

対流圏-成層圏力学結合の予測可能性

向川 均(京大・防災研)・廣岡 俊彦(九大・理)

1. はじめに

近年、対流圏の天候パターンや気候に及ぼす成層圏循環の影響の重要性が認識されるようになり、成層圏-対流圏間の力学的相互作用に関する多くの研究が行われている。特に、この相互作用は、冬の成層圏循環における最も顕著な現象である成層圏突然昇温現象(SSW)の発生期において、最も明瞭になることが期待される。SSWの基本メカニズムは、Matsuno(1971)により、対流圏から鉛直伝播する大振幅のプラネタリー波と成層圏における帯状平均風との相互作用という枠組みで基本的には理解しうることが示されている。このため、成層圏に対する対流圏循環の影響は、SSW イベントにおける昇温現象の極大期以前に明瞭になることが予期される。

しかしながら、突然昇温現象の発生時にしばしば観測される、対流圏におけるプラネタリー波の増幅メカニズムを矛盾なく説明する理論は依然として存在しない(Andrews et al. 1987)。また、現業の数値予報モデルを用いて、実際に発生した昇温現象を、どれくらい以前から予測しうるのでかという予測可能性や、成層圏突然昇温の前駆現象に言及した研究も少ない(例えば、Mechoso et al., 1985)。

一方、中長期予報の精度向上の観点からは、成層圏循環の変動が対流圏循環に及ぼす影響とその予測可能性を解明することが重要である。例えば、Baldwin and Dunkerton (1999, 2001)は、統計的解析によって、極渦の弱い状態と強い状態にそれぞれ対応する北極振動(以下 AO)の正負のシグナルが、成層圏上層から徐々に成層圏中を下方伝播して対流圏にまで達することを指摘している。また、SSWはAOシグナルが負の大きな値となる期間とよく対応するので、SSW イベントにおける昇温現象の極大期以降に、AOシグナルの変動を通じて、対流圏に対する成層圏循環の影響が明瞭になることが予想される。しかしながら、AOシグナルの下方伝播メカニズムはもちろん、その力学的メカニズムも明らかにはされていない。

向川・廣岡(2003)や向川他(2003)では、気象庁一ヶ月予報結果を用いた解析から、1998年/99年の冬季に発生したSSWは一ヶ月程度以前より予

測可能であることを示している。また、SSW発生をうまく予測するには、対流圏での惑星規模波の増幅に都合のよい帯状風分布が形成されることが必要であり、それには、総観規模擾乱の活動をうまく予測する必要があることが示唆された。しかし、これらの結果は、最も確らしい初期値から時間積分を行ったコントロールランのみの解析に基づいたものであり、全アンサンブル予報メンバーを用いたより詳しい解析が必要である。

そこで本研究では、向川・廣岡(2003)や向川他(2003)で解析された1998年12月中旬に発生したSSWについて、昇温の極大期以降における対流圏循環変動の予測可能性を気象庁一ヶ月予報モデル結果を用いて解析する。また、気象庁一ヶ月予報の全メンバーを用いて、2001年12月に発生した波数1型の成層圏突然昇温現象の予測可能性とその前駆現象について詳しく調べる。

2. データ

1998/99年の冬季期間のデータ解析で用いた気象庁一ヶ月予報データは、向川・廣岡(2003)や向川他(2003)と同じ、水平解像度 T63、鉛直層数 30(モデル上端は 1hPa)の気象庁数値予報モデルの時間積分結果に基づく。この期間で解析できたのは、毎週木曜日を初期日とする週一回のコントロールランのみである。予測結果は、12時間毎に、1000hPaから10hPaまでの17等圧面上での緯度経度2.5度格子点データとして提供された。

一方、2001/2002年の冬季期間のデータ解析で用いた気象庁一ヶ月予報結果は、水平解像度 T106、鉛直層数 40(モデル上端は 0.4hPa)の数値予報モデルにより得られている。アンサンブル予報は毎週水曜と木曜に実施され、コントロールランと、BGM法で生成された初期摂動を含む12摂動ランの全13メンバーについて解析を行った。予測結果は、24時間毎に1000hPaから1hPaまでの22等圧面上での緯度経度2.5度格子点データとして提供された。

