

2001–2006 年冬季北半球成層圏循環の予測可能性について

^{1,3}一丸 知子, ¹廣岡 俊彦, ²向川 均

¹九大院・理 ²京大・防災研 ³日本学術振興会特別研究員(DC1)

1. はじめに

対流圏から伝播する増幅したプラネタリー波によって引き起こされる成層圏突然昇温(SSW)は、冬季成層圏循環の変動を支配する顕著な現象である。我々はここ数年、SSW を対象にした成層圏循環の予測の研究を行ってきたが、その結果、対流圏循環の予測可能性(e.g., Kimoto et al. 1992)と異なる興味深い結果が色々と得られてきた。

例えば、Mukougawa and Hirooka (2004)は、1998 年 12 月に生じた SSW の予測可能性を等圧面高度の平方根平均二乗誤差(RMSE)を用いて解析し、RMSE が大きくなる SSW の期間中でも成層圏循環の予測限界が 20 日を超えることを示唆した。また、Mukougawa et al. (2005)は、気象庁 1 ヶ月アンサンブル予報全メンバーを用いて、2001 年 12 月に生じた SSW の詳細な予測可能期間を調べた。10hPa、北緯 80 度の帯状平均温度を解析した結果、温度ピークを少なくとも 2 週間前から前もって予測できると報告した。しかし、この SSW は予報しやすい事例であり、温度ピークの予測可能期間は SSW の生起パターンに依存して異なってくるのが Hirooka et al. (2007)により報告されている。

以上のような、事例解析に留まっていた従来の研究を受け、本研究では、2001 年から 2006 年までの冬季に実施された気象庁 1 ヶ月アンサンブル予報の各予報を用い、北半球冬季における成層圏循環の予測限界を、平方根平均二乗誤差(RMSE)とアノマリー相関(AC)の 2 つの指標により定量的に求める。さらに、Mukougawa et al. (2005)の手法で見積もる温度ピークの予測可

能期間と比較することで、RMSE と AC から得られた予報限界との整合性を議論する。

2. データと解析手法

本研究で用いる気象庁 1 ヶ月アンサンブル予報データは、毎週水曜と木曜の 12UTC から、初期値に摂動を加えないコントロールラン 1 個と、Breeding of Growing Mode 法により作成した摂動を加えた摂動ラン 12 個が 34 日間にわたり積分されたものである。また、予報値の検証には気象庁全球客観解析データを用いる。解析期間は、2001 年から 2006 年までの北半球冬季(12 月から 2 月)であり、両データとも 12UTC のもののみを使用し、水平格子点間隔は $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ に統一している。

以下に RMSE と AC, RMSE で予測限界を求める際の閾値である気候的標準偏差(CSD)の定義式を示す。これらは、10hPa でのジオポテンシャルハイトに関して計算しており、北緯 20 度以北で面積の重みを考慮した領域平均を取っている。

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (Z_f^i - Z_g^i)^2 / N} \quad \dots(1)$$

$$CSD = \sqrt{\sum_{i=1}^N (Z_g^i - Z_c^i)^2 / N} \quad \dots(2)$$

$$AC = \frac{\sum_{i=1}^N (Z_f^i - Z_c^i)(Z_g^i - Z_c^i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Z_f^i - Z_c^i)^2 \sum_{i=1}^N (Z_g^i - Z_c^i)^2}} \quad \dots(3)$$

ここで、 N は格子点数で、 Z_f^i と Z_g^i は、それぞれある格子点 i でのアンサンブル予報平均値と観測値である。 Z_c^i は、観測値の長期的な平均値であるが、その詳細は後に述べる。RMSE

は予報誤差を表し、もっぱら予報値と観測値の差の絶対値によって値が変化する。一方、ACは長期的な平均値からの予報値の偏差と観測値の偏差の間のパターン相関を表し、偏差の絶対値の情報は捨象している。従って、予報精度を考えるうえでこの二つの尺度は相補的な関係にある。一方、CSDは高度場の日々変動の大きさを表わす尺度である。RMSEに基づく予報限界は、時間とともに増加するRMSEの値が初めてCSDを超えるまでの期間とし、予報誤差が自然に生じる日々変動の大きさを超えてしまった場合には、その予報の価値がなくなると考える。一方、ACに基づく予報限界は、時間とともに減少するACが0.6の値を初めて下回るまでの期間としてそれぞれ求める。

