京都大学防災研究所年報 第 50 号 B 平成 19 年 4 月
Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 50 B, 2007

成層圏突然昇温現象発生期における成層圏−対流圏結合の予測可能性に関する数値実験

向川 均・廣岡 俊彦*・黒田 友二**

* 九州大学大学院理学研究院
** 気象研究所

要旨

気成層圏突然昇温 (SSW) 発生期における成層圏-対流圏結合の予測可能性を調べるため，2001年12月に生じたSSWについて，気象研究所-気象庁統一大気大循環モデルを用いた予報実験を行った。その結果，Mukougawa et al. (2005) と同様に，SSW発生期にSSWの予報が初期値に対する鋭敏性が大きくなることや，対流圏における前駆現象を確認することができた。また，前駆現象の大きさに対する成層圏循環の応答は非線型的であることも分かった。

キーワード：予測可能性，成層圏突然昇温，ブロッキング，アンサンブル予報

1. はじめに

大気大規模運動の予測可能性に関する研究は，これまで主として対流圏循環を対象にして行われてきた(e.g., Kimoto et al., 1992)。一方で，成層圏循環の予測可能性に関する研究は，成層圏突然昇温(Stratospheric Sudden Warming; SSW)の再現を目的とした初期の研究(e.g. Miyakoda et al., 1970; Mechoso et al., 1985) の他には，ほとんど存在しない。 SSW は冬季成層圏循環における最も顕著な惑星規模での変動現象である。また，近年，成層圏循環変動が引き起す対流圏への下方影響に対する関心(Christiansen, 2003; Reichler et al., 2005)の高まりとともに，SSW の予測可能性に関する研究も行われるようになってきた。

Mukougawa and Hirooka (2004) は，週一回行われた気象庁一ヶ月予報結果を用いて 1998 年 12 月に生じた SSW が一ヶ月も前から予測可能であることを，はじめて報告した。しかし，彼らの結果は，初期値に摂動を含まないコントロールランの結果のみに基づくものであり，SSW の実際的な予測可能性を正確に見積もることはできなかった。そこで，Mukougawa et al. (2005) (以下では M05) は，気象庁一ヶ月予報の摂動を含む全アンサンブルメンバーを用いて，2001 年 12 月に生じた SSW の実際的な予測可能性を吟味した。その結果，SSW は少なくとも 2 週間前から予測可能であることを見い出した。また，SSW の予測可能性は予測の初期時刻に大きく依存し，SSW がオンセットする時期には，SSW の予測の初期値に対する鋭敏性が大変大きくなることを発見した。同様の予測可能性の変動は，対流圏でのブロッキングの予測に対しても生じることを，Kimoto et al. (1992) が示している。

一方，SSW の基本的なメカニズムは，Matsuno (1971) の研究により，対流圏から上方伝播する惑星規模波と成層圏帯状流との力学的相互作用によりうまく理解できることが示されている。しかしながら，SSW のオンセット時に対流圏で惑星規模波を生成し，その上方伝播を促進する対流圏での前駆現象についての理解は今だ不充分である。気象庁一ヶ月予報結果に回帰分析を行うことにより，M05 は，2001 年 12 月の SSW について，対流圏での前駆現象を同定することを試みている。その結果，持続性の高い対流圏ブロッキングに伴う対流圏上層での特徴的な帯状風偏差が，有意に SSW の発生と関連していることを見い出した。しかしながら，彼らの研究は統計的解析にとどまっているため，統計的に得られた前駆現象が実際に引き続く SSW を誘起するかどうか確かめることはできない。

そこで本研究では，2001 年 12 月に発生した SSW に注目し，統計的に得られた対流圏前駆現象と SSW と

の力学的関連を確かめるため，大気大循環モデル(MRI/JMA-GCM) を用いて一連の予報実験を行う。また， M05 で得られた SSW オンセット期において，SSW の予測が初期値に大きく依存する現象が，このGCM 予報実験でも再現できるのかどうかも吟味する。このような予報実験を実施して前駆現象を詳細に検討することによってはじめて，対流圏ブロッキングとそれに引き続いて発生する SSW との力学的関連を明らかにできると考える。

2. モデル

本研究で用いたモデルは，気象庁(JMA)と気象研究所(MRI)が共同で開発した気象研究所/ 気象庁統一大気大循環モデル(MRI/JMA-GCM)である (Mizuta et al., 2006)。この GCM は基本的には，気象庁全球数値予報モデル(JMA-GCM0103) に基づいている。なお，この全球数値予報モデルは，M05 で使用した 2001/2002 冬季の気象庁一ヶ月アンサンブル予報で用いられていた。

このモデルの水平解像は TL96 で，鉛直に 40 層，モデルの上端は 0.4hPa である。セミラグランジアンスキームを用いて水平移流は計算されている。成層圏循環の表現に重要な，放射，重力波抵抗，放射に対するエアロゾルの直接効果も表現されている。オゾン濃度は，予報実験の期間は, 気候値を帯状平均して与えられる。海面水温 (SST) は, 月平均した気候値に初期時刻における気候値からの SST 偏差を固定して与える。モデルに関するさらに詳しい情報は, Mizuta et al. (2006) を参照のこと。