一方、同期間の実況データとして、1998/99年については、6時間毎の1000hPaから10hPaまでの17等圧面上での緯度経度1.25度格子点データとし

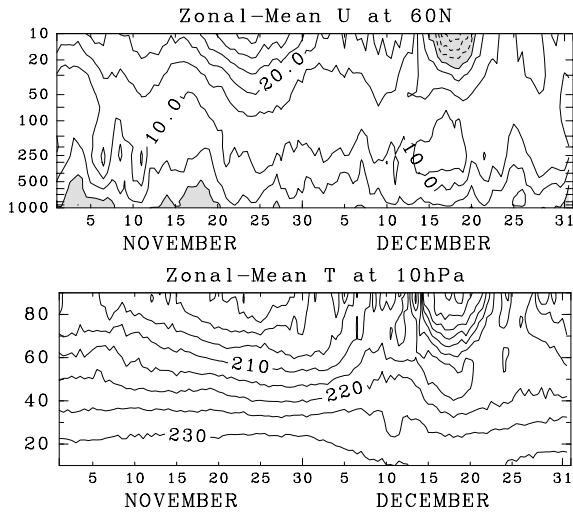


図 1: 1998 年 11 月 1 日から 12 月 31 日までの北緯 60 度における帯状風速 (m/s) の高度-時間変動 (上) . 値が負の領域に陰影 . (下) 10hPa における帯状平均温度 (K) の時間-緯度 (北緯) 断面 .

て提供された気象庁全球客観解析 (GANAL) データを用いた . 一方, 2001/2002 の GANAL データの水平・時間解像度は同じではあるが, 1000hPa から 0.4hPa までの 23 等圧面上で与えられている .

3. 結果 1: 1998/99 年の冬季循環

3.1 大気循環の特徴

まず, 1998 年 11 月, 12 月の大気循環の特徴を簡潔に記述する . 図 1 からわかるように, 1998 年 12 月 12 日頃から一週間程度で 40K も成層圏極域の温度が上昇し, それに伴い, 成層圏高緯度域で東風となり, 典型的な SSW (major warming) が発生した . この昇温が極大となるのは, 12 月 17 日頃である .

図 2a で示した, 旬平均 10hPa 等圧面高度場の分布から, この突然昇温現象は東西波数 1 のプラネタリー波の増幅によって生じたことがわかる . 一方, 突然昇温現象が終了した 12 月末に, 対流圏では, アラスカ付近に顕著なブロッキング現象に伴う高気圧性循環が発生した (図 2b) . 図 2a より, この高気圧性循環は 10hPa 等圧面高度場でも明瞭に存在しており, 成層圏中部にまで達する非常に背の高い順圧構造を持っていることがわかる . 向川・廣岡 (2003) や向川他 (2003) は, この SSW 後のブロッキングは, Kodera and Chiba (1995) が指摘したように, SSW を引き起した惑星規模波が極向きに伝播するのに伴って形成されたことが確かめられている .