本研究では、10hPa帯状平均場に関する3つの条件、即ち、条件(A):北緯60度で帯状平均東西風が東風；条件(B):北緯80度以北で平均した帯状平均温度が3日間で15K以上昇温；条件(C):温度ピーク間隔が10日以上、について「(A)と(C)」または「(B)と(C)」を満たす昇温をSSWとして抽出する。

3. 結果

3.1 RMSEの気候的標準偏差(CSD)

はじめに、11日移動平均した10hPaの帯状平均高度と東西波数1から3の合成振幅について

2001-2006年冬季の季節進行を示す(図1)。2004/05年冬季を除いて、大振幅のプラネタリー波に伴い、たびたび極域の帯状平均高度場が高くなっている。このとき、極域の帯状平均温度は上昇し、SSWが生じる(図1の矢印)。一方、2004/05年冬季には、波の振幅が大きい時期(1月から2月の下旬)でも極域の帯状平均高度場が非常に低く、SSWは生起していない。このような冬季成層圏平均場の年々変動は、準2年周期振動や11年周期太陽活動変動、エルニーニョなどの影響を受けて起こることが知られている(e.g., Labitzke and van Loon, 1999)。冬季成層圏の年々変動に見られるこうした性質のため、5冬季にわたり実施された各予報のRMSEに関する予報限界を、ある閾値によって見積もる場合には一つの問題が生じる。

図2は、日々の観測値の5冬季の平均値からの偏差に基づき計算した10hPa高度の平均二乗誤差(MSE)の時間変化を示している。偏差の基準を5冬季にわたる平均高度場とした場合、2004/05年冬季は、帯状平均高度場が期間を通して低いため、MSEが他の冬季に比べて非常に大きな値となっている(図2a)。即ち、年々変動の存在のために、日々変動の大きさが過大評価されていると考えられる。従って、冬季平均場の年々変動が大きい成層圏では、こうした問題を考慮してCSDを求める必要がある。そこで、

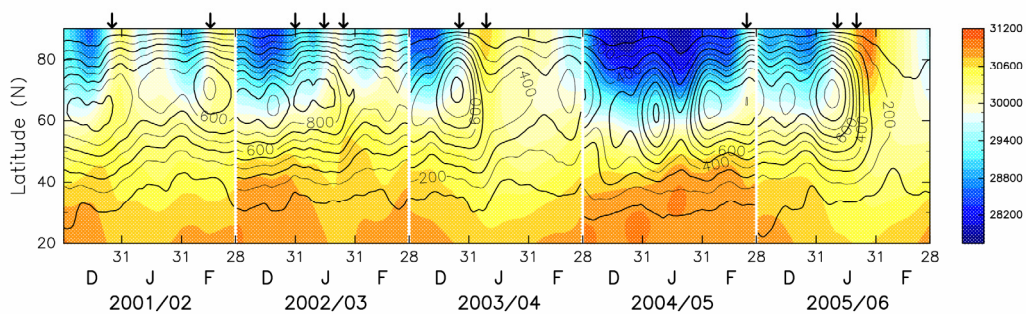


図1:11日移動平均した10hPaでの帯状平均高度(カラーの陰影)と東西波数1-3の合成振幅(等値線)の2001-2006年冬季の季節進行。矢印:成層圏突然昇温の温度ピークの時期。

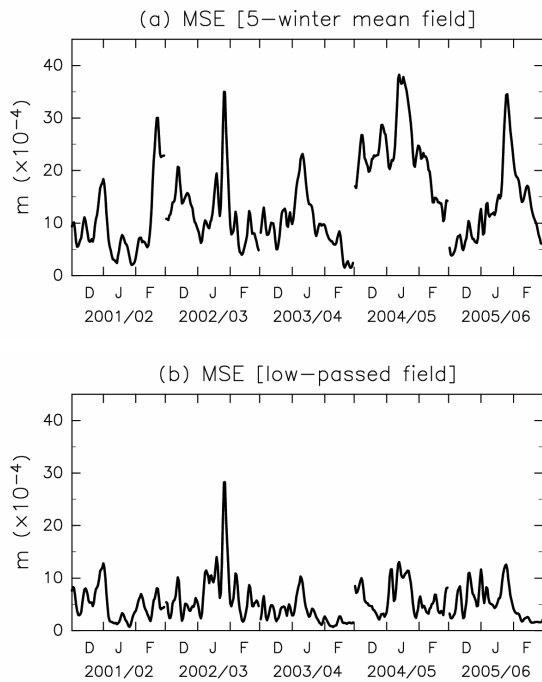


図 2: 日々の観測値と 5 冬季の平均値の偏差から計算した 10 hPa 高度の平均二乗誤差の時間変動。基準値が, (a) 2001-2006 年の 5 冬季の平均高度場, (b) lowpass filter をかけた高度場の場合。

