

北大西洋振動（NAO）の力学：偏差場の維持過程と長期変調

*中村 尚^{1,2}, Patrick Martineau¹, 小坂 優¹, 山本絢子², 田口文明³, 森 正人¹

¹ 東京大学先端科学技術研究センター; ² 海洋研究開発機構; ³ 富山大学都市デザイン学部

1. はじめに

北大西洋振動（NAO: North Atlantic Oscillation）は、北半球中高緯度対流圏で最も卓越する循環変動であり、欧州・北米東部の天候・気候状態に大きな影響を与える（Wallace and Gutzler 1981; Hurrell et al. 2003）。NAO は北大西洋上空の渦駆動の極前線ジェット気流（PFJ: polar-front jet）の南北変位として現れ、地表では準停滞性のアイスランド低気圧とその南方のアゾレス高気圧とが同時に強弱を繰り返す変動を現す。NAO を特徴づけるのは、亜熱帯・中高緯度北大西洋域において対流圏全層に及ぶ気圧の南北シーソーであり、大西洋域における移動性高低気圧活動、即ちストームトラック活動の変調である。NAO が正位相の期間では、アイスランド低気圧・アゾレス高気圧ともに平年より強まり、ストームトラック活動も上空の PFJ も平年より強化され、PFJ はより北東向きとなる（Feldstein 2003）。一方、NAO が負位相になると、アイスランド低気圧・アゾレス高気圧、その間のストームトラック活動も全て弱まり、PFJ はその強度も北向き偏倚も弱まる。こうした NAO 偏差には持続性があり、その維持には移動性擾乱による西風運動量の南北輸送の変化による力学的フィードバック（FB: feedback）が本質的と考えられてきた（Feldstein 2003; Rivière and Orlandi 2007; Barnes and Hartmann 2010）。この FB は、NAO の位相に応じて、移動性高低気圧の上空での碎波の状態が変調を被る傾向を反映したものである（Benedict et al. 2004; Woollings et al. 2008）。この際、発達時には傾圧的な構造であった移動性擾乱が成熟期にはより順圧的な構造なることから、NAO に伴う循環偏差の力学もその等価順圧性を前提に議論がなされてきた。

しかしながら、NAO の循環偏差にも僅かながらも傾圧性があることが指摘されている（Barnes

and Hartmann 2010）。そこで本研究では、NAO 偏差の 3 次元構造を再調査し、その僅かな傾圧性が偏差の維持過程に如何に重要かをエネルギー収支解析から評価する（Martineau et al. 2020a）。また、同様な観点から、NAO の長期変調が北大西洋域の季節内変動の振る舞いをどう変調させるかについても調査する（Martineau et al. 2020b）。

2. データ・解析手法

NAO 偏差の構造とエネルギー収支解析には、気象庁の全球大気長期再解析データ JRA-55 を用いた（Kobayashi et al. 2015）。本研究では 100hPa から 100hPa まで 100hPa 毎の等圧面上のデータを 1.25°解像度で利用した。1958 年から 2016 年までの期間で月平均した 500hPa 高度偏差場について、北大西洋・欧州域 [20°N–90°N, 90°W–30°E] での経験直交関数（EOF）解析を施し、各季節での第 1 EOF を NAO に伴う偏差と暫定的に定義した。それに 6 時間毎の 500hPa 偏差場を射影することで、各季節の NAO 指数を求めた。NAO の典型的時間スケールに着目するため、NAO 指数に時間フィルターを施して周期 10~60 日の季節内変動を抽出した後、正規化した指数の値が+0.5 以上の場合を NAO 正位相（NAO+）、-0.5 以下の場合を負位相（NAO-）と定義し、夫々合成図を典型的な循環場と見做した。そして、典型的な NAO 偏差は NAO+の合成図からの NAO-の合成図を差し引くことで定義され、エネルギー収支解析に用いた。こうして得られた NAO 偏差は NAO+のピーク時近傍の典型的偏差場に対応し、NAO-の場合は符号を反転させたものとなる。但し、定義からエネルギー収支解析の結果は両位相とも共通となる。なお、移動性擾乱に伴う偏差場は、各変数の各地点での 6 時間毎のデータに切離周期 10 日の高周波フィルターを施して抽出した。

