

2001-2006 年に生じた成層圏突然昇温の予測可能性

^{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

成層圏循環変動による対流圏への影響に対する関心の高まり(e.g., Baldwin and Dunkerton 2001)とともに, 冬季成層圏で最も顕著な現象のひとつである成層圏突然昇温(SSW)の予測可能性に関する研究が盛んに行われている. 例えば, Mukougawa *et al.*(2005)(以後, M05)は, 気象庁1ヶ月アンサンブル予報の結果を用いて2001年12月に生じた大規模突然昇温の解析を行い, 10hPa, 北緯80度での帯状平均温度ピークを少なくとも2週間前から予測可能であることを示した. また, 2004年1月, 2006年1月の大規模突然昇温についても同様の解析が行われ, いずれも約10日前から予測可能であることに加えて, 昇温の起き方により予測可能期間が異なることもわかっている(Hirooka *et al.* 2007, 一丸他2007).

しかし, これらの研究は事例解析に限られている上, 温度ピークをどれくらい前から予測可能であるかという観点のみから予測可能期間を見積もっている. また, 用いた解析手法も, 温度ピーク時の全アンサンブルメンバー間のスプレッドで予測可能期間を主観的に判断するものである. 従って, SSWの予測可能性に関する一般的な特徴は未だ明らかではないといえる. そこで本研究では, 2001年から2006年の北半球冬季に生じたSSW全てを対象に, 温度ピークの解析に加えて, 対流圏の予測可能性の議論でしばしば用いられている, 等圧面高度の二乗平均平方根誤差(Root Mean Square Error; RMSE)による定量的解析(e.g., Kimoto *et al.* 1992)を行うことで, SSW前後の成層圏の一般的な予測可能性を調べることにした.

2. データと解析手法

本研究で用いた予報データは2001年から2006年までの北半球冬季(12月から2月)の気象庁1ヶ月アンサンブル予報データである. この予報では, 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, BGM法(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ている(気象庁, 1994). 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た. 解析には予報値, 観測値とも12UTCのものを扱い, 水平格子点間隔は $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ に統一している.

SSWの事例は以下の方法で抽出した. まず, 10hPa, 北緯80度以北の平均温度が5日間で10K以上昇温している事例を選んだ. ただし, 連続して昇温が起きている場合には, 1度目の昇温後に20K以上降温し, かつ1度目と2度目の温度ピーク間隔が10日以上あいていれば, 2度目の昇温を独立したSSWとして扱う. こうして5回の冬季間に生じた大規模昇温と小規模昇温, あわせて12事例を抽出した.

RMSEによる成層圏循環の予測可能期間は以下の方法で見積もる. まず, 等圧面高度を用いて式(1)のように定義したRMSEの時間発展を求めた.

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

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10hPa高度場のアンサンブル平均値と観測値である. 実際には, 北緯20度以北で面積の重みを考慮して領域平均したあとで平方根をとっている.

次に、気候的標準偏差を求めた。対流圏と異なり冬季成層圏では準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平均場そのものが変動することが知られている(e.g., Labitzke and van Loon, 1999)。このことを考慮して、気候的標準偏差を式(2)に基づき定義した。

$$\text{気候的標準偏差} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (Z_g^i - Z_c^i)^2 / N} \dots(2)$$

ここで、 Z_c^i はある格子点 i で各月毎に求めた 10hPa 月平均高度場である。実際には Z_c^i とその月に観測された 10hPa 高度場 Z_g^i との偏差を二乗し、領域平均をとったあとで、5 回の冬季にわたり平均して平方根をとっている。RMSE の時間発展が気候的標準偏差を超えると予報価値はなくなると考えられるので、予報開始から前者が後者を超えるまでの期間を成層圏の予測可能期間とした。以後、この RMSE に基づく「予測可能期間」と区別するため、従来の手法に基づく温度ピークの予報期間を「温度予測期間」と呼ぶことにする。

3. 結果

3.1 温度ピークの予測

まず、従来と同様、10hPa、北緯 80 度以北で領域平均した温度について、全アンサンブルメンバーが昇温傾向を示し、温度ピーク時にそのスプレッドが十分小さくなるような初期値を探すことで温度ピークをどれくらい前から予報できるか調べた。ここでは、初期値から温度ピークの日までを温度予測期間とみなしているが、毎週水・木曜日の初期値のみからしか予報がないため、幅を持たせて結果を表示している(表 1)。表 1 に対応させて図 1 には、温度ピークの予報に成功した初期値について、全アンサンブルメンバーの振る舞いを示す。

