

成層圏循環の力学的安定性と予測可能性変動 ～2007年3月に生じた成層圏惑星規模波下方伝播イベントの事例解析～

向川均(京大・防災研)・野口峻佑・黒田友二・水田亮(気象研)・小寺邦彦(名大・宇地研)

1. はじめに

近年、北半球冬季において成層圏が対流圏循環に及ぼす力学プロセスの一つとして、成層圏惑星規模波の対流圏への下方伝播が注目されている。例えば、Perlwitz and Harnik (2003) は、統計解析により、成層圏で反射した東西波数1の惑星規模波が下方伝播し、約1週間後に対流圏循環に影響する可能性を示している。また、Kodera et al. (2008) は、2007年3月初旬に発生した成層圏惑星規模波の顕著な下方伝播イベントについて事例解析を行い、ユーラシア域から上方伝播した惑星規模波束が成層圏中を水平伝播し、北米東岸域で対流圏に下方伝播する過程を捉えることに成功した。さらに、Kodera et al. (2013) は、いくつかの事例解析から、成層圏惑星規模波の対流圏への下方伝播は北太平洋域におけるブロッキング発生の契機となることを明らかにした。

一方、向川他 (2010) は、成層圏で惑星規模波の下方伝播が生じたときには、成層圏中層で西風が極大となるなど成層圏帯状風の子午面分布が、いくつか特徴的な構造を持つことを多数の事例解析から明らかにした。また、Kodera et al. (2008) で示された2007年3月初旬に生じた成層圏惑星規模波

の顕著な下方伝播事例の予測可能性について気象庁1ヶ月アンサンブル予報結果を用いた解析も行った。しかし、気象庁1ヶ月アンサンブル予報は1週間に一度しか実施されないため、比較的時間スケールの短い現象である成層圏惑星規模波の下方伝播が生じる条件や、そのメカニズム、さらにはイベントの予測可能期間などを明らかにできなかった。

そこで本研究では、2007年3月初旬の惑星規模波下方伝播イベント期間について、毎日12UTCを初期時刻とする高頻度のアンサンブル再予報実験を、気象研究所アンサンブル予報実験システム (MRI-EPS, Yabu et al., 2014) を用いて新たに実施し、成層圏惑星規模波の下方伝播イベントの予測可能性と、下方伝播が生じるメカニズムの解明を試みた。

2. 実験設定

本研究で実施した予報実験では、気象研究所大気大循環モデル (MRI-AGCM, Mizuta et al., 2006; 2012) を用いた。モデルの設定は、野口他 (2015) やNoguchi et al. (2016)