一方, 予報実験の初期値は M05 で使用したものと同じである。すなわち，初期時刻の解析値に気象庁現業一ヶ月アンサンブル予報の初期摂動を加えることにより与えた。2001/2002 年の冬季には，気象庁一ヶ月アンサンブル予報は毎週水曜日と木曜日の 2 回，摂動を加えない初期値と，12 個の初期摂動を含む初期値を用いて実施された。この初期摂動は，ブリーディング (Breeding of Growing Mode; BGM) 法 (Toth and Kalnay 1993) を用いて生成されている。初期摂動は，北緯 20 度以北の全気圧面で与えられ，500hPa での高度場変動の二乗平均根の大きさが、気候値の 14.5%になるように摂動の振幅が与えられている。予報実験結果の検証には，気象庁全球客観解析 (GANAL) を用いた。提供された GANAL の水平解像度は，水平格子間隔は緯度経度格子で 1.25 度，鉛直レベルは 1000hPa から 0.4hPa までの 23 層である。

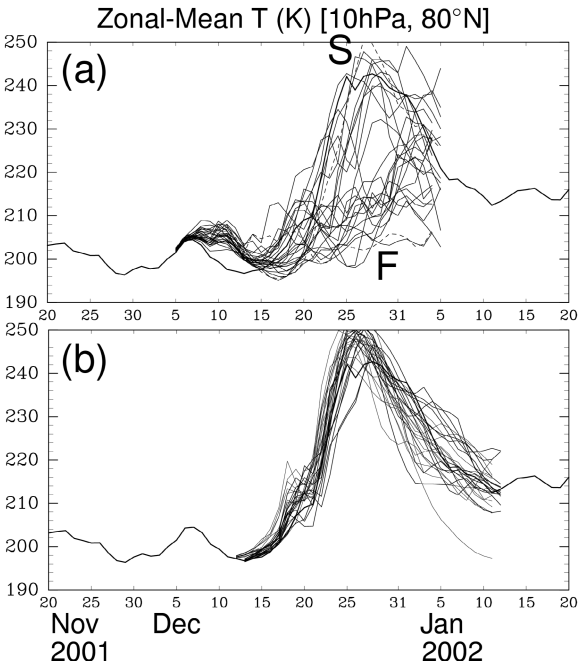

Fig. 1 Time variation of 10-hPa T at 80N from 20 Nov 2001 through 20 Jan 2002 for the analysis (thick solid lines), and for MRI/JMA GCM hindcast (thin solid lines) starting from 5 and 6 Dec 2001 (a), and 12 and 13 Dec 2001 (b). The dotted lines in (a) denote run S and run F.

3. 結果

3.1 初期値に対する鋭敏性

まず，M05 で示された SSW のオンセット期に予測の初期値に対する鋭敏性が高くなることが GCM 実験で再現できることを示す。Fig. 1 の太実線は，10hPa，北緯 80 度における観測された帯状平均温度 (T) である。SSW の発生に伴い，2001 年 12 月 28 日に温度は最高になる。この SSW は Fig. 2a で示されたように，波数 1 の惑星波の増幅によって生じている。この Fig. 2a は，12 月 27 日から 29 日までで 3 日平均した 10hPa 等圧面高度場を示している。一方, Fig. 1 の細実線は，初期日を 12 月 5 日，6 日 (Fig. 1a)， 12 月 12 日，13 日(Fig. 1b) とする気象庁アンサンブル予報の初期値を用いて MRI/JMA-GCM を 30 日間時間積分した結果を示している。12 月 5 日と 6 日を初期値とする実験結果では，いくつかのメンバーがうまく SSW の発生を再現している。一方，12 月 12 日，13 日を初期値とする実験結果では，M05 で示されたように，全てのメンバーが SSW を予測することに成功していることが分かる。但し，MRI/JMA GCM を用いた結果は，観測値や気象庁一ヶ月予報結果に比べて，予測された極域成層圏温度が全般的に高めになっている (Fig. 1b)。一方，M05 と同様に，SSW の最盛期おいて，12 月 5 日と 6

日を初期値とするメンバー間のばらつき (スプレッド) は，12 月 12 日と 13 日を初期値とするメンバー間のばらつきよりも大変大きくなっている。このことから，MRI/JMA-GCM を用いた予報実験結果からも，このSSW のオンセット期にSSW予測の初期値に対する鋭敏性が極めて大きくなることを確認することができた。

一方，Fig. 2 からも，12 月 5 日と 6 日を初期値とするメンバー間のスプレッドが大きくなることを認識することができる。Fig. 2b は，全てのメンバーの中で，12 月 28 日の北緯 80 度，10hPa における T の予測値が最大であったメンバー (run S) の，12 月 27 日から 29 日での 3 日平均 10hPa 高度場予測値を示す。一方，Fig. 2c は， 北緯 80 度，10hPa における T の予測値が最小であったメンバー (run F) の予測値である。この図から，run S では，波数 1 成分が観測値 (Fig. 2a) と同様に大きく増幅していることが明らかである。但し，観測と比べ，その位相はやや西に変位している。一方，run F では，極渦は依然として強い状態を保っており，極域の温度も低いままである。このように，SSW の予測の鍵は波数 1 成分の増幅であることが分かる。M05 でも記されたように，12 月 5 日，6 日を初期日とするメンバー間で，波数 1 の波活動度の鉛直伝播を表現する E-P flux の鉛直成分の大きさが， 高緯度の成層圏下層で12月13 日頃に大きくなる。このため，12 月 13 日付近を SSW のオンセット期と考える。

