

NICAM を用いた 2009 年 1 月の
成層圏突然昇温の再現実験

2011 年 2 月

屋代 義博

NICAM を用いた 2009 年 1 月の
成層圏突然昇温の再現実験

筑波大学大学院
生命環境科学研究科
地球科学専攻
修士 (理学) 学位論文

屋代 義博

Numerical Simulation of Stratospheric Sudden Warming in January 2009 Using NICAM

Yoshihiro YASHIRO

Abstract

In late January 2009, a major stratospheric sudden warming (SSW) occurred. Horizontal structure of the warming is wavenumber 2 type in the stratosphere due to unusual amplification of planetary wave 2 in the troposphere. In this study, we conducted a numerical simulation of the Stratosphere Sudden Warming in January 2009 using NICAM glevel-10 (Horizontal resolution of 7 km). As the initial data of NICAM, we applied the global Gaussian analysis data for vertical level of Eta of the JMA (JMA/MRI/NPD). Moreover, for the comparison, we used GPV/GSM 8-day forecast data in JMA, JCDAS data and NCEP/NCAR reanalysis data.

Onset of the SSW is about 15 January 2009, and its peak is about 24 January 2009. The predicted temperature and height of GPV/GSM 8-day forecast (initial time: 2009/01/15/12Z) comparatively reproduced actual temperature and height field at 10 hPa level. On the other hand, the predicted temperature of NICAM 14-day forecast (initial time: 2009/01/15/12Z) shows rather poor prediction. Furthermore, the warming peak reproduced by NICAM is about half of warming peak reproduced by JCDAS data. Zonal wind at 60N has changed from westerly to easterly on the about peak time. The predicted zonal mean zonal wind of GPV/GSM reproduced well up to 100 hour (4-5 day). The predicted zonal wind of NICAM underestimated the reality. But, both of forecast data couldn't predict major warming in late January 2009, because zonal wind didn't change to easterly.

We showed minor changes in temperature and height field at 10 hPa level predicted by NICAM. We suggest gravity waves as a possible cause of the minor change, because it is important to treat the gravity waves in stratosphere. In terms of both model study and observation study, behavior of gravity waves is very hard problem.

If we use NICAM in stratosphere, we have to consider effects of gravity waves.

It is very important to predict atmospheric blocking in Pacific for prediction of SSW. In this case, we consider that it is necessary to predict both atmospheric blocking of omega type and dipole type occurred just prior to SSW.

Key Words: stratospheric sudden warming, NICAM, atmospheric blocking, gravity wave

目次

Abstract	i
目次	iii
表目次	v
図目次	vi
1 序論	1
1.1 背景	1
1.2 成層圏突然昇温の予測可能性	2
1.3 目的	4
2 使用モデル	5
2.1 全球非静力雲解像モデル NICAM	5
2.2 NICAM の格子系	5
2.3 NICAM の方程式系	6
2.4 雲微物理スキーム	7
3 使用データと研究手法	8
3.1 対象とする事例	8
3.2 使用データ	8
3.3 研究手法	10
4 結果	13
4.1 成層圏突然昇温の再現	13
4.2 ブロッキングの再現	18
5 まとめと考察	22
5.1 成層圏突然昇温の再現実験	22
5.2 ブロッキングの再現実験	23
6 結論	24

謝辭	25
7 参考文献	26

表目次

1	成層圏突然昇温カレンダー	28
2	NICAM の水平解像度	29
3	NICAM の並列化	29

図目次

1	北緯 80 度, 10hPa 高度での帯状平均気温の時系列	30
2	北緯 60 度, 10hPa での帯状平均東西風の時系列	30
3	北緯 80 度での帯状平均気温の鉛直時系列	31
4	北緯 60 度での帯状平均東西風の鉛直時系列	32
5	10 hPa での北半球ジオポテンシャル高度	35
6	10 hPa での北半球の気温	38
7	帯状平均東西風の緯度-高度の断面図	41
8	EPFlux の緯度-高度の断面図	44
9	EPFlux の収束・発散の緯度-高度の断面図	47
10	500 hPa での北半球のジオポテンシャル高度	49
11	北半球の海面更正気圧	51
12	700 hPa での北半球の気温	53
13	850 hPa での北半球の比湿	55
14	ジオポテンシャル高度の緯度-高度の断面図	57
15	帯状平均気温の緯度-高度の断面図	59
16	帯状平均比湿の緯度-高度の断面図	61
17	ジオポテンシャル高度の帯状平均からの偏差の経度-高度断面図	63
18	気温の帯状平均からの偏差の経度-高度断面図	65

1 序論

1.1 背景

成層圏突然昇温は、世界気象機関 (WMO; World Meteorological Organization) の定義によると、極域成層圏で一週間以内で 25 K 以上気温が上昇する現象である。また、10hPa かそれ以下の高度領域で、帯状平均気温が緯度 60° より極側に向かって増大し、それに伴い上空の西風領域が東風領域に変化した場合、大昇温と呼ばれる。気温傾度の反転が起こっても、西風領域のままである場合は小昇温と呼ばれる。一般に、成層圏突然昇温と呼ばれる現象は大昇温のことを指している。

成層圏突然昇温を最初に提唱したのは、Scherhag (1952) である。ドイツ国内でのラジオゾンデによる一点観測で、成層圏で気温が数日で 40 K 以上上昇したのを発見した。当時はこの現象をベルリン現象と呼ばれ、これが後の成層圏突然昇温となる。

