

成層圏突然昇温の予測可能性について—2004年1月の事例解析—

一丸 知子・廣岡 俊彦(九大・理), 向川 均(京大・防災研)

1. はじめに

冬季成層圏における最も顕著な現象のひとつである突然昇温現象(SSW)は、高度 10~50km あたりで数日のうちに気温が 40~50°Cも上がる現象で、高緯度での昇温時に、緯度 60 度で帯状平均東西風が東風になれば大規模突然昇温(Major warming)、西風のままであれば小規模突然昇温(Minor warming)と大別される。SSW は、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力学的に理解しうることが示されてはいるが、その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。また、数値モデルを用いて、実際に発生した突然昇温をどれくらい前から予測しうるかという予測可能性についての研究例も少ない。

現行の気象庁一ヶ月アンサンブル予報データを用い、近年の Major warming を解析した Mukougawa et al.(2005)によると、2001年12月に起きた Major warming の予測可能期間は、少なくとも 2 週間以上であることが示されている。ただ、この Major warming は、後ほど示すようにプラネタリー波が短期間で一度に鉛直伝播して起きたもので、比較的予測しやすい事例であったと考えられる。そこで本研究では、SSW の起こり方によってどの程度予測可能性に差が出るのか考察するため、Mukougawa et al. (2005)と同様に現行の1ヶ月アンサンブル予報データ及び気象庁全球客観解析データを用いて、2003/04年冬季について解析し、2001年の事例と比較を行った。

2. データ

本研究で使用したデータは以下の通りである。

(1) 気象庁1ヶ月アンサンブル予報データ

水平格子点間隔 2.5° × 2.5°

水平格子点数 144 × 73

(経度方向 × 緯度方向)

鉛直層数 23 層 (地上~1hPa)
初期時刻 水曜日・木曜日の 12UTC
初期値から 34 日間
メンバ数 13 メンバずつ実施
摂動作成方法 Breeding of Growing Mode
(BGM)法

一ヶ月アンサンブル予報の摂動作成に用いられているBGM法は、過去の大気場から誤差成長の大きいモード(摂動成分となりうるもの)を求めて摂動を作成する手法である。この摂動は、大気場が大きく変わらなければ最も不安定なモードに一致することが知られている(気象庁予報部, 1994)。

(2) 気象庁全球客観解析データ

データ時間間隔 6 時間

格子点間隔 1.25° × 1.25°

水平格子点数 288 × 144

(経度方向 × 緯度方向)

鉛直層数 23 層 (1000hPa~0.4hPa)

3. 解析結果

I. 2001年12月の Major warming

Mukougawa et al. (2005)が解析した 2001年12月の Major warming の特徴を簡単に記す。まず、図1に、2001年11月11日から2002年2月10日の期間の解析値に基づく、波数1成分の Eliassen-Palm Flux (以後 E-P Flux)と平均流加速を表す量(以後 DF)(Andrews et al., 1987)の北緯 50 度~70 度平均の高度時間断面図を示す。この図より、Major warming は、波数1のプラネタリー波が 12月10日から20日までの短期間に一度に鉛直伝播して生じていることが分かる。総観的には、北緯 80 度、10hPa の帯状平均温度を示した図2と、突然昇温時 12月29日の 10hPa における高度場を示した図3より、この事例はアリューシャン

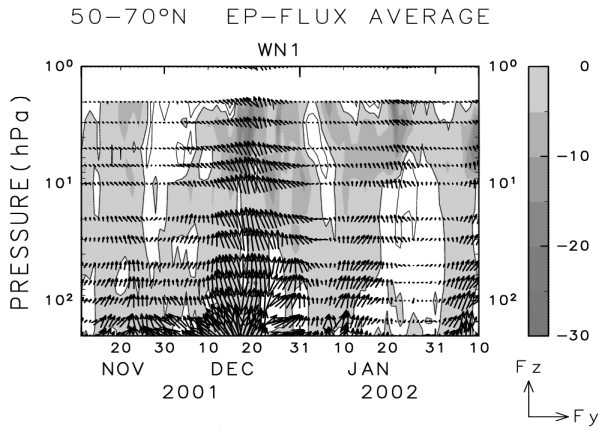


図1: 期間 2001/11/11~2002/2/10 での解析値の E-P Flux と DF の北緯 50 度~70 度平均の高度時間断面図。ベクトルは E-P Flux、コンターは DF を表す。収束域のみ陰影付きでトーンバーの単位は[m/s/day]。

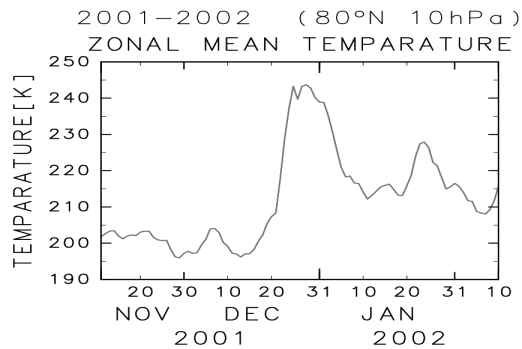


図2: 期間 2001/11/11~2002/2/10 での北緯 80 度, 10hPa における帯状平均温度[K]変化。

高気圧が強まって短期間で一気に昇温した波数1型の Major warming であることが分かる。図4は、昇温の約 2 週間前の 12 月 12 日から 14 日の 300hPa における解析値の高度場平均(左)と帯状平均東西風平均の緯度高度断面図(右)を示したものであるが、この期間、大西洋上空に明瞭なオメガ型構造のブロッキング現象が生じており、それに伴って西風ジェットが高緯度へと大きく蛇行した結果、右図の帯状平均東西風分布には、対流圏高緯度で西風極大域が表われ、また同時に下部成層圏中緯度で西風減速域が表われている。このような平均場の変化が、波の屈折率(refractive index squared)の変化を通して、プラネタリー波の成層圏への伝播を容易にし、突然昇温の生起へと導いたものと思われる。