次に，SSW の生成に必要な前駆現象を捉えるため，オンセット期における run S と run F の振舞いの違いを見比べる。Fig. 3 は，このオンセット期の 3 日間で平均した 500hPa 等圧面高度場を示す。解析値や run S では，発達したブロッキング高気圧に伴い，北東大西洋域で，ジェット気流がかなり高緯度にシフトしている。しかし run F では，ブロッキング高気圧はかなり弱く，このため大西洋域のジェット気流は，その気候学的な位置である北緯 60 度付近に存在する。このブロッキングは，予報実験の初期時刻にはすでに発達段階にあったため，この違いはブロッキングの持続性の違いにより生じていると考えられる。これらの特徴は，M05 の結果と共通している。

このオンセット期で 3 日平均した帯状平均東西風 (U) の子午面分布を Fig. 4 に示す。Fig. 4a が解析値，Fig. 4b が run S，Fig. 4c が run F である。惑星波の生成や伝播はUの分布に影響されるため，Uの分布はSSWをうまく予測するために重要な要因の一つであると考えられる。この図から，解析値や run S と，run F との間には明瞭な違いが対流圏高緯度域で見て取れる。すなわち，run F では対流圏上層の北緯 80 度付近に弱い東風，北緯 60 度付近に強い西風が存在する。それとは対照的に，解析値と run S では，かなり強い西風が北緯 80 度付近の対流圏上層に存在し，その南側の西風は弱くなっている。この高緯度におけるUの違いは，Fig. 3 に見られるように，北大西洋領域におけるブロッキングの持続特性の違いに由来するものである。また，これらの違いは，M05 の気象庁一ヶ月予報結果を用いた解析においても同様に存在する。一方，成層圏上層に着目すると，解析値や run S の U は run F に比べかなり強い。さらに，西風の軸は run F に比べ極側にシフトしている。Fig. 4 には，波数 1 の伝播方向と活動度も，E-P flux ベクトルによって示されている。解析値に比べ，run S や run F はより大きな波活動度を示しているが，run S では対流圏の北緯 60 度付近で，波数 1 の極向き上向きの伝播が，run F に比べ明瞭である。このことは，波数 1 成分の対流圏における生成が SSW の予測にとって重要であることを示唆している。

3.2 回帰分析

Fig. 3 でみられた北東大西洋域でのブロッキング高気圧の形成と，それに引き続く SSW の発生との関係は，M05 と同様に，12 月 5 日と 6 日を初期値とする全 26 メンバーの GCM 予報実験結果を用いた 500hPa 高圧面高度に対する回帰分析からも確認することができる。Fig. 5 は，昇温ピーク期に対応する 12 月 28 日の 10hPa，北緯 80 度の T 予測値のアンサンブル平均からの偏差に回帰させた，12 月 12 日から 14 日の 3 日間で平均した 500hPa 等圧面高度場予測値の偏差で， T 偏差が +1 標準偏差となるときに対応する 500hPa 等圧面高度場偏差を示す。両者の相関係数の有意性を，自由度 24 の t-検定によって見積もった結果を陰影で示す。この自由度は，26 個のアンサンブルメンバーが互いに独立であると仮定して見積もった。この図から，北東大西洋上のブロッキングに伴う正の高度場偏差は，その 2 週間後の SSW の発生と有意に関連していることが分かる。これは，run S と run F に対する前述した解析結果と矛盾しない。Fig. 5a には，M05 で見られなかった有意な高度場偏差が存在するが，Fig. 5 で見られる大西洋上の正の高度場偏差は，M05 の Fig. 3a で示されたものとほぼ同じ地理的位置にある。このことは，SSW の成因としてブロッキングが重要な役割を果たしていることを示唆している。

同様の回帰分析を 12 月 12 日から 14 日の 3 日間で平均した U についても行った (Fig. 6)。この図から，正の高度場偏差に伴う北緯 60 度付近の対流圏上層の U 偏差も，SSW の発生と有意に関係していることが分かる。このことはまた，M05 でも確認されている。しかしながら，M05 の Fig. 4a とは異なり，Fig. 6a における亜熱帯領域における U 偏差は有意であるが，極域に

