

CMIP5 マルチモデルにおけるブロッキング発生頻度と極端現象の変遷

Spatial change of blocking frequency and extreme events as simulated by the CMIP5 models

北海道大学大学院工学院 学術振興会特別研究員 DC1 ○学生員 北野慈和 (Yoshikazu Kitano)
北海道大学大学院工学研究院 正 員 山田朋人 (Tomohito J. Yamada)

1. はじめに

中緯度における豪雨や熱波、寒波等の異常気象の要因として、通常とは異なる気圧配置が数週間から数ヶ月持続する大気ブロッキングが挙げられる。同現象は偏西風が南北に大きく蛇行することによりスケールの大きな高気圧が高緯度に張り出し、長期にわたり一地域に留まることにより生じる。この停滞するブロッキング高気圧の発生により、2003 年欧州熱波事例では、死者が 70000 人達したと報告があり^{1), 2)}、また 2010 年ロシア熱波、パキスタン豪雨事例では、ロシア西部にて穀物収穫量の約 30%低下などの経済損失が発生し、連動してパキスタンでは大洪水により 3000 人近くの犠牲者が出た^{3), 4)}。また、道内においても 2012 年冬季の豪雪事例において、厚田、新篠津、岩見沢で最深積雪心の記録が更新され、交通網の維持や除排雪に支障をきたしたのは記憶に新しい。

長期予測の観点から、2013 年に公開された IPCC 第 5 次報告書で用いられた第 5 期結合モデル相互比較計画 (CMIP5)⁵⁾の計算結果を使い、Masato et al. (2013)⁶⁾は将来予測結果と過去の再現実験とを比較し、ブロッキング発生頻度の気候変動に伴う変遷を地域ごとに示した。同論文は、冬季のヨーロッパにおけるブロッキングの減少、太平洋北部におけるブロッキングの極方向シフトを示したが、依然としてモデル間のばらつきが顕著であり、また物理的な背景については未解明である。

本論文では、CMIP5の計算結果を用い、将来のブロッキング発生位置の変遷及びそれに伴う極端現象の遷移について地域ごとに明らかにする。2章では解析に使用したデータ及びブロッキング同定手法について紹介する。3章ではブロッキング発生頻度を、4章ではブロッキングに起因する将来気候における極端現象の変遷を示し、5章で考察およびまとめを行う。

2. 手法

(1) データ

CMIP5 により、気候変動を想定した将来予測の計算を、各国の最先端の GCM により、代表的濃度パス (RCP)シナリオに沿って行われた。RCP シナリオには、四つの代表的なシナリオがあり、それぞれ工業化前と比較して大気中の温室効果ガス濃度が放射強制力を今世紀末までに 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 W/m² 上昇する際を想定する。本研究では、最も温暖化の寄与が大きい RCP8.5 シナリオを用い、ブロッキングの発生頻度が高い冬季について解析する。なお、モデルの再現性の比較のために、ECMWF 40 年再解析データ(以後 ERA-40)⁷⁾及び過去の再

現実験(Historical)のデータについても RCP8.5 と同様の解析を行う。解析期間は、過去 1960-1999 年の 39 回の冬季(12 月、1 月、2 月の 3510 日間、ただし閏年の 2 月 29 日は除く)、及び 2060-2099 年の同回の冬季とし、全て北半球のみの日データを用いた。9 つの CMIP5 のモデルを用いたが、その概要を表-1 に示す。なお、CMIP5 の各モデルや ERA-40 はそれぞれにグリッド数が異なるが、内挿を施し、全て経度 4.5° × 緯度 1.5° に変換している。

(2) ブロッキング同定手法

ブロッキングは地球流体力学的には高低気圧波動の砕波として解釈される。中緯度における高低気圧の渦列は地球一周に対し波数 4~5 程度の波動成分である。ブロッキング発生時には高気圧の一つが大きく高緯度側に張り出し、これに伴い低気圧が南に張り出すが、この形状は振幅が増大し生じる砕波に類似している。この気圧勾配の南北逆転を利用し、Tibaldi and Molteni (1990)^{8), 9)}は 500hPa におけるジオポテンシャルの南北逆転を、Pelly and Hoskins (2003)¹⁰⁾は渦位により動的に定義された対流圏界面における南北温位差の逆転からブロッキングを定義した。