10hPa 2001/12/29

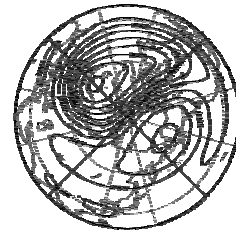


図3: 突然昇温時 2001/12/29 の 10hPa における高度場[m]。

300hPa 2001/12/12-14

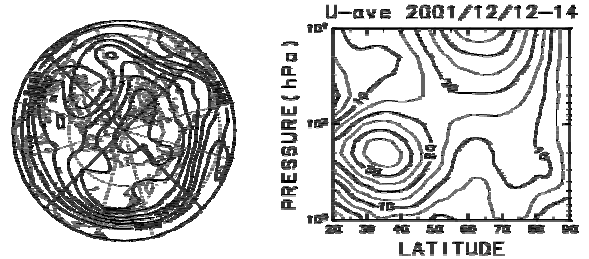
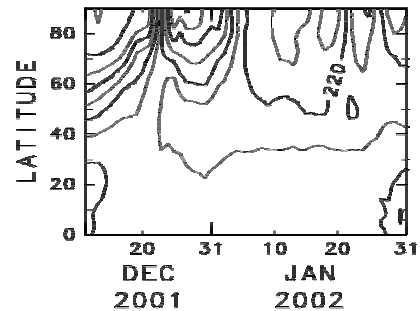


図4: ブロッキングが起きている期間 2001/12/12~14 の(左)300hPa における解析値の高度場平均[m]と(右)帯状平均東西風平均[m/s]の緯度高度断面図。実線は西風を表す。

ZONAL MEAN TEMPERATURE (10hPa)



ZONAL MEAN U-WIND (10hPa)

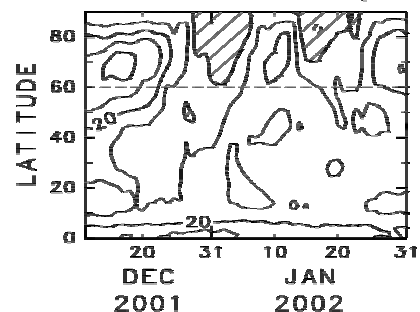


図5: 期間 2001/12/11~2002/1/31 での 10hPa の緯度時間変化を示す。上が帯状平均温度[K]、下が帯状平均東西風[m/s]。斜線部は東風を表す。

ZONAL MEAN TEMP (80°N 10hPa)

ZONAL MEAN TEMP (80°N 10hPa)

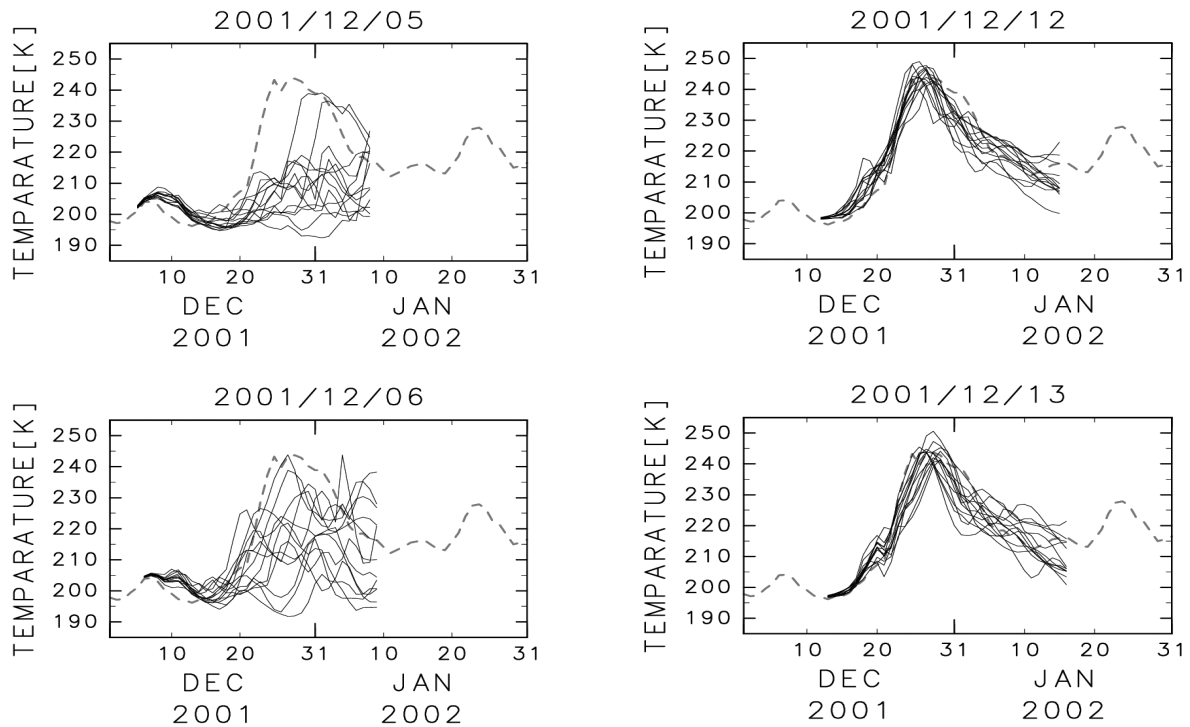


図6:左図は 2001/12/5・6 初期値、右図は 2001/12/12・13 初期値の、北緯 80 度, 1hPa における 13 メンバの帯状平均温度[K]の時間発展。実線がアンサンブルメンバ、点線は解析値の時間変化。

