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(京大院・理)・黒田友二(気象研)・向川均(京大・防災研)

1. はじめに

2010年夏,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ヵ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 年夏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 ヵ月アンサン

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のデータを用いた. 気象庁1 ヵ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を固定して与えた 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ヵ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 圧ー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ヵ月アン 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とき、予報の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。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一時間発展を調べた。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

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

$$GHGN = \frac{Z500(\varphi_{N}) - Z500(\varphi_{0})}{\varphi_{N} - \varphi_{0}}$$
 (2)

$$egin{aligned} arphi_N &= 77.5 \,^\circ \mathrm{N} \pm \Delta \ & arphi_0 &= 60.0 \,^\circ \mathrm{N} \pm \Delta \ & arphi_S &= 40.0 \,^\circ \mathrm{N} \pm \Delta \ & \Delta \, \mathrm{は緯度間隔で}, \ \Delta = 0 \,^\circ, 2.5 \,^\circ, 5.0 \,^\circ \end{aligned}$$

を各 Δ について求める. そして, ある一つの Δ について,

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

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

$$f_i = \frac{M}{20} \tag{5}$$

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 ヵ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 ヵ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(I)で求められる GHGS のうち最大の値で定義

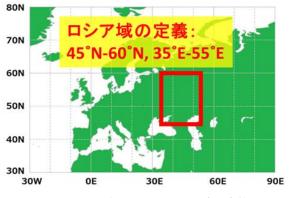


図1 本研究におけるロシア域の定義.

した. また, ブロッキング強度 I の領域平均は, ブロッキングが発生したと判断された格子点では I=GHGS, 発生していないと判断された格子点では I=0 とおき, ロシア域(35°E-55°E;図 1 参照)で領域平均した \bar{I} を求め, \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(図 2).

3. 結果

3-1. 2010年夏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図3に示す.発生領域は式(3)に基づき定義した.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

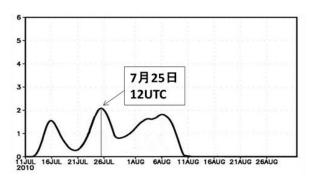


図2 最新のデータから求められた, ロシア域 $(35^{\circ}E-55^{\circ}E)$ で東西平均したブロッキング強度 \bar{I} の時系列.

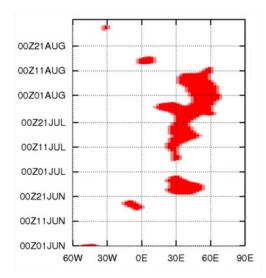


図3 2010年夏季(6月-8月)におけるブロッキング 発生領域(赤色で色塗り)の経度-時間断面図.

の領域 $(20^{\circ}E$ 付近と $50^{\circ}E$ 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(図4a,b)と7月末(図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 (図3). 低周波変動成分に注目すると, 6月18日 00UTC(図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(図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 図 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 (図 4c) が東進しながらオメガ型のブロッキ ング(図 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 年夏のイベントの予測精度の時間変動を調べた(図 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。

図 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。図 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

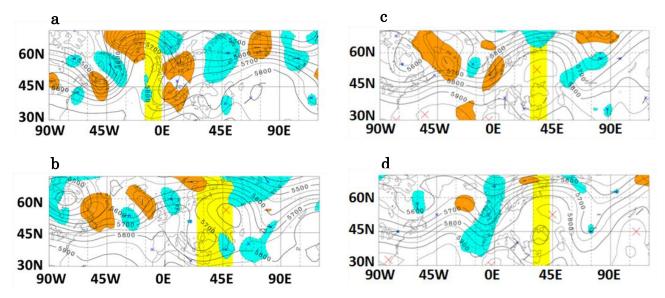


図4 500hPa 高度場の水平分布. a: 2010 年 6 月 18 日 00UTC, b: 2010 年 6 月 25 日 00UTC, c: 2010 年 7 月 20 日 00UTC, d: 2010 年 7 月 25 日 00UTC. 太い実線は高度場の低周波変動成分(等値線間隔 50m)を示し、橙色または水色で色塗りした領域は偏差が 40m 以上の大きさを持つ高周波変動成分の領域を示し、橙色領域が高気圧性偏差,水色領域が低気圧性偏差に対応する. これらの領域の等値線間隔は 20m. 黄色で示した経度帯はブロッキング発生領域を表している。また、赤色の×印は 20°×20°の領域で定義された高度場極大点である.