本研究では、上記 2 種の同定手法を組み合わせた、Masato et al. (2013)の手法に準拠し、ブロッキングの発生頻度を求める。ブロッキングインデックスを

$$\beta = \frac{2}{\Delta\phi} \int_{\phi_0}^{\phi_0 + \Delta\phi/2} Z_i d\phi - \frac{2}{\Delta\phi} \int_{\phi_0 - \Delta\phi/2}^{\phi_0} Z_i d\phi$$

の式によって定義する。ここで、 Z_i はある緯度の各グリッドにおけるジオポテンシャルを、 $\Delta\phi$ は緯度方向に 30° を示しており、上記の二つの積分は中心緯度 ϕ_0 から南北 10 グリッド分のジオポテンシャルの和を示している。 $\beta > 0$ の場所および日は、 ϕ_0 の北側に高ジオポテンシャルが、南側に低ジオポテンシャルが位置し、ブロッキング発生時の条件の一つである、高緯度側の高気圧と低緯度側の低気圧の分布を満たす。

ブロッキング高気圧は、長期間にわたり同一地域に留まる特性があるため、以下の手順を導入する。1) 対象期間の全グリッド(λ_0, ϕ_0)においてブロッキングインデックス β を計算し、空間的に正の極大値を取る点を求める。2) n 日の正の極大値の座標を中心として経度 27° × 緯度 36° のボックス内に $n+1$ 日の正の極大値があるならば、時系列で連続した極大値とみなす。さらに、最初に発生した正の極大値を中心に、経度 40° × 緯度 54° のボックスの外の正の極大値は、連続した極大値とはみなされない。3) 条件 2 の結果、5 日以上連続した正の極大値が見つかった場合、その周囲の $\beta > 0$ の領域をブロ

表-1 本研究で用いた CMIP5 の 9 つのモデル及び ERA-40 の解析期間及び水平格子数。

モデル名	機関	水平格子 (緯度×経度)
BNU-ESM	BNU, China	T42 (2.8° × 2.8°)
GFDL-CM3	NOAA, USA	(2° × 2.5°)
GFDL-ESM2M	NOAA, USA	(2° × 2.5°)
IPSL-CM5A-LR	IPSL, France	(1.875° × 1.25°)
IPSL-CM5A-MR	IPSL, France	(1.25° × 2.5°)
MIROC5	AORI, Japan	(1.4° × 1.4°)
MIROC-ESM-CHEM	AORI, Japan	(2.8° × 2.8°)
MPI-ESM-MR	MPI-M, Germany	T63 (1.875° × 1.875°)
MRI-CGCM3	MRI, Japan	TL159 (1.125° × 1.125°)
ERA-40	ECMWF, Europe	(2.5° × 2.5°)

ッキング発生箇所とする。

上記の手法によりブロッキングの発生箇所が各日に対して決定される。各グリッドにてブロッキングが発生した日数を解析対象期間である 3510 日で除した値を、ブロッキング発生頻度と定義する。

(3) 本研究における極端現象の定義

解析対象期間 3510 日のうち、10 パーセンタイル以下の気温の日を低温日、90 パーセンタイル以上の日を高温日、90 パーセンタイル以上の降水の日を高降水日として各グリッドで定義する。従って、各極端現象は、351 日ずつ定義される。

極端現象が発生したと同定される 351 日のうち、何パーセントがブロッキング起因かを議論するため、以下の解析を行う。ブロッキング発生時は偏西風が南北に大きく蛇行するため、ブロッキング高気圧の高緯度側には中緯度から運ばれた温暖な大気が流入し、また低緯度側では高緯度から寒気が運ばれやすい。また、ブロッキング高気圧と、それに隣接する低気圧との間には温暖前線が形成されることも予想される(図-1 参照)。従って、ブロッキング同定手法にてブロッキング発生と定義されたグリッドと同経度の各座標で発生した極端現象をブロッキングに起因する極端現象とした。この手法では、他の要因による極端現象をブロッキング起因であると判定してしまう可能性があり、またテレコネクションによりブロッキング高気圧の遠方に生じる極端現象を考慮することは出来ない。上記の点を踏まえて解析を行う。

