

2010年夏のロシアブロッキングにおける移動性擾乱の寄与

山崎哲¹, 伊藤久徳², 直江寛明³

1. 海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター

2. 九州大学大学院理学研究院

3. 気象庁

1 はじめに

ブロッキングは、偏西風の蛇行・分流や移動性擾乱の停滞を伴う現象で様々な異常気象と関係する。その一例として、2010年に起きた夏のロシアでの「記録破り」な熱波やパキスタンでの洪水は、ロシア西部に発生したブロッキング（以下、ロシアブロッキング）が原因であったことが指摘されている（e.g., Hong et al. 2011）。このロシアブロッキングについて、予報可能性や地球温暖化との関係の観点から議論がなされている（Matsueda 2011; 藤井ら 2013; Dole et al. 2011; Watanabe et al. 2013）。しかしながら、その発生・持続メカニズムの力学的研究については少ない。

これまでいくつかの論文でロシアブロッキング形成・持続の力学について、特に熱帯からの寄与に注目して、研究がなされた。Otomi et al. (2012)では、2010年夏の北極振動の正位相がロシアブロッキングに対応する高気圧性偏差を作っていることに注目し、北極振動と大西洋海面水温との関係から調査を行った。その結果、2009/10年冬季の北極振動負位相が熱帯域を含む大西洋海面水温偏差に影響を与え、その偏差が2010年夏に北極振動に影響を与えるという過程をデータ解析・数値実験から示した。Schneider et al. (2012)は、ENSOの極性とヨーロッパ・西部ロシアでの夏季のブロッキングの関係を調査し、ENSOがLa niña位相のときに、季節内の時間スケールを持つ定常Rossby波が変調され、ヨーロッパ域での高気圧性偏差の発達に寄与することを示した。特に、2010年のロシアブロッキングの発生に関しては、ENSOが夏にLa niña位相へと遷移したことにより、定常Rossby波と移動性擾乱活動が変調されたことでその両者が引き金となったと結論付けている。しかしながら、定量的にどの現象がどのくらいロシアブロッキングの持続に寄与しているのかを議論した論文

は、我々の知る限りではまだない。これまでのブロッキングのメカニズム研究で、移動性擾乱がブロッキングの持続に重要な寄与を果たすということが多くに研究で指摘されているので（e.g., Shutts 1983）、本研究では、まず移動性擾乱だけのブロッキング持続への寄与を定量化し、ブロッキング持続の主要因を探る。

ここで、移動性擾乱によるブロッキング持続を定量的に評価する上で、Yamazaki and Itoh (2013a; 2013b; 以下YIA, YIBとする)で提案されたブロッキング持続メカニズム、選択的吸収メカニズム（SAM）を援用する。SAMでは、ブロッキング高気圧は、同極性の渦である移動性高気圧のみを選択的に吸収し、逆極性の移動性低気圧を遠ざけることで、自身の持続性を保証する。このメカニズムのポイントは‘渦位（PV）の補給メカニズム’と、‘渦と渦の相互作用’である：前者は移動性高気圧からブロッキング高気圧への低PVの補給を説明し、後者は、移動性高気圧と低気圧でブロッキングへの影響が異なる、つまり非対称となることを説明する。

また、ブロッキングの形成ではなく持続メカニズムについてここでは考察する。ブロッキングの形成と持続を陽に区別することは、複雑なブロッキングのメカニズムを明らかにする上で重要な第一歩となる（YIA参照）。加えて、冬季のブロッキング持続メカニズムはYIA・YIBで議論されているので、持続メカニズムの季節間での違いを比較する上でも役に立つ。

ロシアブロッキングに対する移動性擾乱の寄与の定量的評価を、SAMを援用して調査する。本論文の構成は以下になる。まず2節で、ロシアブロッキングの持続でSAMが実際に働いているかを調べる。次に3節で大気大循環モデルを用いた感度実験を行い、移動性擾乱の寄与を定量的に評価する。最後に4節でまとめを行う。

