

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～

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

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 (図1, 図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した。

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

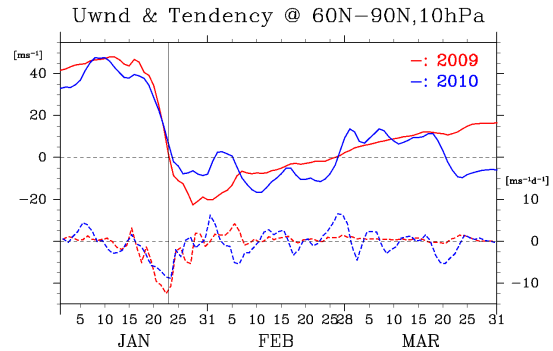


Fig. 1 北緯 60 度以北で平均した 10hPa 東西平均東西風[m/s] (実線; スケールは左軸) と、その時間変化率[m/s/day] (破線; スケールは右軸) の時間平均。2009 年 (2010 年) を赤 (青) 色で示す。ほぼ同じ時期 (1 月 23 日頃) に、極夜ジェットが減速が最大になる。

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。

図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

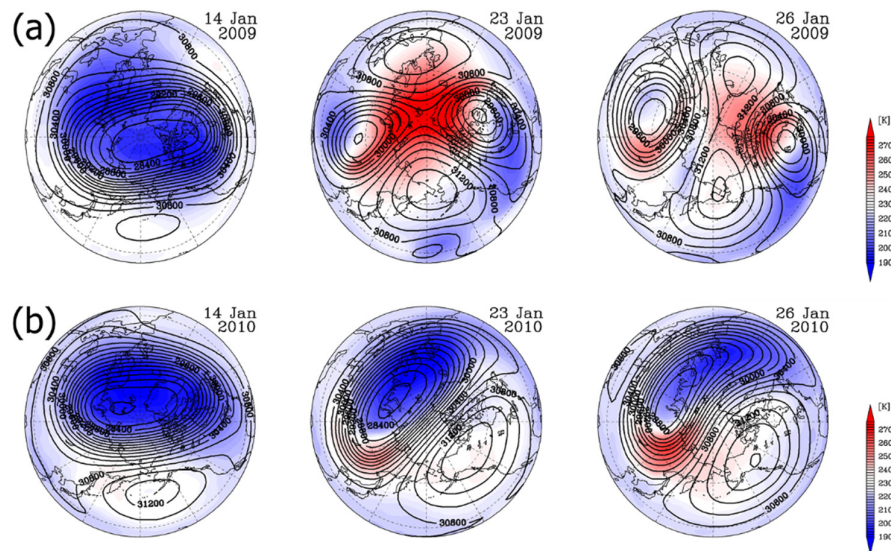


Fig. 2 10hPa 等圧面高度 (m, 等値線) と温度 (K, 色塗り) の水平分布。(a) 2009 年極渦分裂型 SSW。(b) 2010 年極渦変位型 SSW。