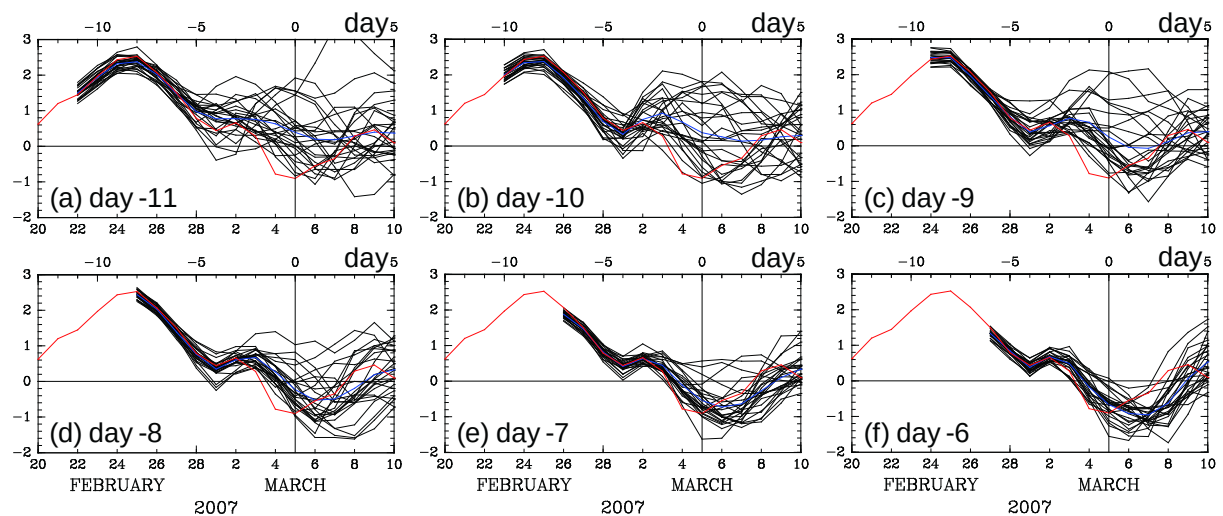


Fig. 1 Time evolution of EPz100 (unit; 10^5 kg s^{-2}). Red lines indicate the analysis, black lines the prediction of each ensemble member, and blue lines the corresponding ensemble mean. The date corresponding to day 0 (5 March 2007) is denoted by the vertical line in each panel, and the initial date of the forecast is shown in the left-bottom corner of each panel.

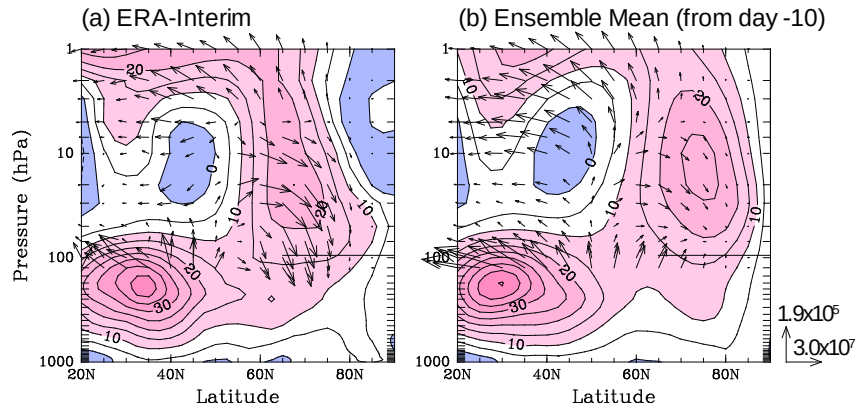


Fig. 2 Meridional distribution of zonal-mean zonal wind (contour, unit; m s^{-1}) and E-P flux (arrow, unit; kg s^{-2}) on day 0 (5 March 2007). (a) The analysis (ERA-Interim). (b) The ensemble mean prediction starting from day -10 (23 February 2007). Contour interval is 5 m s^{-1} . Positive (negative) values are indicated by reddish (bluish) colors. E-P flux vectors above 125 hPa are shown, and their magnitude is scaled by the inverse of the pressure. Arrows at the right bottom indicate the scale of vertical and meridional components of E-P flux at 1000 hPa.

と同様に、水平解像度を TL159（水平格子間隔は約 110 km）、モデル上端を 0.1 hPa、鉛直層数は 6層とした。オゾン分布は帯状平均気候値で与えた。海面水温は、初期時刻に観測された偏差を時間変動する気候値に加えた値で指定した。

各予報の積分期間は34日で、毎日 12 UTC を初期時刻とする25メンバーからなるアンサンブル予報を実施した。また25個の初期値は、成長モード育成（Breeding of Growing Mode; BGM）法によってMRI-EPSで生成される12個の摂動を、解析値として用意した ERA-Interim 再解析データ（Dee et al., 2011）に符号を加味して付け加えることにより用意した。すなわち、アンサンブル予報は、摂動を含まないコントロールメンバー 1個と、摂動を含む24個のメンバーによって構成される。

3. 結果

3.1 下方伝播の予測可能期間

まず、2007年3月初旬に発生した成層圏惑星規模波の顕著な下方伝播イベントの予測可能期間について解析した。ここで、成層圏惑星規模波の下方伝播を、100 hPa等圧面の北緯65度以北で領域平均したE-Pフラックスの鉛直成分の値（以下、EPz100）で評価した（Fig. 1）。また、解析値（ERA-Interim）では、EPz100（Fig. 1の赤線）は2007年3月5日（以下、day 0）に極小となるため、day 0でのEPz100予測値に着目した。すると、Fig. 1から、day -6（2007年2月27日）を初期値と

するアンサンブル予報では、ほぼ全てのメンバーが、day 0にEPz100が負となることを予測していることが分かる。一方、day -8以降を初期値とするアンサンブル平均予測値では、day 0においてEPz100が負となる。従って、この成層圏惑星規模波の下方伝播イベントの予測可能期間はおおよそ8日間程度と見積もれる。