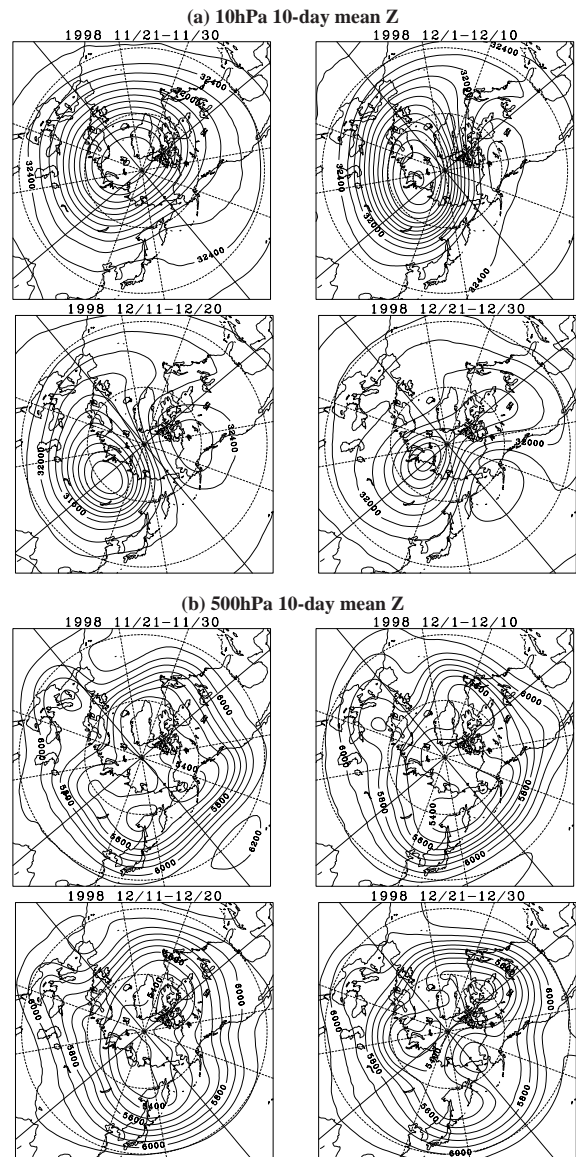


図 2: (a) 10 日平均 10hPa 等圧面高度 . コンター間隔は 200m . (b) 10 日平均 500hPa 等圧面高度 . コンター間隔は 100m .

3.2 AO の予測可能性

この SSW 直後の対流圏循環の予測可能性を調べるため, まず, AO signature の予測可能性について吟味した . ここで用いた AO signature とは, Baldwin and Dunkerton (1999) に従い, 気候場からの日々の高度偏差場の, 北半球高度場変動の第一主成分 (いわゆる Annular mode) への射影の大きさを正規化したもので定義した . 従って, AO signature が負の値の時は, 極渦 (西風) が弱い状態に対応する .

図 3a にこの期間に観測された AO signature の高度時間変化を示す . SSW の最盛期である, 12 月 15 日以降, 100hPa より上空の成層圏では, AO

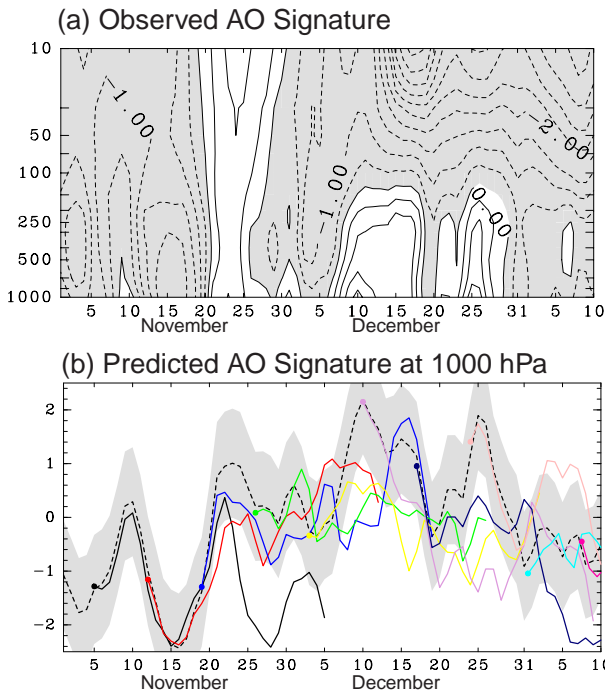


図 3: (a) 観測された AO signature の時間-高度変化。値は各気圧面で正規化されている。陰影は負の値。(b) 1000hPa での AO signature の観測値 (破線) と気象庁一ヶ月予報による予測値 (色付き実線)。陰影は 1998 年 11 月から 1999 年 1 月までの AO signature 変動の標準偏差。

signature は顕著に大きな負の値となる。しかしながら、12 月末以降の対流圏への下方伝播は明瞭ではない。特に、図 2 で見られるように、アラスカ上空でブロッキングが発達した 12 月 25 日付近で、対流圏での AO signature は大きな正の値となった。従って、この SSW 直後の時期においては、AO という観点からすると、成層圏-対流圏間の力学的結合は明瞭ではない。一方、図 3b に、1000hPa での AO signature の観測値 (破線) と、一週間ごとに実施された気象庁一ヶ月予報のコントロールランによる予測値 (色付き実線) を示した。陰影部は 1998 年 11 月から 1999 年 1 月までの観測された AO signature 変動の標準偏差を示す。SSW 終了期の 12 月下旬に注目すると、観測値は、前述したように大きな正の値になるのに対して、1 週間以上前からの予測値 (肌色以外の実線) ではこの変動を予測できず、そのほとんどは負の値を予測している。この一例だけから断言するのは難しいが、SSW 後の対流圏内における AO signature の変動を予測するのはかなり困難であることがわかる。