3. NAO の傾圧的構造と維持過程

上記の手法を JRA-55 に適用して得られた冬季（12～2月）の NAO+と NAO-についての各合成図、及び NAO 偏差場を示したものが図 1 である。過去の研究で指摘されている通り、NAO+では（図 1 左列）、PFJ が強く北東に流れ、北大西洋を横切って北欧にまで達している。上層では惑星波に伴う欧州上の気圧の峰とカナダ北東部の気圧の谷が明瞭であり、これらに対応して下層のアイスランド低気圧もアゾレス高気圧もともに強まっている。これに対し NAO-では（図 1 中列）、PFJ は北米東岸付近でのみ明瞭で、上層の気圧の谷は弱まる一方、気圧に峰は北大西洋東部で強く、グリーンランド近傍にまで伸びている。これは大西洋北部でのブロッキング高気圧の頻繁な形成に対応するものである。下層では、アイスランド低気圧・アゾレス高気圧もともに弱まっている。

これらの差として定義される NAO の典型的偏差場も（図 1 右列）過去の研究で指摘されている通り、対流圏上層・下層とも南北双極子状の気圧

偏差が特徴的である。一見この偏差は等価傾圧的に見えるが、よく見ると等価傾圧なら一致するはずの 500hPa での低気圧偏差の中心（赤丸）と寒気偏差の中心（赤×）は明らかにずれており、下層では寒気偏差は低気圧偏差の中心の遙か西方の北風偏差域に位置している。欧州上での高気圧性偏差の中心（青丸）と暖気偏差中心（青×）のずれも明瞭である。このように、NAO 偏差は特に下層で明瞭な傾圧構造を示す事が見出された。

NAO 偏差の傾圧性とその維持に果たす役割について、エネルギー収支解析からの評価を試みた（図 2）。エネルギー収支解析の詳細は Tanaka et al. (2016) を参照されたい。等価傾圧的な構造に伴って上層ほど風偏差が強い傾向を反映して、NAO 偏差の持つ擾乱運動エネルギー（EKE）も上層に集中している（図 2 第 4 列）。対照的に、下層で明瞭な偏差の傾圧構造を反映して、擾乱有効位置エネルギー（EAPE）は対流圏中・下層に集中している（図 2 第 1 列）。北半球全域で上空 100hPa まで 3 次元的に積分した冬季 NAO 偏差に