一方、day 0でのEPz100予測値のアンサンブルスプレッドは、予報期間が長くなるほど大きくなる（Fig. 1）。ただし、day -11を初期値とするアンサンブル予報では、多くのメンバーでday 0のEPz100予測値は正となる。一方、day -9が初期値の場合には、逆に負となるメンバー数が多くなる。このため、次節では、両者のメンバー数がほぼ等しいday -10（2007年2月23日）を初期値とするアンサンブル予報を用いて、day 0でのEPz100予測値と関連する循環場について相関解析を行った。

次に、Fig. 2にday -10を初期値とする予報における、day 0（2007年3月5日）での帯状平均風とE-Pフラックスのアンサンブル平均予測値（Fig. 2b）と、対応する日の解析値（Fig. 2a）を示す。解析値では、100 hPaの北緯60度以北の領域で、波活動度の下方伝播が顕著であり、10 hPaから50 hPaの成層圏中層で、極向きに伝播する波活動度が、そ

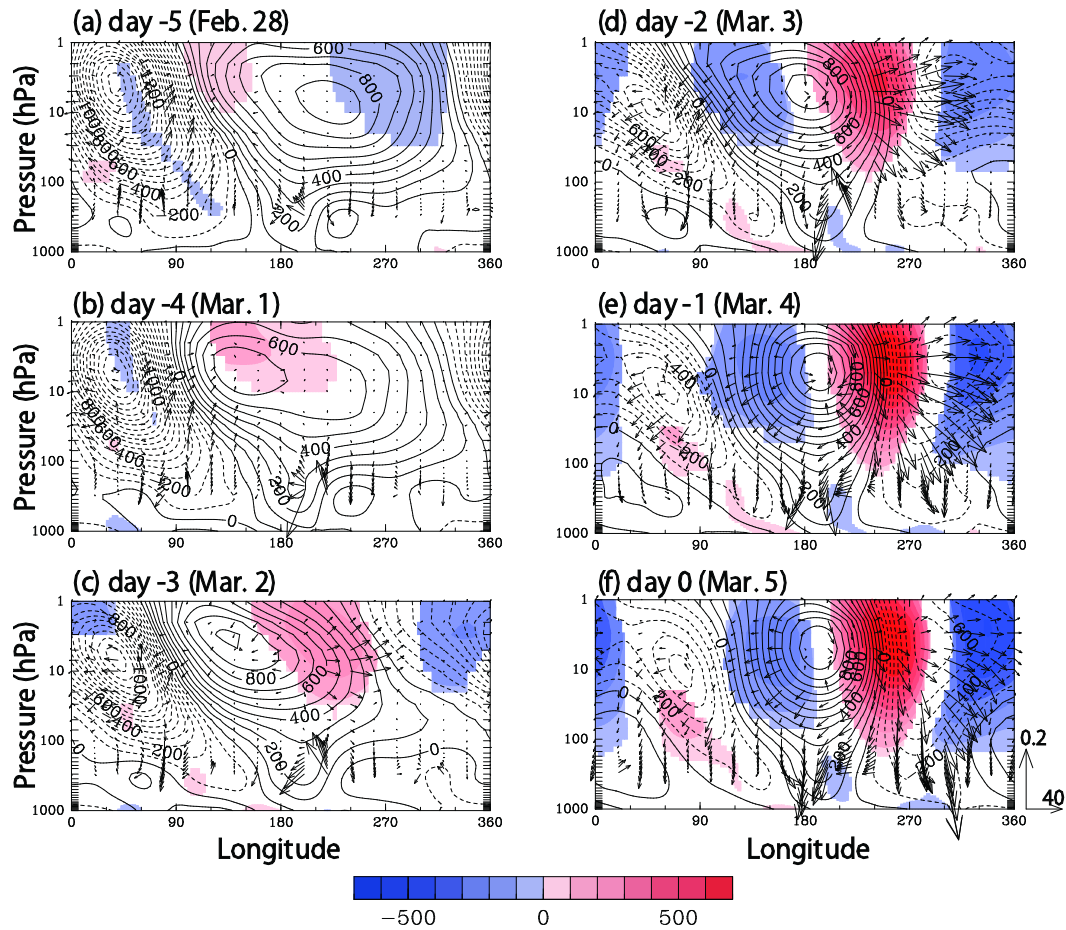


Fig. 3 Longitude-height cross section of the ensemble mean (contour; unit: m) and the regressed anomaly (color shade; unit: m) of the predicted eddy geopotential height averaged over 60°N – 70°N with respect to EPz100 on day 0. The arrows indicate vertical and zonal components of the anomalous 3-D Plumb flux above 300 hPa (unit: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) associated with the composited (ensemble mean plus regressed anomaly) eddy height field. Contour interval