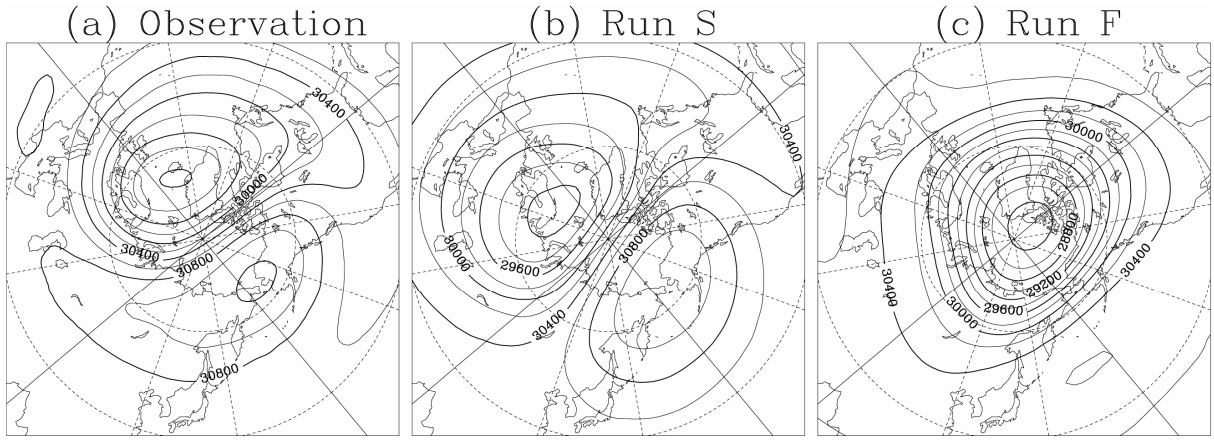

Fig. 2 3-day mean 10-hPa height field (m) during 27-29 Dec 2001 for the analysis (a), run S (b), and run F (c). Contour interval is 200 m.

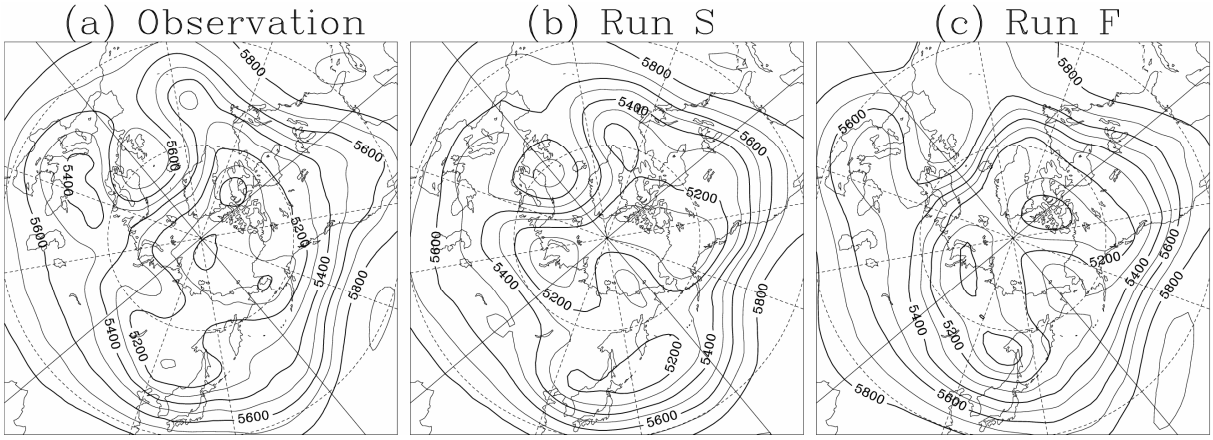

Fig. 3 3-day mean 500-hPa height field (m) during 12-14 Dec 2001 for the analysis (a), run S (b), and run F(c). Contour interval is 100 m.

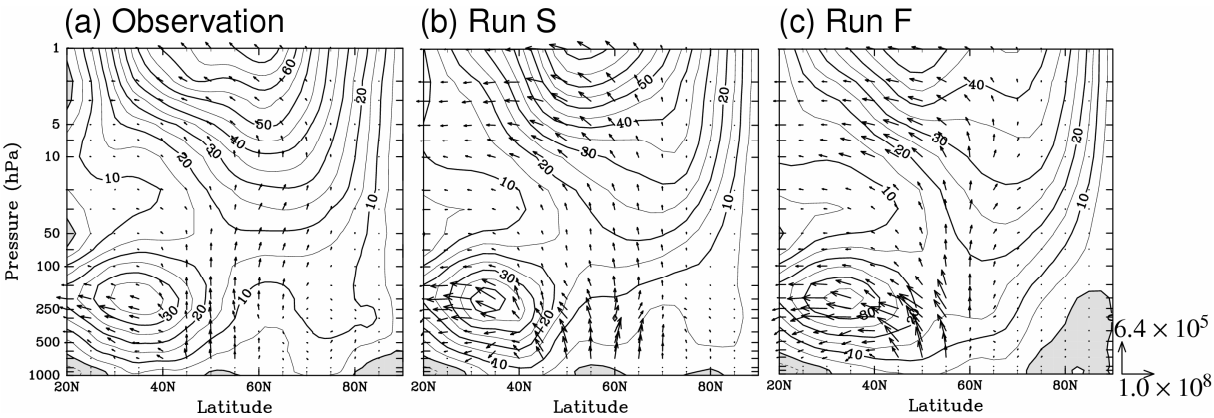

Fig. 4 Latitude-height cross sections of U (m/s) averaged over 12-14 Dec for the analysis (a), run S (b), and run F (c). The vectors show 3-day mean WN1 E-P flux (kg/s^2) above 700 hPa. E-P flux is scaled by the reciprocal square root of the pressure. The magnitude of the reference vectors at 1000 hPa is shown in the lower right corner.