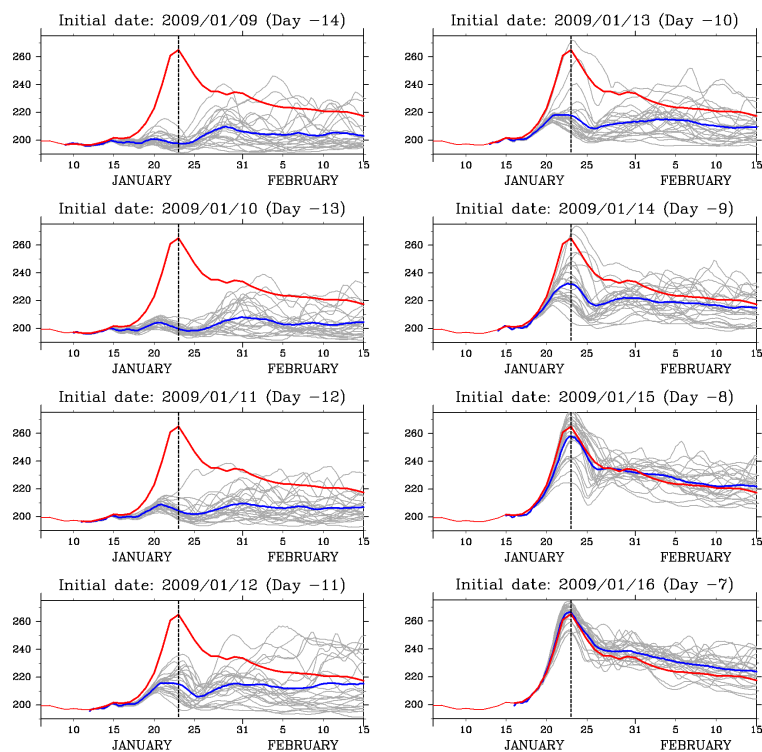


Fig. 3 2009 年 1 月の SSW 発生期におけるアンサンブル予報結果。80°N 以北で平均した 10hPa 温度の時間変化を示す。赤色は観測値、青色はアンサンブル平均予測値、灰色は各アンサンブルメンバーの予測値

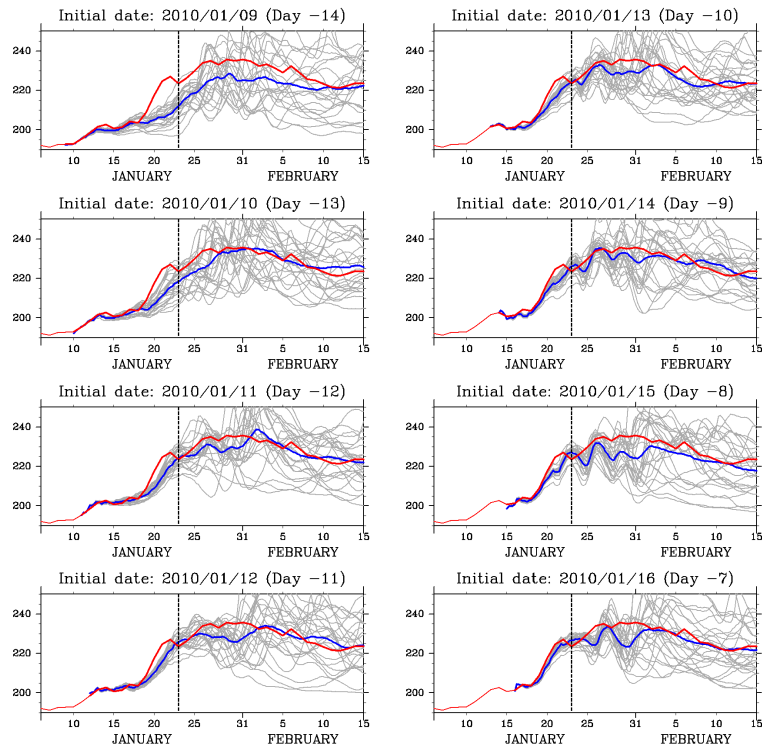


Fig. 4 図 3 と同様。但し、2010 年 1 月の SSW 発生期におけるアンサンブル予報結果。

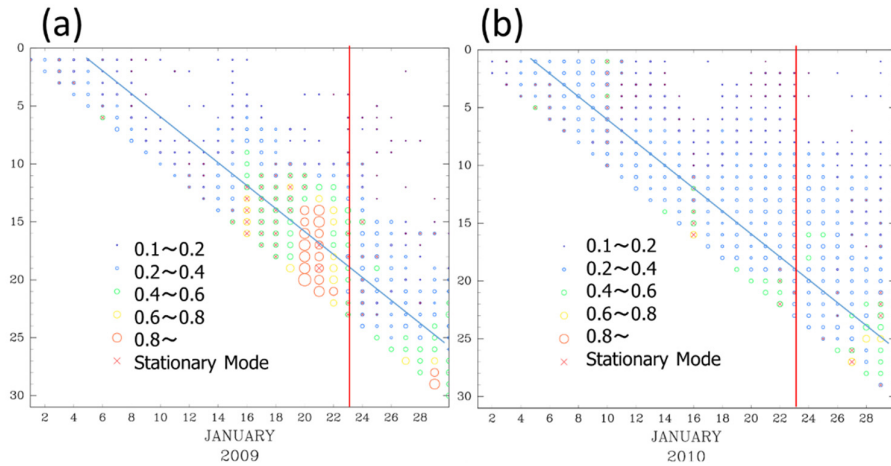


Fig. 5 5hPa 流線関数アンサンブル平均予測値を基本場とした場合の安定性解析結果。(a)2009 年、(b)2010 年。縦軸がアンサンブル予測の予報初期日、横軸は予報日を示す。最大成長率を持つモードの成長率 (1/day) を図中の凡例に従って示す。×は振動数がゼロの stationary mode。赤色の縦線は 1 月 23 日、斜めの青線は 4 日予報を示す。