この比較的シンプルな Major warming をアンサンブルデータがどのくらい予報できているか調べるため、図6に示すように、特定の日を初期値とするアンサンブル予報のメンバ 13 個と解析値の帯状平均温度の時間変化を比較してみた。昇温ピークに達する約 20 日前の 12 月 5 日初期値では、昇温傾向を示すメンバがほとんどないのに対し、翌 6 日初期値には 4~5 メンバに昇温傾向が見られ、昇温ピークの約 13 日前には、全メンバが昇温傾向を予測している。

E-P Flux や DF、プラネタリー波の振幅、高度場について解析値と予報値を比較したが、昇温を予測できているメンバは解析値と似た特徴になり、予測できていないメンバは当然違った時間変化を示していた。ただし、高度場を見る限り、トラフ・リッジの位相に関してまで全てがうまく予測できてはいなかった(図は省略)。そういった点を除いて、2001 年のこの Major warming はシンプルで予想しやすく、予測可能期間は、約 2~3 週間であったと考えられる。

II. 2004 年 1 月の Major warming

次に、2003/04 年冬季について見ていく。図7の北緯 80 度, 10hPa における帯状平均温度変化図で見られるように、12 月末に Minor warming、1 月上旬に Major warming が起きた。図8に示した 10hPa における高度場を見ると、Minor warming は波数 1 型の SSW、今回注目する Major warming は、極渦の分裂が見られるため波数 2 の振幅も割と大きい波数 1 型の SSW だと言える。

図9には図4と同じく、ブロッキングが起きている 2003 年 12 月 5 日から 7 日の 300hPa における高度場平均と帯状平均東西風平均の緯度高度断面図を示す。2001 年同様、Minor warming の起きる約 3 週間前には、大西洋上空に明瞭な双極子構造のブロッキングが見られ、帯状平均東西風を見ると、ここでも図4と同様、対流圏の高緯度域に西風が現れ、中緯度下部成層圏では西風が減速している。図 10 には、解析値の E-P Flux と DF の北緯 50 度~70 度平均の高度時間断面図を示しているが、この図よりブロッキングが起こって以降、プ

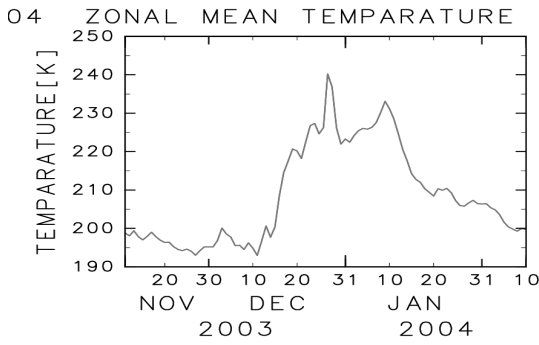


図7: 期間 2003/11/11~2004/2/10 での北緯 80 度, 10hPa における帯状平均温度[K]。

300hPa 2003/12/05-07

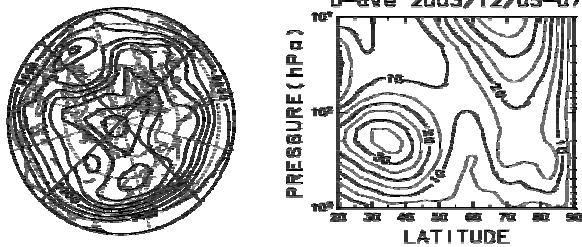


図9: ブロッキングが起きている期間 2003/12/5~7 に関する図4と同様の図。

ラネタリー波が極方向へ鉛直伝播しやすくなる傾向が見られ、このことから一連の SSW が生じたと思われる。

さて、いよいよ2004年1月上旬の Major warming について見ていくことにする。帯状平均温度、東西風の緯度時間変化を示した図 11 を見ると、2004年1月5日の北緯 60 度あたりにある昇温ピークが時間とともに極側へ移り(上図陰影部)、昇温による東風も、1月1日から1月15日にかけてその極大が高緯度から中緯度へ、そしてまた高緯度へと時間とともに変化しており、複雑な経過をたどっている(下図陰影部)。

また、通常の波数1型 SSW では、アリューシャン高気圧が発達して極渦を押しやり、極へと移動する形で起こるのに対し、この Major warming で特異だったのは、図 12 に示す北半球、10hPa の等圧面高度場の経度緯度断面図から分かるように、2004年1月6日に東経 80 度の中緯度に生じた高気圧が、発達しながら北進し、高緯度域で勢力の弱まったアリューシャン高気圧にとって代わったという点である。

10hPa 2003/12/27 10hPa 2004/01/11

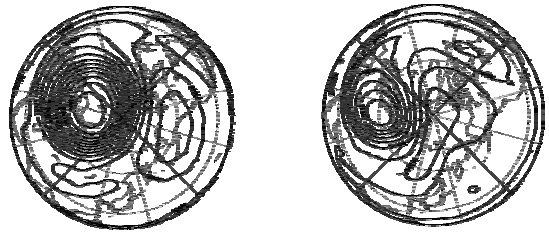


図8: 左が Minor warming 2003/12/27、右が Major warming 2004/1/10 の 10hPa における高度場。

50-70°N EP-FLUX AVERAGE

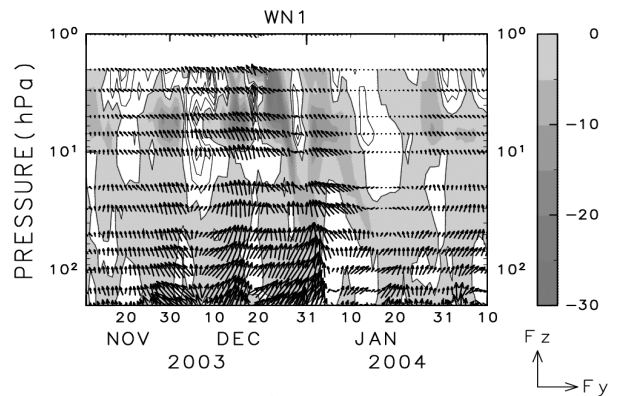
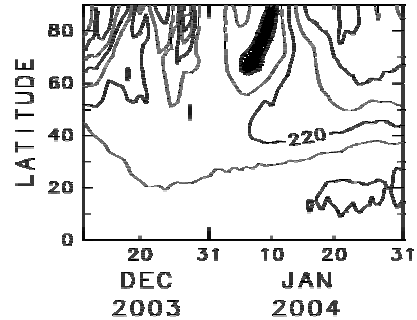