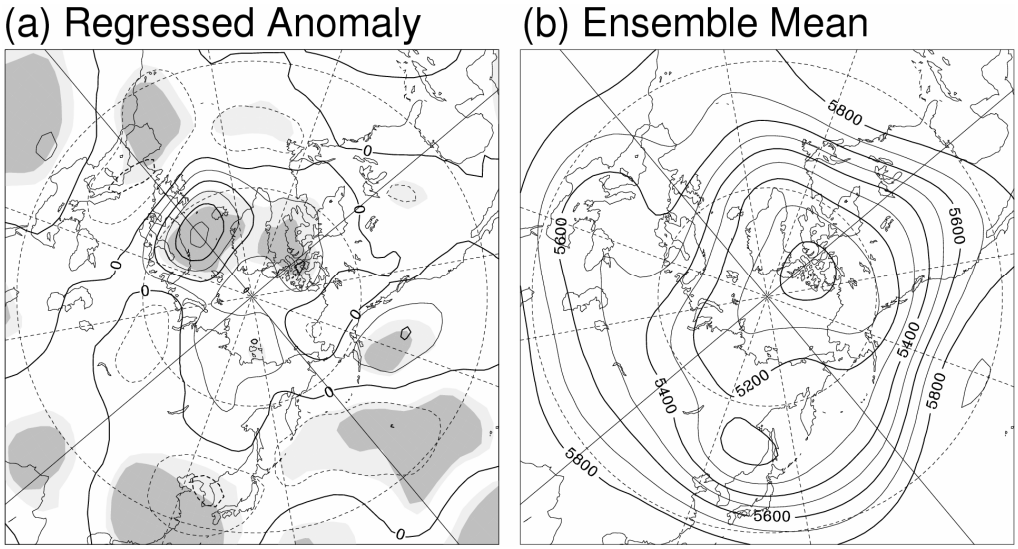

Fig. 5 (a) Regressed anomaly of the predicted 3-day mean 500-hPa height (m) during 12-14 Dec upon the predicted 10-hPa T at 80N on Dec 28 using all ensemble forecasts starting from 5 and 6 Dec by MRI-JMA GCM. The light (heavy) shades indicate regions where the statistical significance of the anomaly exceeds 95 (99) %. Contour interval is 20 m. (b) Ensemble average of the predicted 3-day mean 500-hPa height (m).

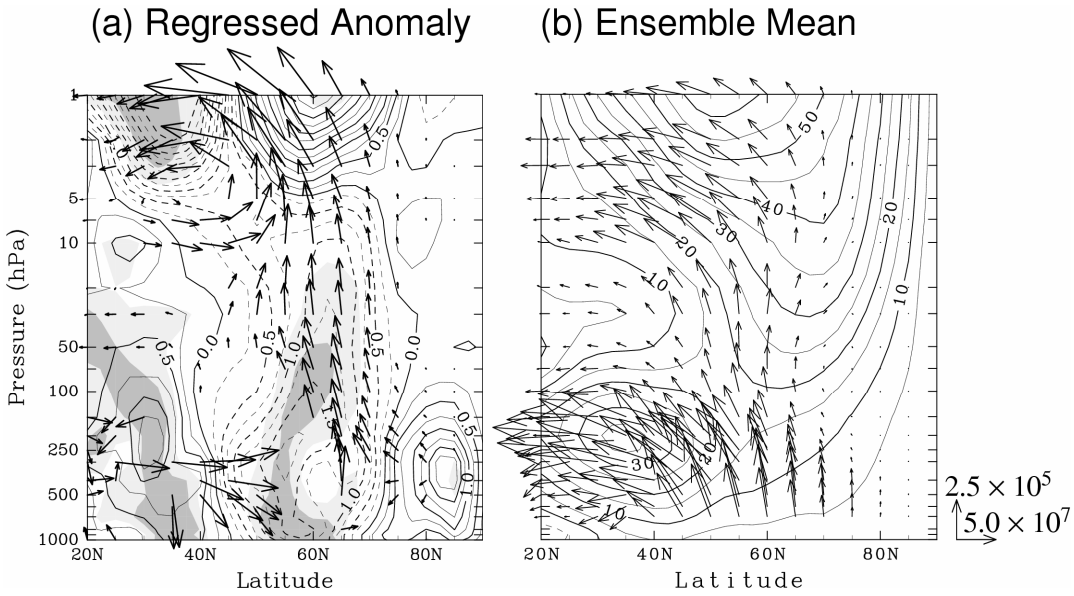

Fig. 6 As in Fig. 5, but for the predicted 3-day mean U (m/s) and WN 1 E-P flux (kg/s^2) during 12-14 Dec. The vectors in (a) show the regressed WN 1 E-P flux anomalies of which vertical or meridional component is significant at 90% level above 700 hPa. Their magnitude is multiplied by 10. E-P flux is scaled by the reciprocal square root of the pressure. The magnitude of the reference vectors at 1000 hPa is shown in the lower right corner.

