_2 は気候場の東西一様成分と偏差場の低周波変動成分との相互作用、 ξ_3 は気候場の東西非一様成分と偏差場の低周波変動成分との相互作用を表し、以下ではこれら三つの項の和 $\sum_{i=1}^3 \xi_i$ を渦度の水平移流項と呼ぶ。 ξ_4 は発散項で、偏差場の低周波変動成分と気候場の収束・発散による渦度生成を表す。以下では、 $\sum_{i=1}^4 \xi_i$ を線形項と呼ぶ。 ξ_5 は低周波変動成分同士の相互作用（ロスビー波束伝播に伴う渦度フラックスの収束に対応）、 ξ_6 は高周波変動成分同士の相互作用（総観規模擾乱に伴う渦度フラックスの収束に対応）、 ξ_7 は低周波変動成分と高周波変動成分との相互作用を表し、以下では $\sum_{i=5}^7 \xi_i$ を非線形項と呼ぶ。また、鉛直流による寄与（渦度の鉛直移流項及び傾斜項）は、Cash and Lee (2000) と同様に、摩擦消散項とともに残差 R に含めて扱う。Fig. 2に示すように、ロシアブロッキングの中心付近において、残差 R は他の項に比べて小さいことが確認できる。

2.4 予測可能性の評価

前述のMRI/JMA-AGCMによるハインドキャスト予報実験データ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に、以下で定義されるブライア・スコア

$$\text{Brier score} = \frac{1}{N_x} \sum_{n=1}^{N_x} (p_n - a_n)^2 \quad (5)$$

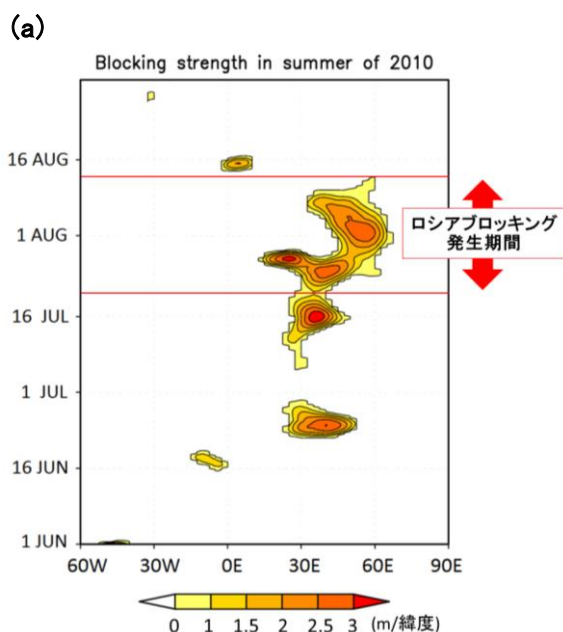
を使用した。ただし、再解析データでブロッキングの発生が確認された領域（すなわち、 $a_n = 1$ の領域）における予測精度を調べるために、 N_x は各時刻に実際にブロッキングが発生した領域（ $a_n = 1$ ）の経度方向の格子点数で定義した。また、 n は各時刻に $a_n = 1$ を満たす経度方向の格子点、 p_n はメンバー数20のアンサンブル予報データから求めた経度方向の運の格子点 n におけるブロッキング発生確率（Matsueda, 2011）で、

$$p_n = M/20 \quad (6)$$

と定義した。式 (6) で、 M はブロッキングの発生を予測したアンサンブルメンバーの数を表す。本研究では、式 (5) より、実際にブロッキングが発生した領域内だけでブライア・スコアを評価しているため、評価に用いた経度方向の格子点数 N_x は時間的に一定でないことに注意する。また、式 (5) で $N_x \geq 3$ を満たす場合、つまり、ブロッキング発生領域が経度方向に5度以上の広がりを持つ場合についてのみ予測精度を評価した。ブライア・スコアは、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。

3. 結果

3.1 ブロッキング発生領域の時間発展



2010年6月～8月に発生したブロッキングの経度－時間発展をFig. 3aに示す．図に示した値は，低周波フィルター（カットオフ周期は8日）を施した500hPa高度場について求めたブロッキング強度である．Fig. 3aから，2010年夏季のブロッキングは次の三つのブロッキングが連続的に発生した事例であることが分かる．すなわち，6月中旬の北大西洋ブロッキング（10°W付近），6月下旬～7月下旬のヨーロッパブロッキング（30°E付近），7月下旬～8月中旬のロシアブロッキング（50°E付近）である．この時間発展の特徴はMatsueda（2011）で示された結果でもよく捉えられている．また，本研究ではFig. 3aに基づき，それぞれのブロッキングの開始・終息時刻を決定した．まず，30°E～70°Eの経度帯におけるブロッキング強度 I の領域平均値 $\bar{I}$ を求め（Fig. 3b），初めて $\bar{I} > 0$ を満たした時刻をブロッキング開始時刻とした．そして，再び $\bar{I} = 0$ となる直前の時刻をブロッキング終息時刻と定義した．その結果，ヨーロッパ・ロシアブロッキング開始時刻は7月5日1800UTC，終息時刻は8月12日1200UTCと決定できた．また，ロシア西部でブロッキングが発生した時期を， $\bar{I}$ が極小となる時刻（7月20日1800UTC）からブロッキング終息時刻（8月12日1200UTC）までと定義した．以下では，特に，この期間に注目してロシアブロッキングの持続メカニズムと予測可能性について調べた．

3.2 予測可能性の時間変動

本節では，ハインドキャスト予報実験データの解析結果に基づき，2010年夏季のブロッキング事例の予測可能性について議論する．なお，以下では，6時間毎に実施された摂動を含まないコントロールラ

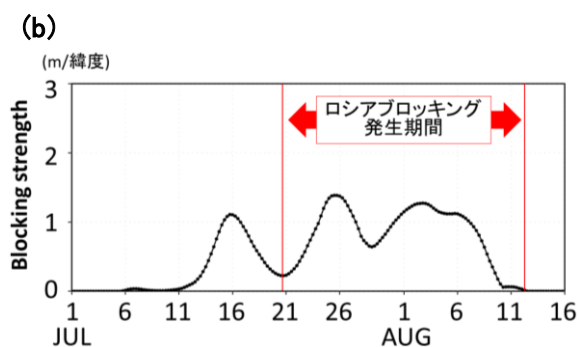


Fig. 3 (a) Time variation of the blocking strength (m/latitude) at each longitude (x-axis) during a period from June to August, 2010. (b) Time variation of the blocking strength (m/latitude) averaged over western Eurasia (30°E～70°E). The occurrence period of the Russian blocking is defined as a time interval delimited by the two vertical lines (from 1800UTC 20 July to 1200UTC 12 August).

ンに対してLAF法を適用し，メンバー数20のアンサンブル予報としてハインドキャスト予報実験データを取り扱った（Kuroda, 2010）．

Fig. 4に，120時間予報におけるブロッキング発生確率を示す．ブロッキング発生確率は式（6）で定義した．この結果から，本事例ではブロッキングの発生を予測しやすい時期と予測しにくい時期とが明瞭に分かれていることが読み取れる．まず，ブロッキングの発生を予測しやすい時期は，6月中旬の北大西洋ブロッキング形成期（6月15日頃），6月下旬のヨ

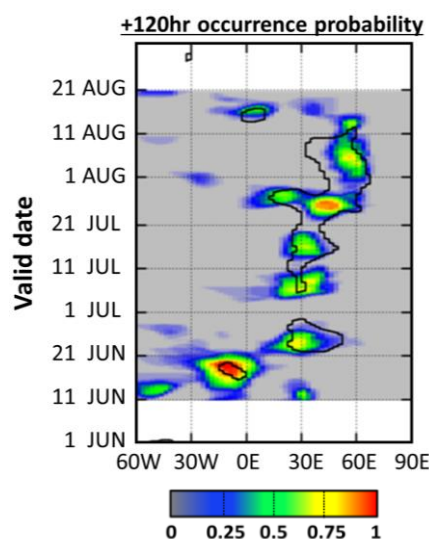


Fig. 4 Predicted occurrence probability of blocking at each longitude (x-axis) for a lead time of 120 hours by the hindcast ensemble forecast experiment. The y-axis is the valid time of forecast. The observed blocking regions are shown by black curves (see also Fig. 3a).