年々変動の影響を除くのに十分短い, cutoff 周期が 90 日の lowpass filter をかけた 10hPa 高度場を偏差の基準として MSE を計算した(図 2b)。その結果, 図 2b で見られるように各冬季間の MSE の違いは小さくなり, 日々変動の大きさを適切に表現できていると思われる。この値を Z_c^i として MSE を 5 冬季にわたり平均した後で平方根をとり CSD を求めたところ, 232m であった。RMSE の予報限界を見積もる場合には, この値を閾値とする。

3.2 RMSE と AC による予報限界の見積もり

図 3 に, 5 冬季間に実施された 126 回の予報について, RMSE と AC から見積もった予報限界を示す。図 1 からわかるように 2004 年 1 月以降と 2006 年 1 月後半以降は, 波の振幅が小さい時期が続く。この時期(図 3 の青色)の RMSE から見積もった予報限界は, 波の振幅が大きい時期(図 3 の赤色)に比べて長くなる傾向にある。

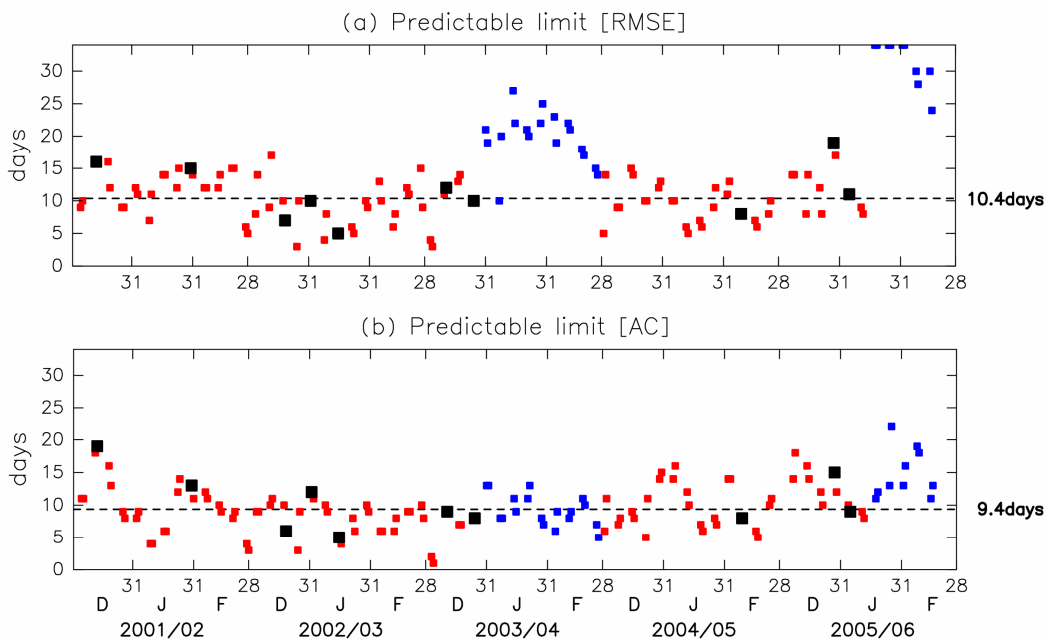


図 3: 2001-2006 年の 5 冬季に実施された 126 回の予報の(a)RMSE と(b)AC から見積もった予報限界。

■ : 波の振幅が大きい時期, ■ : 波の振幅が小さい時期, ■ : 昇温ピークの約 2 週間前を初期値として実施された予報の予報限界。

これは、波の振幅が小さいため RMSE 自体も小さくなり、閾値である CSD に達する前に誤差成長しなくなることに起因する。一方、AC から見積もった予報限界は、波の振幅が大きい時期と同程度である。このことは、予報誤差が小さくても、パターンまでが予報できているわけではないことを意味する。従って、波の振幅の小さい時期には、RMSE に基づき予報限界を見積もろうとする試み自体が難しいと考えられる。