図 10: 期間 2003/11/11~2004/2/10 での図1と同様の図。

ZONAL MEAN TEMPERATURE (10hPa)



ZONAL MEAN U-WIND (10hPa)

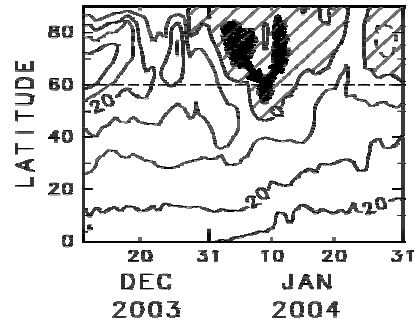


図 11: 期間 2003/12/11~2004/1/31 での 10hPa の緯度時間変化を示す。上が帯状平均温度[K]、下が帯状平均東西風[m/s]。

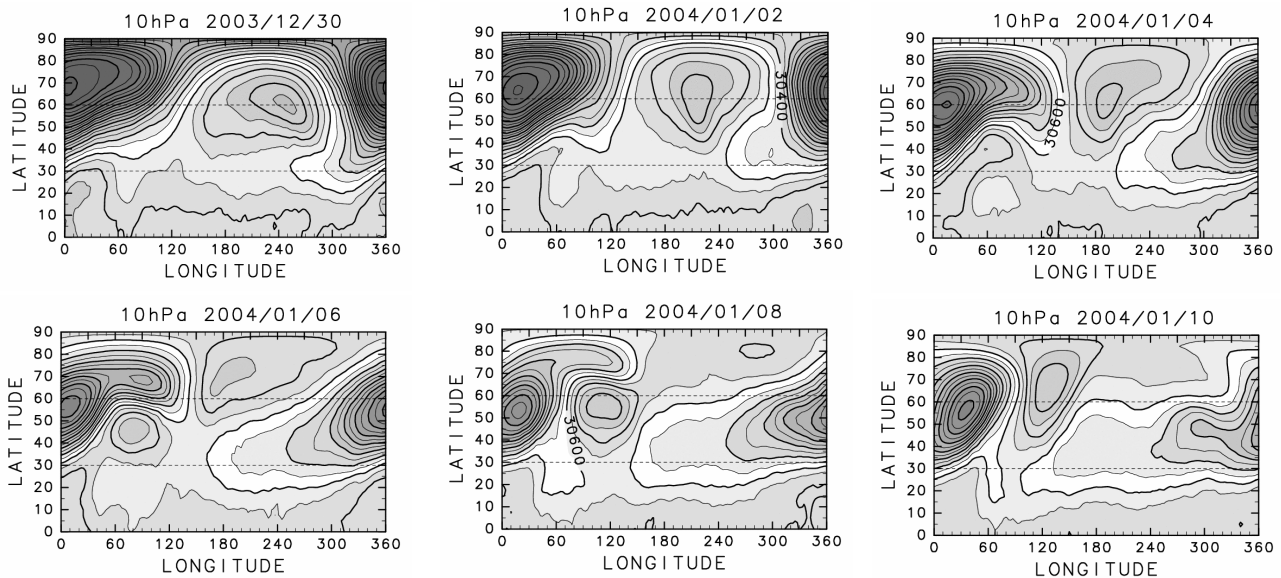


図 12: 北半球, 10hPa の等圧面高度場の経度緯度断面図。2003/12/30 から 2004/1/10 の期間を2日おきに示す。2003/12/30 の図で、中高緯度の色の濃い部分が極渦, 図の中央付近にあるのがアリュージャン高気圧である。等値線間隔は 100m。

そこで、プラネタリー波の波数1成分と、波数2から波数5成分の和について、解析値の E-P Flux と DF の高度時間断面図を、北緯 50-70 度平均と北緯 40-50 度平均の二つの緯度帯で示した図 13 を用いて、アリュージャン高気圧と中緯度起源の高気圧(以後、中緯度高気圧)が、今回起きた Major warming にどう関わっているのかを考察してみる。図 12 に示されている通り、ここでは、対流圏から伝播してくるプラネタリー波の波数1成分は主にアリュージャン高気圧の盛衰を示し、波数2から波数5成分の和は主に中緯度高気圧の特徴を表わすと考えられる。

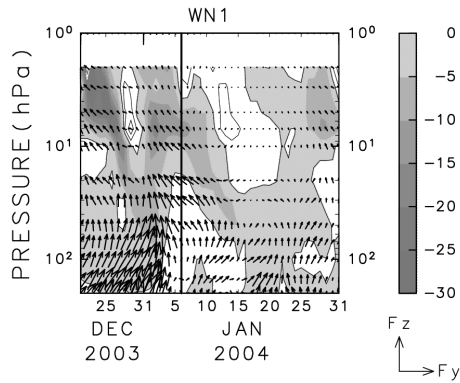
図 13 上を見ると、Minor warming が収まった 1 月 1 日から 5 日にかけての、北緯 50 度から 70 度、10hPa から 5hPa あたりで、アリュージャン高気圧による東風加速が起こり、図 13 下より、1 月 3 日から 7 日にかけての、北緯 40 度から 50 度、10hPa から 2hPa あたりで、中緯度高気圧による東風加速が起こっていることが分かる。これは、図 11 で、1 月上旬に東風領域が北緯 45 度あたりにまで達していることと対応しており、この SSW が Major warming になり得たのは、アリュージャン高気圧に加え中緯度高気圧による寄与も大きかったためと考えられる。