is 100 m. Regions where the regressed anomaly has a statistical significance at 95 % are shaded with different tones designated by the bottom color bar. The 3-D Plumb flux is scaled by the inverse of the pressure. Arrows at the right bottom indicate the scale of longitudinal and vertical components of 3-D Plumb flux at 1000 hPa.

の伝播方向を次第に下向きに転じる。また、北緯65度付近を中心とする順圧的な帯状風の極大域が成層圏全体に広がっており、その極側と赤道側には東風領域が存在している。一方、対応する10日予報 (Fig. 2b) では、極域の100 hPa付近でE-Pフラックスは大変小さな値となる。これは、Fig. 1で、EPz100のアンサンブル平均予測値がほぼゼロとなっていることに対応する。また、成層圏中層における極向きのE-Pフラックスは解析値に比べ小さく、成層圏下層の北緯60度付近での上向きフラックスは過大評価されていることが分かる。一方、成層圏帯状風予測値では、解析値と同様に、高緯度域に順圧的な強風域が存在する。しかし、その強風域の中心軸付近での南北シアの大きさは解析値よりも小さく、中心軸の位置もや

や高緯度側にシフトしている。このため、強風軸の南側には解析値と同様に東風領域が存在するが、その北側に東風領域は存在しない。

3.2 回帰分析

本節では、day -10 (2007年2月23日) を初期値とするアンサンブル予報全25メンバー予測値を用いて、day 0におけるEPz100予測値と関連する循環場について回帰分析を行った。

Fig. 3の色塗りで、北緯60度から70度で平均した東西非一様高度場の回帰偏差を、等値線でそのアンサンブル平均予測値を示す。なお、Fig. 3以降では、EPz100が負、すなわち、下方伝播が生ずる場合の回帰偏差場を示す。また、図の矢印は、回帰偏差とアン