おけるそれは有意ではない。Fig. 6a から，Fig. 4 で示されたように，SSW の発生と有意に関連して，成層圏上層の西風が極域にシフトすることが分かる。

Fig. 6a には，SSW の発生と有意に関連する波数 1 の E-P flux 偏差の回帰が示されている。対流圏における極向き伝播の促進と，対流圏上層での上向き伝播の強化が SSW の発生と緊密に関連していることが分かる。この関係は，M05 でも確認されていたが，その統計的有意性は M05 よりも大きい。一方，Fig. 6b から，アンサンブル平均した WN1 の活動度は成層圏下部では北緯 60 度付近で大きいが，SSW の発生と有意に関連するのは北緯 70 度付近での上方伝播であることが分か

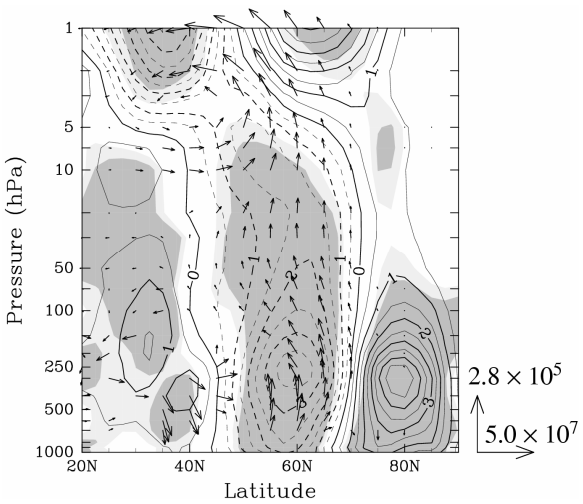

Fig. 7 As in Fig. 6a, but for the regressed U and E-P flux vectors upon PC1 of the predicted 3-day mean U during 12-14 Dec of the ensemble forecasts starting from 5 and 6 Dec.

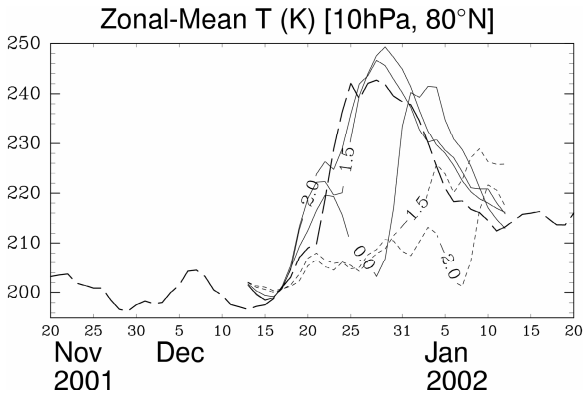

Fig. 8 As in Fig.1, but for the MRI/JMA GCM hindcast experiments starting from 13 Dec 2001 with initial conditions composed of the ensemble mean field (Fig. 6b) and the regression field (Fig. 6a) multiplied by a coefficient which is denoted on the lines. The analysis is shown by the broken line, predictions with positive coefficients by thin solid (dotted) lines.

る。また，M05 では明瞭に見い出せなかったが，Fig. 6a から対流圏の北緯 70 度付近における波数 1 成分の生成は，直接的に，成層圏における上方伝播の増大と関係していることが分かる。このことは，この SSW の発生には，オンセット期間における波数 1 の波活動度の伝播特性の変化よりも，むしろ波数 1 の生成自体が重要であることを示唆している。

Fig. 1a で見られた，SSW の予測が初期値に強い鋭敏性を示すということは，M05 と同様に Fig. 7 からも説明することができる。Fig. 7 は，SSW オンセット期におけるアンサンブルメンバー間のスプレッドが最も大きくなるパターンを示すため，12 月 5 日と 6 日を初期値とする全ての予測実験結果を用いて，12 月 12 日から 14 日の予測された 3 日平均 U に対して主成分分析を行い，得られた第 1 主成分スコア (PC1) に回帰した U 偏差を示している。主成分分析は 1000 から 0.4hPa，北緯 20 度以北の領域で行い，面積ファクターを加味するため緯度のコサインの平方根と，各気圧面での密度の平方根を偏差に掛けた。第 1 主成分は，アンサンブル平均の回りでの U の全分散の 43%を説明する。Fig. 7 で示された U 偏差の大きさは対流圏上層で最大で，北緯 45 度と 70 度に節構造を持ち，10hPa にまで達する順圧的な構造で特徴づけられる。一方，上層成層圏では，北緯 55 度付近の節を持つ双極子構造が卓越している。これらの特徴は Fig. 6a で示された，SSW の発生と関連する U のパターンと良く類似している。従って，M05 と同様に，この類似性は，SSW のオンセット期に SSW の予測が初期値に強い鋭敏性を示した理由を与えていると考えられる。Fig. 7 の矢印で示された PC1 に対する波数 1 成分の E-P flux の回帰も，この推論を支持している。Fig. 6a と同様に，Fig. 7 でも，北緯 60 度付近で対流圏から成層圏への上方伝播が有意に強化されている。これは SSW を誘起すると考えられる。

3.3 回帰図を用いた予報実験

前節で統計的に得られた，SSW の発生と関連する Fig. 5a や Fig. 6a の回帰パターンの重要性を確認するために，初期日を 12 月 13 日とし，Fig. 5b や Fig. 6b で与えられるアンサンブル平均値に，回帰パターンにある係数 α を掛けて加えたものを初期値とする一連の予報実験を実施した。このアンサンブル平均や回帰パターンは，12 月 5 日と 6 日を初期日とする GCM 予報実験の 12 月 12 日から 14 日の 3 日間で平均した予測値を用いて，MRI/JMA-GCM の全ての予報変数について計算した。