また、プラネタリー波の波数1成分と、波数2から波数5成分の和に関して、特定の日における解析値の E-P Flux と DF の子午面断面図を示す図 14 を用いて、この Major warming を複雑にした原因の一つと思われる中緯度高気圧の起源を探ってみる。

まず、図 14 の左上図は、アリュージャン高気圧(主に波数1に相当)が活発な時期のものであり、波数1の波が、北緯 50 度から 70 度の対流圏界面あたりから鉛直伝播していることが分かる。そして、アリュージャン高気圧の衰退時期を示す右上図を見ると、10hPa から 5hPa の同緯度帯で、DF が収束域となっていることが分かる。次に、中緯度高気圧(主に波数2から波数5の和に相当)が生じた左下図 1 月 6 日の E-P Flux を見ると、中緯度高気圧を生じさせた波は北緯 40 度から 50 度付近から鉛直伝播して、10hPa から 3hPa の同緯度帯で収束し、二日後の 1 月 8 日右下図には、北に移動して北緯 45 度から 70 度あたりで収束していることが分かる。

このことから、アリュージャン高気圧は北緯 50 度から 70 度を、中緯度高気圧は北緯 40 度から 50 度をそれぞれ起源としていると考えられる。

50-70°N EP-FLUX AVERAGE



40-50°N EP-FLUX AVERAGE

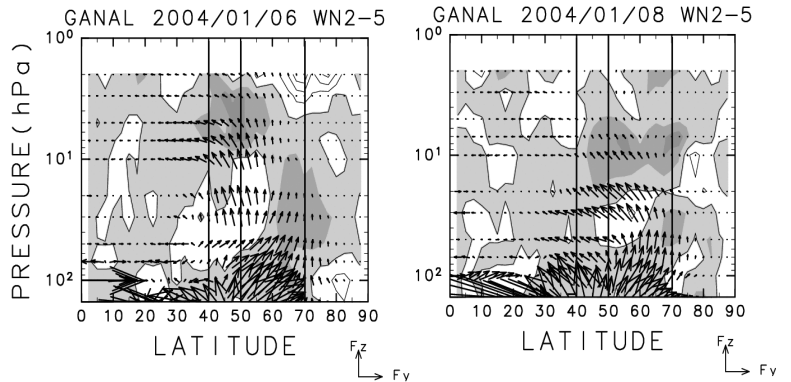
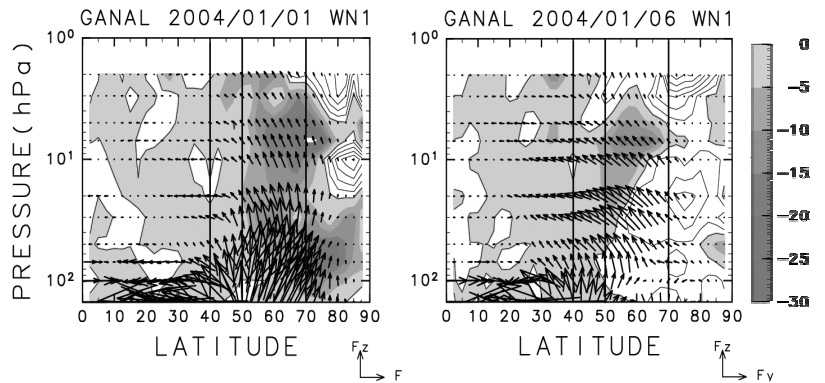
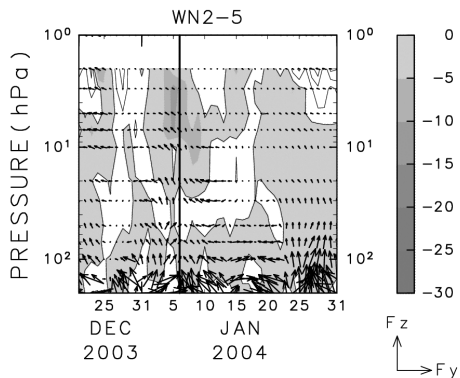


図 13: 期間 2003/12/21~2004/1/31 における解析値の E-P Flux と DF の高度時間断面図。高度は 200hPa~1hPa、上図は北緯 50 度~70 度平均、下図は北緯 40 度~50 度平均。上図は波数 1、下図は波数 2~5 の和。2004/1/6 に実線。

図 14: 上 2 図は 2004/1/1, 1/6 の波数 1、下 2 図は 2004/1/6, 1/8 の波数 2~5 の和における解析値の E-P Flux と DF の子午面断面図。高度は 150hPa~1hPa。ベクトルが E-P Flux、コンターは DF を表す。収束域のみ陰影付き。

Ⅲ. 解析値とアンサンブル予報の比較 (2004 年)

次に、この複雑な経過で起きた Major warming を、アンサンブル予報がどのくらい予報できているかについて見ていく。

2001 年の事例ではほぼ全メンバが昇温を予測できていた時期に相当する、昇温 18 日前の初期値 2003 年 12 月 24 日と、17 日前の初期値 12 月 25 日の帯状平均温度の時間発展を示した図 15 をまず見てみる。これらのアンサンブル予報が、Major warming を予報できているかどうかという点に着目すると、以下の二つの問題点が挙げられる。一つ目の問題点は、北緯 80 度、10hPa で 12 月 27 日に昇温ピークを持つ Minor warming 後の降温の表現が不十分なこと、二つ目の問題点は、1 月 10 日に昇温ピークを持つ Major warming の予測に失

