

冬季成層圏極渦に内在する予測障壁 —2009・2010年の成層圏突然昇温の予測可能性比較—

On the Existence of the Predictability Barrier in the Wintertime Stratospheric Polar Vortex: Intercomparison on the Predictability of the Two Stratospheric Sudden Warmings in 2009 and 2010

向川均⁽¹⁾・野口峻佑⁽²⁾・黒田友二⁽³⁾・水田亮⁽²⁾・小寺邦彦⁽²⁾

Hitoshi MUKOUGAWA⁽¹⁾, Shunsuke NOGUCHI⁽²⁾, Yuhji KURODA⁽³⁾,
Ryo MIZUTA⁽²⁾, and Kunihiko KODERA⁽²⁾

(1) 京都大学大学院理学研究科

(2) 気象研究所気候研究部

(3) 気象大学校

(1) Graduate School of Science, Kyoto University

(2) Climate Research Department, Meteorological Research Institute

(3) Meteorological College

Synopsis

The predictability of two stratospheric sudden warming (SSW) events occurring in 2009 and 2010 is examined by conducting ensemble forecast using an AGCM. It is found that the predictable period of the vortex splitting SSW in 2009 is about 7 days, much shorter than that of the vortex-displacement SSW in 2010, which is assessed at about 14 days. Stability analysis of the stratospheric circulation using a nondivergent barotropic vorticity equation also reveals that the upper stratospheric circulation is highly unstable to infinitesimal perturbations just before the mature phase of the 2009 SSW event while such unstable modes with extremely large growth rates are absent during the 2010 SSW event. Hence, it is suggested that a predictability barrier inherent in the upper stratospheric circulation, which is characterized by the existence of dynamically unstable modes with large growth rates limits a predictable period of the 2009 SSW event.

キーワード: 成層圏突然昇温, 予測可能性, 力学的安定性

Keywords: stratospheric sudden warming, predictability, dynamical stability

1. はじめに

これまでの気象庁現業1か月アンサンブル予報結果やアンサンブル予報実験結果を用いた解析から、成層圏突然昇温 (SSW) の予測可能期間は5日から19日と、イベントに依存して大きく変動することが明らかになった (Ichimaru et al. 2016) . この予測可能

期間の長短に、対流圏から上方伝播する惑星規模波の予測可能性が大きく寄与することは間違いない. 一方, Mukougawa et al. (2017) は、成層圏で惑星規模波の下方伝播が生じる直前に東西非一様な上部成層圏循環が極度に力学的に不安定となることを見出した. このため, SSWの予測可能性にも、成層圏循環の力学的安定性が重要な役割を果たしている可能性

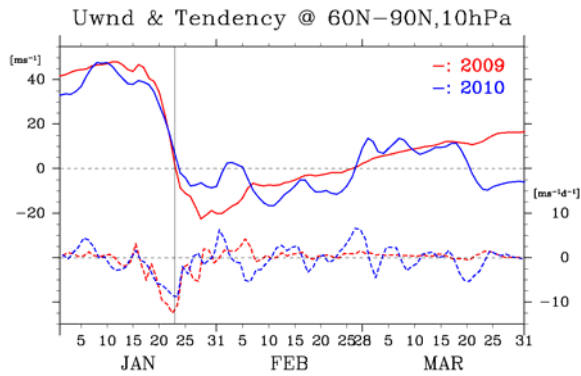


Fig. 1 Time evolution of zonal wind (upper two solid lines, unit; $m s^{-1}$) and its acceleration (lower two broken lines, unit; $m s^{-1} day^{-1}$) averaged poleward of $60^{\circ}N$ at 10 hPa. Red (blue) lines show the evolution during the 2009 (2010) winter. The vertical line indicates the date corresponding to 23 January (referred to as day 0) when the deceleration of the polar night jet during both SSW events became maximum.

が考えられる。

このため、本研究では、2009年1月に生じた極渦分裂型SSWと、2010年1月に生じた極渦変位型SSWの予測可能性を比較し (Figs. 1 and 2), 成層圏循環の力学的安定性とSSWの予測可能性との関係について吟味する。

2. アンサンブル予報実験

まず、Noguchi et al. (2016) と同様に、水平解像度 TL159, 鉛直総数60層 (モデル上端は0.1hPa) の気象研究所AGCMを用いて、メンバー数25のアンサンブル予報実験を毎日実施した。