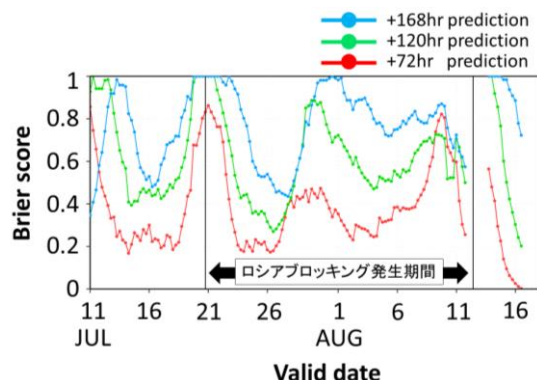


Fig. 5 Time variation of Brier Score for the prediction of blocking occurrence by the hindcast ensemble forecast experiment. The x-axis denotes the valid time of forecast from 0000UTC 11 July to 0000UTC 18 August. The red, green, and blue lines denote lead times of 72, 120, and 168 hours, respectively.

ヨーロッパブロッキング開始期（6月23日頃），7月上旬の持続期（7月5日頃及び7月15日頃），7月25日頃のロシアブロッキングへの遷移開始後の期間，そして，8月6日頃の持続期（45°E～60°Eの領域）である．特に，北大西洋ブロッキングに関しては，168時間予報でも75%以上の高い確率でブロッキングの発生を予測できていた（図は省略）．一方，ブロッキング発生の予測が困難な時期で注目すべきは，7月11日及び21日頃のヨーロッパブロッキング持続期，7月28日頃のロシアブロッキング持続期である．特に，7月21日頃のブロッキング発生確率は72時間予報でさえ50%未満であった（図は省略）．また，Matsueda (2011)でも指摘されたように，8月上旬のロシアブ

ロッキングの西側領域（30°E～45°E）におけるブロッキング発生確率は，その東側領域（45°E～60°E）よりも低く，ロシアブロッキングの西側領域の予測精度が悪いことが分かる．

次に，2010年夏季のブロッキング発生の予測精度の時間変動について調べた．そのために，式（5）で定義されるブライア・スコアを用い，解析値でブロッキングが発生した領域で予測値の発生確率を定量的に評価した（ただし，ブロッキング領域が経度方向に5度以上の広がりを持った場合にのみ評価した）．その結果をFig. 5に示す．ロシアブロッキング発生期間（7月20日1800UTC～8月12日1200UTC）に注目すると，ロシアブロッキングへの遷移前（7月21日頃）及び遷移後（7月28日頃）の持続期と，ブロッキング終息期（8月9日頃）に，特に3日予報の予測精度が悪化していることが分かる．一方，遷移開始直後の7月26日頃では，ブロッキングの予測精度は非常に良い．

以上の結果から，2010年夏季の事例の予測可能性について，次のような特徴が挙げられる．まず，形成期（6月15日，6月23日，7月5日頃）におけるブロッキング領域の予測可能性は，持続期（7月11日，7月21日，7月28日頃）と比較して予測可能性が高いことが示された．一般に，ブロッキング形成期には予報誤差が増大し，一旦ブロッキングが形成されると予報誤差は減少する傾向にあることがこれまでの研究で示唆されているが（Tibaldi and Molteni, 1990; Kimoto et al., 1992），2010年夏季の事例における予測可能性の変動は過去の事例とは異なっている．ただし，ロシアブロッキングへの遷移開始直後（7月26日頃）の持続期に予測精度が向上することは先行研

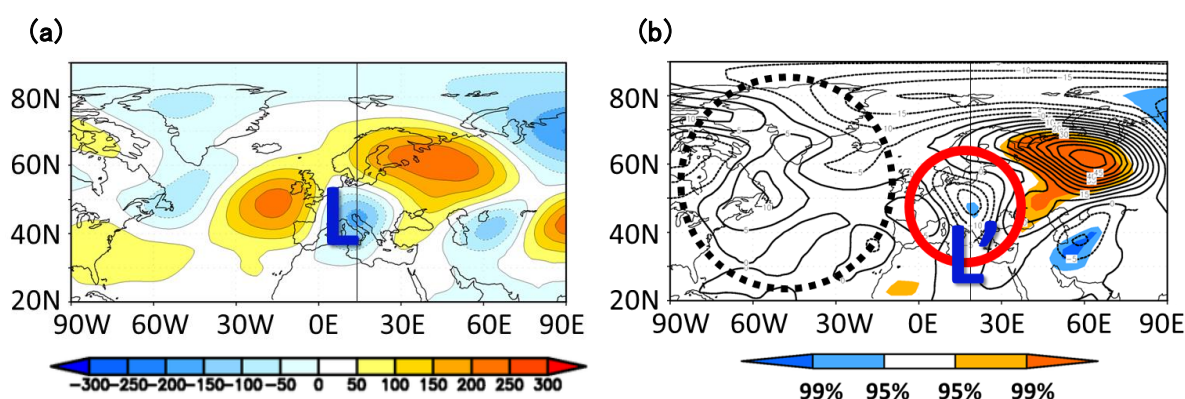


Fig. 6 (a) Ensemble average of predicted 250-hPa low-pass filtered height anomaly (m) at 1200UTC 26 July 2010 for the JMA 1-month ensemble forecast (25 members) starting from 1200UTC 21 July 2010. (b) Regressed anomaly of the predicted 250-hPa low-pass filtered height (m) at 1200UTC 26 July based on the predicted 250-hPa low-pass filtered height at 1200UTC 28 July averaged over the Russian region (32.5°E～62.5°E, 50°N～70°N) for the same ensemble forecast (contour interval is 5 m). The color shades indicate regions where the statistical significance of the regression exceeds 95 %. Warm (cool) color indicates positive (negative) correlation.

究の結果と整合的である。

次節では、7月末の予測精度悪化の要因を詳細に調べるために、気象庁現業1か月アンサンブル予報データを用いた解析を行った。

3.3 7月末におけるブロッキングの予測と関連する循環場の解析

前節のハインドキャスト予報実験データの解析結果から、7月末はブロッキング発生の予測精度が比較的悪い時期であることが示された (Figs. 4 and 5) . 本節では、7月21日1200UTCを初期時刻とする気象庁現業1か月アンサンブル予報データ (メンバー数25) を用い、250hPa高度場偏差の低周波変動成分の予測値に注目してずれ回帰分析 (Mukougawa, 2005) を実施することにより、予測精度が悪化する7月末におけるロシア上空の高度場の予測と関連する循環場について解析を行った。

このずれ回帰分析では、key dayを7月28日1200UTC (予報7日目) と定め、key dayにおけるロシア域 (32.5°E~62.5°E, 50°N~70°N) の高度場予測値と、それ以前の時刻における高度場予測値との回帰を求めた。ロシア域を上記の領域で定義した理由は次節で述べる。

Fig. 6に、key dayの48時間前 (7月26日1200UTC) の高度場予測値に対するずれ回帰分析の結果を示す。Fig. 6bから、key dayにおけるロシア域の高度場予測値は、その48時間前のイタリア上空の高度場予測値 (Fig. 6a中のL) と有意水準95%以上で統計的に有意に負の相関を持つことが分かる (Student-*t*テストによ