ここで α の値は，-2.0 から 4.0 の範囲で 0.5 毎に与えた。アンサンブル平均値からの予報実験は $\alpha = 0$ に相当する。これまでの回帰分析の結果から，正の α を初期値として与えた場合には SSW の発生する確率が高くなり，負の場合には低くなることが予期される。この予報実験の結果を Fig. 8 に示した。この図は，北緯 80 度，10hPa における T の時間変動を示している。線の上に記された数字が α である。この図から，正で大きな α を与えた場合には 12 月 28 日頃に実際に昇温が起きる傾向にあり，負で大きな α の場合には昇温が

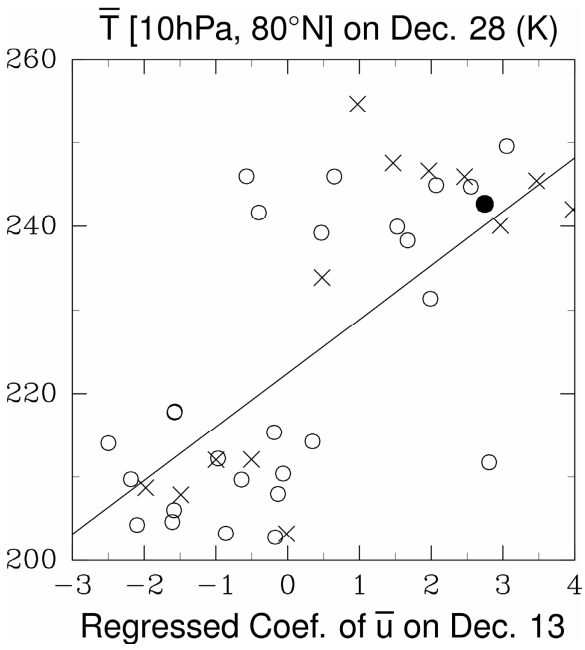

Fig. 9 Relationship between 10-hPa T (K) at 80N on Dec 28 and the coefficient of 3-day mean U anomaly during 12-14 Dec. Open circles are for ensemble experiments starting from 5 and 6 Dec, crosses are for hindcast experiments from 13 Dec starting from the ensemble mean field (Fig. 6b) added with the regression field (Fig. 6a) multiplied by the coefficient (value of the abscissa).

抑制される傾向にあることが分かる。このような MRI/JMA-GCM を用いた予報実験から， SSW の発生に対する Fig. 5a や Fig. 6a で示された回帰パターンの重要性を示すことができた。

Fig. 9 では, さらに, 北緯 80 度, 10hPa における T と α との関係を吟味することができる。この図で，横軸は α，縦軸は T である。12 月 13 日を初期日とする予報実験結果は×で，初期日が 12 月 5 日，6 日の MRI/JMA-GCM アンサンブル予報実験結果が∘，観測値が●で示されている。また，この図の x-軸の値は, Fig. 6a で示された U の回帰パターン **b** に, U の偏差 **a** を射影した値を示している。ここで射影は<**a**, **b**>/<**a**, **a**>で定義した。但し, <**a**, **b**>は, 北緯 20 度以北, 1000hPa から 0.4hPa の領域で定義される **a** と **b** との内積を表す。この内積には緯度のコサインに比例する面積ファクターを加味している。さらに，偏差は，12 月 12 日から 14 日までの 3 日平均値のアンサンブル平均場 (Fig. 6b) からの差で定義した。この図から，全体的には，α と 12 月 28 日の T との間に正の相関があることが分かる。この関係を示す回帰直線は Fig. 9 の実線で示されている。しかしながら，両者の関係は線形的よりも, 階段関数的である。予報実験で得られた T は, α が正(負)の値に対して, 240 (210) K 付近に集まっている。このことはまた，SSW が発生するために必要な α の閾値が存在することを示唆している。従って，SSW のオンセット期では, 前駆現象に伴う偏差の大きさに対して，成層圏循環は非線型的に応答しているといえる。

4. まとめ

気象庁 1 ヶ月アンサンブル予報の各メンバーの初期値を用いて MRI/JMA-GCM による予報実験を行い，M05 で報告された 2001 年 12 月に生じた波数 1 型の SSW の予測が初期値に強く依存することについて吟味した。この予報実験でも同様に，SSW のオンセット期に，初期値に対する鋭敏性が大きくなることを確認した。

この GCM 実験の結果，M05 で示されたのと同様な帯状風の特徴的な偏差場は，それに引き続いて生ずる成層圏極域における昇温と有意に関連していた。この対流圏における帯状風偏差は，M05 と同様に，大西洋域における持続性の高いブロッキング高気圧に伴うものであり，それは対流圏から成層圏への波数 1 成分の上方伝播を促進する。一方，SSW のオンセット期に成層圏帯状平均風にも特徴的な偏差が存在することが示された。これは，M05 では報告されていない。さらに M05 と比べ, 波数 1 成分の励起はより明瞭であったが, 対流圏帯状風偏差の統計的有意性はやや小さくなった。この違いから，SSW の発生には，波数 1 の伝播特性の変化よりも，むしろその励起そのものが重要であることを示唆している。また，この帯状風偏差のパターンは，M05 と同様に，SSW のオンセット期におけるアンサンブルメンバーの帯状風偏差に関する第 1 主成分とほぼ一致していた。従って，オンセット期におけて SSW の予測が初期値に強く依存することは，この両者のパターンの一致から説明することができる。