Fig. 3より、2009年SSWの予測可能期間は一週間程度と短く、しかも、10日予報から7日予報において、1月20日から23日の予報期間に、アンサンブルメンバー間のスプレッドが急に大きくなるのが分かる。一方、2010年SSWの予報期間は2週間程度と比較的長く、東風が出現する1月23日頃のスプレッドも比較的小さい (Fig. 4)。このため、2009年のSSWに比べ2010年のSSWは、比較的予測しやすいことが分かる。

3. 非発散順圧方程式を用いた安定性解析

次に、Mukougawa et al. (2017)と同様に、各気圧面でのアンサンブル平均予測場を基本場として実施した非発散順圧方程式に基づく力学安定性解析の結果を示す。

Fig. 5は、5hPa流線関数アンサンブル平均予測場を基本場として実施した安定性解析結果を示す。2009年の場合、SSW極大期直前の1月20日付近で、 $1.0/day$ を越える極めて大きな成長率を持つ不安定モードが出現することが分かる。一方、2010年SSWの場合、そのように大きな成長率を持つ不安定モードは存在しない。

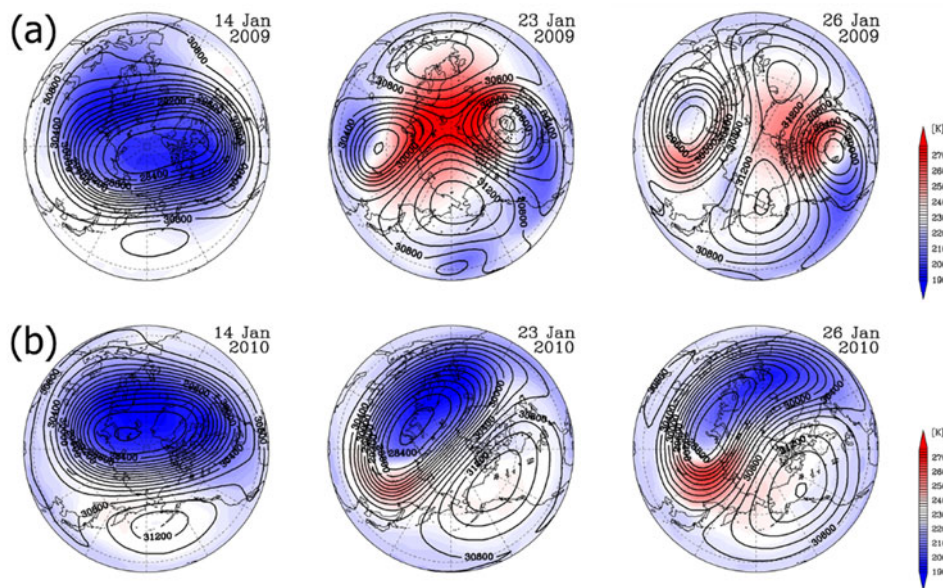


Fig. 2 Horizontal distribution of geopotential height (contour; unit: m) and temperature (color shade, unit: K) at 10 hPa during the 2009 SSW event (a) and the 2010 SSW event (b).

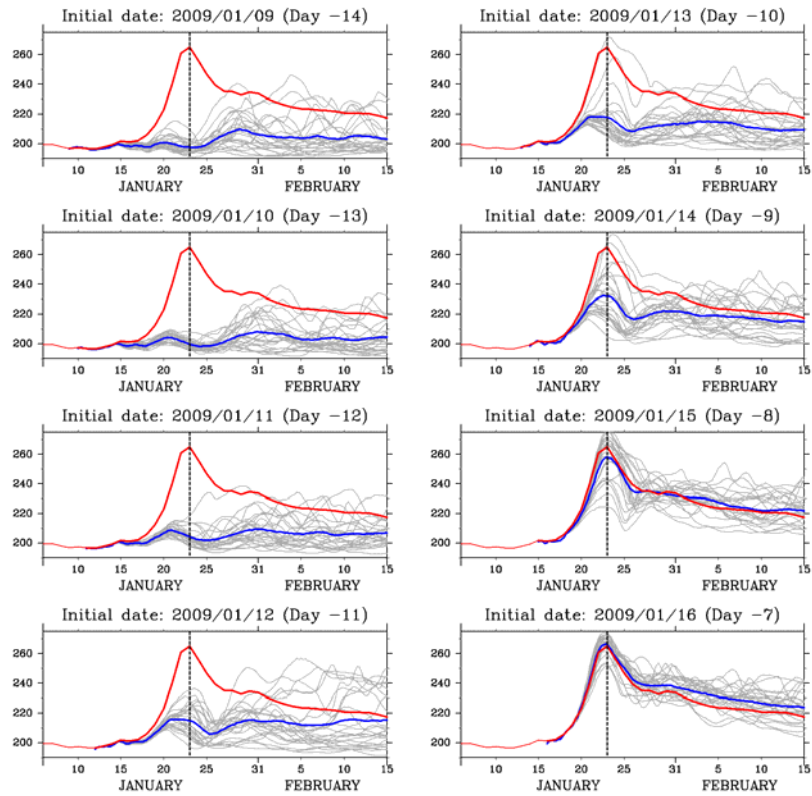


Fig. 3 Prediction of 10 hPa temperature (unit; K) averaged poleward of 80°N during the 2009 SSW event. The red line indicates the analysis, the black line the prediction of each ensemble member, and the blue line the corresponding ensemble mean prediction.