り検定した) . すなわち、予測されたイタリア上空の低気圧性偏差が大きいほど、その2日後に予測されたロシア域の高気圧性偏差は大きくなる傾向にある。また、回帰場で見られる偏差 (Fig. 6b中のL') の中心はアンサンブル平均予測場で見られる低気圧 (Fig. 6a中のL) の中心よりもやや東に位置することが分かる。さらに、その偏差の水平分布から、低気圧性偏差Lが北西-南東方向に引き伸ばされるとき、ロシア域でのブロッキングが発達する傾向となることが分かる。

ただし、回帰場で見られる偏差L' との負相関は、key dayの4日前 (7月24日1200UTC) から2日前 (7月26日1200UTC) までの期間でのみ統計的に有意である。さらに、Fig. 6bで示されるように、より上流側の北大西洋域での高度場偏差とロシア域の高度場偏差との相関は有意でない。これらの相関関係の特徴はkey dayを2~3日前後に変更しても同様である。このように、7月末のロシアブロッキング領域での高度場予測値が有意に関連するのは、その予測時間の4日前までのイタリア上空の高度場予測値であったため、ロシアブロッキングが予測可能な期間は、この時期に極端に短くなったと考えられる。

上記のずれ回帰分析で示されたイタリア上空のトラフの強化は、トラフ軸を北西-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西部のブロッキング高気圧へ向かうロスビー波の波活動度フラックスを増大させ、ロシアブロッキングを強化していたと考えられる。実際に、再解析データを解析した結果、ロシアブロッキングの

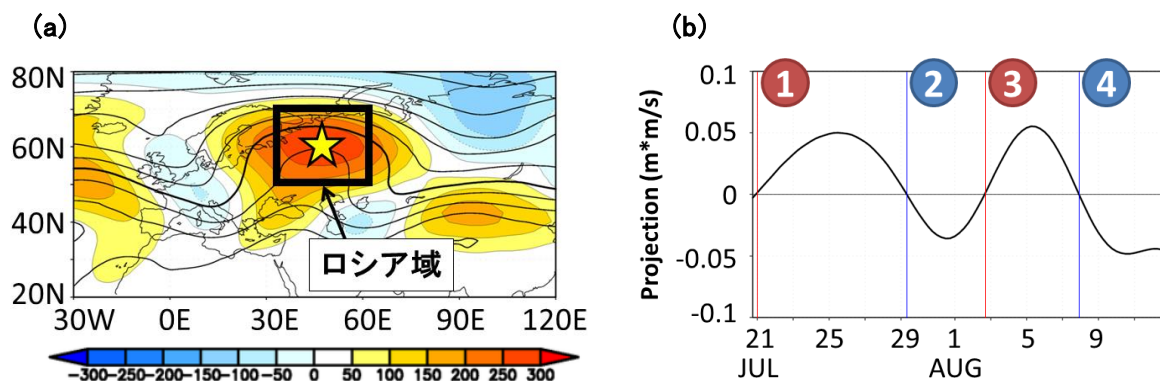


Fig. 7 (a) Horizontal distribution of 250-hPa height (contour) averaged over the occurrence period of the Russian blocking (from 1800UTC 20 July to 1200UTC 12 August). Contour interval is 100 m, and the bold line indicates 10700 m. The color shade indicates the anomaly from the climatology, and its scale is shown at the bottom of this panel. The open star indicates the location of the maximum height anomaly at 47.5°E and 60°N in the Russian blocking region, which is shown by the rectangular region (32.5°E~62.5°E, 50°N~70°N). (b) Time variation of 250-hPa height tendency $A_0 \equiv \partial Z_L / \partial t$ in the Russian blocking region projected on to the time-averaged height anomaly of the blocking (Fig. 7a) using Eq. (7). The period when the 250-hPa height tendency has a positive (negative) value such as period (1) and (3) [period (2) and (4)] is defined as the growing (decaying) period.

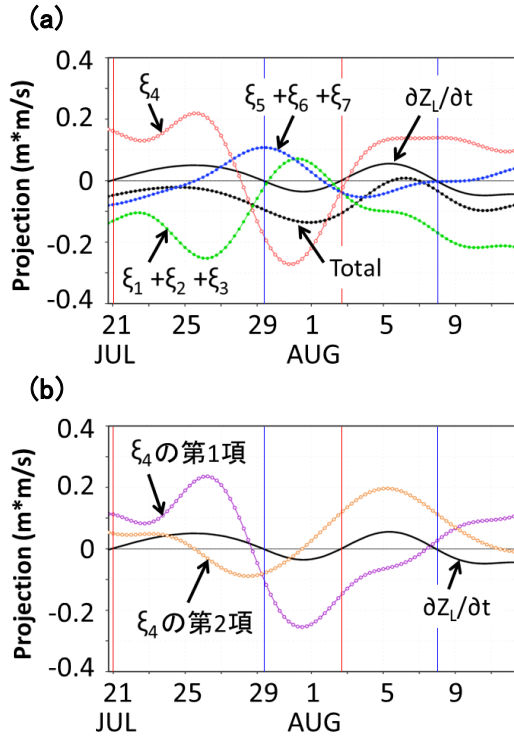


Fig. 8 Time variation of each term of Eq. (4) in the Russian blocking region. (a) A_0 , $\sum_{i=1}^7 \xi_i$ (total), $\sum_{i=1}^3 \xi_i$ (advection), ξ_4 (divergence), $\sum_{i=5}^7 \xi_i$ (nonlinear terms). (b) A_0 , and each term of ξ_4 (see Eq. (8)).

すぐ上流側で発達するトラフの軸は7月24日～7月27日頃に北西－南東方向へ傾斜し、このトラフからロシアブロッキングに向かう波活動度フラックスが増大する様子が確認できた（図は省略）。

以上のように、2010年夏季のブロッキング事例の予測可能性に関してMatsueda (2011) が指摘した、ブロッキングのすぐ南西に位置するトラフとブロッキングの予測精度との関連性は、本研究で実施したずれ回帰分析によって、より定量的に実証することができた。

3.4 渦度収支解析

前節では、アンサンブル予報データの統計的解析から、ブロッキングのすぐ南西に位置するトラフ（以下、L1と呼ぶ）の発達とロシアブロッキングの強化とが有意に関連していることが示されたが、どのようなメカニズムにより両者が関連したのかは明らかにされていない。そこで本節では、この点も含め、ブロッキングの持続に寄与した力学的要因を渦度収支解析（Cash and Lee, 2000; Mori and Watanabe, 2008）により調べ、さらにその結果を予測可能性と関連付けて議論する。

まず、JRA-25/JCDASデータを用いて実施した渦度収

支解析の結果を示す。本研究では、式 (4) に基づき、高度場偏差の低周波変動成分の時間変化 $\partial Z_L / \partial t$ に寄与する渦度収支項に注目して解析を行った。

Fig. 7bに、ロシア域（32.5°E～62.5°E, 50°N～70°N）における $\partial Z_L / \partial t$ の時間変動を示す。ただし、高度場変化傾向 $A_0 \equiv \partial Z_L / \partial t$ 及び渦度収支項 $A_i \equiv \xi_i$ ($i = 1, \dots, 7$) は、ロシアブロッキング発生期間（Fig. 3b）で平均した250hPa高度場偏差パターン $B(x, y)$ (Fig. 7a) に A_i ($i = 1, \dots, 7$) を射影した値、

$$P_i = \frac{\iint A_i(x, y) B(x, y) \cos \phi dx dy}{\iint \cos \phi dx dy} \quad (7)$$

を用いて評価した。式 (7) の積分領域は、Fig. 7aの矩形領域（32.5°E～62.5°E, 50°N～70°N）である。また、式 (7) により、ロシア域でのブロッキングに相当する250hPa高度場偏差パターンを効果的に強化する渦度収支項の寄与 P_i ($i = 1, \dots, 7$) が抽出できる。