2 流跡線解析

SAMでは、移動性高気圧はブロッキング高気圧に吸収されるが移動性低気圧はされないこと、そして、ブロッキング高気圧を構成する大気が中緯度のストームトラック域を起源としていることが重要である。そこで、移動性高・低気圧それぞれを起源とする大気塊を追跡する前方流跡線解析と、ブロッキング高気圧内部を起源とする大気塊を逆追跡する後方流跡線解析の両方を行う。流跡線解析の方法はYIAを参照せよ。

今回解析に用いるデータは、JRA25/JCDAS再解析(Onogi et al. 2007)等温位面データ(360×180格子)である。ロシアブロッキングの持続期間は、2010年7月初旬から8月前半とする(Matsueda 2011とSchneiderreit et al. 2012参照)。移動性高・低気圧の検出には、カットオフ周期8日のLanczosフィルターを用い、ErtelのPV(以下EPV)の高周波(ハイパス)負/正成分を移動性高/低気圧成分とする。また、解析は330 K面で行った:この高度はおおよそ対流圏界面に対応し、移動性擾乱とブロッキング偏差の振幅が最も大きくなる高度である(図には示さない)。

まず、前方流跡線では、ブロッキング持続期間中の3つの時刻を対象として、上流で検出される移動性高・低気圧それぞれ3個の上に複数の粒子を置き、5日後までの粒子の位置を追跡する。このとき、移動性高(低)気圧起源粒子は、ブロッキングから十分に上流の高周波成分-3.0 PVU以下(3.0 PVU以上)かつ非フィルターで0.5 PVU以下(8.0 PVU以上)のEPV値を持つ格子点上に置かれる。

3つの各対象時刻での流跡線を見ると(図1a-c)、どの対象時刻においても、移動性高気圧起源の粒子(高気圧性粒子)はブロッキング高気圧に選択的に吸収され、低気圧性起源の粒子(低気圧性粒子)は下流に流されながらブロッキング高気圧に遠ざけられていることがわかる:これは、SAMでの移動性高低気圧の非対称な振舞いと整合的である。ここでの高・低気圧性粒子の動きにはそれぞれ特徴が見られる。高気圧性粒子は、ブロッキング高気圧に吸収される前に、ブロッキング高気圧西方のトラフを大きく南に回り込んでいる様子が見られる:これはYIAでの冬季ブロッキングの解析でも見られた様子で

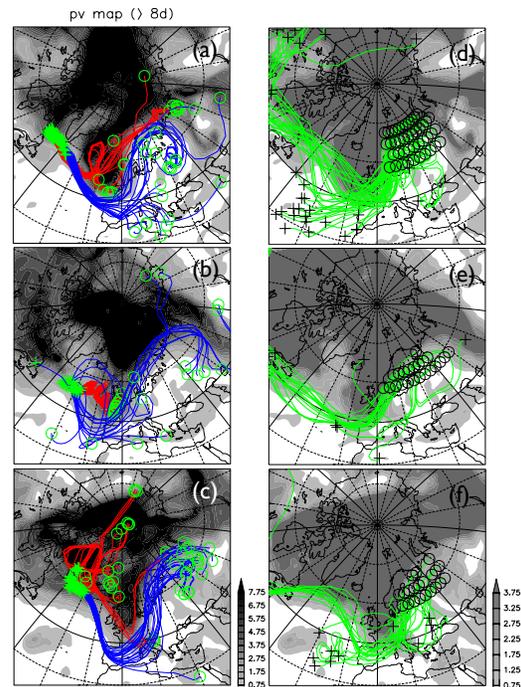


図1: ブロッキング持続期間中の3つの対象時刻(a, d) 2010年7月14日00UTC, (b, e) 2010年7月22日00UTC, (c, f) 2010年8月4日00UTCでの(a-c) 前方・(d-f) 後方流跡線を示す。前方流跡線での移動性高/低気圧起源粒子の流跡線は青/赤線で示され、初期時刻は(a) 7月11日00UTC / 7月11日18UTC, (b) 7月20日06UTC / 7月17日18UTC, (c) 8月1日00UTC / 8月2日00UTCとなっており、流跡線の開始点は+印、終了点は○印で示される。後方流跡線(緑線)の計算開始時刻はそれぞれの対象時刻に対応し、○印が開始点、+印が終了点を示す。陰影は対象時刻でのカットオフ周期8日のEPVローパス(低周波)成分(単位はPVU)を示している。