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と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 1 ヵ月半 (図 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 ヵ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)のブロッキング予報精度は比較的悪いことが示されている。

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。図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(図2)をkey day として解析した。図6c、d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(図 6c,d)は、アンサンブル平均予測場(図 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、かつ、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は、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)。

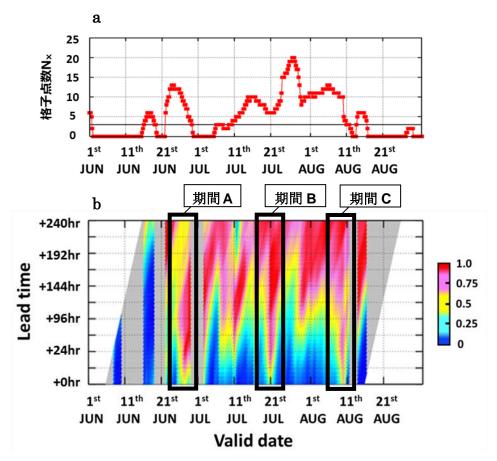


図5 2010 年夏季(6月-8月)のブロッキング発生予測の予測精度の時間変動. LAF 法に基づく 20 メンバーのアンサンブル予報を用いて評価した. \mathbf{a} : 再解析データから見積もられた大西洋-ユーラシア域(30 $^\circ$ W-90 $^\circ$ E)でのブロッキング発生領域に存在する東西格子点数. 横軸は観測時間,縦軸は東西格子点数. \mathbf{b} : 大西洋-ユーラシア域におけるブロッキング発生域でのブライア・スコアの時系列. 横軸は予測日,縦軸は予報時間で,色がブライア・スコアを示す. 灰色領域は再解析データでブロッキングが発生していない期間,あるいは, N_x が 3 未満の期間.

4. 結論

2010 年夏季にユーラシア域では 1 ヵ月半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、このブロッキングイベントの形成・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 ヵ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日以上の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ヵ月アンサンブル予報結果に基づくずれ回帰分析の結果は、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ヵ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。

引用文献

- Barriopedro, D., E. M. Fischer, J. Luterbacher, R. M. Trigo, and R. Garcìa-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.
- 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.

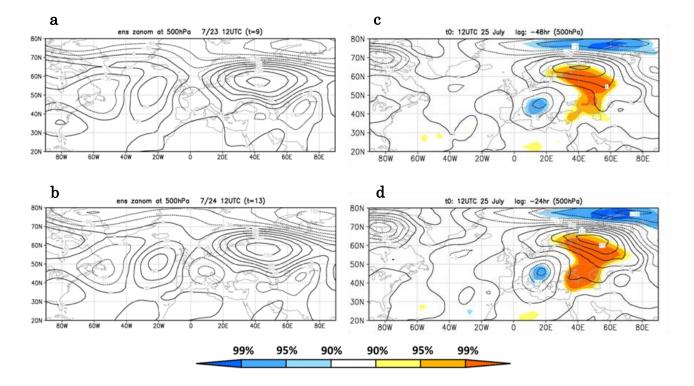


図6 2010年7月21日12UTCを初期時刻とする気象庁現業1ヵ月アンサンブル予測結果を用いて解析したずれ回帰分析の結果. 左列は500hPa高度場予測値の低周波変動成分のアンサンブル平均場(等値線間隔は30m). 右列は2010年7月25日のロシア域のブロッキング強度に基づく各メンバーの予測した500hPa高度場の低周波変動成分偏差の回帰(実線;等値線間隔は3m). Student・tテストで求めた相関係数の統計的有意性が90%(95%)以上の領域を薄く(濃く)色塗りした. 寒色系(暖色系)は負(正)の相関を示す. a,c:2010年7月23日12UTC(予報初期日). b,d:2010年7月24日12UTC.