一方、向川・廣岡 (2003) や向川他 (2003) によると、この SSW 後にアラスカ上空で発達したブ

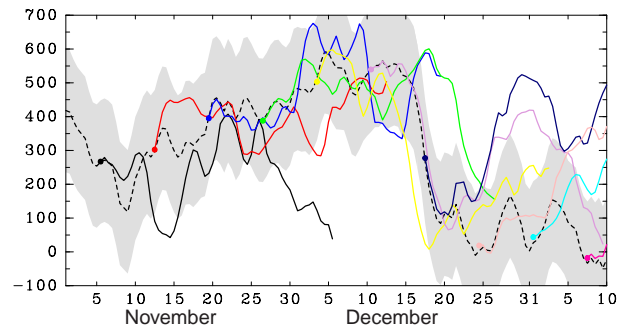


図 4: 図 3 と同じ、但し、帯状流指数 (m) の観測値と予測値を示す。帯状流指数は、東経 135 度から西経 135 度までの領域で平均した、北緯 40 度と 70 度との間での 500hPa 等圧面高度差で定義した。

ロッキング現象は、成層圏循環の影響を強く受けていることが示唆されるため、その発生の予測可能性はかなり高いことが予期される。このことを確かめるため、図 4 に、図 3 と同じ期間における北太平洋域で定義した帯状流指数 (Zonal Index) の観測値と予測値を示す。ここで用いた帯状流指数は、東経 135 度から西経 135 度までの北太平洋領域で平均した、北緯 40 度と北緯 70 度の 500hPa 高度場の差で定義した。破線が観測値、色付きの実線が 1 週間ごとに実施された気象庁一ヶ月予報のコントロールランによる予測値である。この図から、SSW 後の 12 月 18 日付近で、アラスカ付近でのブロッキング高気圧の形成に伴い、東西流の卓越する状態 (high-index state) から、南北流の卓越する状態 (low-index state) に明瞭な遷移が生じていることがわかる。また、気象庁一ヶ月予報もかなり以前からこの遷移を予測していることがわかる。例えば、黄色の実線で示された 12 月 3 日を初期値とする予測値でも、この遷移をうまく予測している。従って、この遷移は、約 3 週間以前から予測可能であることが示唆される。Kimoto et al. (1992) は、1989 年に同じくアラスカ上空で発生したブロッキング形成の予測可能性について気象庁予報モデルを用いた詳しい解析を行ない、ブロッキング形成は、その約 1 週間以前を初期値とした場合、うまく予測できないことを示している。彼らの結果と比較すると、この SSW の発生に付随して、惑星規模波が極向きに伝播することによって生じたブロッキング現象の予測可能性は極めて高いことが示唆される。これは、SSW に伴う成層圏循環の変動が、対流圏循環をコントロールしていることの現れであると考えられる。

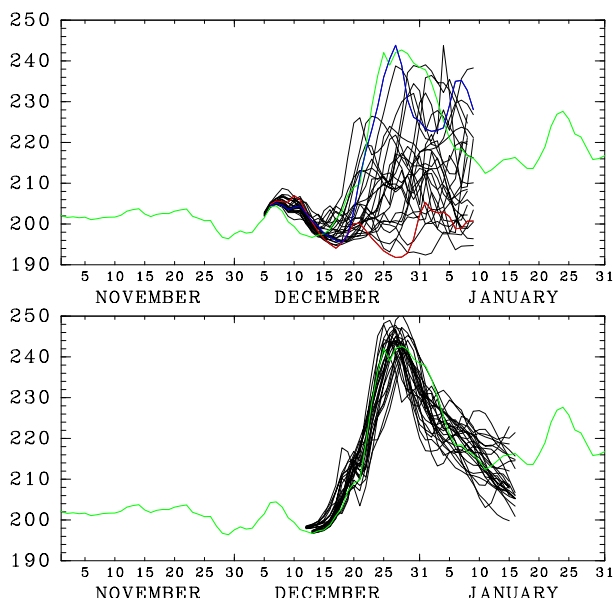


図 5: 2001 年 11 月から 2002 年 1 月までの 10hPa, 北緯 80 度における帯状平均温度 (K) の時間変動。緑色の実線は観測値, 実線は各予測値。(上) 12 月 5 日, 6 日を初期日とする予測。(下) 12 月 12 日, 13 日を初期日とする予測。上図で成層圏極域温度を最も高く予測した Run 1 を青実線で, 最も低く予測した Run 2 を赤実線で示す。