本研究では、Fig. 7bで示された A_0 の符号によって、ロシアブロッキング発生期間を次の四つの期間に区分した。

- 期間①：7月21日0000UTC～7月29日0600UTC
- 期間②：7月29日1200UTC～8月2日1200UTC
- 期間③：8月2日1800UTC～8月7日1800UTC
- 期間④：8月8日0000UTC～8月12日1200UTC

ここで、 $A_0 > 0$ である期間①及び③を発達期、 $A_0 < 0$ である期間②及び④と衰退期として、各期間で支配的な力学的メカニズムについて解析した。

まず、ロシアブロッキング発生期間における各渦度収支項の時間変動をFig. 8に示す。ここでは発達期（期間①及び③）に注目して議論する。Fig. 8aから、期間①と期間③では発散項 ξ_4 が、ロシア域での高気圧性偏差を促進する最も主要な項であり、移流項 $\sum_{i=1}^3 \xi_i$ と非線形項 $\sum_{i=5}^7 \xi_i$ は、逆に高気圧性偏差を減少させる作用を持つことが分かる。従って、ロシアブロッキングの発達はいずれの期間も発散項 ξ_4 によってもたらされている。ただし、期間①の後半（7月27日～7月29日）では、高気圧性偏差の形成に対する非線形項の寄与も増大している。

次に、ロシア域の高気圧性偏差の形成を促進した主要因である渦度生成項 ξ_4 について詳しく調べる。 ξ_4 は、

$$\xi_4 = \nabla^{-2} \{ -(f + \bar{\zeta}) \nabla \cdot \mathbf{V}_L - \bar{\zeta}_L \nabla \cdot \bar{\mathbf{V}} \} \quad (8)$$

のように二つの項から成り、式 (8) の第1項、第2項は、それぞれ循環偏差場の低周波変動成分と、気

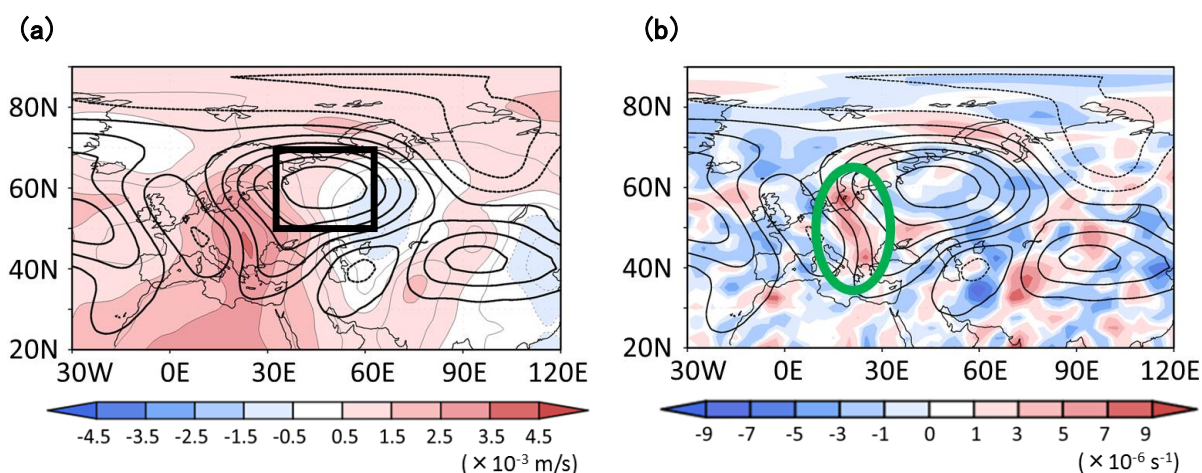


Fig. 9 (a) Horizontal distribution of 250-hPa height tendency (color shade) induced by the first term of the right hand side in Eq. (8) averaged over the period (1) (from 0000UTC 21 July to 0600UTC 29 July). The warm (cool) colored regions have a positive (negative) value. The contours show the time-averaged 250-hPa height anomaly (the contour interval is 50 m) during the Russian blocking period. (b) Same as in Fig. 9a except for 250-hPa horizontal divergence associated with the low-frequency anomaly $\nabla \cdot \mathbf{V}_L$. Divergent (convergent) regions are shaded by warm (cool) colors.

候場の発散・収束による渦度生成を意味する。 ξ_4 の第1項及び第2項の時間変動をFig. 8bに示す。ただし、式(7)に従って、ロシア域の高気圧性偏差 (Fig. 7a) に射影した値を示す。この結果から、期間①と期間③では ξ_4 で支配的な項が異なることが分かる。すなわち、期間①（7月下旬）では ξ_4 の第1項、期間③（8月上旬）では ξ_4 の第2項による高気圧形成がそれぞれ支配的である。

3.5 期間①で支配的な持続メカニズム

Fig. 9aに、250hPaにおける ξ_4 の第1項の空間分布（ただし、期間①で時間平均した値）を示す。この図から、 ξ_4 の第1項は、ロシア域のほぼ全体で高気圧性偏差を生成する効果を持つことが分かる（大きさは約 $10^{-3} \text{ m/s} \approx 100 \text{ m/day}$ ）。気候場の相対渦度 $\bar{\zeta}$ は惑星渦

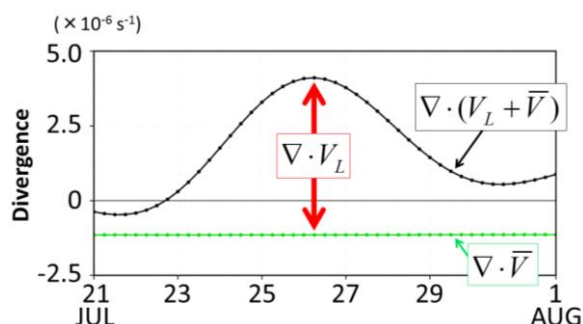


Fig. 10 Time variation of horizontal divergence at 250-hPa averaged over a region ($20^\circ\text{E} \sim 30^\circ\text{E}$, $40^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$). The black line indicates the observed value during 2010 while the green line shows the climatology.

度 f よりも一般には1桁小さく、 $(f + \bar{\zeta}) \approx f$ が成り立つと考えられるため、北半球 ($f > 0$) では、 ξ_4 の第1項は低周波変動成分による水平発散 ($\nabla \cdot \mathbf{V}_L > 0$) が存在する場合に高気圧性偏差を生成する効果を持つ。また、準地衡方程式系において、偏西風中に存在する短波長の定在波に伴う渦度バランスを考慮すると、定在波に伴う水平発散は、帯状風に伴う相対渦度移流 ξ_2 とバランスする必要がある。このため、対流圏上層では、高気圧性偏差の下流側（上流側）で水平収束（水平発散）に伴う低気圧性（高気圧性）偏差形成傾向が、帯状風による定在波の東進傾向を相殺する。このように、帯状風中に存在する定在波では、この水平発散に伴う高度場偏差形成傾向と、定在波に伴う高度場偏差自体とは相関しないため、定在波に伴う水平発散はそれ自身の増幅には寄与しない。実際、Cash and Lee (2000) は、過去のブロッキングの解析から、渦度生成項 ξ_4 は渦度の水平移流に伴うブロッキングの東進を抑制する役割を持つことを示している。

しかしながら、2010年7月下旬のブロッキング発達期には、 ξ_4 の第1項は広範囲で高気圧性偏差を生成する効果を持ち (Fig. 9a)、この時期のブロッキング強化の主要因となっていた。これは、上述したように、北半球では $(f + \bar{\zeta}) \approx f > 0$ であるため、 ξ_4 の第1項が広範囲にわたり高気圧性偏差を生成するためには、ブロッキングの下流側での発散がより大きな値を持つことが必要と考えられる。実際に、2010年7月23日～7月26日では、イタリア上空のトラフL1の発達に伴い、その下流 (Fig. 9bの緑色で囲まれた領域)