成層圏突然昇温の種類として、定義で紹介した大昇温、小昇温の他に、Canadian Warming、最終昇温がある。大昇温は 12月~1月で 2~3年に1回の発生しているが、集中して発生したり、全く発生しなくなったりしている。表1は、NCEP/NCAR再解析データを用いた大昇温の発生記録である。これをみると、大昇温は2000年代、1980年代、1960年代に多く発生しており、1970年代、1990年代はあまり発生していないのがわかる。また、大昇温は基本的にプラネタリー波の活発な北半球にしか発生しないが例外として2002年9月に南半球で大昇温が見られた。小昇温は、どちらの半球でもほぼ毎年発生しており、大昇温を発生しやすくする役割である Preconditioning を引き起こす。Preconditioning とは、Labitzke (1981) で提唱された現象で、極夜ジェットが極向きにシフトすることである。これが起こることによって、大昇温が引き起こされやすくなる。Canadian Warming は、アリューシャン高気圧の増幅に伴い発生する昇温のことを言い、主に11月~12月に発生する。最終昇温は、冬の西風領域が昇温で東風領域に変化し、そのまま翌冬まで戻らない(夏の東風領域に入る)ことを言い、主に2月~3月に発生する。

成層圏突然昇温の発生メカニズムは、Matsuno (1971) により提唱された「波による加速に対する非定常応答」で示されている。まず、対流圏でのプラネタリー波が何らかの影響で増幅して、鉛直方向に伝播する。それにより、東風平均流の加速(西風減速)が引き起こされる。西風減速に対してコリオリ力が弱まり、高度 30~50 km の上部成層圏で子午面循環が駆動される。極向きに駆動された子午面循環が極域でぶつかることにより、中間圏と下部成層圏に分散される。中間圏では断熱膨張で降温、下部成層圏では断熱圧縮で

昇温が引き起こされる。これが、成層圏突然昇温のメカニズムで、赤道域準 2 年周期振動のメカニズムと同様の「波と平均流の相互作用」である (Charney and Drazin 1961; 瓜生 1976)。

成層圏突然昇温の水平構造には波数 1 型と波数 2 型がある。10 hPa のジオポテンシャル高度でこの構造は明瞭に見られる。波数 1 型は、対流圏で波数 1 のプラネタリー波が鉛直伝播したときに発生し、極渦が極から移動しているように見えることから、一般に「極渦移動型」とも呼ばれている。波数 2 型は、対流圏で波数 2 のプラネタリー波が鉛直伝播したときに発生し、極渦が極で分裂しているように見えることから、一般に「極渦分裂型」とも呼ばれる。表 1 で示した成層圏突然昇温の発生スケジュールのうち、ほとんどは波数 1 型で波数 2 型はあまり発生していない。

南半球では北半球と違い、海に覆われ、土地起伏や熱コントラスト少ないので、活発なプラネタリー波が発生しにくく、あまり鉛直に伝播しない。そのことから、成層圏突然昇温は基本的に北半球でしか発生しないとされている。しかし、2002 年の 9 月に南半球で大規模な突然昇温が引き起こされた。成層圏突然昇温が発生した影響で、9 月に拡大のピークを迎えるオゾンホールが、例年と違い分裂して拡大が抑制された。この成層圏突然昇温が発生した原因はいまだ不明となっている。

成層圏突然昇温は、対流圏や成層圏の現象に大きな影響を与えている。例えば、対流圏では北極振動 (Arctic Oscillation: AO)、ブロッキング、エルニーニョ・南方振動 (El Niño Southern Oscillation: ENSO)、成層圏では、準 2 年周期振動 (Quasi-Biennial Oscillation: QBO)、太陽活動 11 年周期振動がある。ここでは、ブロッキングへの影響を紹介する。ブロッキングとは、対流圏中高緯度で発生する背の高い高気圧で、これが発生することで偏西風ジェットの流れが大きくなり、異常気象をもたらす。ブロッキング現象は、成層圏突然昇温の前兆現象と言われている。予測可能性の研究には非常に重要な役割を果たしている (Schoeberl 1978)。Martius et al. (2009) で、大西洋ブロッキングは波数 1 型の突然昇温の前兆現象で、太平洋ブロッキングは波数 2 型の突然昇温の前兆現象であることを、再解析データで示した。一方で、Taguchi (2008) では、ブロッキングと成層圏突然昇温との統計的な関連はないとしている。

1.2 成層圏突然昇温の予測可能性

数値モデルを用いて成層圏突然昇温の予測可能性を検証する実験が古くから行われている。予測可能性の研究では、前兆現象として言われているブロッキングの予測と Preconditioning の発生が非常に重要とされている。

Mechoso et al. (1985) では、カリフォルニア大学ロサンゼルス校 (UCLA) の大気大循環モデルを用いて、1979 年冬季の成層圏突然昇温の予測可能性を検証した。その結果、成層圏突然昇温の予測精度は、初期値、モデルの空間解像度、上部境界の高さに強く依存していることを示した。