表 1 から、温度予測期間は一律ではなく、事例により大きく異なることがわかる。特に、M05 で

解析された 2001 年 12 月の事例(表 1-(1))と 2006 年 1 月の事例(表 1-(11))は、他の事例に比べ早くから温度ピークを予報できている。また、続けて昇温が起こる場合には、前の SSW の温度ピーク付近の初期値になってようやく昇温を予測できるようになる傾向があるため、温度予測期間が短くなることが多い(表 1-(6), (9))。

さらに、温度ピーク後の降温期間の温度予報に注目すると興味深いことに気づく。昇温直後に別の昇温が生じることなく降温している場合、メンバー間のスプレッドが小さく、極めて精度よく温度変化を予報している事例が多い。このような昇温後の緩和過程については、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”を予報しているわけではなく、たまたま大きな温度変化が生じなかったため、見かけの温度予測期間が長くなったものと考えられる。

3.2 SSW 前後の成層圏の予測

5 回の冬季間のデータを用いて、式(2)に従い気候的標準偏差を求めたところ 238m であった。そこで、冬季の全予報について、RMSE がこの気候的標準偏差に達する期間から予測可能期間を見積もった。結果を図 2 に示す。ある程度大きな振幅をもつプラネタリー波が鉛直伝播している場合には、予測可能期間は 3 日から 20 日の間である。しかし、プラネタリー波の振幅が小さく昇温が起きていない 2004 年と 2006 年の 1, 2 月には、成層圏循環変動の予報誤差は小さくなり、その値が期間を通して気候的標準偏差内に収まっているため、見かけの予測可能期間は著しく長くなる。このような場合には、上記と同様、成層圏循環の”変化”を予報しているとは言えないため、予測可能性の議論そのものが困難になってしまう。従来の成層圏に関する予測可能性の議論の大半が SSW の温度ピークの予測を対象としてきた理由のひとつはここにある。

そこで、予測可能期間が十分に議論できる SSW 前後の成層圏の予測可能性を詳細に調べた。SSW12 事例について、各温度ピークの日 (key day) 前 20 日以内にある初期値 66 個に基づき予測可能期間を図 3(a)に示す。key day 前 10 日以内になると、ほとんどの予報の予測可能期間が初期値から key day までの期間より長くなる。SSW 時の気圧配置が key day の約 10 日前にはうまく予報できるようになることを示唆するこの結果は、温度ピーク予報の結果とも概ね一致していた。また、平均的な予測可能期間をみると、大きくばらついてはいるが 10.5 日先まで予報できていることがわかる。同様にして求めた 500hPa 高度場の予測可能期間が 7 日前後であることから(図は省略)、変動の激しい SSW 前後でも成層圏の方が対流圏に比べて予測可能期間が長いといえる。

3.1 節で注目した、温度予測期間が長い事例 1(表 1-(1))と短い事例 6(表 1-(6))の予測可能期間を比較すると、事例 1 は key day 前 20 日以内の期間を通して常に事例 6 より長いことに気づく(図 3(a))。このような予測可能期間の違いをもたらす要因を探るため、昇温の起こり方により温度予測期間が異なるという一丸他(2007)の考えに基づき、さらなる解析を行った。10hPa、北緯 80 度以北の平均温度において、初冬の静穏な状態から生起する事例を「冬季初」、2 つの SSW の温度ピーク間隔が 10 日から 15 日しか離れていない場合、2 度目に生起した事例を「連続」と定義して 4 事例ずつ抽出し、それらの予測可能期間を計算した。結果を、図 3(a)と同様、図 3(b)に示す。それぞれの予測可能期間を平均して比較すると、「冬季初」が 11.8 日、「連続」は 8.2 日であり、「冬季初」の平均予測可能期間の方が「連続」よりも 1.5 倍近く長いことがわかった。

4. まとめ

気象庁1ヶ月アンサンブル予報結果を用いて

2001 年から 2006 年の北半球冬季に生じた SSW 12 事例を解析し、SSW 前後の成層圏の予測可能性を、対流圏で予報限界を見積もる際に用いられる RMSE を使った定量的解析手法に基づき調べた。成層圏の平均場の年々変動を考慮した気候的標準偏差を尺度にして予測可能期間を調べたところ、事例によりばらつきはあるが平均して 10.5 日先まで予報できることがわかった。この結果は、温度ピークの予報を全アンサンブルメンバー間のスプレッドで主観的に判断した解析の結果と概ね一致していた。