3. ブロッキング発生頻度と将来気候における増減

図-2 は ERA-40 及び、表-1 に示す CMIP5 の 9 つのモデルを平均した過去の再現実験及び将来予測結果のブロッキング発生頻度をそれぞれ(a)、(b)、(c)に示す。実線は 5%毎のブロッキング発生頻度であり、(b)における色は ERA-40(a)との差を表しており赤い領域ほど過去の再現実験の結果が過大評価、青い領域ほど過小評価であることを示す。また、(c)における色は過去の再現実験(b)との差であり、赤い領域は将来ブロッキングが増加する地域を、青い領域は減少する地域を示す。また、黒のドットは(b)過大・過小評価または(c)増加・減少傾向が全てのモデルで一貫している地域、灰色のドットは 8 つのモデルで一致している地域である。

まず、ERA-40 の(a)の図を見ると、ブロッキング発生頻度の三つのピークがグリーンランド、ヨーロッパ北部、ロシア極東に観察される。特にロシア極東においては発

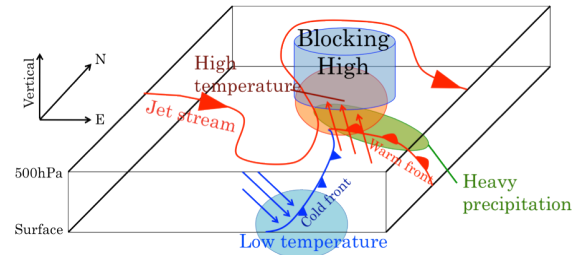


図-1 本研究におけるブロッキングに起因する極端現象の概念図。

生頻度が 40 パーセントにものぼり、10 日に 4 日はブロッキングが発生していることが分かる。

これに対し、過去の再現実験(b)では、ヨーロッパにおけるブロッキングが 9 モデル一貫して過小評価となっており、発生位置も大きく高緯度側にシフトしている。ロシア極東のブロッキングは過大評価されているが、これはモデルによって過小評価のものもあり一貫性はない。

また、将来予測結果(c)においては、9 モデルが一貫してロシア極東におけるブロッキングの高緯度シフトを示している。ヨーロッパにおけるブロッキングの減少及びグリーンランドのブロッキングの東方向のシフトが観察できるが、両者とも若干の差であり、またモデル毎のばらつきも大きい。

4. ブロッキングに起因する極端現象の変遷

(1) 低温日

図-3 は、低温日 351 日の内、ブロッキング起因である日の割合を示している。(a)は ERA-40 の、(b)は CMIP5 の過去の再現実験の、(c)は将来予測結果の解析結果を示している。赤・青の色は、3 章と同様に、過大・過小評価及び増加・減少傾向をそれぞれ示す。

ERA-40(a)より、北米東部、ヨーロッパ及び日本付近において、ブロッキングに起因する低温日の割合のピークが観察される。これは、それぞれブロッキング発生頻度の三つのピークの低緯度側に位置しており、図-1 で想定したブロッキング高気圧の低緯度側の低温日と解釈できる。北米東部、ヨーロッパでは低温日 351 日中 140 日程度が、日本周辺においては 280 日程度が図-1 で想定したブロッキング起因の低温日と考えられる。

過去の再現実験(b)を見ると、ヨーロッパ西部で 9 モデル一貫して過小評価となっている。これは、ブロッキング発生頻度がヨーロッパ周辺で過小評価となっている為と考えられる。北米西部および日本付近では 10 パーセント前後の過小・過大評価である。

将来予測結果(c)においては、9 モデル一貫して日本付近での減少及びアラスカ付近での増加を示している。北米西部では若干の減少傾向があり、ヨーロッパ西部では 9 モデル一貫して減少傾向である。

(2) 高温日

図-4 は、高温日について図-3 と同様に解析した結果を示す。ERA-40(a)より、グリーンランド、スカンジナビア半島北部及びロシア東部にブロッキングに起因する高温日の割合のピークが観察される。これらはブロッキング発生頻度のピーク位置と隣接しており、図-1 で考慮した南からの暖気の移流による高温日として解釈でき