ある。この動きは、持続するロシアブロッキング高気圧西方に停滞性のトラフが存在することを示す。次に低気圧性粒子では、極渦に吸収されて北側に移動する傾向が見られる。また、これらの粒子は、ブロッキング西方のトラフに一旦トラップされたり、通過する様子も見られている。こういった様子は、低気圧性粒子が同極性の低気圧性渦に吸収されていると解釈でき、SAMの考え方と矛盾しない。

次に、後方流跡線解析を行い、ブロッキング高気圧を構成する粒子がどの領域を起源としているか調査する。この解析によって、ブロッキングの持続性を決定する主要因を見いだす。粒子は、対象時刻において、0°E-60°Eの間で、非フィル

ターの EPV が 2.0 PVU 以下かつ帯状平均 EPV が 3.0 PVU 以上の各格子点に置かれ、それをブロッキング領域と定義する。粒子は 6 日前まで追跡される。

図 1d-f に結果が示される。どの対象時刻についても、ブロッキングを構成する粒子の大部分が中緯度のストームトラック域を起源としている。図 1d, f においては、いくらかの粒子が亜熱帯域を起源としているように見えるが、それでも半分以上の粒子はストームトラック域を起源としている。よって、ブロッキングを維持する主な要因は、中緯度の移動性擾乱であることが示唆される。

3 大気大循環モデルを用いた移動性高・低気圧に対する感度実験

さらに定量的な解析の結果を堅固にするために、現実的な大気大循環モデル (AGCM) を用いた感度実験を行う。移動性高/低気圧およそ 1 つを消した実験を noANTI/noCYC 実験とし、それを消さない実験を CTL 実験としてそれぞれで 10 日間の積分を行い結果を比較し、移動性高/低気圧がブロッキング持続に与える影響を見積る。

実験には地球シミュレータ用に最適化された AGCM (AFES, Ohfuchi et al. 2004; Enomoto et al. 2008; Kuwano-Yoshida et al. 2010) を用いた。解像度は三角形切断 T119 である。ロシアブロッキング持続期間中の 7 月 10 日 00UTC から 8 月 5 日 12UTC までの 12 時間毎を初期値として、それぞれの実験で 54 つの 10 日間積分を行った。初期値には、JRA-25/JCDAS 再解析等圧面データ (288×145 格子) の、各時刻での瞬間値を用いている；これを CTL 実験とする。ただし、比湿に関しては、全ての実験の全ての初期値に対して 2010 年 7 月から 8 月の平均値を用いている：これは、noANTI・noCYC 実験で移動性擾乱を取り去るときに、水蒸気の場合が不整合になることを防ぐためである。この操作は、現実場を再現するのに不適當であるが、対流圏上層での数日程度の総観規模大気運動は断熱的なので、その時間スケールの現象を解析する上では問題ないと考えられる。海面水温・海水の境界条件に関しては、日毎データの OISST (Reynolds et al. 2007) を 2010 年 7-8 月平均し