が急に大きくなることが分かる。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。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。

2. 非発散順圧方程式を用いた安定性解析

2.1 成層圏predictability barrier

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。

図 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。

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結果を図 6 と図 7 に示す。ここで、予報期間は 4 日とした。図 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/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 (図 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に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

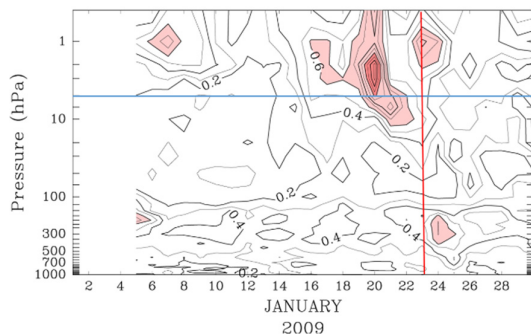


Fig. 6 2009 年 1 月において、各気圧面での流線関数アンサンブル平均 4 日予報を基本場とした場合の安定性解析結果。最大成長率を持つモードの成長率 (1/day) を示す。縦軸は気圧、横軸は予報日。成長率が 0.6/day (1.0/day) 以上の領域を淡く (濃く) 色塗りした。赤色の縦線は 1 月 23 日、青色の水平線は 5hPa を示す。

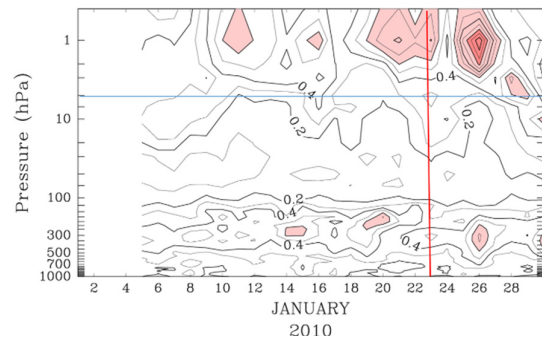


Fig. 7 図 6 と同じ。但し、2010 年 1 月。

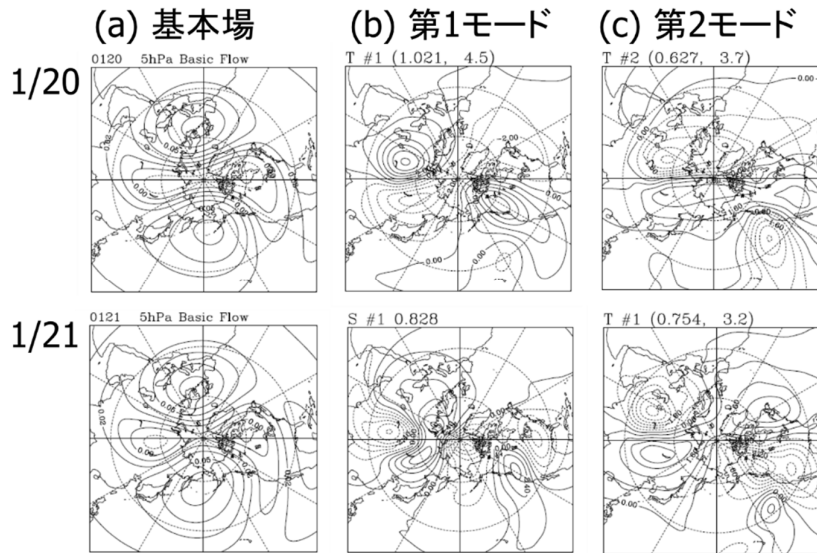


Fig. 8 5hPa 流線関数のアンサンブル平均 4 日予報を基本場として得られた不安定モードの流線関数の水平構造（無次元）。上段：予報日は 2009 年 1 月 20 日、下段：2009 年 1 月 21 日。(a) 基本場（無次元）、(b) 第 1 不安定モード、(c) 第 2 不安定モード。不安定モードの水平構造を示す各パネルの上の括弧内の数字は、成長率 (1/day) と周期 (day) を示す。T は、振動数がゼロでない transient mode、S は stationary mode を意味する。