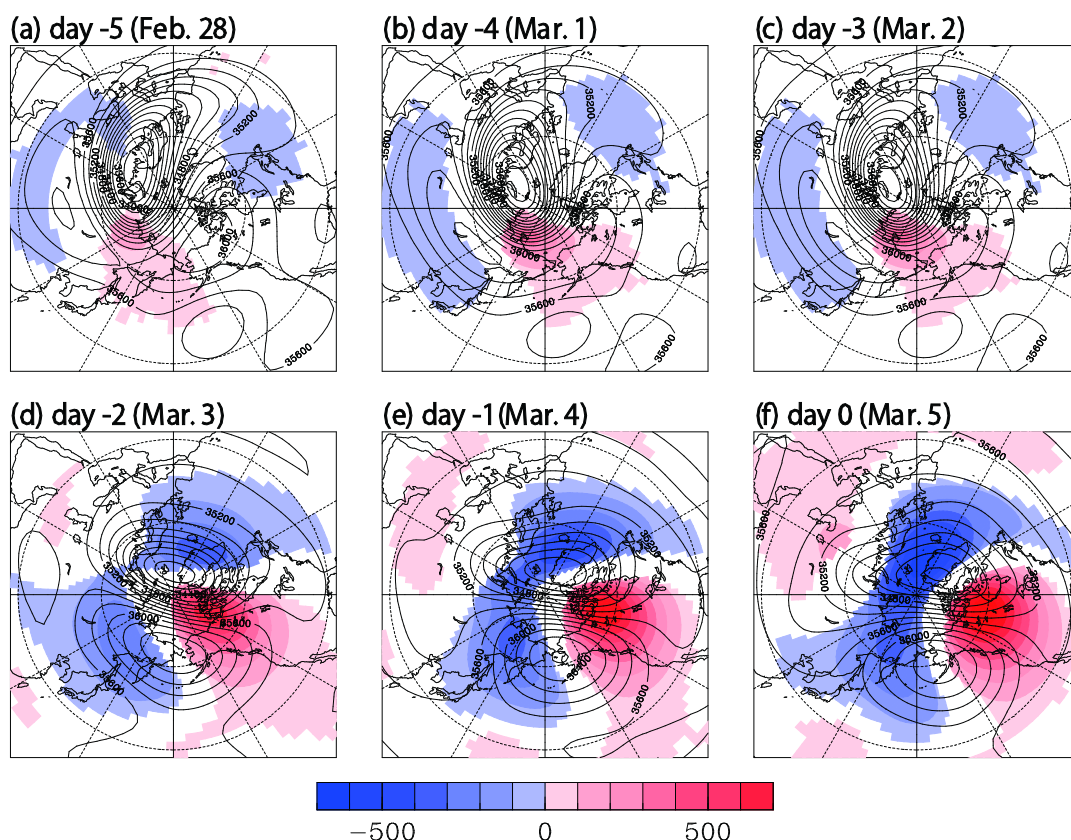


Fig. 4 Horizontal distribution of the ensemble mean (contour; unit: m) and the regressed anomaly (color shade; unit: m) of the predicted 5-hPa geopotential height with respect to EPz100 on day 0. Contour interval is 100 m. Regions where the regressed anomaly has a statistical significance at 95 % are shaded with different tones designated by the bottom color bar.

サンプル平均予測場との合成場に伴う3次元波活動度フラックス (Plumb, 1985) の、アンサンブル平均予測場に伴うそれからの偏差を示す。

まず、アンサンブル平均予測場を見ると、Kodera et al. (2008) で示された解析値での特徴と同様に、惑星規模波束に伴う波活動度は、day -5からday -3の期間で、西ユーラシア上空の東経90度付近において対流圏から成層圏に上方伝播する。この上方伝播に伴い、惑星規模擾乱の位相は高さとともに顕著に西方向に傾く。上方伝播した波活動度は、成層圏中層で東向きに伝播し (day -2とday -1)、それに伴い日付変更線付近の高気圧性偏差の振幅が次第に大きくなる。しかし、day -1以降は解析値とは異なり、西半球側で予測高度場の位相はほぼ鉛直に立ち、惑星規模擾乱の鉛直構造はほぼ順圧的となる。このため、アンサンブル平均予測場では、成層圏下層での波活動度の下方伝播はほとんど認められない。

次に、高度場東西非一様成分の回帰偏差

場に注目すると、day -5やday -4では、対流圏内には有意な偏差は存在しないことが分かる。また、3次元波活動度フラックスの上向き偏差も、成層圏下部の東経90度付近を中心にわずかに認められるが、持続性はなく組織的でもない。一方、day -5に、成層圏中上層の東経120度付近に存在する高度場の正偏差領域は次第に東進し、day -3以降は、日付変更線を越えて西半球側で次第に定在的となる。その偏差は増幅し、正偏差領域の下流側では、波活動度フラックスの東向き偏差が顕著となる。さらに、このフラックス偏差と対応するように、西経50度付近の成層圏中上層で負偏差が発達し始める。一方、正偏差上流域の東経120度付近でも、顕著な負偏差領域が出現し始め、そこでは、波活動度フラックスの西向き偏差が顕著となり、合成場では、アンサンブル平均予測場に比べ、波活動度の上方伝播が抑制される。また、高度偏差場の鉛直構造は成層圏では順圧的で、偏差の東西位相はアンサンブル平均予測場とはほぼ1/4波長ずれて