たものを全ての実験の全ての初期値に対して与えている、その理由は比湿の場合と同様である。

noANTI・noCYC 実験は、CTL 実験の初期値の場合から、図 2a の四角枠内で定義されるストームトラック域での移動性高・低気圧をそれぞれ 1 つ程度初期値から引き去り、それから 10 日間積分したものとなる。ストームトラック域内部で検出される高周波 PV 成分の負/正值だけを引き去ることで、移動性高/低気圧約 1 つが除去できる。ストームトラック域は、ブロッキング近傍の、移動性高・低気圧が十分に成熟し等価順圧化した領域ではなく (YIB)、その上流の移動性擾乱が成長する場所とした。ストームトラック域での高周波 PV を引き去ると、PV-inversion により、移動性高/低気圧 (高周波 PV) を構成する風場・温度場・高度場を同時引き去ることができる (e.g., Hoskins et al. 1985)。PV-inversion 手法により得られる移動性高/低気圧と「バランス」する場を初期値から無くし AGCM を積分することで、それぞれがブロッキングにどのくらい影響を与えるかのインパクトを見積ることができる。このように、PV-inversion で初期場から擾乱を取り去り、そこから数値積分を行い、擾乱の影響を定量化する方法はいくつかの先行研究で行われている手法である (例えば, Moore et al. 2008; Tochimoto and Kawano 2012)。

ここでの PV-inversion は、準地衡 PV (以下 QGPV) q を inversion することで準地衡バランスした風場・温度場などを得る (e.g. Hakim et al. 1996; Takaya and Nakamura 2005) :

$$q = \nabla^2 \psi + f + \frac{f_0^2}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_0}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right), \quad (1)$$

ここで ψ は流線関数、 f は Coriolis パラメータ、 f_0 は 45°N での f 、 $\rho_0 = \rho_s e^{-z/H_s}$ ($\rho_s = 1.452 \text{ kg m}^{-3}$), $z \equiv -H_s \ln(p_0/p)$ ($H_s = 7025 \text{ m}$, $p_0 = 1000 \text{ hPa}$), $N^2 = R/H_s(d\bar{\theta}/dz)e^{-\kappa z/H_s}$ ($R = 287 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$, $\kappa = 0.286$, $\bar{\theta}$ は 30°N 以北で領域平均した温位) であり、ここでの式や定数は Andrews et al. (1987) より得た。求めた QGPV に 2 節と同じ Lanczos フィルターを施し、高周波 PV を得る。図 2a には、移動性高気圧に対応する 250 hPa 面高周波 QGPV の負値が示されている。同時に描かれている、330 K 面での高周波 EPV と比較すると、振幅が小さくなっているが、ストームトラック域でパターンがよく

ppv map (Negative QGPV (< 8d))