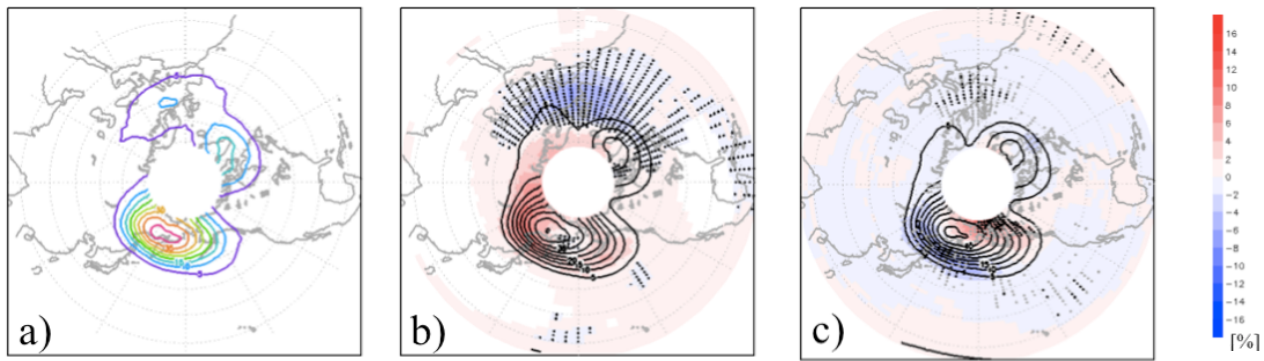


図-2 ブロッキング発生頻度。a)ERA-40 により算出した 1960-1999 年の 39 年間の冬季(12 月-2 月)のブロッキング発生頻度。 b)実線は、CMIP5 の 9 つのモデル平均による a)と同期間の再現実験のブロッキングの発生頻度。赤-青の色は再現実験のブロッキング発生頻度から ERA-40 の発生頻度を引いた値であり、赤い地点ほど過大評価、青い地点ほど過小評価であることを示す。c)実線は、CMIP5 の 9 つのモデル平均による 2060-2099 年の 39 年間の冬季のブロッキング発生頻度。赤-青の色は将来予測のブロッキング発生頻度から過去の再現実験の発生頻度を引いた値であり、赤い領域ほど将来増加傾向、青い領域ほど減少傾向である事を示す。b)および c)において、黒及び灰色のドットは過大・過小評価または増加・減少傾向が 9 及び 8 モデルで一致している地点を示している。

る。グリーンランド上空では高温日 351 日中 245 日程度、スカンジナビア半島北部では 175 日程度、ロシア西部では 280 日程度が図-1 で想定したブロッキング起因であると考えられる。

過去の再現実験(b)では、グリーンランド及びスカンジナビア半島北部において 8~9 モデル一貫して過小評価が見られる。一方、ロシア東部では、モデル差及び地域差がありピーク位置がやや東側にずれている。

将来予測結果(c)においては、9 モデル一貫してグリーンランド及びスカンジナビア北部の減少が見られる。一方、ロシア東部の周辺では減少傾向であるものの、ピーク位置周辺では若干の増加傾向にある。

(3)高降雨日

図-5 は、高降雨日について図-3、4 と同様に解析した結果である。ERA-40(a)を見ると、グリーンランド上空、大西洋東部、ロシア東部周辺に、ブロッキングに起因する高降雨日の割合のピークがある。グリーンランド上空およびロシア東部周辺に関しては、図-1 で考慮したブロッキング高気圧とそれに付随する低気圧との間に生じる前線が起因した高降水と解釈できる。一方、大西洋東部付近でのピークの要因については 5 章で考察する。

過去の再現実験(b)では、グリーンランド及び大西洋東部でのピークが過小評価されており、ロシア東部のブロッキングが過大評価されているが、モデルの一貫性は観察されない。

将来予測結果(c)について見ると、グリーンランド及び大西洋東部でのピークが減少傾向、ロシア西部では高温日と同様にピーク位置での若干の増加とその周辺での減少が観察される。

5. 考察およびまとめ

ERA-40 および CMIP5 の 9 つのモデルを用いた過去の再現実験および将来予測結果におけるブロッキング発生頻度を 3 章にて、ブロッキングに起因した極端現象の割合を 4 章にて議論した。