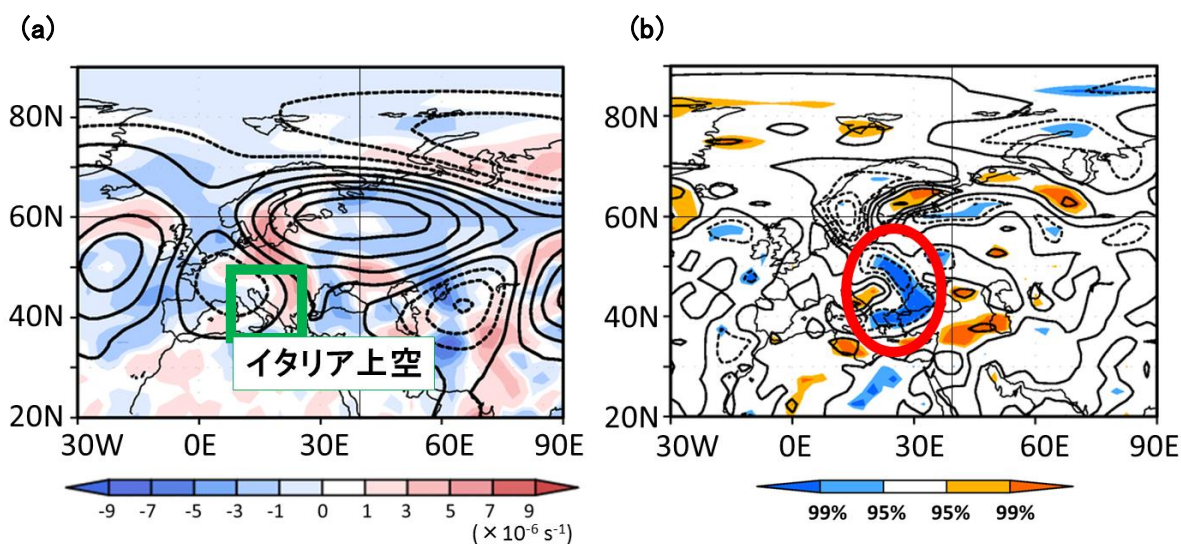


Fig. 11 (a) Ensemble average of the predicted 250-hPa $\nabla \cdot V_L$ (color shade) and Z_L (contour: contour interval is 50m) at 1200UTC 24 July 2010 for the JMA 1-month ensemble forecast (25 members) starting from 1200UTC 21 July 2010. (b) Concurrently regressed anomaly of the predicted $\nabla \cdot V_L$ at the same time (contour: contour interval is $5 \times 10^{-7} s^{-1}$) upon the predicted 250-hPa height anomaly averaged over the rectangular region ($10^\circ E \sim 25^\circ E$, $35^\circ N \sim 50^\circ N$). The color shades indicate regions where the statistical significance of the correlation exceeds 95%, which is assessed by Student's *t*-test.

で $\nabla \cdot V_L$ は大きな正の値となっていた (Fig. 10)

以上の再解析データを用いた解析結果から、期間①におけるブロッキングの発達には、ブロッキングの上流側で水平発散が大きくなったことが重要であることが示唆された。以下では、この水平発散の増大とブロッキングの発達との関係を定量的に明らかにするため、気象庁現業1か月アンサンブル予報デー

タを用いた解析を行った。この解析では、7月21日1200UTCを予報初期時刻とするアンサンブル予報データ(メンバー数25)を用いて回帰分析を実施した。その結果、まず、7月下旬のブロッキングの上流側における $\nabla \cdot V_L$ の予測値は、同時刻のイタリア上空のトラフL1 ($10^\circ E \sim 25^\circ E$, $35^\circ N \sim 50^\circ N$) 付近での高度場偏予測値と有意に関連することが示された (Fig. 11)。

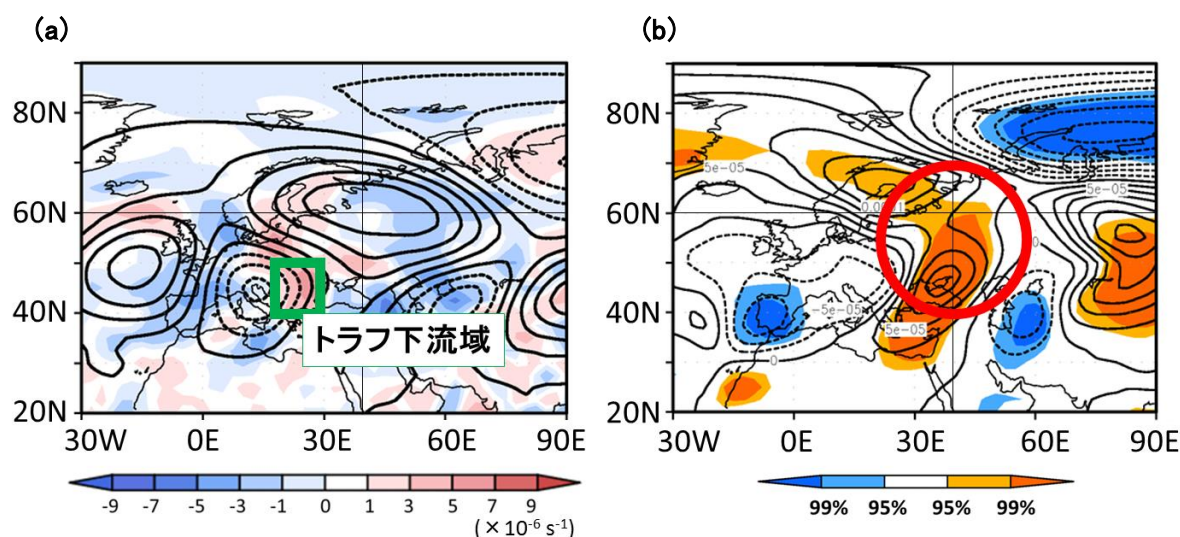


Fig. 12 (a) Same as in Fig. 10a except for 0600UTC 26 July 2010. Ensemble average of the predicted $\nabla \cdot V_L$ (color shade) and Z_L at 250-hPa (contour: contour interval is 50m). (b) Concurrently regressed anomaly of the predicted 250-hPa height tendency $\partial Z_L / \partial t$ (contour: contour interval is $2.5 \times 10^{-5} ms^{-1}$) at the same time upon the predicted $\nabla \cdot V_L$ averaged over the rectangular region ($20^\circ E \sim 30^\circ E$, $40^\circ N \sim 50^\circ N$). The color shades indicate regions where the statistical significance of the correlation exceeds 95%, which is assessed by Student's *t*-test.