4. 結果 2: 2001 年の SSW の予測可能性

この章では, 2001 年の 12 月末に発生した波数 1 型の SSW の予測可能性について, 気象庁一ヶ月予報の全アンサンブルメンバーを用いて解析した結果について報告する。

4.1 成層圏極域温度の予測可能性

図 5 に, 2001 年 11 月から 2002 年 1 月までの 10hPa, 北緯 80 度における帯状平均温度の時間変動を示した。緑色の実線は観測値, 実線は各予測値である。SSW に伴う成層圏極域の昇温が極大となるのは, 12 月 25 日付近である。上図に, 12 月 5 日, 6 日を初期値とする全アンサンブルメンバーの予測値を示した。いくつかのメンバーは SSW の発生をうまく予測しているが, 昇温を全く予測できていないメンバーも存在し, 予報間の散らばり (スプレッド) は極めて大きい。一方, それから一週間後の, 12 月 12 日, 13 日を初期値とする予報では, 各メンバー間のスプレッドも小さく, 全ての予報が極域の昇温をうまく予測している。従って, この SSW は, 約 2 週間程度前から予測可能であることがわかる。また, 12 月 5 日, 6 日を初期値とした場合, 予測間のスプレッドが大きいこ

とから, SSW のオンセット以前では, 成層圏極域の温度を予測する場合, 初期値に対する鋭敏性が極めて大きいことが示唆される。

以下では, この SSW の前駆現象を調べるため, 12 月 6 日を初期値とするアンサンブルメンバーについて詳しく調べる。また, SSW を引き起した波数 1 の惑星規模波の活動度に注目すると, 12 月 13 日頃からアンサンブルメンバー間の違いが明瞭になり始めるので, 以下ではこの時期の循環の違いに着目する。まず最初に, SSW の発生を最もうまく予測した予報と, SSW の予測に失敗した予報を互いに比較して吟味する。そのため, 以下では, 12 月 6 日を初期値とするアンサンブルメンバーの中で, 12 月 25 日における成層圏極域温度の予測値が最も高く, 観測値に近い予測を Run 1 (図 5 での青実線), 逆に, 予測温度が最も低く SSW の発生を全く予測できなかった予測を Run 2 (図 5 での赤実線) と呼び, 両者の比較を行う。

4.2 SSW の前駆現象

まず, 図 6 に, 12 月 12 日から 14 日の 3 日間で平均した, 帯状平均風 (m/s) の子午面分布の観測値 (左図) と, SSW の予測に成功した Run 1 (中図) と, 失敗した Run 2 (右図) の予測値を示す。観測値と, SSW の予測に成功した Run 1 では, 対流圏北緯 60 度付近の西風が弱く, 北緯 80 度付近に比較的強い西風が存在する。一方, SSW の予測に失敗した Run 2 では, 全く反対に, 北緯 60 度付近の対流圏で西風が強く, 北緯 80 度付近には東風が存在する。この帯状風分布の違いは, 向川・廣岡 (2003) や向川他 (2003) によって, 1998 年 12 月の SSW 発生前にも確かめられた同様の前駆現象である。

一方, 図 7 に, 図 6 と同時期での 300hPa 等圧面高度分布を示す。観測値 (左図) と SSW の予測に成功した Run 1 (中図) では, 波数 1 の増幅に伴い, 極渦の中心が太平洋域にシフトし, 大西洋域やヨーロッパ域では, ブロッキングに伴い高気圧性循環が卓越していることがわかる。一方, SSW の予測に失敗した Run 2 では, ヨーロッパ域でのブロッキングは既に衰退してしまい, 波数 1 の増幅も明瞭ではない。また, Run 2 では北大西洋域の西風ジェットは北緯 60 度付近に存在するが, 観測値や Run 1 では, ブロッキングの形成により, 北緯 80 度付近にまで北上している。従って, ブロッキングの形成が, 図 6 に見られる特徴的な帯状流分布の違いをもたらしたと考えられる。また, Run