敗していることである。

まず、第一の問題点について考える。図 16 は、2003 年 12 月 30 日における 10hPa、北半球の高度場の経度緯度断面図(上から解析値、12 月 24 日を初期値とするアンサンブルメンバの一例、同じく 25 日初期値の一例)を示したものである。この図より、(b), (c) のアンサンブルメンバでは、解析値に比べて高気圧の中心が 5~10 度極側にあることが分かる。他のメンバについても同様に、アリューシャン高気圧が解析値よりも極寄りとなる傾向を示していた。このことから、波数 1 成分の収束がより極側に生じて極域で大きな西風減速を引き起こしたため、降温が不十分になったと考えられる。

ZONAL MEAN TEMP (80°N 10hPa)

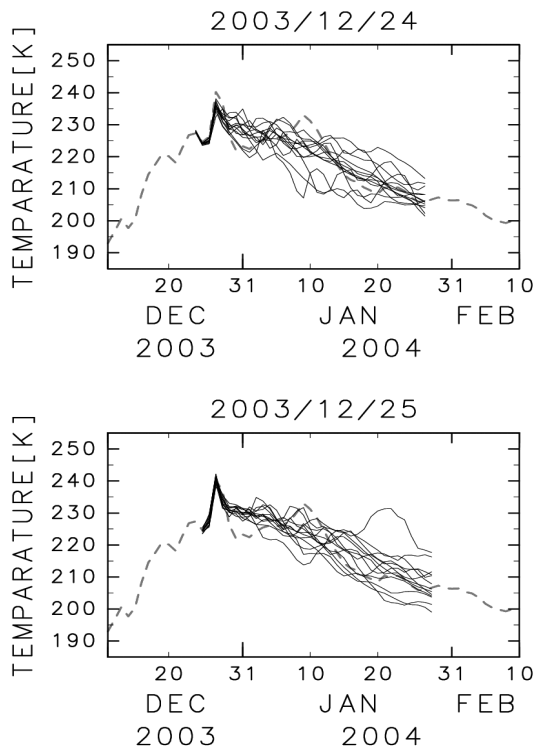
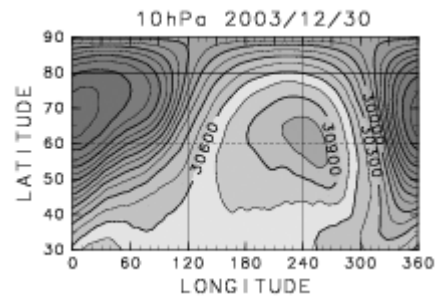


図 15: 2003/12/24(上)・25(下) 初期値に関する図6と同様の図。

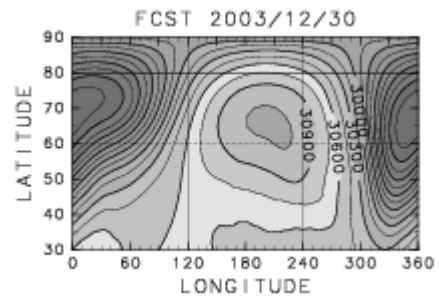
次に、第二の問題点について考える。図 15 に示した 26 メンバのうち 6 メンバは、時期・精度は違うが昇温傾向を示し(図 17 に一例を示す)、残りの殆どのメンバについては、昇温が生じず降温も十分でない予報となっていた(詳細図は省略)。図 17 の北半球 10hPa 等圧面高度場(下图)に示すように、いずれの場合においても、中緯度高気圧が生じず、アリューシャン高気圧が極寄りになるという特徴を示しており、結局、12 月 24 日・25 日のアンサンブルメンバの全てが、Major warming の予測に失敗していたことになる。

次に、昇温 11 日前の初期値 12 月 31 日と 10 日前にあたる初期値 1 月 1 日の帯状平均温度の時間発展を示した図 18 を見る。両初期値ともに昇温傾向は予測できているが、予報精度が悪く、時期もあまり合っていない。そこで、アンサンブル予報の昇温が、解析値と同様に中緯度高気圧の寄与によって起きた Major warming であるか否かと

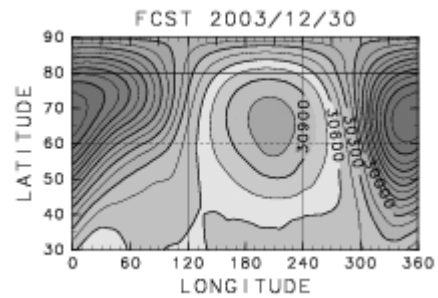
(a) 解析値



(b) 2003/12/24 初期値のアンサンブルメンバ



(c) 2003/12/25 初期値のアンサンブルメンバ



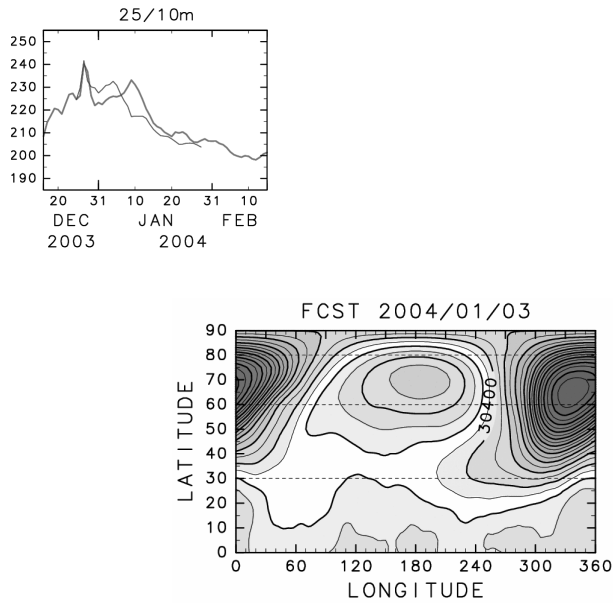


図 17: 2003/12/25 初期値のアンサンブルメンバの 1 例。上図は、このメンバの帯状平均温度 [K] の時間発展。下図は、このメンバが昇温ピークにあった 2004/1/3 での 10hPa 北半球の高度場 [m] の経度緯度断面図。