また、各温度ピーク前 20 日以内の期間を通して、長い温度予測期間を与える初期値の大半が、短い予測期間しか与えない初期値に比べて予測可能期間も長くなる傾向が見られた。このような違いをもたらす要因を昇温の起こり方によると推測し、「冬季初」と「連続」で場合分けをして検証したところ、「冬季初」の方が「連続」より予測可能期間が長いという結果を得た。このことから、昇温の起こり方が予測可能期間に違いをもたらす要因のひとつであることが明らかとなった。予測可能期間の変化の要因としてはこの他にも準 2 年周期振動などの外的要因による年々変動の影響があげられ、これにより年毎に予測のしやすさが変わっていることも考えられる。したがって今後は、年々変動の影響も踏まえて SSW の予測可能性を考える必要がある。

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

- Baldwin, M.P., and T.J. Dunkerton, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, 294, 581-584.
- 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., van Loon H., 1999: The Stratosphere. *Springer*, 179pp.

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.

一丸知子, 廣岡俊彦, 向川均, 2007: 2005/06年冬季成層圏突然昇温と予測可能性, 気象研究ノート, 216, 151–159.

気象庁予報部, 1994: 1ヵ月数値予報とアンサンブル予報 研修テキスト, 50pp.

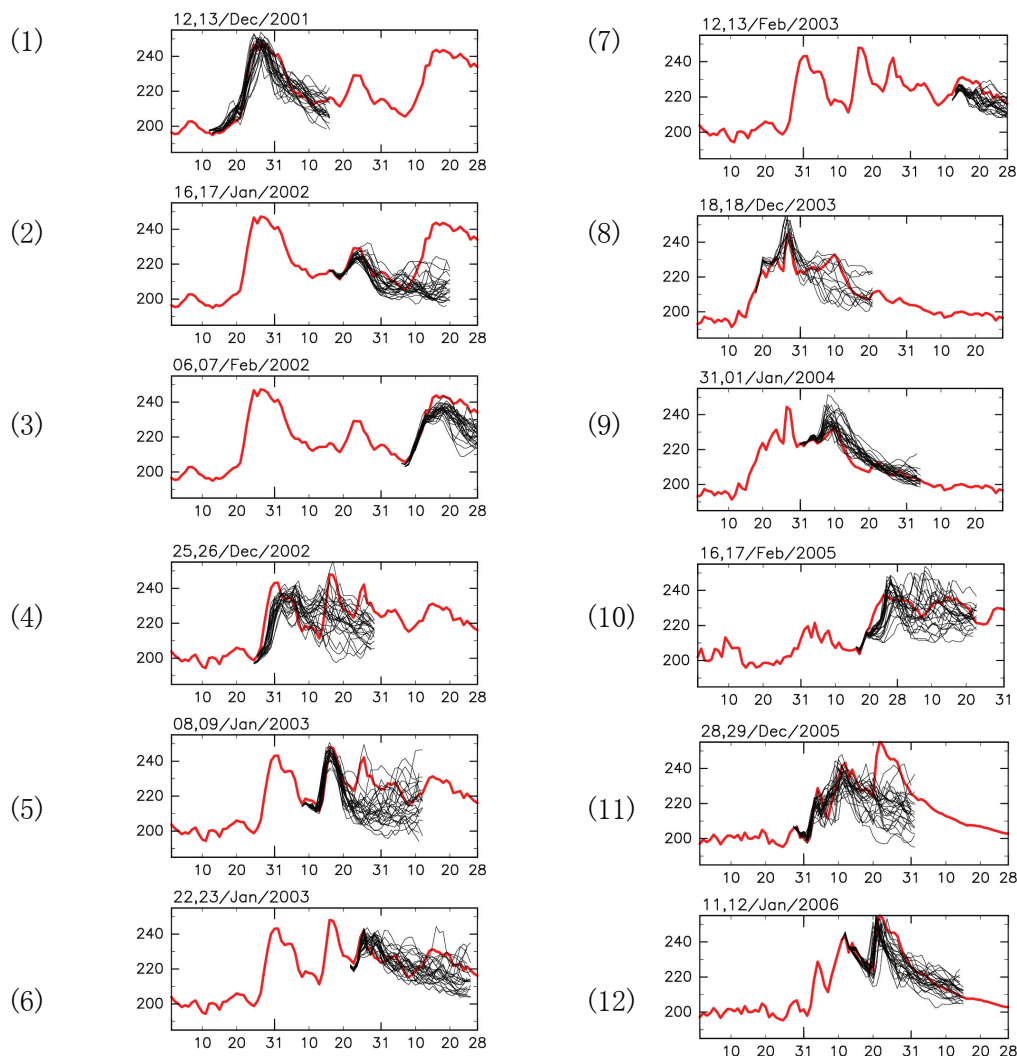


図 1: 10hPa, 北緯 80 度以北の平均温度[K]の時間変化. 黒線がアンサンブル予報 26 メンバーの予報値, 赤線は冬季(12月から2月)の観測値. 2001年から2006年の北半球冬季に生じたSSW 12事例について, 温度ピークをうまく予報できた初期値からの予報のみを示す.

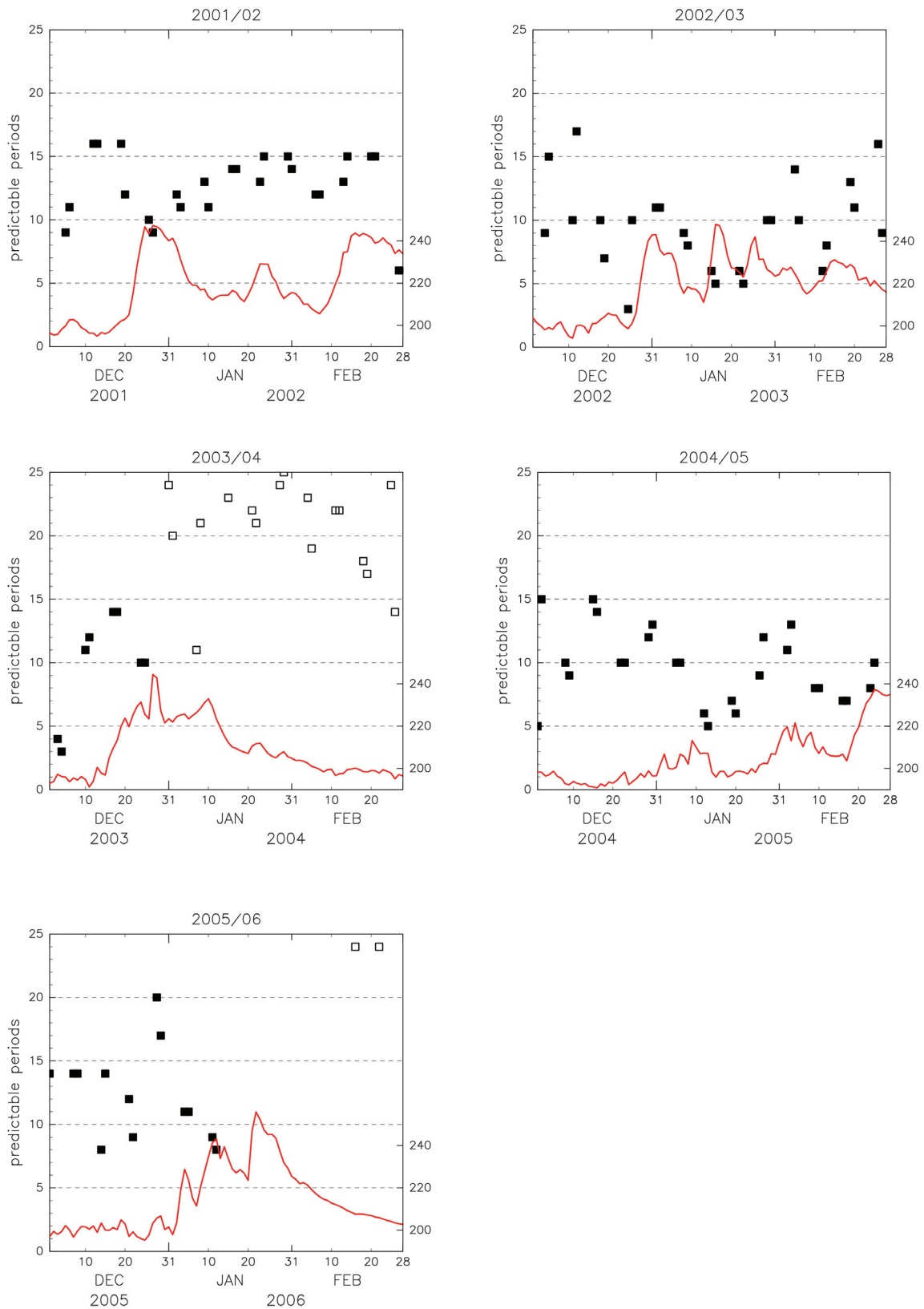


図 2: 2001 年から 2006 年の北半球冬季で実施された全予報の予測可能期間. 黒点は各日を初期値とする予報の RMSE が, 気候的標準偏差である 238m に達するまでの期間. 赤線は, 10hPa, 北緯 80 度以北の平均温度. 期間を通して予報誤差が小さい初期値は白抜きで示す.