1 と観測値を比べると、ブロッキングの強さや位置はかなり異なっていることから、SSW の予測には、ブロッキングの発生位置や強度の正確な予測はあまり重要ではないことが示唆される。

次に、12月6日を初期値とする全てのアンサンブルメンバー(13メンバー)を解析して得られた、12月13日前後において、SSW 発生予測と関連する大気循環場の特徴について報告する。まず、図8上に、成層圏極域の昇温が極大となる12月25日の、北緯80度、10hPaにおける帯状平均温度の予測値に線型回帰することにより求められた、12月13日における帯状平均風の予測値のアンサンブル平均値からの偏差を示す。色付の陰影部は、この偏差が有意な領域を示す。この図より、図6と同様に、12月13日に対流圏の北緯60度付近で西風が弱く、北緯80度付近で西風が強いときには、12月25日の成層圏極域の温度が高くなる傾向があることが示される。すなわち、図8は、SSW 発生と関連する特徴的な帯状平均風分布を示している。また、高緯度対流圏中部における偏差の大きさは6m/sに達し、図8下と比較するとアンサンブル平均値(5m/s)とほぼ同じ大きさであることがわかる。

一方、図9の上図は、12月13日の帯状平均風予測値のアンサンブル平均からの偏差場に関して主成分分析を行った結果得られた、スプレッドの第一主成分を示す。すなわち、この図は、予測の散らばりが最も大きくなる帯状平均風偏差場のパターンを示している。その寄与率は、図9の下図より、41%に達している。図9で得られたパターンは、対流圏において北緯60度付近と、北緯80度付近との間でのシーソーパターンを示している。図8と比較すると、このパターンは、SSW の発生予測と関連する偏差パターンとよく似ていることがわかる。従って、12月6日を初期値とする予報において、成層圏極域の予測値のスプレッドが大きくなったのは、12月13日付近で、この両者のパターンがほぼ一致したことが原因と考えられる。

5. 結論

1998年12月に生じた成層圏突然昇温現象(SSW)に伴う対流圏循環の予測可能性と、2001年12月に生じたSSWの前駆現象について、気象庁一ヶ月予報モデル結果を用いて解析を行った。

まず、1998年12月SSWの最盛期以降においては、対流圏内の北極振動シグナル(AO signature)は長期間予測可能な因子ではないことが示された。

むしろ、SSWを引き起す原因となった、プラネタリー波の極向き伝播に伴って発生するブロッキング現象が、かなり以前(3週間以前)から予測可能であることが示された。この予測可能な期間は、SSWを伴わないブロッキング現象の場合と比べてかなり長い。その原因として、SSW発生期では、プラネタリー波の南北伝播を通して、成層圏循環が対流圏循環をコントロールしているためであると考えられる(Kodera and Chiba 1995)。

一方、2001年12月のSSWの予測可能性について、気象庁一ヶ月予報の全アンサンブルメンバーを用いて解析した結果、このSSWは2週間程度以上前から予測可能であることが示された。また、SSWの前駆現象に対応すると思われる、SSW発生期での対流圏における帯状流変動は、向川・廣岡(2003)や向川他(2003)で得られた、1998年12月のSSWに伴うものと同じであり、北緯80度付近における西風の強化、北緯60度付近における西風の弱体化で特徴づけられる。しかし、2001年12月の帯状流変動は、1998年12月とは異なり、ヨーロッパ域でのブロッキング現象の発生と関連していた。さらに、この帯状流変動は、予測間のスプレッドが最大になる方向とも一致したため、SSWオンセット期に初期値に対する鋭敏性が極めて高くなったと考えられる。

謝 辞

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., J. R. Holton, and C. B. Leovy, 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press. pp. 489.
- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton, 1999: Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *J. of Geophys. Res.*, **104**, 30937–30946.
- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, **294**, 581–584.
- 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.