ERA-40 の解析において、ブロッキング発生頻度のピ

ークはグリーンランド、ヨーロッパ、ロシア東部の三箇所に分布した。また、図-1 で示した位置関係と一致してブロッキング起因の極端現象が分布しているが、大西洋およびヨーロッパ周辺に関しては、図-1 で想定したよりも低緯度側に高降水日が多く発生している。これについては、ブロッキングの形態が大西洋およびヨーロッパ付近ではブロッキング高気圧の低緯度側に切離低気圧が発生するダイポール型のブロッキングが発生しやすいのに対し、大西洋付近ではブロッキング高気圧の周囲の偏西風が Ω 型に吹く Ω 型ブロッキングが発生しやすいことに起因すると考えられる¹¹⁾。大西洋およびヨーロッパ付近の、想定されるよりも低緯度側の高降水日は、切離低気圧が停滞することによって生じる降水日と考えられる。なお、過去の再現実験については、ヨーロッパ付近のブロッキングの再現性が低く、それに付随して、グリーンランド、大西洋、ヨーロッパ付近の極端現象が過小評価となっている。一方、ブロッキング起因の極端現象が占める割合のピークは、過大・過小評価がある程度あるものの、再現されている。

将来におけるブロッキング発生頻度は、ロシア西部のピーク位置にて 9 モデル一貫して極方向へのシフトが観察される。また、紙面の都合上割愛するが 9 モデル中 8 つのモデルで東方向へのシフトが観察された。これに付随し、日本周辺でのブロッキング起因の低温日は減少し、高温日及び高降水日のピークが極側で強まったものと考えられる。一方、グリーンランド南部付近のブロッキングは 8 モデルで一貫して減少傾向にある。これに起因するブロッキング起因の各極端現象のピーク位置では、連動して減少傾向を示している。なお、ヨーロッパブロッキングは再現性が低いため議論の対象とするかは難しい点もあるが、ブロッキングに付随する極端現象の割合は、図-3~図-5 の(c)におけるヨーロッパブロッキングに係するピーク位置において減少傾向を示している。

謝辞 本研究は MEXT/RECCA, MEXT/SOUSEI(theme C-i-C), JST/CREST(Core Research for Evolutional Science and Technology)の成果の一部である。本研究は JSPS 科

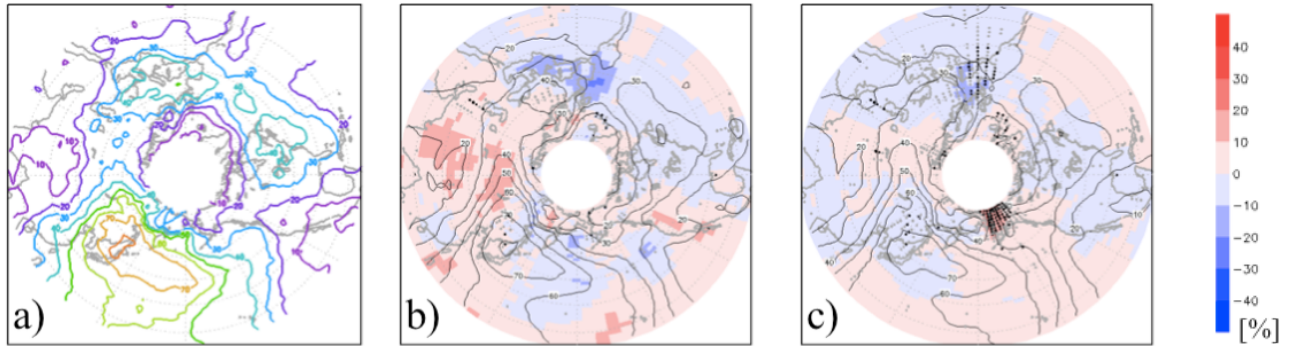


図-3 低温日 351 日の内ブロッキングに起因して発生した低温日が占める割合。a)実線は、図-2a)と同期間・同データにおけるブロッキングに起因して発生した低温日の割合。b)実線は、図-2b)と同期間・同データにおける同割合。赤-青の色は、過去の再現実験と ERA-40 における同割合との差。c)実線は、図-2c)と同期間・同データにおける同割合。赤-青の色は、将来の予測結果と過去の再現実験における同割合との差。b)および c)において、黒及び灰色のドットは過大・過小評価または増加・減少傾向が 9 及び 8 モデルで一致している地域を示している。