その後、Mukougawa and Hirooka (2004) では、気象庁一ヶ月予報結果を用いて、1998 年 12 月の突然昇温の予測可能性を検証した。その結果、一ヶ月前からの成層圏突然昇温は予測が可能であることが示された。しかし、この結果は初期摂動を含んでいない結果であったため、正確ではなかった。そこで、Mukougawa et al. (2005) では、気象庁アンサンブル予報で初期摂動を含む全アンサンブルメンバーを用いて、2001 年の 12 月の成層圏突然昇温の予測可能性を検証している。その結果、約 3 週間前から成層圏突然昇温の予報が可能であることを示し、オンセット時の予測の初期値に対する鋭敏性が強いことも示した。これは、Preconditioning を含まない比較的単純な突然昇温であったが、一般には Preconditioning を伴うことが多いと言われている。そこで、廣岡ほか (2006) では、Mukougawa et al. (2005) の事例と 2003/2004 の Preconditioning を含む複雑な事例の比較を行った。結果、Preconditioning がある場合は、予測は 9 日くらいで、Mukougawa et al. (2005) の事例よりも困難であることを示した。

また、一丸ほか (2009) では、2009 年 1 月の大規模波数 2 型成層圏突然昇温についても、気象庁アンサンブル予報データを用いて、予測可能性の検証を行っている。その結果、ピークの約 1 週間前を初期値とした場合、気温は比較的再現されていたが、東西風はほとんど再現されていなかった。今後は、東西風のより正確な再現とその直前に発生するブロッキングの正確な再現が課題となっている。

1.3 目的

本研究では、最新の全球非静力雲解像モデル NICAM を用いて、一丸ほか (2009) と同じ事例の 2009 年 1 月の成層圏突然昇温を対象にして、再現実験を行った。

筑波大学計算科学研究センターでは、高緯度の NICAM の数値実験として、順圧な構造を持っているブロッキングと北極低気圧を対象にして研究を行ってきている。それらの結果から、ブロッキングと北極低気圧は、下部成層圏での断熱圧縮による暖気塊の発生が重要であることを示した。ここでは、同様の発生要因である成層圏突然昇温をターゲットにして、再現実験を試みた。

NICAM は最新のモデルで、物理過程はまだ開発途上である。そこで、様々な基礎的解析を行い、欠点を発見・改善することが期待されている。成層圏では、低解像度の NICAM では不具合が発生すると言われており、また、高解像度の他のモデルでは、成層圏で重力波が顕著に見られると言われている。

よって、この研究で期待したい成果は次の 2 点である。

1. 気象庁の現業モデルでは、ほとんど再現されなかった、東西風の予測の改善。
2. 雲がほとんど発生しない成層圏での高解像度 NICAM の振る舞いについての診断。

2 使用モデル

2.1 全球非静力雲解像モデル NICAM

従来の大気大循環モデル (Atmospheric General Circulation Model; AGCM) では、格子間隔が非常に大きいため、雲のモデリングが非常に困難である。そこで、海洋研究開発機構・地球環境フロンティアセンター (JAMSTEC) では、東京大学気候システム研究センター (現東京大学海洋研究所; AORI) の協力の下で超高解像度大気大循環モデル NICAM の開発を行った。

NICAM の最大の特徴は、細かい雲を直接表現できることである。従来の AGCM では、直接雲を表現できるほどの解像度がなく、非静力学方程式系の積雲パラメタリゼーションで雲の効果を取り入れており、これは気候に対して非常に不確かな情報をもたらしていると指摘されている。そこで NICAM では、積雲パラメタリゼーションを入れず、雲を直接解像できるように開発が進められてきた。単純に水平格子間隔を小さくするだけでは、水平格子系と使用する方程式系の 2 つの問題が発生してくる。NICAM ではこの問題を改善するため、水平格子に球面に一様に分布する正二十面体格子を採用し、方程式系に全く近似のない力学方程式を採用した。また、その力学コアには、放射、乱流、雲微物理過程等を実装している。モデルの名称はこれらの特徴から、Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model(NICAM) となった。

次の節から、格子系、方程式系と雲物理スキームについて解説する。

2.2 NICAM の格子系

開発初期の AGCM では、格子系に緯度・経度格子点法が用いられた。この方法では、極に近づくほど格子間隔が狭くなる極問題が発生してきてしまい、極付近では格子を間引くなどの方法が取られてきた。しかし、これは、誤差が大きくなってしまった問題が発生してしまう。

現在の多くの AGCM に使用されているのが、擬スペクトル法 (変換法) である。この方法では、時間ごとに球面スペクトルと格子間のルジャンドル変換をしなければならないので、高解像度の計算では計算量が非常に増えてしまい、限界がきてしまうといわれている。

そこで NICAM では、これらの問題を解決するため、一様性に優れている正二十面体格子を採用した。正二十面体の 20 個それぞれの三角形を、さらに 4 つの三角形に分割し

ていき，細かい格子系を得ていく．正二十面体のときを $glevel-0$ とし，一回分割し解像度をあげると， $glevel-1$ となる．この方法を繰り返していき，高解像度の格子を作成していく．表 2 に示すのは， $glevel$ と水平格子間隔の関係である．しかし，正二十面体格子を採用したモデルにも問題があると言われている．単純に三角形を分割して得られた三角形の面積分布はフラクタル的で，計算の不安定性の要因となっている．そこで，NICAM では格子間をバネでつなぎ，バネ力学を作用させることで，格子幅が単調に変化する格子分布を得る方法を採用した．これにより，計算の安定性が得られた．