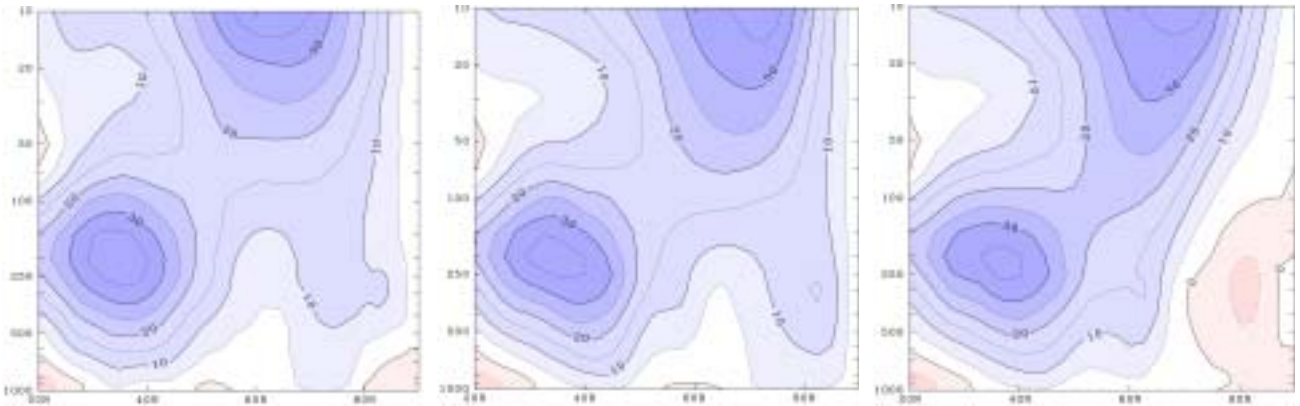


図 6: 12 月 12 日から 14 日の 3 日間で平均した, 帯状平均風 (m/s) の緯度-高度 (1000hPa から 10hPa) 分布 . (左) 観測値, (中) Run 1, (右) Run 2 .

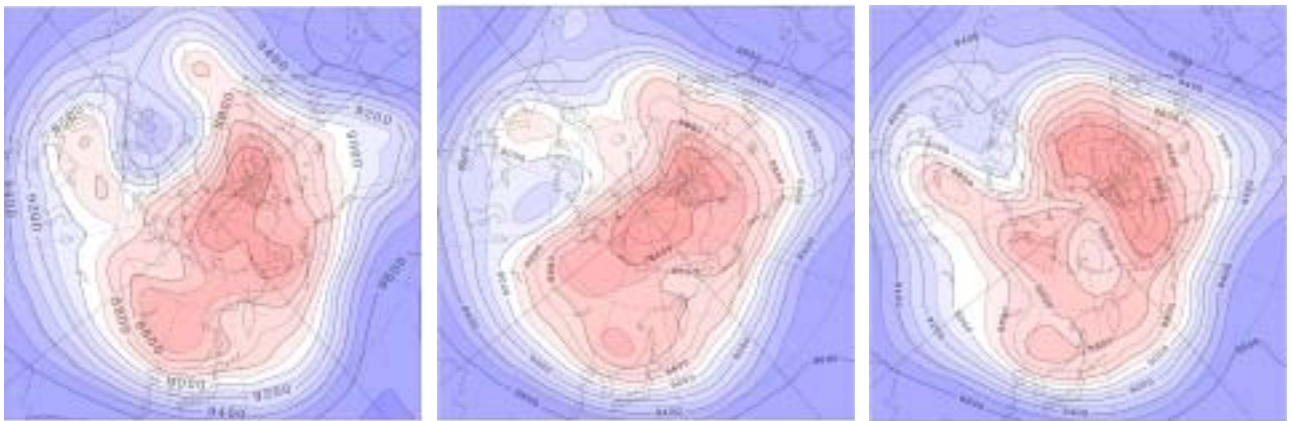


図 7: 図 7 と同じ, 但し, 300hPa 等圧面高度

Kodera, K., and M. Chiba, 1995: Tropospheric circulation changes associated with stratospheric sudden warmings: A case study. *J. of Geophys. Res.*, **100**, 11055–11068.

Matsuno, T., 1971: A dynamical model of stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 871–883.

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

向川 均・廣岡 俊彦, 2003: 成層圏突然昇温の予測可能性-1998 年 11 月, 12 月の事例解析-. *グロースペッター*, **41**, 95–111.

向川 均・佐海 弘和・廣岡 俊彦, 2003: 成層圏突然昇温現象の予測可能性-1998/99 年冬季の事例解析-. *京都大学防災研究所年報*, **46(B)**, 383–396.