伴う全エネルギーの内訳は、58%が EKE で 42%が EAPE である（図 3）。

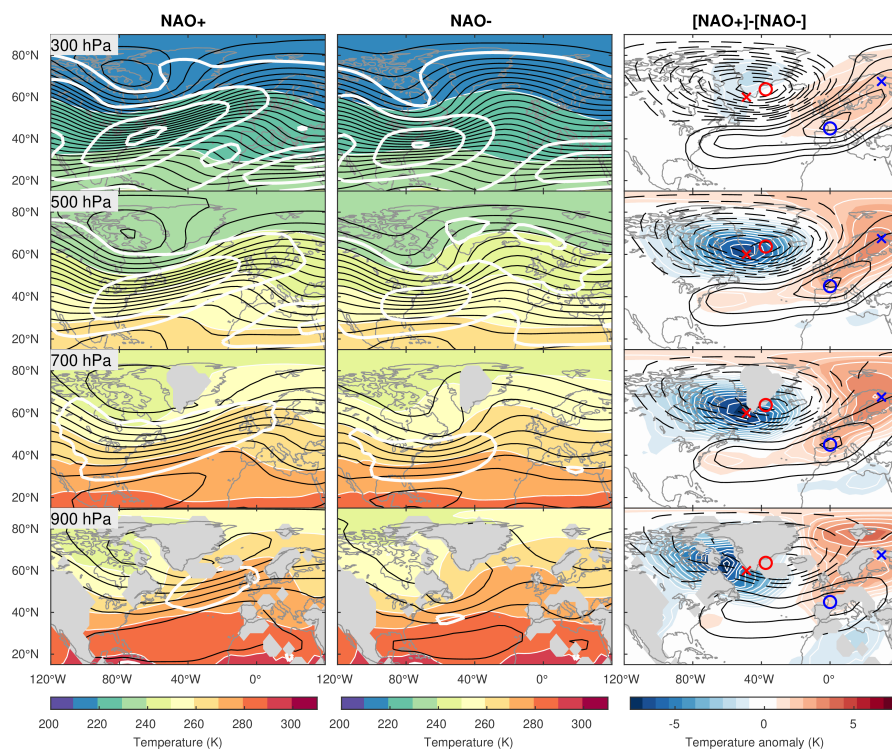


図 1: 合成図解析による冬季 (DJF) NAO の 3 次元構造。(左) NAO 正位相, (中) NAO 負位相, (右) 両者の差としての NAO 偏差 (符号は正位相に対応)。(左) (中): 各気圧面での気温場 (色) に高度場 (黒線) と風速 (白線) を重ねた。(右) 各気圧面での気温偏差 (色) に高度偏差 (黒線) を重ねた。○は高度偏差の中心, ×は気温偏差の中心。Martineau et al. (2020a) による。

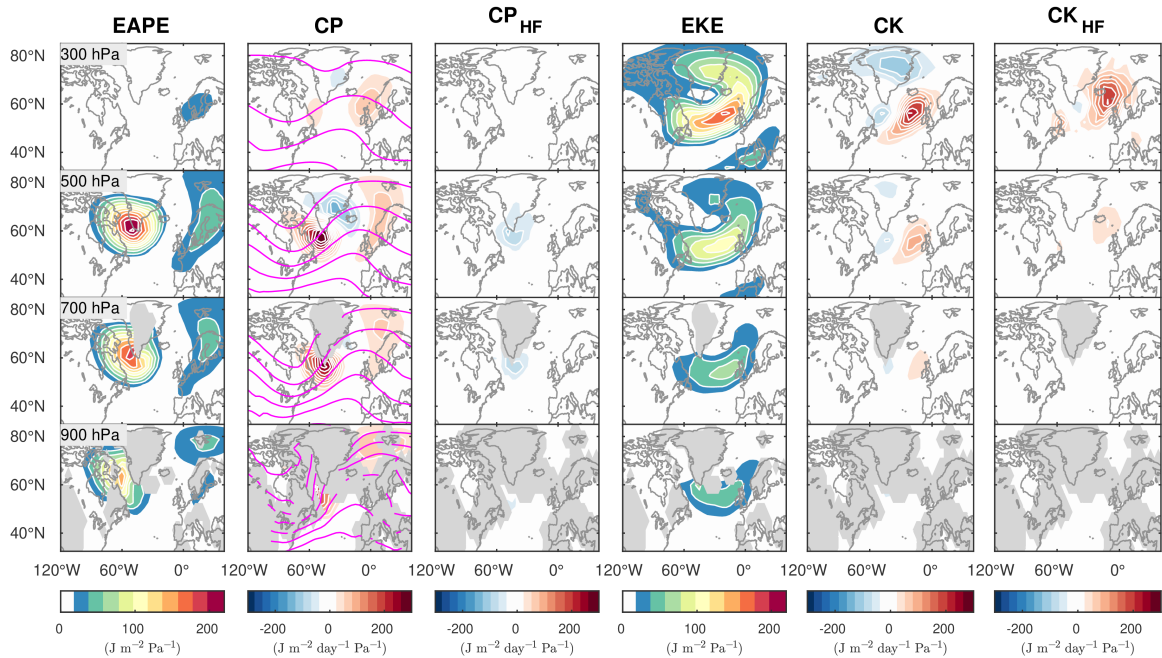


図 2：合成図解析に基づき抽出された冬季 (DJF) NAO 偏差のエネルギー変換各項の各気圧面上の分布。(左から) NAO 偏差に伴う有効位置エネルギー (EAPE), 気候平均場からの有効位置エネルギー変換 (CP; 等値線は気候平均の等温線), 変調を受けた移動性擾乱の熱フラックスによるフィードバック (CP_{HF}), NAO 偏差に伴う運動エネルギー (EKE), 気候平均場からの運動エネルギー変換 (CK), 及び変調を受けた移動性擾乱の運動量フラックスによるフィードバック (CK_{HF})。Martineau et al. (2020a) による。