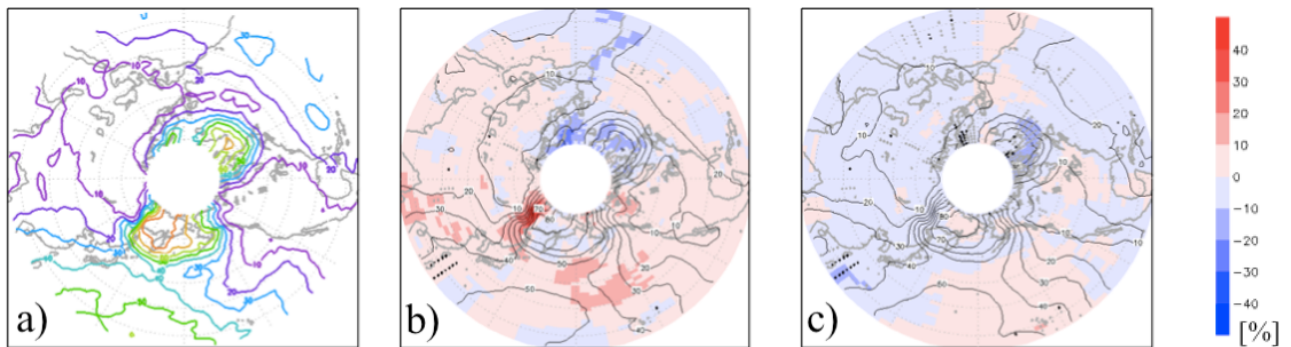


図-4 高温日に対する図-3 と同様の解析。

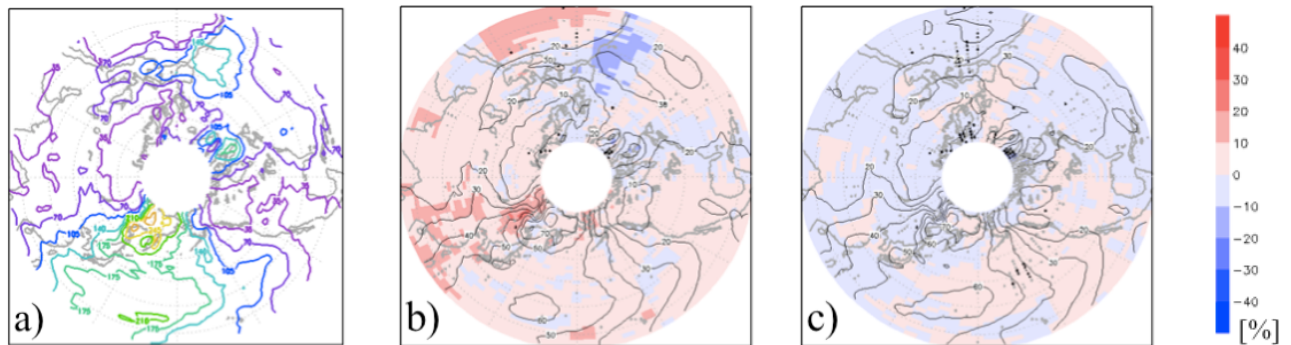


図-5 高降水日に対する図-3、4 と同様の解析。

研費 26・1522 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Robine, Jean-Marie, et al. "Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003." *Comptes rendus biologies* 331.2 (2008): 171-178.
- 2) Black, Emily, et al. "Factors contributing to the summer 2003 European heatwave." *Weather* 59.8 (2004): 217-223.
- 3) WMO, 2011: Weather extremes in a changing climate: Hindsight on foresight. WMO-No. 1075, 17 pp.
- 4) Coumou, Dim, and Stefan Rahmstorf. "A decade of weather extremes." *Nature Climate Change* 2.7 (2012): 491-496.
- 5) Taylor, Karl E., Ronald J. Stouffer, and Gerald A. Meehl. "An overview of CMIP5 and the experiment design." *Bulletin of the American Meteorological Society* 93.4 (2012): 485-498.
- 6) Masato, Giacomo, Brian J. Hoskins, and Tim Woollings. "Winter and summer Northern Hemisphere blocking in CMIP5 models." *Journal of Climate* 26.18 (2013): 7044-7059.
- 7) Covey, Curt, et al. "An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project." *Global and Planetary Change* 37.1 (2003): 103-133.
- 8) Lejenäs, Harald. "Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data." *Tellus A* 35.5 (1983): 350-362.
- 9) Tibaldi, Stefano, and Franco Molteni. "On the operational predictability of blocking." *Tellus A* 42.3 (1990): 343-365.
- 10) Pelly, Jo L., and Brian J. Hoskins. "A new perspective on blocking." *Journal of the atmospheric sciences* 60.5 (2003): 743-755.
- 11) Rex, Daniel F. "Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate." *Tellus* 2.4 (1950): 275-301.