モードの成長率は、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。

図 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 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、図 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、上部成層圏循環が極めて不安定となる、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。

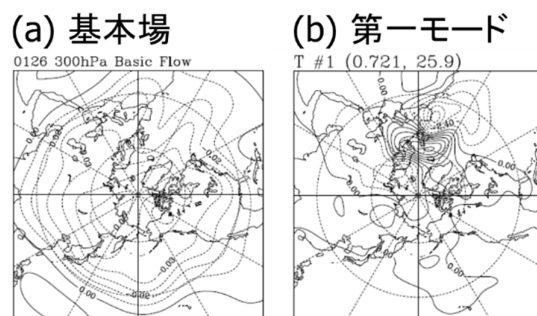


Fig. 9 図 8 に同じ。但し、300hPa 流線関数アンサンブル平均 4 日予報を基本場とした場合に得られた第 1 不安定モードの水平構造。予報日は 2010 年 1 月 26 日。(a) 基本場、(b) 第 1 不安定モード。

2.2 対流圏 predictability barrier

同様の安定性解析を対流圏ブロッキング生起時に実施した。図 9 に、北大西洋で発生したブロッキングに関する解析結果を示す。図 9a に示したように、2010 年 1 月 26 日頃に、低渦位の空気塊が圏界面付近の北大西洋域で、低緯度域から高緯度域へと狭い経度帯で侵入し始める。この状態を基本場として非発散順圧渦度方程式を用いて安定性解析すると、第 1 不安定モードとして図 9b で示される成長率が $0.72/\text{day}$ とやや大きいモードが得られた。このモードの振幅は、北大西洋域に局在化しており、ブロッキング形成期の循環場がかなり不安定であることが分かる。

一方、2009 年 1 月 23 日頃に、形成し始めた北太平洋域でのブロッキングについて同様の解析を行った結果を図 10 に示す。このとき得られた第 1 不安定モード(図 10b)の成長率は $0.37/\text{day}$ と小さく、しかもその振幅はブロッキング領域では小さく、北緯 30 度付近の緯度帯において半球規模で遍在している。このため、図 10b で示された不安定モードは北太平洋域のブロッキングとは関係しないと推論できる。

このように、ブロッキング形成期においても、対流圏循環場が極度に不安定となる場合と、そうではない場合が存在することが推測できる。このことは、両者のブロッキングの予測可能期間の長さの違いにも影響すると予期できる。

3. 結語

成層圏突然昇温やブロッキングの生起時に、成層圏や対流圏循環場が極度に力学的に不安定となる場合が存在することが明らかになった。このような不安定性は、循環に内在する predictability barrier に対応し、予測可能期間を制限すると考えられる。今後は、不安定が生じる条件や、不安定モー

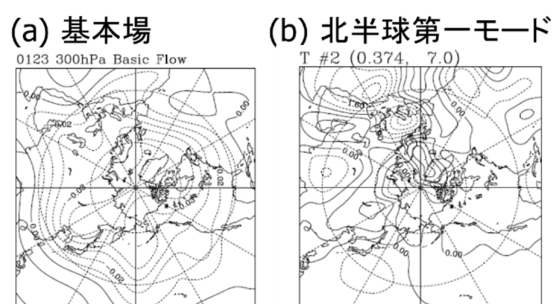


Fig. 10 図 9 に同じ。但し、2009 年 1 月 23 日を予報日とするアンサンブル予報を基本場とした。(b)北半球で振幅が大きくなる第 1 不安定モード。

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用いた。

引用文献

- Ichimaru, T., S. Noguchi, T. Hirooka, and H. Mukougawa, 2016: Predictability changes of stratospheric circulations in Northern Hemisphere winter. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 7–24.
- Mukougawa, H., S. Noguchi, Y. Kuroda, R. Mizuta, and K. Kodera, 2017: Dynamics and predictability of downward propagating stratospheric planetary waves observed in March 2007. *J. Atmos. Sci.*, **74**, 3533–3550.
- 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.