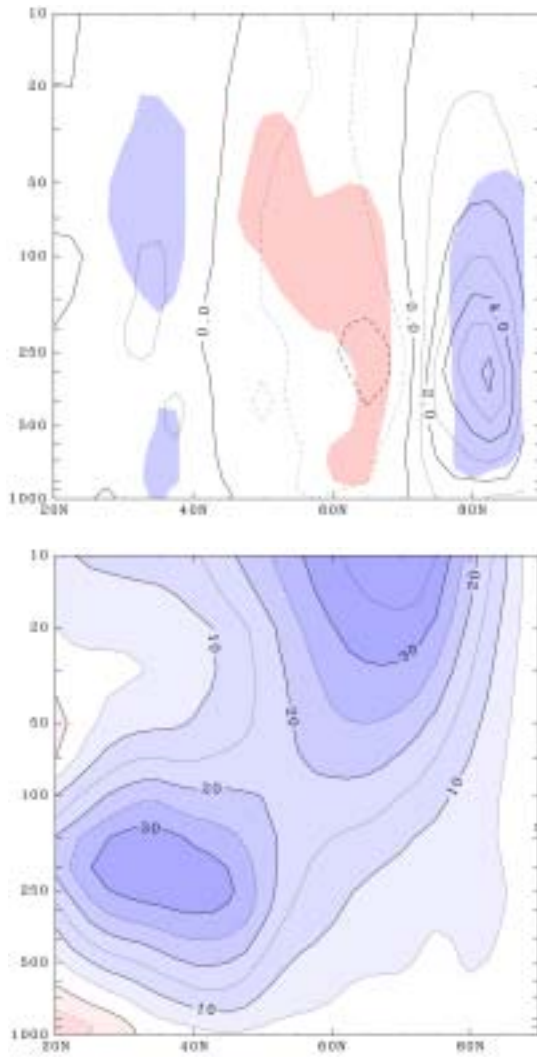


図 8: (上) 12 月 6 日を初期値とする予測値から得られた, SSW と関連する 12 月 13 日における帯状平均風予測値の偏差場 (m/s) . 統計的有意性が 95% 以上有意な領域に, 色付き陰影を付けた . (下) アンサンブル平均 . 本文参照 .

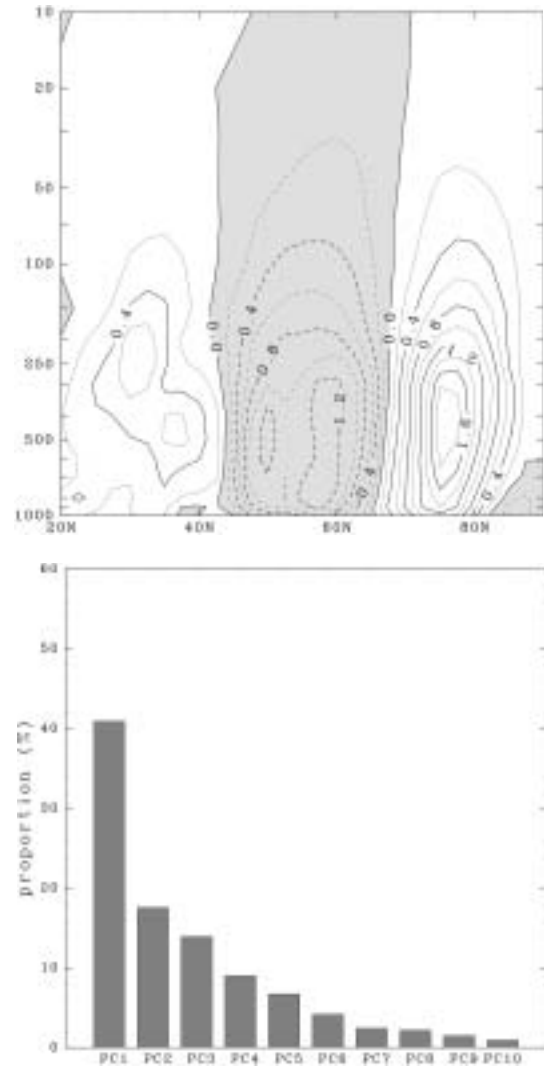


図 9: (上) 12 月 6 日を初期値とする予測値から得られた, 12 月 13 日における帯状流偏差場の第一主成分 . 負の値に陰影を付けた . (下) 各主成分得点の分布 .