全球の格子点の数を $glevel$ という指標で表すのに対し，計算機で並列処理をする際に全球を分割して各プロセスが処理する計算領域を $rlevel$ と呼ばれる指標であらわす．正二十面体の 2 つの三角形をあわせた四角形でデータ行列として定義すると，10 の領域に分割され，これを $rlevel-0$ とする． $glevel$ と同様に 4 つに分割していくと， $rlevel$ は表 3 のよう分割される． $glevel$ と $rlevel$ の差を取ると，各プロセスが処理する問題の規模が決定される．現在，T2K-Tsukuba では最大で $glevel$ が 10 で $rlevel-4$ が実行されている．

2.3 NICAM の方程式系

NICAM の支配方程式系は，近似がない完全圧縮系の音波を含む方程式系を用いている．従来の非静力学モデルでは，短時間積分に用いられることが多く，質量やエネルギーの保存性があまり重要視されていなかった．しかし，気候的な長期積分を行う予定であるので，質量・エネルギーの保存性を満たし，熱力学的に整合的な定式化を行っている．NICAM では，これを実現するため，質量と全エネルギーをフラックス形式の有限体積法で積分を行った．

時間積分法には，並列効率に優れた点から音波の水平分布を陽的に，垂直伝播を陰的に扱い，現象の時間スケールに応じて時間ステップを長短組み合わせる時間分割法を用いた．

物理変数は，密度の摂動場，気圧の摂動場，水平速度ベクトル，鉛直速度，内部エネルギーの顕熱部分，水の状態別の比湿に関する量で，支配方程式には，全密度における連続の式，水平・鉛直方向の運動方程式、内部エネルギーの顕熱部分における方程式、水の状態別における連続の式から成り立っている．また，その他の物理過程として，放射・境界層・陸面過程を導入している．

支配方程式の具体的な説明は，Sato et al. (2008) を参照．

2.4 雲微物理スキーム

NICAM では、積雲パラメタリゼーションや大規模凝結に代わり、雲や降水の生成を計算する雲物理スキームが必要とされている。雲微物理スキームには、g98(Grabowski 1998) や NSW6(Tomita 2008) など様々な種類がある。本研究では、簡単なスキームである g98 を使用した。これは、水物質 3 カテゴリーで温度によって氷相/液相を区別している。

g98 の具体的な説明は Grabowski (1998) を参照。

3 使用データと研究手法

3.1 対象とする事例

本研究で対象とする事例は，2009 年 1 月の波数 2 型成層圏突然昇温である．非常に大きい波数 2 型の大規模突然昇温は，今回を含めここ 30 年で 3 回しか起きていない非常にまれな現象である．また，対象とする現象は，過去の 2 回の昇温に比べ対流圏から成層圏への波数 2 のプラネタリー波の鉛直伝播がはるかに大きかった．一丸ほか (2009) では，気象庁一ヶ月アンサンブル予報を用いて，2009 年 1 月の波数 2 型成層圏突然昇温の特徴と予測可能性をまとめている．その結果，2009 年 1 月 14 日，15 日を初期値としたとき，帯状平均気温の予報は比較的再現できたが，帯状平均東西風は全く再現されていなかった．

本研究では，2009 年 1 月 15 日 12Z を初期値，glevel-10(水平解像度 7km)，積分期間を 15 日として，シミュレーションを行った．初期値には，2009 年 1 月 15 日 12Z の全球 η 面ガウス解析値を用いて作成している．全球 η 面ガウス解析値の鉛直 60 層を NICAM の格子系に変換して作成している．全球 η 面ガウス解析値は，東西格子 1920 個，南北格子 960 個と非常に格子間隔が小さいデータセットである．JMA/GSM などのデータセットと比べ，細かい格子間隔であるため，NICAM の格子間隔により近いので，初期値としてふさわしいデータセットであるといえる．

3.2 使用データ

NICAMglevel-10 の予報値と比較するデータとして，NCEP/NCAR 再解析データ，JCDAS データ，JMA/GPV/GSM 解析値，JMA/GPV/GSM 予報値を使用した．NCEP/NCAR 再解析データ，JCDAS データ，JMA/GPV/GSM 解析値は現実の値として使用している．ここでは，本研究で使用したデータの解説を行う．

3.2.1 NCEP/NCAR 再解析データ

アメリカ合衆国商務省海洋大気圏局 (NOAA) の国立環境予報センター (NCEP) とアメリカ大気研究センター (NCAR) で行われている再解析プロジェクトである．1948 年 1 月 1 日からスタートし，現在まで行われており，2009 年 1 月のデータを使用した．時間間隔は 6 時間，1 日，1 月があり，6 時間間隔を使用した．鉛直レベルは，1000hPa から 10hPa までの 17 層で，10hPa 高度のみを使用した．水平格子間隔は 2.5 度グリッドと

なっている。データ形式は netCDF である。

3.2.2 JCDAS データ

JCDAS データは、2005 年 1 月から運用された気象庁気候データ同化システムで、それ以前は JRA-25 と呼ばれる長期再解析データである。JRA-25 は、気象庁と電力中央研究所で行われた再解析プロジェクトである。1979 年 1 月から 2004 年 12 月の 26 年間で再解析を行い、その後、JCDAS データへと引き継がれ現在まで行われている。2009 年の 1 月のデータを解析したため、JCDAS のデータを本研究では使用している。時間間隔は 6 時間のデータを使用した。鉛直レベルは、1000hPa から 0.4hPa までの 23 層で、17 層までのデータを主に使用した。水平格子間隔は 2.5 度グリッドのものを使用した。データ形式は Grib 形式である。