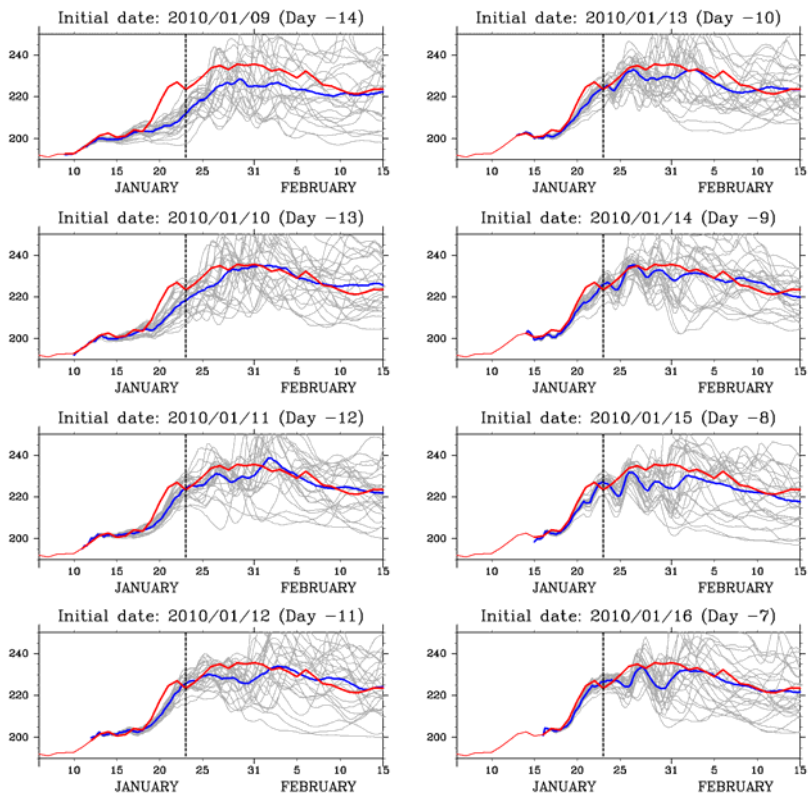


Fig. 4 As in Fig.3, except for the 2010 SSW event.

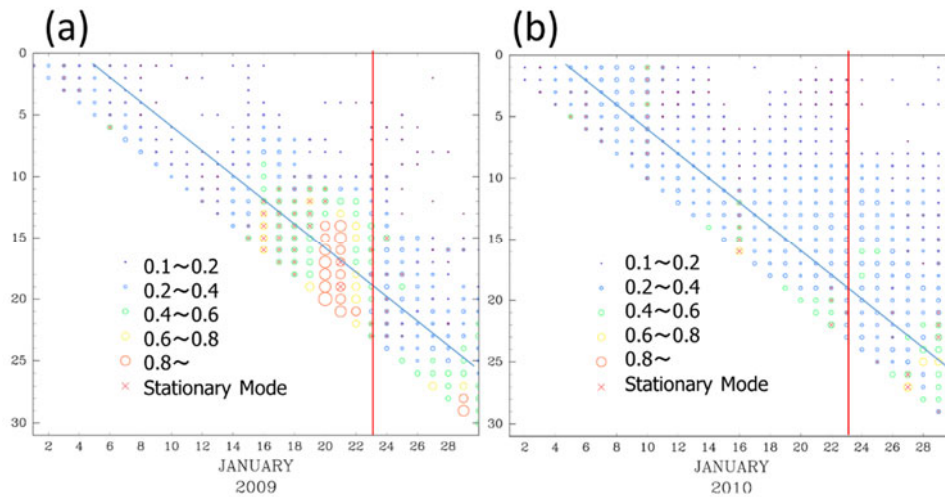


Fig. 5 Growth rate (unit; day^{-1}) of the most unstable modes computed for the basic flow composed of the T21 truncated 5-hPa streamfunction of the ensemble mean field on each verification date (the ordinate) of the forecast starting from January 1 to January 30. The radius of the open colored circle is proportional to the growth rate, and each color corresponds to the respective range of the growth rate as shown in the panel. The cross indicates that the most unstable mode is a stationary mode with zero frequency. (a) 2009, (b) 2010. The vertical red lines correspond to 23 January, and the slant blue lines correspond to day-4 forecast.