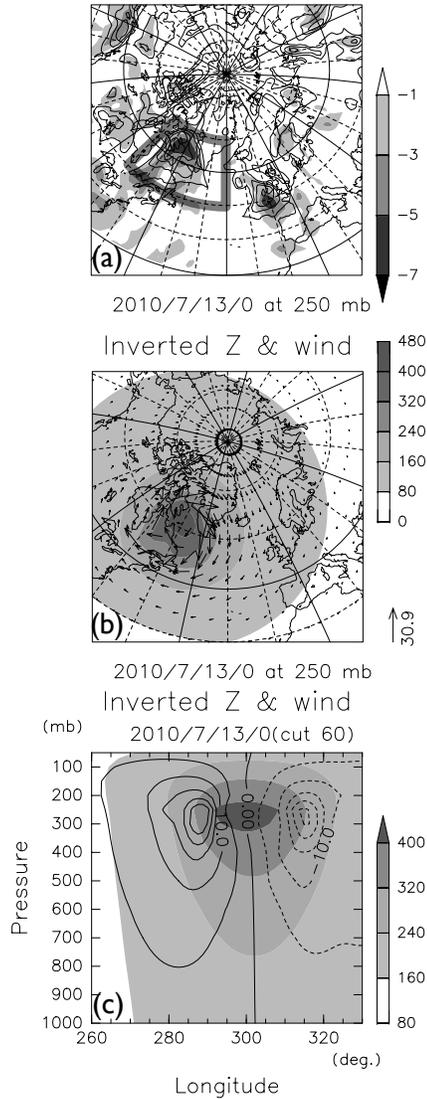


図 2: 2010 年 7 月 13 日 00UTC での, noANTI 実験で CTL 実験から引き去られる初期場. (a) 250 hPa での高周波成分準地衡 PV (陰影) と 330 K での EPV (コンター), いずれも単位は PVU. 準地衡 PV は, EPV との振幅を比較するために $-g(d\theta/dp)$ (g は重力加速度) がかけ算されている (Hakim et al. 1996). コンター間隔は 2 PVU 毎で -1 PVU 以下の値を示している. 太線で囲まれた領域 (280°E - 330°E , 50°N - 70°N) はストームトラック域を示す. (b) (a) の準地衡 PV 場を inversion して得られる 250 hPa 面ジオポテンシャル高度 (陰影, [m]) と風 (矢印, [ms^{-1}]). なお, (a) と (b) はどちらも 30°N 以北の値のみを示している. (c) (b) と同じだが 60°N での経度高度断面, ただし南北風をコンターで示す.

対応していることがわかる. noANTI (noCYC) 実験の初期値で取り去られる移動性高 (低) 気圧は, 高周波 QGPV q' でストームトラック域内部かつ気圧面 p が $500 \geq p \geq 100$ hPa 内での $q' > 0$ (< 0) で定義され, それ以外の $q' = 0$ にマスクされる. そして, 図 2a から視覚的に, ストームトラック域内では移動性高 (低) 気圧が約 1 つ消去される設定になっていることがわかる. 高周波 QGPV q' とバランスする風場・温度場・ジオポテンシャル高度場を求めるには, (1) より,

$$\psi' = \mathcal{L}_g^{-1} q' = \left[\nabla^2 + \frac{f_0^2}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_0}{N^2} \frac{\partial}{\partial z} \right) \right]^{-1} q', \quad (2)$$

を数値的に解く (詳細な計算方法は Takaya and Nakamura 2005), ここで ψ' は高周波 QGPV とバランスした流線関数場である. バランス流線関数は, 準地衡の関係式を用いて図 2b, c のようなバランス風場・温度場・ジオポテンシャル場に変換される (Andrews et al. 1987). PV-inversion での境界条件は, (2) において, 水平方向は周期境界条件, 上下境界は $\partial\psi'/\partial z = 0$ (バランス温度がゼロ) で与えられ, 上部境界と下部境界をそれぞれ 0.01 hPa, -10 km に人工的に設置する. このように人工的に (上) 下部境界を現実的な大気境界の遠くに設置する方法は, 対流圏上層の PV アノマリーが地表面付近の循環場に与える影響を見積るために Nakamura and Fukamachi (2004) や Takaya and Nakamura (2005) で開発された手法である. 本研究ではこの方法を, 上層の高周波 QGPV を消去することで, 移動性擾乱の発達を抑制する目的で採用した. 上記の PV-inversion で得られたバランス場が図 2b, c に示される. 一般に, 移動性擾乱は対流圏上層の PV アノマリーと地表の温位アノマリーのカップリングで成長するので (e.g., Hoskins et al. 1985; Tochimoto and Kawano 2012), この実験ではカップリングの片方を消去することで, 移動性擾乱の成長を抑制する. しかし, 下層の温位アノマリーは今回の PV-inversion 手法では消去されていないので, 現実での移動性擾乱の影響は今回の実験の結果よりも大きいかもしれない.

各実験での全 54 ランについて, 各ランでの予報時間を合わせてコンポジット (key-time composite) した結果を図 3 に示す. 以下, 予報開始から n 日目の予報時刻を Day n と示す. まず,

AFES で現実のブロッキング持続がどのくらい表現できているかを調べる。図 3a, b を見ると、Day 4, 6 ともにブロッキングリッジの位置や振幅をよく再現できていることがわかる。Day 7 あたりから、予報でのブロッキングの振幅が顕著に減少するのに対し、再解析では減少しない(図には示さない)。つまり今回の実験設定ではブロッキング持続の予報可能日数は 6 日程度であり、それ以内の予報はブロッキング持続の定量的評価に利用できるとする。