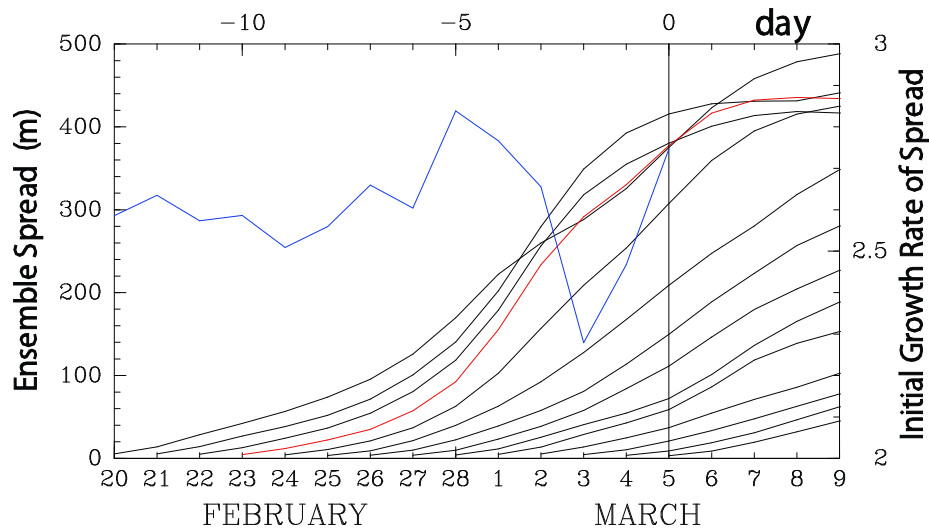


Fig. 5 Time evolution of ensemble spread (m) for 5-hPa geopotential height field northward of 30°N for each forecast (black lines). The scale is shown by the left ordinate. The abscissa denotes the initial date of each forecast. The red line corresponds to the forecast starting from day -10. The blue line indicates initial growth rate of spread plotted on the initial date of each forecast, which is assessed by the ratio of the spread at 1-day forecast to the initial spread. Its scale is shown by the right ordinate.

いる．一方，対流圏内には高度場の顕著な回帰偏差は存在しない．このため，アンサンブル平均予測場と回帰場との合成高度場の位相は，西半球側の成層圏下層で，アンサンブル平均予測場に比べ，高さとともにより東方向に傾く．その結果，合成場では波活動度の下方伝播が顕著になる．このように，Fig. 3で示された高度場の東西非一様成分についての回帰分析の結果から，波活動度の下方伝播と関連する有意な高度場偏差は，対流圏ではなく成層圏に起源を持つ順圧的な擾乱であり，day -3以降に増幅する傾向を持つことが明らかになった．

次に，10 hPa高度偏差について回帰分析した結果をFig. 4に示す．この図の等値線は，Fig. 3と同様に，アンサンブル平均予測場を示し，色塗りは回帰場を示している．回帰場では，day -5から東ユーラシア上空で正偏差領域が出現するが，この領域は，アンサンブル平均予測場において極夜ジェットが強く，しかも，流線関数の曲率が大きい場所に相当する．また，day -4とday -3では，正偏差域の位相は北西から南東に傾き，この偏差場は西風運動量を赤道側に輸送して極域の西風を減速する作用を持つことが分かる．このことは，Fig. 2で示されたE-Pフラックス偏差や帯状風偏差の分布とも整合的である．さらに，day -3以降では，極域の西経120度付近に顕著な正偏差を伴う東西

波数2の構造を持つ高度場偏差が，ほぼ定定的に増幅する様子が見て取れる．

3.3 アンサンブルスプレッドの分析

まず，Fig. 5に，5-hPaにおける北緯30度以北の高度場をもとに見積もったアンサンブルスプレッドの時間発展を示す．この図から，2007年2月21日から23日を初期とする予報では，2月28日から3月3日にかけてのスプレッド成長が，他の予報に比べ明瞭に大きくなる．これは，スプレッド成長曲線の勾配が，そこで大きくなることと対応している．さらに，予報初期24時間で見積もったスプレッドの増幅率も，2月末に，2.8と極大値を取る．このことは，この時期にアンサンブル平均予測値に対応する解軌道周辺の解軌道は互いに急激に離散する傾向にあることを意味している．このようなスプレッドの急成長は，上部成層圏循環の予報に対する「予報バリエーション」が，この時期存在することを示唆している．

次に，位相空間内で最もスプレッドが拡大する方向を求めるため，Fig. 6にアンサンブルスプレッドの第1主成分を示す．この主成分分析は，day -10を初期値とするアンサンブル予報全メンバーを用いて，北緯30度以北の5-hPa高度場偏差（アンサンブル平均からの偏差）について行った．この図から，