NICAM のデータとの比較した、現実の値としては主にこのデータを使用している。

3.2.3 JMA/GPV/GSM 解析値

気象庁の全球数値予報モデル (GPV/GSM) によって作成されたデータである。2002 年 5 月 15 日から運用されており、2 度モデル更新されている。使用した 2009 年 1 月のデータは、2007 年 11 月 21 日から運用されている形式で提供されている。時間間隔は、6 時間で、1 日 4 回を初期値としてそれぞれ予報値を作成している。格子系は、地上から 100hPa までが、0.5 度グリッド、70hPa から 10hPa までが 1.0 グリッド間隔となっている。鉛直レベルは、NCEP/NCAR 再解析と同じ、17 層である。気象業務支援センターからダウンロードでき、データ形式は Grib2 形式である。

本研究での解析値は、各時間における予報値の 0 時間を集めて作成している。

3.2.4 JMA/GPV/GSM 予報値

JMA/GPV/GSM 解析値と同じ、気象庁の全球数値予報モデル (GPV/GSM) によって作成されたデータである。予報時間は 00Z, 06Z, 12Z, 18Z の一日 4 回で、6 時間間隔の 84 時間予報を行っている。ただし、12Z のときだけ、12 時間間隔の 96 時間から 192 時間予報を行っている。

本研究で使用したのは、2009 年 1 月 15 日 12Z を初期値とする 192 時間予報である。

3.2.5 NICAMglevel-10 予報値

筑波大学計算科学研究センターの T2K-Tsukuba で走った NICAM の出力結果である。本研究で使用したのは、2009 年 1 月 15 日 12Z を初期値とする 6 時間間隔の 354 時間予

報である．鉛直レベルは，NCEP/NCAR 再解析と同じ，17 層である．rlevel-4 で並列化して走った水平解像度が 7 km の glevel-10 を使用した．

3.3 研究手法

まず，NICAM での再現実験がどれくらい正確であったのかを確認するため，全ての使用データを用いて，成層圏での帯状平均気温を比較した．また，水平構造についても全ての使用データを用いて構造を把握した．

次に，Preconditioning が発生しているのかを確認するため，極夜ジェットに着目をして解析を行い，極夜ジェットがどのように崩れていったのかを調べた．また，エネルギーがどのくらい上空に輸送されているかを調べるため，EP Flux を用いて解析を行った．これらは，NICAM のデータと JCDAS データを比較して，研究を行った．

最後に，プラネタリー波を上空に伝播する原因とされるかもしれない北米西岸に発生したブロッキングについても，高度，気温，風速，鉛直 p 速度，比湿に関して，簡単な解析をした．

この節では，解析に使用した要素について説明した．

3.3.1 EP Flux

EP Flux は光吉 (2007) を参考にして計算している．

EP Flux は次の式のように表される．

$$\mathbf{F} = \left(-\overline{u'v'}, \hat{f} \frac{\overline{v'\Phi'_z}}{S} \right) = \left(-\overline{u'v'}, \hat{f} R \frac{\overline{v'T'}}{S} \right) \quad (1)$$

各種要素の設定は，以下の表にあらわした．

u	東西風
v	南北風
T	気温
S	静的安定度のパラメータ
f	コリオリパラメータ
R	気体定数
θ	緯度
Ω	地球の自転角速度
ρ_0	大気密度
c_p	定圧比熱

東西風，南北風，気温の摂動をとると，

$$u = \bar{u} + u' \quad (2)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (3)$$

$$T = \bar{T} + T' \quad (4)$$

となる．コリオリパラメータは，

$$f = 2\Omega \sin \theta \quad (5)$$

としている．

水平成分は西風運動量の南北フラックス，鉛直成分は温位の南北フラックスをあらわしている．西風運動量は，EP Flux と逆向きに輸送される．顕熱は，EP Flux が上向きするとき北に輸送され，下向きするとき南に輸送される．

次に EP Flux の収束・発散について説明する．単純に EP Flux の発散を取ったもので，式は以下ようになる．

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{1}{\cos \theta} \frac{\partial}{\partial y} (\cos \theta F_y) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_0 F_z) \quad (6)$$

3.3.2 海面更正気圧

次に，ブロッキングの解析に用いた海面更正気圧について説明する．海面更正気圧とは，天気図が作成されるときに用いられる気圧である．気温減率が同じであると仮定し，1000hPa 面の気温と高度から近似的に推定気圧を求めている．海面更正気圧は， g を重力加速度， ρ を密度， z を高度， p を気圧， R を気体定数， T を気温とし，静力学平衡の式と状態方程式から求められる．途中，気温減率の式と 1000hPa 面での気温の式も使用する．

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (7)$$

$$p = \rho RT \quad (8)$$

$$\gamma = -\frac{\partial T}{\partial z} \quad (9)$$

$$T = T_0 + \gamma z \quad (10)$$

以上の式から，海面更正気圧の計算式は，

$$p_0 = p \left(1 + \frac{\gamma z}{T - \gamma z} \right)^{\frac{g}{R\gamma}} \quad (11)$$