次に、NAO 偏差の維持過程として、背景場としての気候平均場からのエネルギー変換を評価した。但し、エネルギーと同様に変換量自体は偏差の振幅の自乗に比例するため、3 次元的に積分した変換量を同じく積分した全エネルギーで除して、変換効率として評価した。これは擾乱振幅には依存しない量で、その逆数は NAO の全エネルギーを特定の変換過程 (あるいは生成過程) のみで賄うのに要する時間を与える (図 3)。様々な過程のうち、最も効率よく NAO のエネルギーを維持し得るのが年場のジェット気流からの傾圧エネルギー変換 (CP) である。これは、NAO 偏差の傾圧構造に伴う熱フラックスが、ジェット気流に伴う気温勾配を横切ることによって、NAO に伴う気温偏差を維持するよう働く過程である (図 2 第 2 列)。例えば、NAO+時の北米東部の寒気偏差は、増幅したアイスランド低気圧西側の北風偏差により強化された寒気移流がさらに強化する。同様に、欧州上の暖気偏差も南風偏差で強化された暖気移流で強化される。さらに、NAO+時の下層の偏西風強化は寒冷なカナダ東部からの寒気移流を

強化し、増幅したアイスランド低気圧南部の寒気偏差を維持・強化させる。CP の寄与は NAO に伴う全エネルギーを僅か 4 日で賄い得るほど効率的である (図 3)。加えて、NAO に伴う東西風偏差が平年場の北大西洋 PFJ の出口付近に重なるために、主に上層では NAO 偏差が PFJ より直接運動エネルギーを変換 (CK) しているが (図 2 第 5 列)、その効率は CP の 20% にも満たない。一方、過去の研究と整合的に、移動性擾乱による西風運動量輸送の変調が、その背景場となる NAO に伴う東西風偏差を維持・強化する FB 過程 (CK_{HF}) は CK よりも 2 倍以上効率が低いことが確認されている (図 2 第 6 列; 図 3)。しかし同時に、移動性擾乱は常に背景の気温勾配を緩和するよう熱輸送を行うため、NAO に伴う EAPE も減ずるよう働く (CP_{HF}: 図 2 第 3 列)。よって、移動性擾乱からの正味の FB は NAO 偏差を維持しようとするものの、正味の効率は CP の僅か 25% に過ぎない (図 3)。なお、非断熱加熱は正味では NAO 偏差の減衰過程として働くが、これは主に海洋との熱交換によるものである (図 3)。

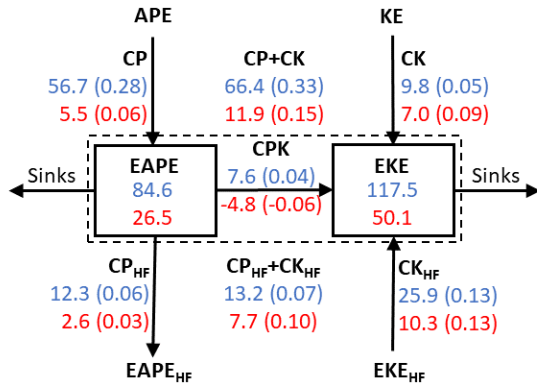


図3：図2に基づき、北半球全体、及び地表から下部成層圏（100hPa）まで3次元的に積分した冬季（青）・夏季（赤）NAO偏差のエネルギー収支。枠内はNAOに伴うEKEとEAPE（10¹⁷J）。矢印はエネルギー変換項（10¹⁷J day⁻¹）。括弧内は変換効率（day⁻¹）。Martineau et al. (2020a) による。