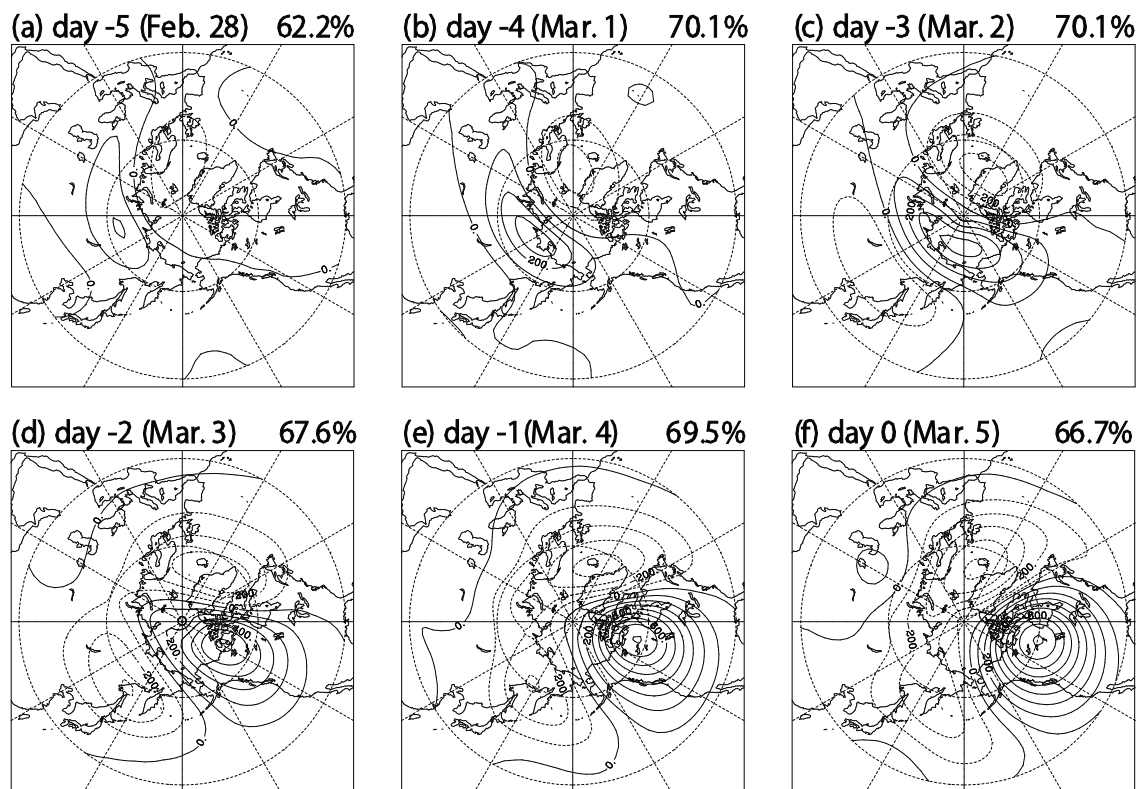


Fig. 6 The 1st EOFs of ensemble spread of the predicted 5-hPa geopotential height field northward of 30°N (unit: m) on each prediction date for the forecast starting from day -10. Contour interval is 100 m. The corresponding PC is shown at the top right of each panel.

day -3以降では、第1主成分と回帰偏差場 (Fig. 4) の水平構造は極めて類似していることが分かる。特に、波数2が卓越する構造や、偏差場の東西位相がアンサンブル平均予測場と1/4波長ずれている点などは、両方で共通している。しかも、day -2以降、第1主成分の作用中心は、回帰偏差場と同様、定在的となる。また、この主成分は、スプレッドに伴う全分散の70%程度を説明する。

これらの解析から、Fig. 3とFig. 4で得られた回帰偏差場は、上部成層圏の変形した極渦に内在する力学的不安定によって、自励的に出現したと強く示唆される。

4. 結語

本研究では、2007年3月初旬に生起した、成層圏下層における惑星規模波の下方伝播イベントの予測可能性を吟味するため、気象研究所大気大循環モデルを用いて全25メンバーからなるアンサンブル予報実験を毎日実施し、その結果について回帰分析を行った。

まず、100 hPaの北緯65度以北で領域平均

したE-Pフラックス（以下、EPz100）の下向き成分が極大となる2007年3月5日（以下、day 0）におけるアンサンブル平均予測値から判断すると、この下方伝播イベントは約8日前（day -8）から予測可能であることが明らかになった。次に、day 0におけるEPz100予測値の分散が大きいday -10（2007年2月23日）を初期値とするアンサンブル予報の全25メンバー予測値を用いて、day 0におけるEPz100予測値と関連する循環場について回帰分析を行った。