となる．本研究では，全球一様の気温減率と仮定し， -0.0065 [K/m] とした

4 結果

この章では、2009年1月に発生した成層圏突然昇温を各種のデータを用いて比較した結果を紹介する。次の節では成層圏突然昇温の本体の再現性を確認し詳しい解析を行った結果を、その次の節では成層圏突然昇温の前に発生したブロッキングの再現性を確認し簡単な解析結果を紹介する。

4.1 成層圏突然昇温の再現

4.1.1 帯状平均の時系列

まず、気温、東西風の要素の帯状平均を取り、解析を行った。

図1は、北緯80度、10hPa高度での帯状平均気温の時系列である。横軸は時間で、2009年1月1日00Zを0時間とし、2009年1月31日18Zまでを単位hourであらわしている。以下の記述では、時間は日付で示す。縦軸は気温をあらわしており、単位はケルビンである。細実線がNCEP/NCAR再解析データ、細破線がJCDASデータ、細点線がJMA/GPV/GSM解析値、太点線がJMA/GPV/GSM予報値、太一点破線がNICAMglevel-10をあらわしている。この結果によると、NCEP/NCAR再解析データ、JCDASデータ、JMA/GPV/GSM解析値では、1月17日(400時間)あたりから急激な気温の上昇が見られる。NCEP/NCAR再解析データでは、昇温のピークは1月23日00Z(530時間)あたりで、200Kから260Kまで約60Kの昇温がみられている。一方、JCDASデータ、JMA/GPV/GSM解析値では、昇温のピークは1月23日12Z(540時間)あたりで、200Kから270Kまで約70Kの昇温がみられる。このことから、同じ再解析したデータでも、昇温のピークや昇温の大きさに違いが現れており、どちらの値がより正確であるかは、観測の少ない成層圏では判断が難しいと思われる。次に、予報値の方を見ていく。JMA/GPV/GSM予報値は、比較的再解析データの結果を再現できている。しかし、1月23日00Z(500時間)を過ぎると、昇温が止まってしまい、NCEP/NCAR再解析データの値にわずかにとどかなかった。結局、昇温は200Kから250Kまでの約50Kの昇温となった。NICAMglevel-10は、JMA/GPV/GSM予報値にくらべ、あまり再現性がよくないことがわかる。昇温開始は、初期値のあとすぐに始まり、また、昇温ピークは1月21日12Z(490時間)で、200Kから240Kまでの約40Kの昇温であった。このことから、NICAMglevel-10では、昇温開始、昇温ピークともに他のデータよりも約2日早く予報してしまっていることがわかる。

図 2 は、北緯 60 度、10hPa での帯状平均東西風の時系列である。横軸は時間で、帯状平均気温の図と同様に 2009 年 1 月 1 日 00Z を 0 時間とし、2009 年 1 月 31 日 18Z までを単位 hour であらわしている。縦軸は、東西風の風速をあらわしており、単位は m/s である。縦軸の正の領域は西風領域で、負の領域は東風領域をあらわす。帯状平均気温の図と同様に、細実線が NCEP/NCAR 再解析データ、細破線が JCDAS データ、細点線が JMA/GPV/GSM 解析値、太点線が JMA/GPV/GSM 予報値、太一点破線が NICAMglevel-10 をあらわしており、また、太実線で 0 線を引き、西風領域と東風領域を分けている。この結果より、NCEP/NCAR 再解析データ、JCDAS データ、JMA/GPV/GSM 解析値は気温の時と違いほとんど同じ振る舞いを見せている。違いは、1 月 17 日 12Z(390 時間) あたりにできる西風加速が、NCEP/NCAR 再解析データでは若干大きくなっているくらいである。東西風が西風から東風に変化するのは、1 月 24 日 00Z(550 時間) あたりで、東風のピークは、1 月 29 日 00Z(670 時間) あたりである。

次に予報値の方をみていく。JMA/GPV/GSM 予報値は、1 月 19 日 18Z(450 時間) あたりまで、比較的再現できているが、それ以降は、西風減速が 20 m/s で止まってしまい、ほとんど横ばいになった。NICAMglevel-10 は、390 時間あたりのわずかな西風加速が再現できておらず、初期値から 1 日くらいですぐに西風減速が始まった。NICAMglevel-10 で JMA/GPV/GSM 予報値と同じ 1 月 19 日 18Z(450 時間) あたりで、西風減速が、10 m/s で止まってしまい、ほとんど横ばいとなった。この結果から、NICAMglevel-10 は、JMA/GPV/GSM 予報値とくらべ西風減速は進行したが、早く西風減速が始まっていた。また、どちらの予報値も東西風の反転までには至らなかった。

図 3 は、北緯 80 度での帯状平均気温の鉛直時系列である。上図が JCDAS データで、下図が NICAMglevel-10 データである。横軸は時間で、図 1、図 2 と同様に、2009 年 1 月 1 日 00Z を 0 時間とし、2009 年 1 月 31 日 18Z までを単位 hour であらわしている。縦軸は気圧で、1000 hPa から 10 hPa までを対数軸であらわしている。コンター間隔は 3 K でアノテーション間隔は 6 K としている。JCDAS データの結果をみると、1 月 23 日 12Z(540 時間) から 1 月 24 日 06Z(560 時間) の間でピークをむかえた後、対流圏に向けて高温域が下がってきているのがわかる。一方、NICAMglevel-10 データの結果をみると、1 月 21 日 00Z(480 時間) から 1 月 21 日 18Z(500 時間) の間でピークをむかえた後、対流圏に向けてほとんど影響を与えず、20 hPa 以上の領域で高温域が留まっているのがわかる。