さらに回帰分析の結果得られた SSW の発生と関連する偏差場の重要性を確かめるために，MRI/JMA-GCM を用いた予報実験を行った。この実験で用いた初期値は，統計的に得られた回帰パターンにある係数を掛けた偏差場をアンサンブル平均に加えることにより作成した。その結果, 正の係数を与えると，実際に成層圏での昇温が発生することが確かめられた。但し，昇温の大きさは，与える係数の大きさには比例しない。むしろ，成層圏循環の応答は与えた係数に関して階段関数的であり，SSW が発生するためには，この係数の大きさにある閾値が存在することを示唆している。

このような成層圏循環の非線型的な特徴は，Yoden(1987)でも報告されている。彼は，大変簡略化された大気モデルを用いて，あるパラメータの範囲では，成層圏循環には二つの安定な流れの状態が存在することを示した。その一つは西風が強い極渦の強い状態であり，他方は大振幅の惑星規模波が存在する SSW に似た状態である。このような非線型システムでは，ある一つの安定な流れの状態から，他方の状態への遷移が生じるためには，両者の間に存在する「ポテンシャル障壁」を越えられるような初期摂動が必要となる。さらに，遷移が生じやすくなる「分岐点」付近では，位相空間における二つの安定な状態を結ぶ方向に軌道は拡がりやすくなるため，初期摂動もその方向に与えると，より遷移が生じやすくなると考えられる。この研究で得られた SSW の発生と関連する回帰パターンは，その方向を示している可能性がある。

ここで得られた回帰パターンを，さらに系統的に簡単化して予報実験を行うことにより，SSW の発生に最も重要な前駆現象を取り出せる可能性がある。このような実験によって，対流圏ブロッキングと SSW との関係，SSW の発生に対する惑星規模波の励起と伝播の重要性，惑星規模波の励起とブロッキングとの関係などの問題を解決することが可能となるであろう。

謝辞

MRI/JMA-GCM の予報実験を実施して頂いた気象研究所・吉村裕正主任研究官に感謝する。また，1 ヶ月予報データを提供して頂いた，気象庁数値予報課ならびに気候情報課の皆様に深く感謝する。図の作成には地球流体電脳ライブラリを用いた。

参考文献

Andrews, D. G., Holton, J. R. and Leovy, C. B. (1987): Middle Atmosphere Dynamics. Academic Press. pp. 489.

Christiansen, B. (2003): Temporal growth and vertical propagation of perturbations in the winter atmosphere. Q. J. R. Meteor. Soc., Vol. 129, pp. 1589-1605.

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

Matsuno, T. (1971): A dynamical model of stratospheric sudden warming. J. Atmos., Sci., Vol. 27, pp. 871-883.

Mechoso, C. R., Yamazaki, K., Kitoh, A. and Arakawa, A. (1985): Numerical forecasts of stratospheric warming events during the winter of 1979. Mon. Wea. Rev., Vol. 113, pp. 1015-1029.

Miyakoda, K., Strickler, R. F. and Hembree, G. D. (1970): Numerical simulation of the breakdown of a polar-night vortex in the stratosphere. J. Atmos. Sci., Vol. 27, pp. 139-154.

Mizuta, R. and coauthors (2006): 20-km-mech global climate simulations using JMA-GSM model. -Mean Climate States-. J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 84, pp. 165-185.

Mukougawa, H. and Hirooka, T. (2004): Predictability of stratospheric sudden warming: A case study for 1998/99 winter. Mon. Wea. Rev., Vol. 132, pp. 1764-1776.

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

Reichler, T., Kushner, P. J. and Polvani, L. M. (2005): The coupled stratosphere-troposphere response to impulsive forcing from the troposphere. J. Atmos. Sci., Vol. 62, pp. 3337-3352.

Toth, Z. and Kalnay, E. (1993): Ensemble forecasting at NMC; the generation of perturbations. Bull. Am. Met. Soc., Vol. 74, pp. 2317-2330.

Yoden, S. (1987): Bifurcation properties of a stratospheric vacillation model. J. Atmos. Sco., Vol. 44, pp. 1723-1733.

Numerical Experiments on the Predictability of the Stratosphere-Troposphere Coupling during Sudden Warming Events

Hitoshi MUKOUGAWA, Toshihiko HIROOKA[*] and Yuhji KURODA[**]

[*] Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University
[**] Meteorological Research Institute

Synopsis

In order to examine dynamical predictability of the stratosphere-troposphere coupling during stratospheric sudden (SSW) warming events, we conduct a series of hindcast experiments using an atmospheric general circulation model (MRI/JMA-GCM) for a SSW occurring in December 2001. As a result, high sensitivity to the initial condition of the prediction for the SSW and the tropospheric precursory event are confirmed as in Mukougawa et al. (2005). It is also found that the response of the stratospheric circulation to the magnitude of the precursory anomaly is nonlinear.

Keywords: predictability, stratospheric sudden warming, blocking, ensemble forecast