次に、noANTI 実験と CTL 実験の差を見る(図 3c, d)。これらの図は、移動性高気圧約 1 つの影響が時間とともにどのように拡がるかを示している。Day 3 あたりからブロッキングリッジの西部に負 PV 偏差の応答が現れはじめる、これは上流の移動性高気圧起源の粒子がブロッキング高気圧内部に吸収される時間スケールと整合的である(YIA)。この負 PV 偏差はその後も停滞し続け、大きさは Day 4 あたりに最大の -2 PVU 程度に達する(図 3c, d)。これは、ブロッキングリッジの振幅 4-5 PVU の 1/3-1/2 程度となっている。残りの寄与はより低周波な Rossby 波成分による強制か、あるいはブロッキング内部に保持されている PV か、今後より詳しく調査する必要がある。

また、Day 1, 2 以降、ブロッキング西側のトラフ(以下、西方トラフ)上に正 PV 偏差の応答が現れ、正 PV 偏差はその後も西方トラフ上に停滞し続ける。この正 PV 偏差が現れる原因や正 PV 偏差が西方トラフ上に停滞する原因については調査中である。この弱体化された西方トラフでは、その南側を通過する移動性高気圧を北東のブロッキング高気圧に掃き出す効果が小さくなるので、選択的吸収の抑制にも寄与し得る(YIA)。

一方で noCYC 実験と CTL 実験の差を見ると(図 3e, f)、noANTI 実験との差の場合と比べて、ブロッキング内部の負 PV 偏差の応答が見られないことがわかる；これは移動性高・低気圧の影響の非対称性を示しており、SAM と整合的である。noANTI 実験の場合と同じく、西方トラフには正 PV 偏差の応答が現れている。この正 PV 偏差の応答は、消去された移動性低気圧の西方トラフ(低気圧)への吸収が抑制されているのかもしれない(詳しくは YIA)、なぜならば 2 において、低気圧性粒子が西方トラフをよく通

過しているためである。しかし、noCYC 実験で西方トラフの抑制が起こっても、移動性高気圧の吸収はあるので、ブロッキングの振幅は大きく減少していない。

この感度実験で得られた結果は、ロシアブロッキングの持続において SAM が働いていたことを示し、更に移動性擾乱がロシアブロッキング持続の主要因であったことを示唆している。また、移動性高気圧がロシアブロッキング西方トラフを強化しているという、SAM を促進する新たな素過程が見られた。

4 まとめと今後の課題

2010 年夏に発生したロシア西部でのブロッキング持続における移動性擾乱の寄与について、YIA と YIB で提唱された選択的吸収メカニズムを援用し、定量的解析を試みた。まず、移動性高・低気圧起源の粒子を追跡する前方流跡線解析により、移動性高気圧のみがロシアブロッキング高気圧に吸収され、移動性低気圧はブロッキング高気圧から遠ざけられながら下流へ流されていくことがわかり、SAM が働いていることがわかった。また、ブロッキング高気圧を構成する粒子の起源を逆追跡する後方流跡線解析では、ブロッキング高気圧を構成する粒子の大部分がストームトラック域を起源としていることがわかり、ロシアブロッキング持続の主要因が移動性擾乱であることを示唆した。次に移動性高・低気圧を 1 つずつ取り除く条件と除かない条件で大気大循環モデルを積分し、その影響を調べる感度実験を行った。その結果、移動性高気圧約 1 つの吸収でロシアブロッキングの振幅の 1/2 から 1/3 を説明しているという結果が得られた。

ここで得られた結果は、冬のブロッキングと同様に夏のブロッキングに関しても SAM が適用可能であることと、移動性擾乱がその持続に寄与することを示唆している。

しかしながら、3 節で言及したように、更なる調査が 2 つ必要である。1 つ目は、PV-inversion を行う際の上部・下部の境界条件の選び方の影響である。Bretherton (1966)・Schneider et al. (2003) で地表面の温位アノマリーを大気中の PV アノマリーの代理とできることが示されているので、その方法で下層の移動性高・低気圧による温