図 4 は、北緯 60 度での帯状平均東西風の鉛直時系列である。図 3 と同様に、上図が JCDAS データで、下図が NICAMglevel-10 データである。横軸は時間で、図 3 と同じである。縦軸も図 3 と同じ、気圧を対数軸で取っている。コンター間隔は 2 m/s でアノテー

ション間隔は 4 m/s としている。JCDAS データの結果をみると、1 月 17 日 18Z(400 時間) あたりから西風減速がみられ、1 月 24 日 00Z(550 時間) あたりで反転が起こっており、それらの影響は気温と違いあまり対流圏まで降りてこず、影響しているのは 50 hPa くらいまでである。また、20 hPa から 50 hPa、500 時間から 550 時間の領域で若干の西風加速がみられる。一方、NICAMglevel-10 データの結果をみると、初期値の後、1 日くらいから西風減速が始まっている。その影響は 100 hPa くらいまで影響している。後半の、東風領域は全く現れておらず、むしろ西風が若干戻り始めているように見える。また、JCDAS データでみられた 20 hPa から 50 hPa、500 時間から 550 時間の領域での西風加速は、NICAMglevel-10 データの結果からも、若干であるがみられた。予報時間が後半になると、東西風は JCDAS データと NICAMglevel-10 データで全く違う振る舞いをみせている。

4.1.2 水平構造

次に、高度場と気温場の水平構造についてみていく。

図 5 は、10 hPa での北半球の高度場である。左の列から、NCEP/NCAR 再解析データ、JCDAS データ、JMA/GPV/GSM 予報値、NICAMglevel-10 予報値となっている。行は上から、2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 29 日 12Z まであらわしている。ただし、JMA/GPV/GSM 予報値は、8 日予報なので 23 日までをあらわしている。コンター間隔は 200 m、アノテーション間隔は 400 m である。シェードは帯状平均からの差をあらわしている。NCEP/NCAR 再解析データと JCDAS データの結果から、突然昇温の初期段階 (2009 年 1 月 15 日 12Z) では、極では低圧となっており、その低圧域は北米大陸からユーラシア大陸に向かって伸びている。突然昇温の発達期 (17 日から 22 日) になると、太平洋とヨーロッパに高圧域があらわれてきて、極にある低圧域を徐々に変形させてきている。突然昇温の最盛期 (23 日から 24 日) になると、極にあった低圧域は完全に分裂してしまい、きれいな波数 2 型の構造をみることができる。突然昇温の衰弱期 (24 日以降) になると、極付近では高圧の領域が支配的となった。次に予報値と解析値を比較してみていく。突然昇温の初期段階 (2009 年 1 月 15 日 12Z) では、どのデータもほぼ同じような構造である。突然昇温の発達期 (17 日から 22 日) になると、JMA/GPV/GSM 予報値は比較的再現できているように見える。一方で、NICAMglevel-10 予報値は、低圧域の変形はみられるが、ヨーロッパと太平洋の高圧域は他のデータとくらべ、非常に弱くなっている。突然昇温の最盛期 (23 日から 24 日) になると、JMA/GPV/GSM 予報値はほとんど発達期から変わらず、低圧域の分裂は見られなかった。NICAMglevel-10 予報値は、極にあった低圧域の分裂はみられたが、シベリアの低圧域は弱まっていき、太平洋と

ヨーロッパの高圧域はほとんど見えなくなった。NCEP/NCAR 再解析データ, JCDAS データと比較すると, この時点ではどちらの予報値もほとんど再現されていない。突然昇温の衰弱期 (24 日以降) になると, NICAMglevel-10 予報値は, 北米大陸に弱い低圧域だけが残っているだけで, 全く違う構造を示している。

図 6 は, 10hPa 面での北半球の気温場である。図 5 と同様に, 左の列から, NCEP/NCAR 再解析データ, JCDAS データ, JMA/GPV/GSM 予報値, NICAMglevel-10 予報値となっており, 行は上から, 2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 29 日 12Z までをあらわしている。コンター間隔は 5 K, アノテーション間隔は 10 K である。シェードは帯状平均からの差をあらわしている。NCEP/NCAR 再解析データと JCDAS データの結果から, 突然昇温の初期段階 (2009 年 1 月 15 日 12Z) では, 極付近は北米大陸からユーラシア大陸へと低温域で覆われているが, 太平洋と大西洋で高温域が少しずつ見えてきている。突然昇温の発達期 (17 日から 22 日) になると, 大西洋側の高温域が非常に強くなっているのがわかり, 極に広がっていた低温域が分裂し始めていて, 北米大陸からユーラシア大陸で強い低温域を形成している。また, 高温域は極に向かって拡大してきている。突然昇温の最盛期 (23 日から 24 日) になると, 大西洋と太平洋にあった高温域が極にあった低温域を分裂させ, 極域に大きく広がっている。突然昇温の衰弱期 (24 日以降) になると, 強い高温域は北米大陸で弱まっていき, 極に向けて低温域が再び戻り始めている。また, シベリアで再び高温域があらわれてきている。