波の振幅が大きい時期を見ると、事例によって大きく異なってくるが、平均して RMSE では 10.4 日、AC では 9.4 日と 10 日程度の予報限界をもつ(図 3 の点線)。2001 年 12 月や 2002 年 1 月下旬、2005 年 12 月などは予報限界が長く、2002/03 年冬季などは比較的予報限界が短い傾向にあり、予報しやすい時期とそうでない時期があるように思われる。

3.3 従来の手法との整合性

次に、SSW の温度ピークに対する予測可能期間を見積もる従来の手法と、本研究での手法との整合性を検討する。以下では、5 冬季間に生じた 10 個の SSW を対象として、各温度ピークの約 2 週間前の初期値から実施された予報に着目する。図 4 に、10hPa、北緯 80 度以北で平均した観測とアンサンブル予報の帯状平均温度の時間変化を示す。図中の縦点線は、3.2 節で見積もった予報限界で(図 3 の黒色)、RMSE と AC の結果を比べて短い方の予報限界を示している。

図 4(1)の SSW は、Mukougawa et al. (2005)で解析された事例である。この予報は温度ピークの 14 日前が初期値であり、予報 17 日目が予報限界であるから、温度ピークの実現を予測できていることになる。この結果は、少なくとも 2 週間前から温度ピークを予報できるという Mukougawa et al. (2005)の報告と一致する。また、図 4(9)の

予報も 15 日という長い予報限界を持ち、メンバー間のスプレッドはやや大きい、アンサンブル平均値は温度ピークの時期を確かに予報している。しかし、この他の予報に関する予報限界は、予報初日から温度ピークまでの期間より短いため、温度ピークの時期を予報できていないことになる。実際、予報限界を超えると、アンサンブル予報平均値が観測値から外れ、メンバー間のスプレッドが大きくなり始める傾向があり、温度ピークを予報できていない。

4. まとめ

2001 年から 2006 年の北半球冬季に実施された 126 回の気象庁 1 ヶ月アンサンブル予報について、成層圏循環の予報限界を 10hPa 高度場の RMSE と AC に基づき調べた。成層圏では、RMSE で予報限界を見積もる際に、冬季平均場の年々変動を考慮した閾値が必要となる。そこで、閾値を求める際の基準値には 5 冬季にわたる平均高度場ではなく、lowpass filter をかけた高度場を用いた。

5 冬季間には波の振幅が大きい時期と小さい時期があった。波の振幅が小さい時期、2004 年 1 月以降と 2006 年 1 月後半以降は、SSW 後の降温期間にあたっていた。この時期の成層圏温度予報について、一丸他(2008)は、長期にわたりアンサンブルメンバー間のスプレッドが小さく、精度よく予報しているように見えるが、それは予報モデル固有の放射計算に従った時間変化を示しているだけで、実際の温度変化を力学的に予測しているとは言えないのではないかと述べている。本研究でも、この時期の予報誤差は長期にわたり小さく、一見予報限界が長いように見えるが、パターンまではうまく予報できていないことが示された。

一方、波の振幅が大きい時期には、平均予報限界は 10 日程度であるが、予報しやすい時期と

そうでない時期があり、事例によって大きく異なっていた。SSW の時期も例外ではなく、2001 年 12 月や 2006 年 1 月中旬の事例のように 2 週間以上の予報限界をもつ時期もあれば、2003 年 1 月の事例のように 1 週間未満の予報限界をもつ時期もあった。

アンサンブルメンバー間のスプレッドから SSW

の温度ピークに対する予測可能期間を見積もる従来の手法と比較したところ、予報限界を超えると、アンサンブル予報平均値が観測値から外れ、メンバー間のスプレッドが大きくなり始める傾向が見られた。従って、本研究で用いた予報限界の閾値は、成層圏循環の予報限界を見積もる上で良い指標になっていると考えられる。