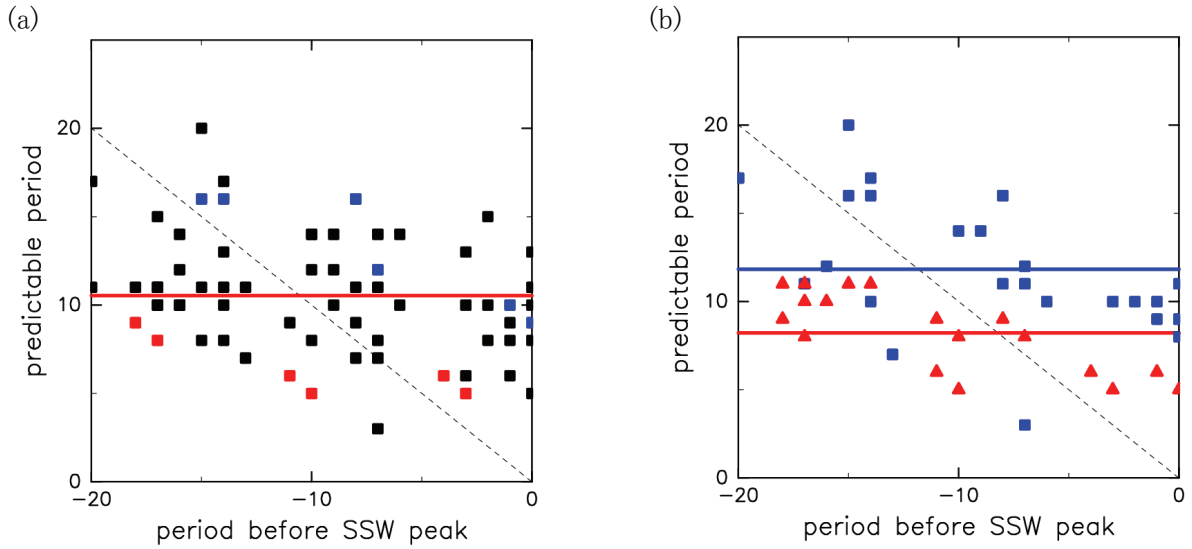


図 3: 各温度ピーク日前 20 日以内にある初期値からの予測可能期間. 図 2 で白抜きにした予測可能期間をうまく議論できない初期値は除いてある. (a)SSW 全 12 事例の初期値 66 個. 青点は表 1-(1)の事例, 赤点は表 1-(6)の事例. (b)冬季初と連続各 4 事例の初期値(24 個と 18 個), 青色が「冬季初」, 赤色は「連続」. 実線は平均予測可能期間を表す.

	温度ピーク (key day)	特徴	温度ピークの 予測可能期間		温度ピーク (key day)	特徴	温度ピークの 予測可能期間
(1)	2001/12/27	冬季初	15~20 日	(7)	2003/2/15		3~8 日
(2)	2002/1/23		7~12 日	(8)	2003/12/27	冬季初	9 日
(3)	2002/2/16		10~15 日	(9)	2004/1/10	連続	4~9 日
(4)	2003/1/1	冬季初	7~12 日	(10)	2005/2/24		8~13 日
(5)	2003/1/16	連続	8~13 日	(11)	2006/1/12	冬季初	16~21 日
(6)	2003/1/26	連続	4~9 日	(12)	2006/1/22	連続	11 日

表 1: 本研究の SSW の定義にあてはまる 12 事例(図 1 に対応)について, 10hPa, 北緯 80 度以北の平均温度がピークを迎える日と, 各事例の特徴を示す. 初冬に初めて生じた事例を「冬季初」, 2 つの SSW の温度ピーク間隔が 10 日から 15 日しか離れていない場合, 2 度目に生じた事例を「連続」としている.