すなわち、トラフL1の強い発達を予測したメンバーでは、トラフL1の下流域（ブロッキングの上流域）で同時刻に水平発散 $\nabla \cdot V_L$ が有意に大きいことが示された。さらに、Fig. 12bから、トラフL1の下流域の水平発散 $\nabla \cdot V_L$ が大きいメンバーでは、ロシアブロッキング域において高度場の時間変化傾向が有意に大きいことが示された（有意水準95%以上）。この回歸予測場（Fig. 12b）における $\partial Z_L / \partial t$ の大きさは、ロシアブロッキング域で約 $0.5 \times 10^{-4} \text{ m/s} \approx 5 \text{ m/day}$ で、アンサンブル平均予測値（約 5 m/day ）と同程度である（同時刻の再解析データにおける $\partial Z_L / \partial t$ の値は約 25 m/day ）。以上より、ブロッキングの上流側での水平発散の強さはブロッキングの発達と関連し、さらに、その水平発散の強さはイタリア上空のトラフL1の強さと有意に関連することが、定量的にも示された。

次に、ブロッキングの上流側での水平発散の強さと関連する物理的要因について、同じ気象庁現業1か月アンサンブル予報データを用いて解析を行った。対流圏上層での水平発散の強さは、対流圏内の鉛直流の大きさと関連し、鉛直流の大きさはその地点での非断熱加熱量、すなわち、降水量と関連する可能性が考えられるため、予測値を用いて降水量と水平発散との相関関係を解析した。

その結果、Fig. 13bに示すように、7月24日（予報3日目）に、トラフL1の下流域で水平発散 $\nabla \cdot V_L$ を強

く予測したメンバーでは、その領域での日積算降水量も大きい（両者の相関係数は0.824で、その統計的有意性は99%以上）ことが分かった。一方、トラフL1の強度（250 hPa高度場偏差の低周波変動成分）はトラフL1の下流域での降水量と有意（両者の相関係数は-0.826で、その統計的有意性は99%以上）に関連していた（Fig. 13a）。すなわち、7月下旬におけるイタリア上空のトラフを強く予測したメンバーでは、そのトラフの下流域で降水量が多く、その領域での対流圏上層の水平発散も強くなることが示された。従って、期間①（7月21日0000UTC～7月29日0600UTC）では、ブロッキングの上流側で、降水に伴う非断熱加熱によって強い上昇流が生じ、対流圏上層で大きな水平発散が発生して、その下流域でブロッキングを発達させたと考えられる。すなわち、7月下旬のブロッキングの発達にはその上流側での非断熱加熱過程が重要であることが示唆された。

7月末にブロッキングの予測精度が悪化したこと（Figs. 3 and 4）は、ブロッキングの発達に非断熱加熱過程が重要であったこととも関連している可能性がある。実際、7月21日1200UTCを予報初期時刻とする気象庁現業1か月アンサンブル予報データの解析から、予報開始後すぐ（予報3日目）にイタリア上空のトラフL1の強度の予測にばらつきが生じ、それに伴い、トラフL1の下流域における降水強度と、その上空での水平発散の強さの予測に大きなばらつきが

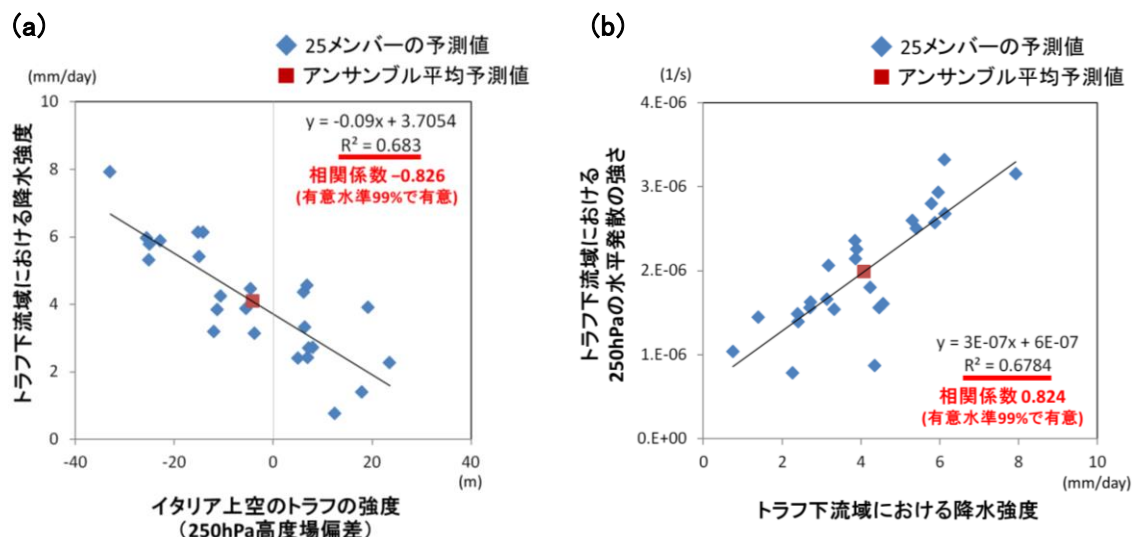


Fig. 13 (a) Scatter diagram of the predicted 250-hPa daily-mean low-frequency height anomaly (m) averaged over the rectangular region ($10^{\circ}\text{E} \sim 25^{\circ}\text{E}$, $35^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$) (x-axis) and the predicted accumulated precipitation (mm/day) during the preceding 24 hours averaged over the downstream region ($20^{\circ}\text{E} \sim 30^{\circ}\text{E}$, $40^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$) (y-axis) at 1200UTC 24 July 2010 for each ensemble member of the JMA 1-month ensemble forecast (25 members) starting from 1200UTC 21 July 2010. (b) Same as in Fig. 13a except for the predicted accumulated precipitation (mm/day) during the preceding 24 hours averaged over the region ($20^{\circ}\text{E} \sim 30^{\circ}\text{E}$, $40^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$) (x-axis) and the predicted 250-hPa $\nabla \cdot V_L$ averaged over the same area (y-axis).

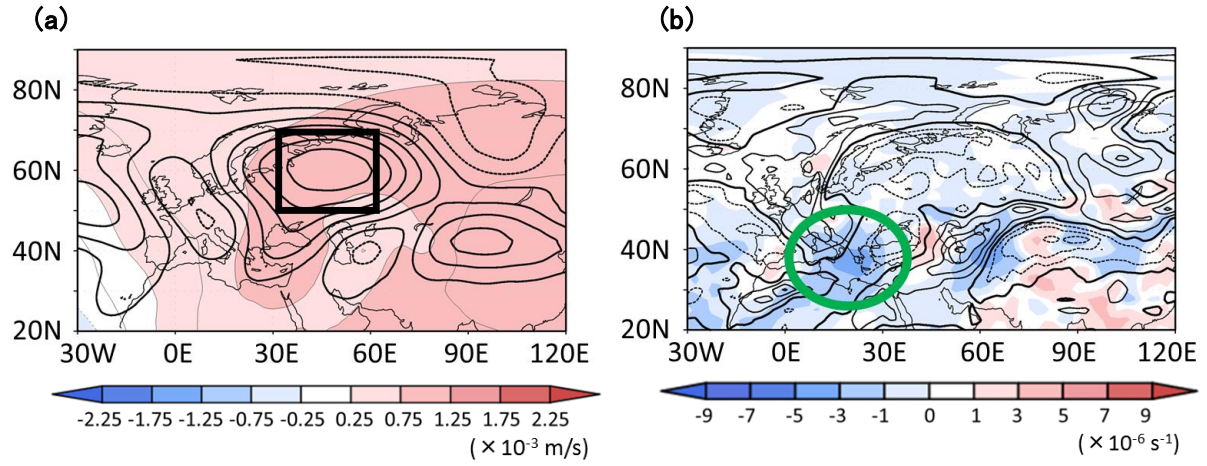


Fig. 14 (a) Horizontal distribution of 250-hPa height tendency (color shade) induced by the second term of the right hand side in Eq. (8) averaged over the period (3) (from 1800UTC 2 August to 1800UTC 7 August). The warm (cool) colored regions have a positive (negative) value. The contours show the time-averaged 250-hPa height anomaly (the contour interval is 50 m) during the Russian blocking period (same as in Fig. 9a). (b) Same as in Fig. 14a except for the horizontal divergence associated with the climatological flow $\nabla \cdot \bar{\mathbf{V}}$ (color shade) and ζ_L (contour: contour interval is 2.0×10^{-5} s $^{-1}$) at 250 hPa. Divergent (convergent) regions are shaded by warm (cool) colors.