次に、各気圧面での流線関数のアンサンブル平均予測値を基本場とした場合の安定性解析の結果を Fig. 6と Fig. 7に示す。ここで、予報期間は4日とした。Fig. 6より、2009年の場合、1月20日付近で、5hPaから2hPaの上部成層圏領域で、 $1.0/\text{day}$ 以上の極めて大きな成長率を持つ不安定モードが出現することが分かる。一方、2010年のSSWの場合 (Fig. 7) には、SSW極大期の直前には、どの高度領域においてもそのような大きな成長率を持つ不安定モードは存在しない。また、2009年の場合、上部成層圏の不安定モードの

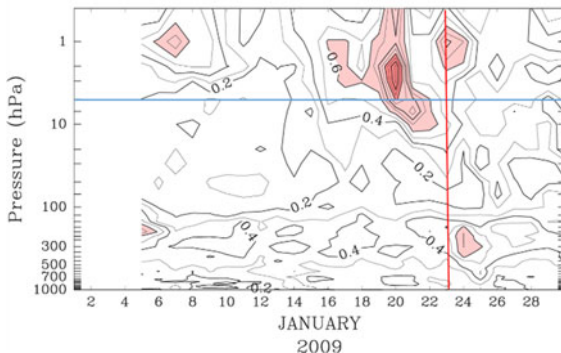


Fig. 6 Growth rate (unit; day^{-1}) of the most unstable modes computed for the basic flow composed of the T21 truncated streamfunction field on each pressure level (the abscissa, unit; hPa) for day-4 ensemble mean prediction of the 2009 SSW event. The ordinate indicates the verification date of forecasts starting from January 1 to January 26. Regions where the growth rate is larger than 1.0 (0.6) day^{-1} have darker (lighter) shading. The vertical red line corresponds to 23 January while the horizontal blue line indicates 5hPa.

成長率は、対流圏でのそれに比べても、かなり大きいことが確認できる。

Fig. 8に2009年のSSW極大期直前に得られた不安定モードの水平構造を示す。ここで、基本場は、5hPa流線関数のアンサンブル平均4日予報とした。基本場では、波数2が卓越し、極渦が分裂する直前の状態を示している。得られた不安定モードの水平構造では、1月20日には、第1不安定モードで波数2が卓越するが、その位相は基本場とは東西方向に90度ずれている。このため、この不安定モードが基本場に重畳すると、極渦はさらに引き延ばされるか、あるいは元に戻ることになる。また、1月21日では、同様のモードが第2モードとして出現している。

なお、このような波数2が卓越する不安定モードは、2009年1月17日から1月21日の期間で出現することが確認できた。さらに、その水平パターンは、1月

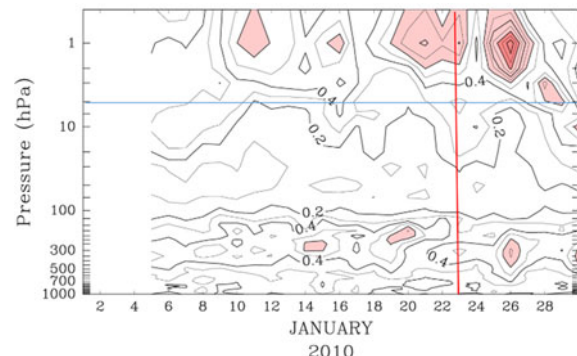


Fig. 7 As in Fig. 6, except for the 2010 SSW event.