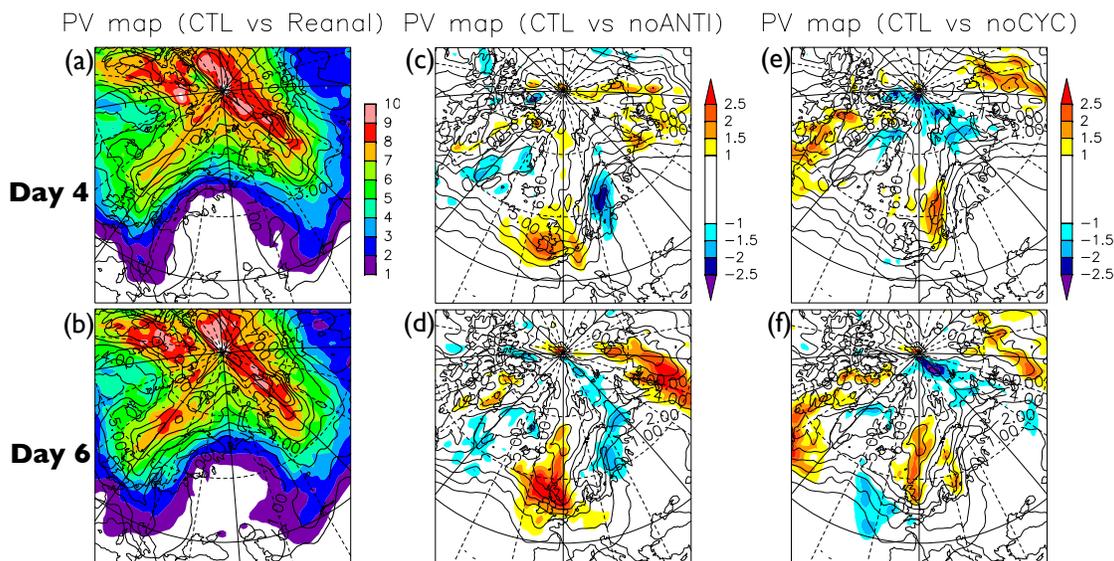


図 3: (a, c, e) Day 4 と (b, d, f) Day 6 での 330 K 面 EPV のコンポジット図. 単位はいずれも PVU. (a, b) CTL 実験 (カラー) と JRA25/JCDAS 再解析 (コンター). (c, d) CTL 実験からの noANTI 実験の差 (カラー) と CTL 実験 (コンター). (e, f) (c) や (d) と同じだが CTL 実験からの noCYC 実験の差 (カラー). コンター間隔は全て 1 PVU 毎.

位アノマリーをも PV-inversion で解いて作成された初期場を用いた実験を行う予定である. 2 つ目は, 移動性擾乱よりも低周波である Rossby 波からの寄与を定量的に見積ることである. Nakamura et al. (1997) では, 冬季のブロッキング形成に, Rossby 波と移動性擾乱の両方の寄与が重要であることを示している. 本研究では, 移動性擾乱からの寄与しか見積っていないので, Rossby 波からの寄与についても定量的な調査を実施する必要がある.

Acknowledgements

本研究は, 文部科学省科学研究費補助金若手 (B) 25800267 の助成を受けた. 研究では気象庁と中央電力研究所の提供する JRA-25/JCDAS を利用した. 図の作成には地球流体電脳ライブラリを用いた. 数値計算には地球シミュレータを利用した.

参考文献

Andrews, D. G., J. R. Holton, and C. B. Leovy, 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*, International Geophysics Series, Vol. 40. Academic Press, 489 pp.

Bretherton, F. P., 1966: Critical layer instability in baroclinic flows. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **92**, 325–334.

Dole, R., et al., 2011: Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? *Geophys. Res. Lett.*, **38**, doi:10.1029/2010GL046582.