図 19 の北半球, 10hPa の等圧面高度場の経度緯度断面図に示すように、一つ目は、中緯度高気圧の北進が早すぎる特徴を持つパターン(図 19 上)、二つ目は、中緯度高気圧が北進できない特徴を持つパターン(図 19 中)。そして三つ目が、解析値に近い動きをしたパターンである(図 19 下)。

図 19 上図から、中緯度高気圧が解析値より早く生じ、極渦にほとんど妨げられずに大きい勢力を保ったまま北進していることが分かる。結果、第一パターンは、解析値より早く昇温ピークを迎え、昇温規模が大きくなったものと思われる。

また、図 19 中図から、一見帯状平均温度は予測できているように見えるが、高度場を見ると、中緯度高気圧が高緯度域で極渦を曲げ伸ばし、その極渦が妨げる形となって極域に行くことなく中緯度で勢力が弱まっていることが分かる。結果、第二パターンでは、昇温は主にアリューシャン高

ZONAL MEAN TEMP (80°N 10hPa)

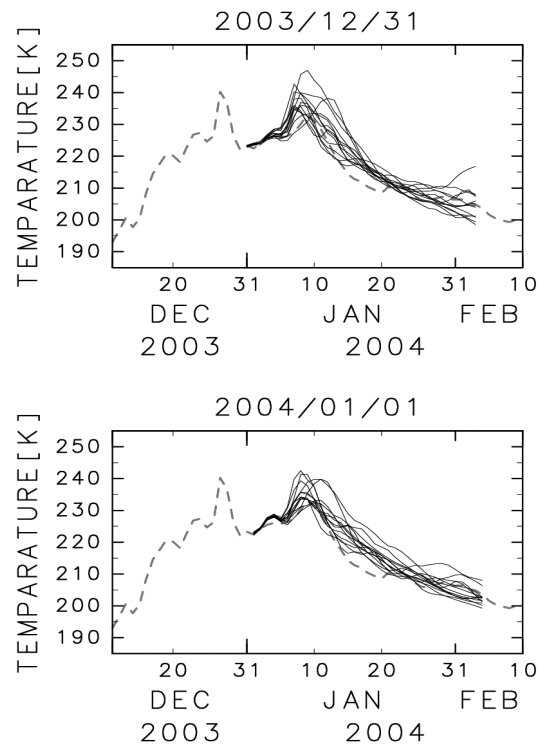


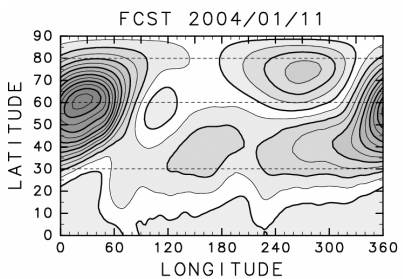
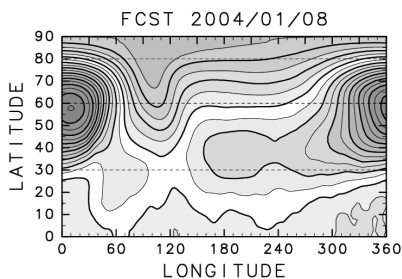
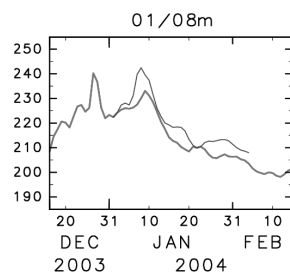
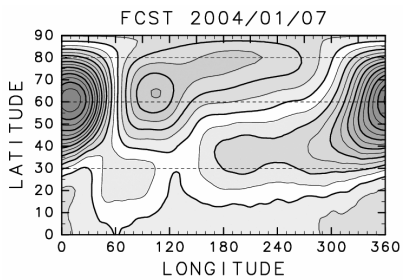
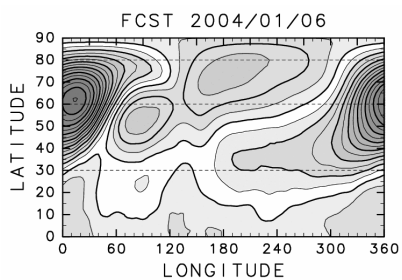
図 18: 2003/12/31(上)・2004/1/1(下)に関する図 6と同様の図。

気圧が起こしたものであり、基本的に予測できているとは言えない。

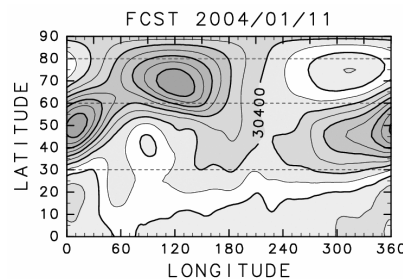
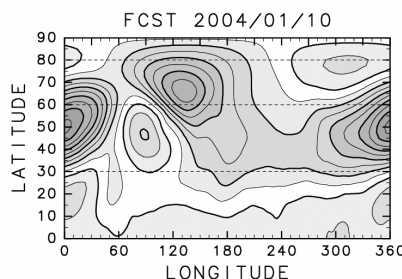
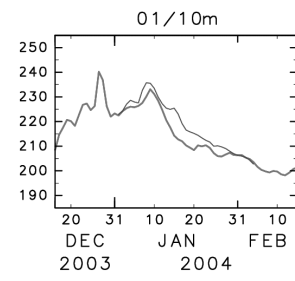
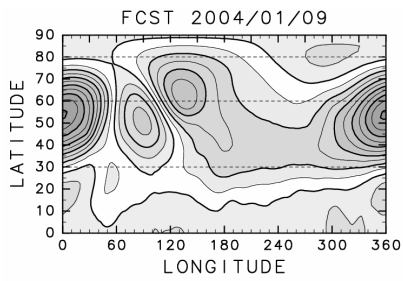
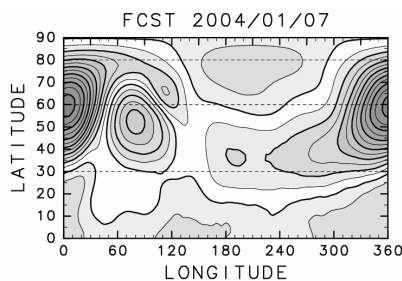
そして、図 19 下図の解析値に近い第三パターンを示したのは、26 個のアンサンブルメンバのうちでただ一つだけであった。