その結果、day 0におけるEPz100予測値のアンサンブル平均からの偏差が負で大きい場合には、day 0以前の偏差場は以下の特徴を持つことが明らかになった。

- ① 有意な回帰は、まず成層圏でday -5頃から出現し始めるが、対流圏では、その頃に有意な回帰は存在しない。
- ② 高度場偏差の回帰は、day -3以降、成層圏中上層で顕著になり、定在的な東西波数2のほぼ順圧構造を保ったまま増幅する。
- ③ アンサンブル平均予測場で日付変更線付近に存在する高気圧性循環の下流域で、

回帰高度場における正偏差が顕著になる。また、この順圧的な高度場偏差とアンサンブル平均予測場とが重畳することにより、成層圏における惑星規模擾乱の位相は、西半球側で高度とともに東に傾き、成層圏下層で下方伝播が生じたと考えられる。さらに、この特徴的な偏差場は、スプレッドが位相空間内において最大成長する方向とほぼ一致する。

本研究で明らかになった回帰場の特徴は、この事例で下方伝播が生じる直前に、上部成層圏循環が力学的に不安定となり、ある種の順圧不安定擾乱が発達したことを強く示唆している。また、成層圏下部で生じた下方伝播も、基本場であるアンサンブル平均予測場と上部成層圏で増幅する順圧的な不安定擾乱との重畳からも説明可能である。実際、Mukougawa et al. (2016)は、球面順圧モデルを用いて、上部成層圏において、東西方向非一様な流れ場を含むアンサンブル平均予測場の力学的安定性を調べ、本研究で得られた回帰場と空間構造が良く似た定在性不安定擾乱が、下方伝播が生じる直前に出現することを確認している。また、その成長率も、下方伝播が生じる直前に極大となる。従って、この事例に下方伝播の励起に、上部成層圏循環の力学的不安定性が大きな役割を果たしていることが強く示唆される。

謝 辞

作図には地球流体電脳ライブラリを用いた。

参考文献

野口峻佑・向川 均・黒田 友二・水田 亮, 2015: 成層圏における惑星規模波反射現象の予測可能性—2014年2月の事例のアンサンブル再予報実験—, 京都大学防災研究所年報, **58B**, 125-136.
向川 均・佐治 憲介・小寺 邦彦, 2010: 成層圏でのプラネタリー波の反射と関連する帯状風構造. 京都大学防災研究所年報, **53B**, 307-312.

Dee, D. P., et al., 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 553-597.
Kodera, K., H. Mukougawa, and S. Itoh, 2008: Tropospheric impact of reflected planetary waves from the stratosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L16806.
Kodera, K., H. Mukougawa, and A. Fujii, 2013: Influence of the vertical and zonal propagation of stratospheric planetary waves on tropospheric blockings. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 8333-8345.
Mizuta, R., et al., 2006: 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model—Mean climate states. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 165-185.
Mizuta, R., et al., 2012: Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, 233-258.
Mukougawa, H., S. Noguchi, Y. Kuroda, R. Mizuta, and K. Kodera, 2016: Dynamics and predictability of downward propagating stratospheric planetary waves observed in March 2007. Submitted to *J. Atmos. Sci.*
Noguchi, S., H. Mukougawa, Y. Kuroda, R. Mizuta, R. Yabu, H. Yoshimura, 2016: Predictability of the stratospheric polar vortex breakdown: An ensemble reforecast experiment for the splitting event in January 2009. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 3388-3404.
Perlwitz, J. and N. Harnik, 2003: Observational evidence of a stratospheric influence on the troposphere by planetary wave reflection. *J. Clim.*, **16**, 3011-3026.
Plumb, R. A., 1985: On the three-dimensional propagation of stationary waves. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 217-229.
Yabu, S., R. Mizuta, H. Yoshimura, Y. Kuroda, H. Mukougawa, 2014: Meteorological Research Institute Ensemble Prediction System (MRI-EPS) for climate research. *Tech. Rep. Meteor. Res. Inst.*, **71**, 63 pp.