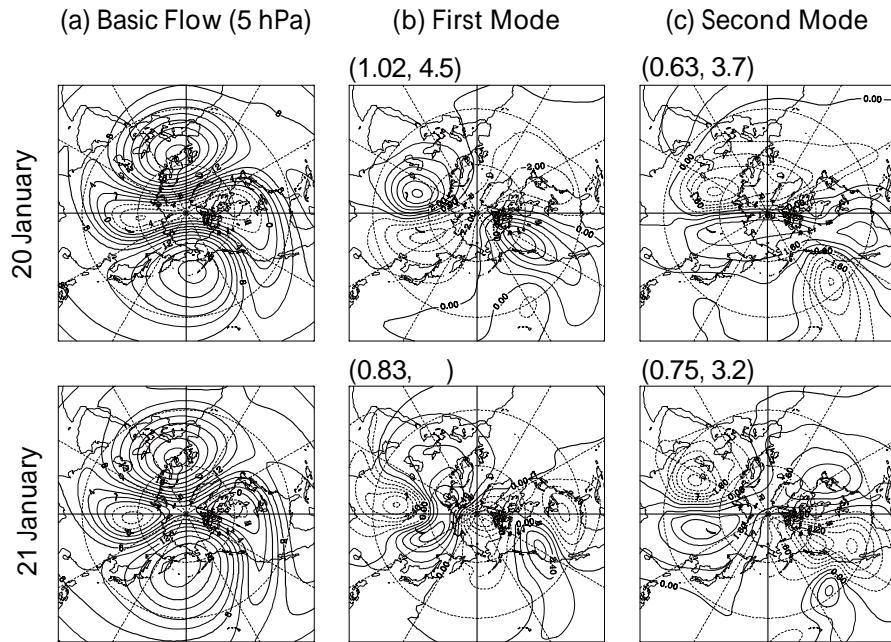


Fig. 8 (a) Horizontal structure of the basic flow given by the T21 truncated 5-hPa streamfunction field ($10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) of day-4 ensemble mean prediction. (b) and (c) show streamfunction field of the first and second unstable modes computed for the basic flow shown in panel (a). The first and second numbers in parentheses above each panel indicate the growth rate (day^{-1}) and the period (days) of the unstable mode, respectively. A Stationary mode with zero imaginary component of the eigenvalue is designated by the period of the infinity. Upper (lower) panels are for 20 January (21 January) 2009.

20日頃において、5hPa高度場のアンサンブルスプレッド第1主成分ともよく似ていることが確認できた。このため、Fig. 3で示されたように、2009年SSWにおいてSSW最盛期直前にスプレッドが大きくなるのは、このような成長率が極めて大きい不安定モードが上部成層圏循環に存在するためであると考えられる。言い換えると、2009年に生じた極渦分裂型SSWでは、極渦が分裂する直前に、上部成層圏循環が力学的に極めて不安定となる予測障壁 (predictability barrier) が存在すると示唆できる。他方、2010年に生じた極渦変位型SSWの場合には、そのようなpredictability barrierは成層圏循環中には存在しない。このため、2009年SSWの予測可能期間は2010年SSWに比べて、極端に短くなったと推測できる。

4. まとめ

気象研究所AGCMを用いて実施したアンサンブル予報実験により、2009年1月に発生した極渦分裂型SSWと、2010年1月に発生した極渦変位型SSWの予測可能性を吟味した。その結果、2009年1月のSSWの予測可能期間は7日程度と、2010年1月のSSWの予測可能期間 (14日程度) に比べかなり短いことが明らかになった。次に、SSW発生期における成層圏循環の

力学的安定性がSSWの予測可能性に及ぼす影響を評価するため、非発散順圧渦度方程式に基づく安定性解析を実施した。その結果、2009年1月のSSWの生起時に、上部成層圏循環は力学的に極めて不安定な状態となることが明らかになった。一方、2010年1月のSSWの生起時の成層圏循環には、2009年1月のように、成長率が極端に大きな不安定モードは存在しなかった。従って、このような成長率の大きな不安定モードの存在と対応する「予測障壁」が上部成層圏循環に内在したために、2009年1月のSSWの予測可能期間が極端に短くなったと考えられる。

今後は、不安定が生じる条件や、不安定モードの3次元構造などについても解析を進める予定である。

謝 辞

作図には地球流体電脳ライブラリを、球面調和関数の計算にはISPACK (Ishioka 2016)を用いた。

参考文献

Ichimaru, T., Noguchi, S., Hirooka, T. and Mukougawa, H. (2016): Predictability changes of stratospheric circulations in Northern Hemisphere winter, *J. Meteor.*

Soc. Japan, Vol. 94, pp. 7-24.
Ishioka, K. (2016): ISPACK: A FORTRAN77 library for scientific computing,
<http://www.gfdennou.org/arch/ispack/index.htm.en>.
Mukougawa, H., Noguchi, S., Kuroda, Y., Mizuta, R. and Kodera, K. (2017): Dynamics and predictability of downward propagating stratospheric planetary waves observed in March 2007, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 74, pp. 3533-3550.

Noguchi, S., Mukougawa, H., Kuroda, Y., Mizuta, R., Yabu, R. and Yoshimura, H. (2016): Predictability of the stratospheric polar vortex breakdown: An ensemble reforecast experiment for the splitting event in January 2009, *J. Geophys. Res. Atmos.*, Vol. 121, pp. 3388-3404.

(論文受理日 : 2018年6月13日)