上記と同様な合成図解析と、それに基づくエネルギー収支解析を夏季（6～8月）NAOについても実施した。冬季に比べ、夏季NAO偏差は振幅が小さい上により順圧的であることが分かった。これを反映し、CPは夏季のNAO偏差を維持しようとするが、その効率は冬季の1/4にまで低下してしまう一方、CKの効率は冬季の80%増になり、CPの効率を上回るようになる（図3）。また、移動性擾乱からの順圧的FB（CK_{HF}）は冬季とほぼ同じ効率で夏季NAOの循環偏差を維持・強化するよう働く一方s、擾乱に伴う熱輸送による減衰（CP_{HF}）効率が低下するため、移動性擾乱からの正味のFB強制的相対的重要性は冬季より増すことになる（図3）。このように、冬季に比べ、夏季NAO偏差がより順圧的になる傾向を反映し、その維持においても冬季とは対照的に順圧的な過程（CK, CK_{HF}）の寄与が支配的となる（図3）。これは、背景のPFJに伴う気候平均的な気温傾度が冬季より大幅に減ずる傾向を反映したものと考えられる。実際、夏季NAOに伴うEKEはAPEの2倍で、冬季よりも偏差の順圧性が大幅に高まったことを示している（図3）。

4. NAOと季節内変動の長期変調

次に、NAOの10年規模の長期変調が季節内変

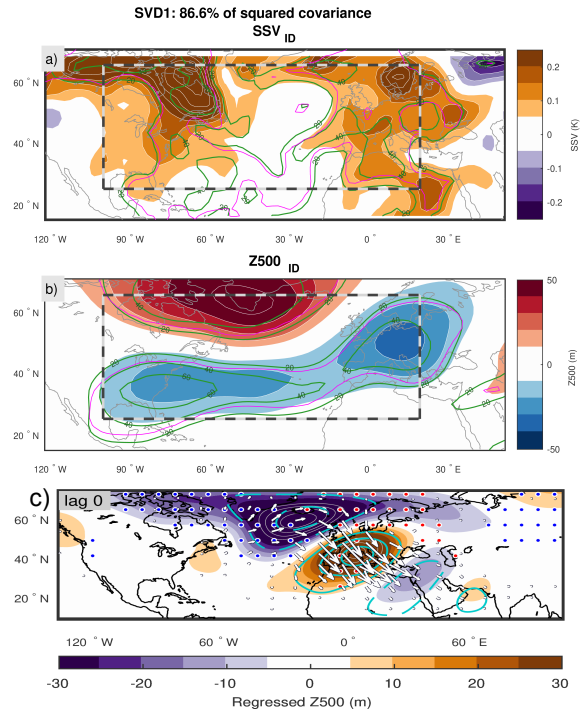


図4：北大西洋域において冬季に卓越する(a) SAT季節内変動の振幅変調（°C）とそれと共変動する(b)冬季平均500hPa高度の10年規模変動成分（m）。北大西洋域で積分した両者の共分散自乗の最大の割合を説明する特異値分解モードとして抽出。(c)欧州にSAT季節内変動をもたらす500hPa高度の季節内変動成分と停滞性Rossby波の波活動度フラックス（Takaya and Nakamura 2001）。Martineau et al. (2020b) による。

動の変調に及ぼす影響について調査した。解析には20世紀再解析データERA-20C(Poli et al. 2016)、及びHadISST海面水温データ(Rayner et al. 2003)を用い、1900年から2010年までを対象期間とした。周期10～60日の時間フィルターを施した地上気温(SAT)変動の各冬での標準偏差を各地点の季節内変動の指標とし、それに周期10年の長周期フィルターを施して変動の長期変調を評価した。その背景場として冬季平均500hPa高度偏差を周期10年の長周期フィルターを施したものとした。そして、北大西洋・欧州域[20°N-90°N, 90°W-30°E]で両者の特異値分解(SVD)解析を施し、その第1モードに抽出される両者の共変動を解析した(図4)。このモードには背景場の卓越変動としてNAOが見出され(図4b)、NAO-が卓越してPFJが弱まる時期に、北米北東部や欧州で

SAT 季節内変動がより活発になる傾向を捉えている (図 4a)。後者は、北大西洋北部から欧州、さらには中東上空まで連なる準停滞性ロスビー波列の振幅増大傾向を反映したものである (図 4c)。波列の活発化は、北大西洋上空での循環偏差がより傾圧的な構造となり、CP による維持がより効率的になることが一因のようである。一方、10 年規模の NAO の維持には北大西洋亜熱帯域での降水変動や北大西洋の南北循環の長期変動が関与しているようである。