結果的にこの事例においては、図 19 のような帯状平均温度の時間発展だけを見て、昇温を予測できているか否かを議論することはできず、色々な角度から検証をしないと正確な予測可能性を語ることはできないと言える。

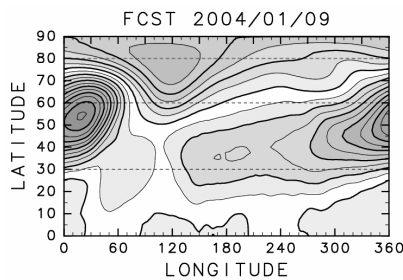
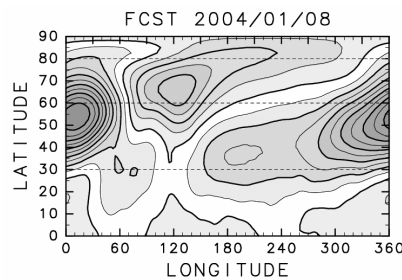
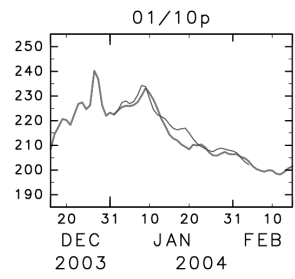
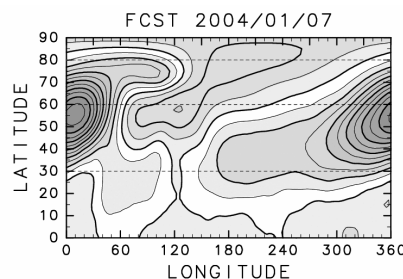
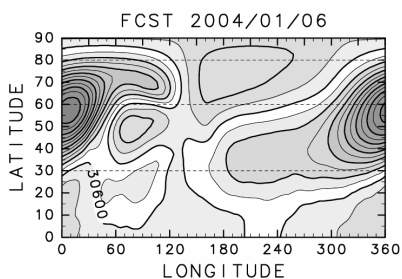
また、これ以上詳しくは述べないが、12 月末の Minor warming も経過が複雑で、プラネタリー波が何度か繰り返して鉛直伝播し、図 7 に見られるように昇温は一度に生じなかった。そのため、予測が難しく、予測可能期間は約 10 日であった。



**中緯度高気圧の北進が
早すぎるパターン**



**中緯度高気圧が北進
できないパターン**



**解析値と近い動きをした
パターン**

図 19: アンサンブルメンバの3パターンを示す北半球, 10hPa の等圧面高度場[m]の経度緯度断面図。

4. まとめ

2004年1月のMajor warmingは、波数1成分を反映するアリューシャン高気圧の北進が寄与して起こる通常のSSWとは違い、中緯度で生じた高気圧が北進するなど、波数1以外の成分が複雑に寄与して起きたものであり予報が難しいものであった。そのため、2001年12月に起きたシンプルなMajor warmingでMukougawa et al.(2005)が示した、少なくとも2週間以上という予測可能期間より、2004年1月の複雑なMajor warmingの予測可能期間は短いと言える。とはいえ、予測可能期間の限界が1週間程度の対流圏と比べれば、今回注目した2004年1月のMajor warmingの予測可能性の方が良いことは確かであり、総観規模スケールの現象が卓越する対流圏より、大規模スケールの成層圏の方が予測可能性が良い、という定説と合致していると思われる。

気象庁一ヶ月アンサンブル予報が、一週間のうち水曜・木曜の2回しか行われないため、大まかな予測可能期間しか議論できない状況だが、SSWの起こり方により予測可能期間がかなり違ってくることは確かだと言える。このSSWの起こり方に大きく影響すると考えられるブロッキングが生じると、プラネタリー波が極側へ鉛直伝播しやすくなる傾向があることも、SSWの予測可能性を考える上で重要な点になると思われる。

5. 今後の課題

今回、2004年1月のMajor warmingの特殊性について、中緯度高気圧に着目し、帯状平均温度の時間発展と高度場の経度緯度断面図の時間発展の二つを用いて解析を行ったが、それだけではSSWの予測可能性を詳細に論じることはできない。今後は、Wave activity flux や Refractive index, Potential vorticity などを用いて色々な角度から、中緯度高気圧の起源や他の類似例、ブロッキングの具体的役割などを解析し、SSWの予測可能性をもっと詳細に論じていきたいと考えている。

謝辞

データを提供して頂いた気象庁の皆様には感謝致します。また、ブロッキングの分類に関しては九州大学の伊藤久徳教授の御教示を受けました。本論文中の図の作成には「地球流体電脳ライブラリー」を使用させていただきました。記して、謝意を表します。

参考文献

- Andrews, D.G., J.R.Holton, and C.B.Leovy, 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press., 489pp.
- Mukougawa, H., H. Sakai, and, T. Hirooka, 2005: High Sensitivity to the Initial Condition for the Prediction of Stratospheric Sudden Warming. *Geophys. Res. Lett.* (in press).
- 気象庁予報部, 1994: 1 ヶ月数値予報とアンサンブル予報 研修テキスト, 26-27