Enomoto, T., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, and W. Ohfuchi, 2008: Description of AFES 2: Improvements for high-resolution and coupled simulations. *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, W. Ohfuchi and K. Hamilton, Eds., Springer, 77–97.

Hakim, G., D. Keyser, and L. Bosart, 1996: The Ohio Valley wave-merger cyclogenesis event of 25–26 January 1978. Part II: Diagnosis using quasigeostrophic potential vorticity inversion. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2176–2205.

Hong, C.-C., H.-H. Hsu, N.-H. Lin, and H. Chiu, 2011: Roles of European blocking and tropical-extratropical interaction in the 2010 Pakistan flooding. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, doi:10.1029/2011GL047583.

- Hoskins, B. J., M. E. McIntyre, and A. W. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **111**, 877–946.
- Kuwano-Yoshida, A., T. Enomoto, and W. Ohfuchi, 2010: An improved PDF cloud scheme for climate simulations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 1583–1597.
- Matsueda, M., 2011: Predictability of Euro-Russian blocking in summer of 2010. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, doi:10.1029/2010GL046557.
- Moore, R. W., M. T. Montgomery, and H. C. Davies, 2008: The integral role of a diabatic Rossby vortex in a heavy snowfall event. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 1878–1897.
- Nakamura, H. and T. Fukamachi, 2004: Evolution and dynamics of summertime blocking over the Far East and the associated surface Okhotsk high. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 1213–1233.
- Nakamura, H., M. Nakamura, and J. L. Anderson, 1997: The role of high- and low-frequency dynamics in blocking formation. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2074–2093.
- Ohfuchi, W., et al., 2004: 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator — Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator) —. *J. Earth Simulator*, **1**, 8–34.
- Onogi, K., et al., 2007: The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369–432.
- Otomi, Y., Y. Tachibana, and T. Nakamura, 2012: A possible cause of the AO polarity reversal from winter to summer in 2010 and its relation to hemispheric extreme summer weather. *Clim. Dyn.*, **40**, 1939–1947, doi:10.1007/s00382-012-1386-0.
- Reynolds, R. W., L. Chunying, T. M. Smith, D. B. Chelton, M. G. Schlax, and K. S. Casey, 2007: Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J. Climate*, **20**, 5473–5496.
- Schneider, T., I. M. Held, and S. T. Garner, 2003: Boundary effects in potential vorticity dynamics. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1024–1040.
- Schneider, A., S. Schubert, P. Vargin, F. Lunkeit, X. Zhu, D. H. Peters, and K. Fraedrich, 2012: Large-scale flow and the long-lasting blocking high over Russia: Summer 2010. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 2967–2981.
- Shutts, G. J., 1983: The propagation of eddies in diffluent jetstreams: eddy vorticity forcing of ‘blocking’ flow fields. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **109**, 737–761.
- Takaya, K. and H. Nakamura, 2005: Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian high. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 4423–4440.
- Tochimoto, E. and T. Kawano, 2012: Development processes of Baiu frontal depressions. *SOLA*, **8**, 9–12, doi:10.2151/sola.2012-003.
- Watanabe, M., H. Shiogama, Y. Imada, M. Mori, M. Ishii, and M. Kimoto, 2013: Event attribution of the august 2010 Russian heat wave. *SOLA*, **9**, 65–68, doi:10.2151/sola.2013-015.
- Yamazaki, A. and H. Itoh, 2013a: Vortex-vortex interactions for the maintenance of blocking. Part I: The selective absorption mechanism and a case study. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 725–742.
- Yamazaki, A. and H. Itoh, 2013b: Vortex-vortex interactions for the maintenance of blocking. Part II: Numerical experiments. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 743–766.
- 藤井晶, 黒田友二, 向川均, 2013: 2010年夏季のロシアブロッキングのメカニズムと予測可能性. 平成24年度「異常気象と長期変動」研究集会報, 20–37.