生じていた。この水平発散の予測の大きなばらつきが、ブロッキングの予測精度を悪化させたと考えられる。これは3.3節で実施したずれ回帰分析の結果 (Fig. 6) と整合的である。

3.6 期間③で支配的な持続メカニズム

次に、8月上旬におけるロシアブロッキング発達期

(期間③) に支配的な持続メカニズムについて議論する。Fig. 14aに、250 hPaにおける ξ_4 の第2項 $\nabla^{-2}(-\zeta_L \nabla \cdot \bar{\mathbf{V}})$ の空間分布 (ただし、期間③で時間平均した値) を示す。この図から、期間③における ξ_4 の第2項はユーラシア西部全域で正の高度場偏差を形成する傾向を持つことが分かる (大きさは約 10^{-3} m/s $\approx$ 100 m/day)。

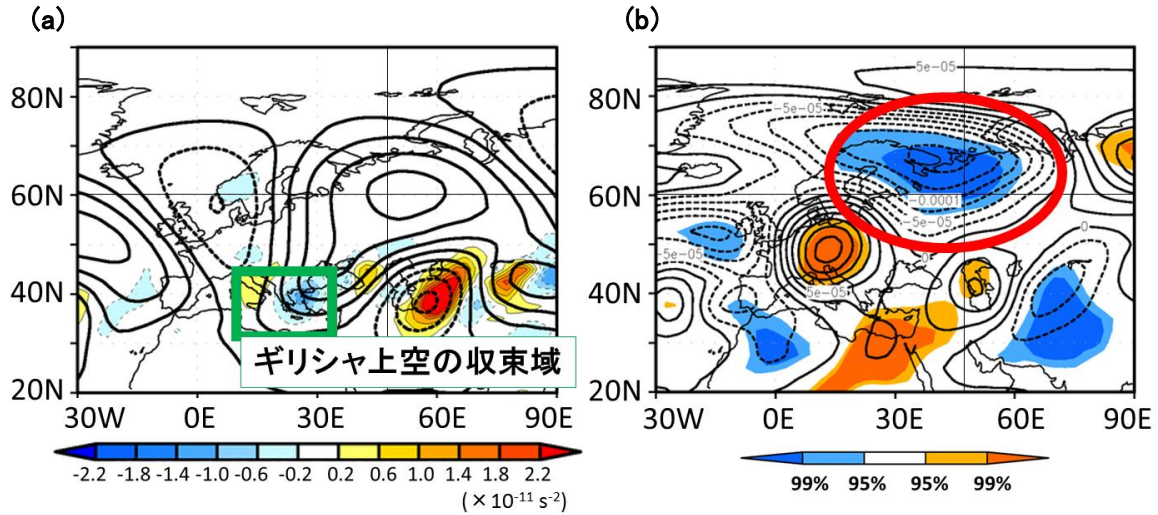


Fig. 15 (a) Ensemble average of the predicted 250-hPa vorticity source term $S_{42} \equiv -\zeta_L \nabla \cdot \bar{\mathbf{V}}$ in Eq. (8) (color shade) and Z_L (contour: contour interval is 50 m) at 0600UTC 5 August 2010. Cool (warm) colored regions have anticyclonic (cyclonic) vorticity forcing for the JMA 1-month ensemble forecast (25 members) starting from 1200UTC 28 July 2010. (b) Concurrently regressed anomaly of the predicted 250-hPa $\partial Z_L / \partial t$ at the same time (contour: contour interval is 2.5×10^{-5} ms $^{-1}$) upon the predicted S_{42} at 250 hPa averaged over the rectangular region ($10^\circ\text{E} \sim 35^\circ\text{E}$, $30^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$). The color shades indicate regions where the statistical significance of the correlation exceeds 95%, which is assessed by Student's t -test. Warm (cool) colored regions have a positive (negative) correlation.

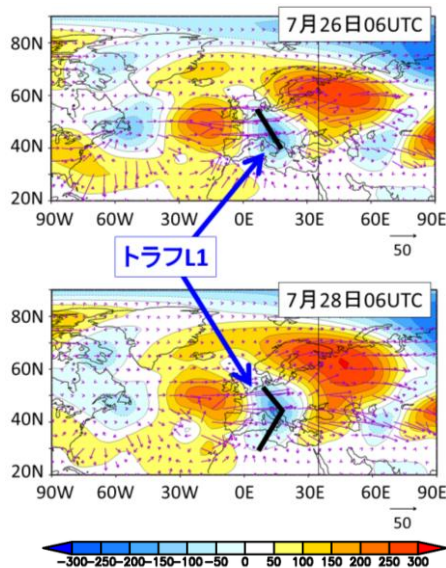


Fig. 16 Low-pass filtered height anomaly (m) (color shade) and the associated wave-activity flux (m^2s^{-2}) (vector) of Takaya and Nakamura (2001) at 0600UTC 26 Jult (top) and 0600UTC 28 July (bottom).

このように ξ_4 の第2項が正の高度場偏差を形成するのは、気候場の収束域 ($\nabla \cdot \bar{\mathbf{V}} < 0$) に低周波変動成分の高気圧性渦度偏差 ($\zeta_L < 0$) が存在する場合、または、その逆の場合である。すなわち、気候場の水平発散域とブロッキング発生域の位置関係により、ブロッキングは発達あるいは減衰する。実際、Fig. 14b に示すように、夏季のユーラシア大陸上の気候場では、ギリシャ上空に収束域 (以下、 C_G と呼ぶ) が存在する。また、2010年7月25日頃から収束域 C_G の上空に高気圧性偏差 (以下、 H_G と呼ぶ) が形成し始める様子が確認できた。従って、期間③におけるロシアブロッキングの持続では、 ξ_4 の第2項の寄与が重要であったと考えられる。

8月上旬におけるロシアブロッキングの持続と ξ_4 の第2項 $\nabla^{-2}(-\zeta_L \nabla \cdot \bar{\mathbf{V}})$ との関連を定量的に明らかにするため、2010年7月28日1200UTCを予報初期時刻とする気象庁現業1か月アンサンブル予報データ (メンバー数は25) を用いて回帰分析を実施した。具体的には、Fig. 15a の緑色の矩形で示したギリシャ上空の収束域 C_G ($10^\circ\text{E} \sim 35^\circ\text{E}$, $30^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$) における ξ_4 の第2項による渦度ソース $S_{42} = -\zeta_L \nabla \cdot \bar{\mathbf{V}}$ の予測値と、同時刻の高度場変化傾向 $\partial Z_L / \partial t$ との関係を調べた。8月5日0600UTC (再解析データで ξ_4 の第2項の寄与が極大となる時刻) についての回帰分析の結果をFig. 15bに示す。

その結果、ギリシャ域 C_G における渦度ソース S_{42} の予測値とロシア北西部における高度場変化傾向 $\partial Z_L / \partial t$ の予測値とは統計的に有意な負の相関関係

を持つことが分かった (Fig. 15b)。すなわち、ギリシャ上空で生成する渦度が負で大きいほど、ロシア西部のブロッキング領域での高度場変化傾向は正で大きくなることが示された。なお、ロシア北西部 (白海付近) では、両者の相関係数の統計的有意性は99%以上であった。また、8月3日～8月6日の期間についても、同様の相関関係が得られた (図は省略)。Fig. 15bより、回帰予測場での $\partial Z_L / \partial t$ の大きさは、ブロッキングの中心付近で約 $10^{-4} \text{ m/s} \approx 10 \text{ m/day}$ であり、これはアンサンブル平均予測値 (約 10 m/day) と同程度の大きさである (なお、解析値における $\partial Z_L / \partial t$ は約 50 m/day)。このように、期間③ (8月2日18UTC～8月7日18UTC) におけるブロッキング領域の高度場変化傾向の予測値は、ギリシャ上空における ξ_4 の第2項による渦度ソース $S_{42} = -\zeta_L \nabla \cdot \bar{\mathbf{V}}$ の予測値と有意に関連していることが示された。