5. まとめ

本研究では、北大西洋・欧州域の天候・気候状態に大きな影響を与える NAO について、幾つかの重要で新たな知見を得た。冬季 NAO 偏差の維持に最も効率的な過程が、偏差の傾圧的な構造とそれに伴う熱輸送を反映した傾圧エネルギー変換であることを見出した (Martineau et al. 2020a)。NAO は気候平均の惑星波に伴うカナダ北東部上空の気圧の谷の東方に位置しており、そこはジェット気流のコア領域を横切る強い南北気温傾度と強い海陸熱コントラストの近傍である。よって下層の循環偏差により温度移流偏差が生じ易い。北西太平洋の気圧の谷の東方には、NAO 偏差と類似した気圧の南北シーズンに特徴付けられる「西太平洋 (WP: Western Pacific)」パターンが存在し、その偏差の維持にやはり傾圧エネルギー変換が決定的に重要なことが示されている (Tanaka et al. 2016)。よって、NAO 偏差も WP 偏差も傾圧的な惑星波に卓説する変動と捉えることもできる。さらに、NAO の 10 年規模変動により、北大西洋北部から欧州へ連なる停滞性ロスビー波の活動が変調を被り、北米北東部や欧州での季節内 SAT 変動にも影響することが見出された。これは、北太平洋・北大西洋でジェットの分流が強まると、基本場からのエネルギー変換が増大し、季節内循環変動が強まる傾向 (Nakamura 1996) と整合的である。今後は背景場の長期変動もたらず海洋の役割の解明が求められる。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構ベルモント・フォーラム国際連携活動「季節～10 年規模の地域間連関が気候予測の改善へ向けて持つ潜在的可能性 (InterDec)」文部科学省「北極域研究推進プロジェクト (ArCS)」、環境省環境研究推進費 2-1904、並びに文部科学省科学研究費新学術領域 19H05702 「大気循環変動とその側可能性に関わる中緯度大気海洋相互作用」から支援を受けた。また、PM は日本学術振興会特別研究員としても支援を受けた。

参考文献

- Barnes, E. A. and D. L. Hartmann, 2010: Dynamical feedbacks and the persistence of the NAO. *J. Atmos. Sci.* **67**, 851–865.
- Benedict, J. J., S. Lee, and S. B. Feldstein, 2004: Synoptic view of the North Atlantic Oscillation. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 121–144.
- Feldstein, S. B., 2003: The dynamics of NAO teleconnection pattern growth and decay. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 901–924.
- Hoskins, B. J. and D. J. Karoly, 1981: The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1179–1196.
- Hurrell, J. W., Y. Kushnir, G. Ottersen, G. and M. Visbeck, 2003: *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*. AGU Monogr., **134**.
- Kobayashi, S. et al., 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **93**, 5–48.
- Martineau, P., H. Nakamura, Y. Kosaka, and A. Yamamoto, 2020a: Importance of a vertically tilting structure for energizing the North Atlantic Oscillation. *Sci. Rep.*, under review.
- Martineau, P., H. Nakamura, Y. Kosaka, B. Taguchi and M. Mori, 2020b: Modulations of North American and European weather variability and extremes

- by interdecadal variability of the atmospheric circulation over the North Atlantic sector. *J. Climate*, under review.
- Nakamura, H., 1996: Year-to-year and interdecadal variability in the activity of intraseasonal fluctuations in the Northern Hemisphere wintertime circulation. *Theor. Appl. Climatol.*, **55**, 19–32.
- Poli, P., and coauthors, 2016: ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. *J. Climate*, **29**, 4083–4097.
- Rayner, N. A., and coauthors, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4407.
- Rivière, G. and I. Orlanski, 2007: Characteristics of the Atlantic storm-track eddy activity and its relation with the North Atlantic Oscillation. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 241–266.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 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.*, **58**, 608–627.
- Tanaka, S., K. Nishii, and H. Nakamura, 2016: Vertical structure and energetics of the Western Pacific teleconnection pattern. *J. Climate*, **29**, 6597–6616.
- Wallace, J. M. and D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 784–812.
- Woollings, T., B. J. Hoskins, M. Blackburn and P. A. Berrisford, 2008: New Rossby wave-breaking interpretation of the North Atlantic Oscillation. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 609–626.