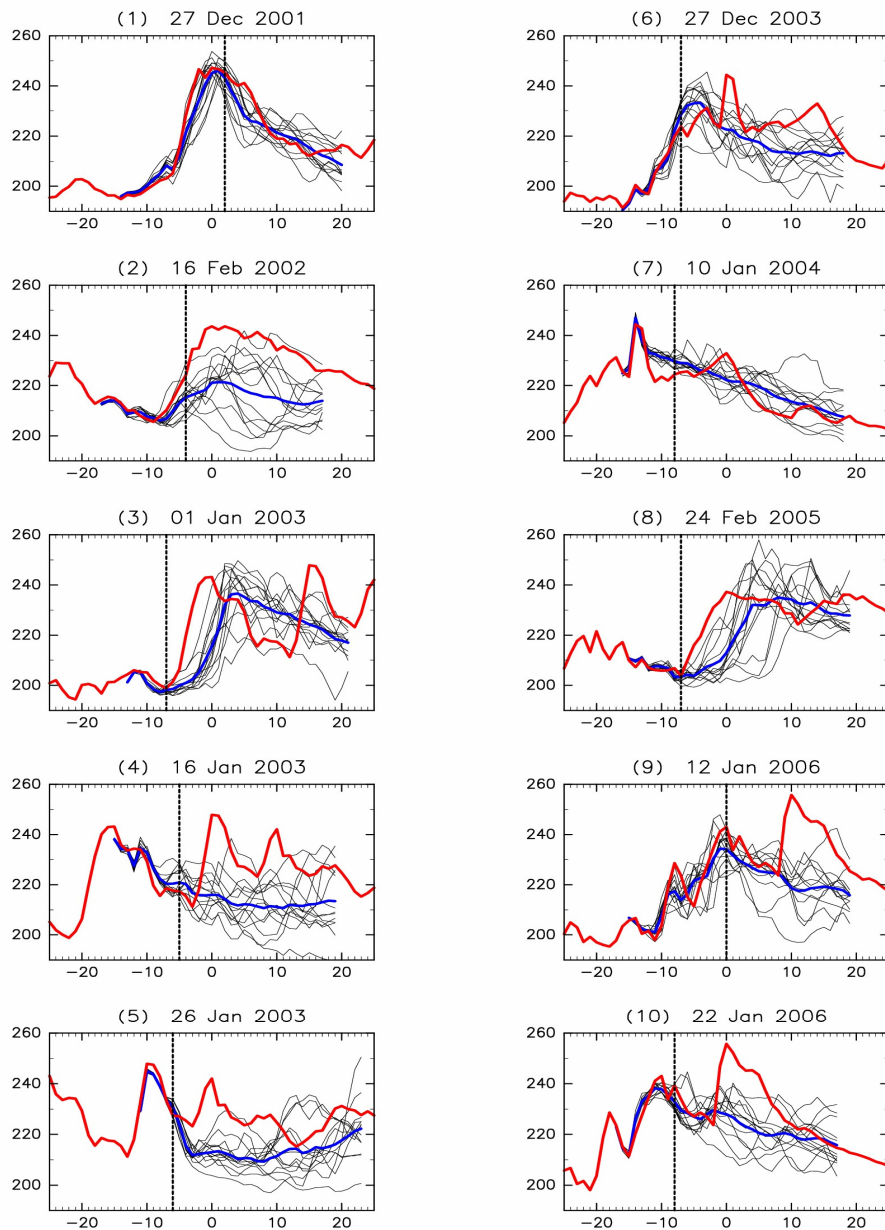


図 4: 10hPa, 北緯 80 度以北で平均した帯状平均温度の時間変化。横軸のゼロの値は、昇温ピークにあたる。赤線: 観測値, 青線: アンサンブル平均予報値, 黒線: アンサンブル予報 13 メンバー。点線: RMSE と AC から見積もった予報限界。

5. 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会特別研究員研究奨励費の補助によるものである。

参考文献

Hirooka, T., T. Ichimaru, and H. Mukougawa, 2007: Predictability of stratospheric sudden warmings as inferred from ensemble forecast data : Intercomparison of 2001/02 and 2003/04 winters. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 919–925.

Kimoto, M., H. Mukougawa, and S. Yoden, 1992: Medium-range forecast skill variation and blocking transition: A case study. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 1616–1627.

Labitzke, K., and van Loon H., 1999: The Stratosphere. *Springer*, 179pp.

Mukougawa, H., and T. Hirooka, 2004: Predictability of Stratospheric Sudden Warming : A case study for 1998/99 Winter. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 1764–1776.

Mukougawa, H., H. Sakai, and T. Hirooka, 2005: High sensitivity to the initial condition for the prediction of stratospheric sudden warming. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L17806, doi:10.1029/2005GL022909.

一丸, 廣岡, 向川, 平成 19 年度「異常気象と長期変動」研究集会報告, 平成 20 年 3 月 2008