次に、このギリシャ上空の高気圧性偏差 H_G の形成・維持要因について議論する。そのために、式 (7) をギリシャ域 ($10^\circ\text{E} \sim 35^\circ\text{E}$, $30^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$) に適用して渦度収支バランスを解析した。その結果、高気圧 H_G の形成期 (7月26日～8月1日) においては ξ_4 の第1項と ξ_5 が重要であることが分かった。すなわち、ギリシャ上空の高気圧 H_G は、前節で述べた7月下旬におけるブロッキングの発達と同様のメカニズムと、低周波変動成分に伴う渦度フラックスの収束によって形成されたと考えられる。実際、Fig. 12bより、トラフL1の下流側 (Fig. 12aの緑色の矩形で示した領域) における対流圏上層の水平発散が強いほど、ギリシャ域から黒海上空にかけて高気圧性偏差の生成が強化されることが分かる。また、250 hPaにおける波活動度フラックス (Takaya and Nakamura, 2001) の解析から、トラフL1が強化 (7月26日頃) した後の7月28日頃に、トラフL1から射出する波活動度フラックスベクトルは、北東方向と東方向に分岐し、高気圧 H_G が形成し始めることが確認できた (Fig. 16)。以上の結果は、ギリシャ上空の高気圧 H_G の形成に ξ_4 の第1項と ξ_5 の寄与が重要であったことと整合的である。

一方、8月1日～8月6日にギリシャ上空の高気圧性偏差 H_G は衰退傾向にあるが (偏差減衰の主要因は基本流に伴う渦度の水平移流)、それに抗って高気圧性偏差を維持していたのは ξ_4 であった (ξ_4 の第1項、第2項ともに高気圧形成を促進する向きに作用した)。

この時期の高気圧 H_G の維持の予測について、気象庁現業1か月アンサンブル予報データを用いて調べた結果、7月28日1200UTCを予報初期時刻とするアンサンブルメンバーでは、ギリシャ域における高気圧偏差の大きさを比較的良く予測できていた。これは、予報初期時刻に十分発達したトラフL1と高気圧 H_G が存在しているためであると考えられる。しかしな

がら、予報における高気圧 H_G の維持要因については、より詳しい解析が必要である。

4. まとめ

2010年夏季にユーラシア西部では1か月以上の持続性を持った強いブロッキングが発生し、主にロシア西部を中心に顕著な高温をもたらした。このブロッキング事例は、6月中旬に 10°W 付近で持続した北大西洋ブロッキング、6月下旬～7月下旬に 30°E 付近で持続したヨーロッパブロッキング、7月下旬～8月中旬に 50°E 付近で持続したロシアブロッキングが連続して発生した事象と捉えることができる。本研究では、最も高度場偏差の大きかったロシアブロッキング（7月下旬～8月中旬）に着目し、その持続メカニズムと予測可能性を明らかにするために、JRA-25/JCDASデータ、気象庁現業1か月アンサンブル予報データ、気象研究所/気象庁統一大気大循環モデルによるハインドキャスト予報実験データを用いて詳しく解析した。

まず、再解析データを用いて実施した渦度収支解析の結果から、7月下旬におけるロシアブロッキングの発達期では、水平発散の低周波変動成分に伴う高気圧性渦度生成が重要であることが示された。この渦度生成は、7月24日～7月27日にブロッキングの南西（イタリア上空）でのトラフの強化に伴い、トラフ下流域の対流圏上層で低周波変動成分に伴う発散が増大したと関連していた。このことは、この時期のロシアブロッキングの発達には、その上流域において降水に伴う非断熱加熱により強化された対流圏上層での水平発散が重要な役割を果たしていたことを示唆している。

また、ハインドキャスト予報実験データの解析から、7月末にロシア域でブロッキングの予測精度が特に悪化することが示された。さらに、気象庁現業1か月アンサンブル予報データの解析から、同時期におけるロシア西部のブロッキング域での対流圏上層の予測高度場と、その4日前までのイタリア上空におけるトラフ域の予測高度場との負の相関は統計的に有意であるが、それより以前、あるいは、北大西洋域などのより上流域での予測高度場との相関は有意でないことが示された。従って、2010年7月末にロシア域でのブロッキングの予測精度が悪化したのは、ブロッキングがイタリア上空でのトラフの急速な強化という直前の要因によって発達したためであったことが示唆される。なお、イタリア上空のトラフの強化要因とその予測可能性については今後検証する必要がある。

一方、8月上旬のロシアブロッキングは、気候場の

収束・発散場とブロッキングに伴う低周波変動成分との相互作用によって発達したことが示された。すなわち、ユーラシア西部の夏季の気候場における対流圏上層でのギリシャ域の強い収束域に、ブロッキングに伴う負の相対渦度偏差が存在したことにより、渦管の伸縮に伴う負の渦度生成が生じ、ロシア域でブロッキングが維持・強化したことが分かった。また、気象庁現業1か月アンサンブル予報データの解析からも、この時期におけるロシア域での対流圏上層の予測高度場の時間変化が、ギリシャ上空での高気圧性偏差の強さと統計的に有意に関連していることが示された。

最後に、Matsueda (2011) と同様に、ハインドキャスト予報実験データの解析から、8月上旬にロシアブロッキングの西側領域での予測精度は、東側領域に比べて悪いことが示された。この予測可能性の領域依存性について、今後解析する予定である。

参考文献

- 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, 気象研究ノート第225号「2010年夏 日本の猛暑」, pp. 65-76.
- 森正人・渡部雅浩・木本昌秀 (2012) : MIROC大気モデルによる2010年夏季の天候再現実験, 気象研究ノート第225号「2010年夏 日本の猛暑」, pp. 127-145.
- Barriopedro, D., Fischer, E. M., Luterbacher, J., Trigo, R. M. and Garcia-Herrera, R. (2011): The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe. *Science*, Vol. 332, pp. 220-224, doi: 10.1126/science.1201224.
- Cash, B. A. and Lee, S. (2000): Dynamical process of block evolution. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 57, pp. 3202-3218.
- Dole, R., Hoerling, M., Perlwitz, J., Eischeid, J. and Pegion, P. (2011): Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave?, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 38, L06702, doi: 10.1029/2010GL046582.
- Duchon, C. E. (1979): Lanczos filtering in one and two dimensions, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 18, pp. 1016-11022.
- Fischer, E. M., Vidale, P. L., Seneviratne, S. I., Lüthi, D. and Schär, C. (2007): Soil moisture-atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave, *J. Clim.*, Vol. 20, pp. 5081-5099.
- 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.
- 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.
- Mori, M. and Watanabe, M. (2008): The growth and triggering mechanisms of the PNA: A MJO-PNA coherence, *J. Meteor. Soc. Japan.*, Vol. 86, pp. 213-236.
- Mukougawa, H., Sakai, H. and Hirooka, T. (2005): High sensitivity to the initial condition for the prediction of stratospheric sudden warming, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, L17806, doi: 10.1029/2005GL022909.
- Mullen, S. (1986): The local balances of vorticity and heat for blocking anticyclones in a spectral general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 43, pp. 1406-1441.
- 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.
- Onogi, K. and coauthors (2007): The JRA-25 reanalysis, *J. Meteor. Soc. Japan.*, Vol. 85, pp. 369-432.
- Schneidereit, A., Schubert, S., Vargin, P., Lunkeit, F., Zhu, Z., Peters, D. H. W. and Fraedrich, K. (2012): Large-scale flow and the long-lasting blocking high over Russia: Summer 2010, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 140, pp. 2967-2981.
- 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.

(論文受理日 : 2013年6月3日)