次に予報値と解析値を比較してみていく。突然昇温の初期段階 (2009 年 1 月 15 日 12Z) では, どのデータもほぼ同じような構造である。突然昇温の発達期 (17 日から 22 日) になると, JMA/GPV/GSM 予報値は比較的再現できているように見える。一方で, NICAMglevel-10 予報値では, 全体的に細かい変動がみられる。シェードから, 大西洋の高温域と北米大陸の低温域は若干みられるが, 太平洋の高温域とユーラシア大陸の低温域はほとんどみられない。突然昇温の最盛期 (23 日から 24 日) になると, JMA/GPV/GSM 予報値は極付近の高温域の広がりが小さく, シベリアの低温域が強く現れている。NICAMglevel-10 予報値では, シベリアで高温域がみられ, 極域ではブーメラン状の高温域が現れている。突然昇温の衰弱期 (24 日以降) になると, NICAMglevel-10 予報値は, 最盛期からあまり変わらずにいる。

水平構造についてまとめると, NICAMglevel-10 予報値は, 高度場で極渦の分裂がみられるが波数 2 の構造はほとんど崩れかけている。気温場では, 細かい変動が現れてきていて, コンターでは構造がほとんど見えない。

4.1.3 極夜ジェット

次に極夜ジェットに着目して、極夜ジェットの振る舞いを調べた。極夜ジェットとは、高緯度地域の成層圏・中間圏で発生する強い西風のことである。発生要因は、冬季に日射が弱まり極域が冷やされ、温度傾度が発生し、その温度風により西風が発生する。

図7は、帯状平均東西風の緯度-高度の断面図である。横からみて、上図がJCDASデータで、下図がNICAMglevel-10予報値である。左から2009年1月15日12Zから1日ごとに2009年1月29日12Zまでをあらわしている。横軸は緯度で、北半球のみをあらわしている。縦軸は気圧で、1000 hPaから10 hPaまでを対数軸であらわしている。突然昇温の初期段階(2009年1月15日12Z)の図から、極夜ジェットは北緯65度あたりの10 hPaにみえる強い西風で100 hPaくらいまで影響を与えている。突然昇温の発達期(17日から22日)になると、極夜ジェットは極方向に向かって移動し、初期段階よりも弱くなってきており、50 hPaくらいまでしか影響を与えていない。また、JCDASデータにくらべ、NICAMglevel-10予報値の方が早く極に向かって進んでいる。突然昇温の最盛期(23日から24日)になると、JCDASデータでは極夜ジェットがほとんど見えなくなっている。NICAMglevel-10予報値では、北緯75度より北の領域で極夜ジェットが反転して、東風領域がみられる。突然昇温の衰弱期(24日以降)になると、JCDASデータでは北緯70度で極夜ジェットが完全に反転して、東風領域がみられる。それは、100 hPa付近まで影響を与えている。NICAMglevel-10予報値では、最盛期に見えていた東風領域は見えなくなり、極夜ジェットは西風領域が徐々に回復傾向にあることがわかる。

極夜ジェットについてまとめると、NICAMglevel-10予報値は、最盛期の北緯75度より北で東風に反転しているが、すぐに戻ってしまい、極夜ジェットは回復傾向がみられる。

4.1.4 EP Flux

次に、成層圏突然昇温発生時の波のエネルギーの輸送がどうなっているのかをみるため、EP Fluxを用いて解析を行った。

図8は、EP Fluxの緯度-高度の断面図である。上図がJCDASデータで、下図がNICAMglevel-10予報値である。行は、左から2009年1月15日12Zから1日ごとに2009年1月29日12Zまでをあらわしている。横軸は緯度で、北半球のみをあらわしている。縦軸は気圧で、1000 hPaから10 hPaまでを対数軸であらわしている。突然昇温の初期段階(2009年1月15日12Z)の図から、EP Fluxは、北緯45度から北緯60度で対流圏と成層圏で鉛直方向へのエネルギー輸送がみられる。成層圏では、鉛直方向のエネルギー輸送は、上層にいくほど強くなっている。突然昇温の発達期(17日から22日)

になると、対流圏での鉛直方向へのエネルギー輸送が、非常に弱くなっている。一方、成層圏では、鉛直方向へのエネルギー輸送が非常に強くなっている。突然昇温の最盛期(23日から24日)になると、対流圏では初期段階にみられたエネルギーの鉛直伝播が再びみられる。成層圏では、JCDAS データでは発達期より弱くなっているが鉛直方向にエネルギーが輸送されている。しかし、NICAMglevel-10 予報値では、成層圏で EP Flux がほとんど見えなくなってしまう、完全にエネルギー輸送が止まっている、突然昇温の衰弱期(24日以降)になると、JCDAS データでは鉛直方向へのエネルギー輸送が見られるが、NICAMglevel-10 予報値では、以前エネルギー輸送が止まったままである。

図9は、EP Flux の収束・発散の緯度-高度の断面図である。左図が JCDAS データで、右図が NICAMglevel-10 予報値である。行は、上から 2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 29 日 12Z までをあらわしている。横軸は緯度で、北半球のみをあらわしている。縦軸は気圧で、1000 hPa から 10 hPa までを対数軸であらわしている。正の領域が発散で、負の領域が収束である。突然昇温の初期段階(2009 年 1 月 15 日 12Z)の図から、200 hPa の中緯度と 10 hPa の高緯度で発散がみられ、200 hPa 中緯度の発散領域の周辺と 10 hPa の中低緯度で収束がみられる。突然昇温の発達期(17日から22日)になると、JCDAS データでは、200 hPa、中緯度の発散領域が広がり、10 hPa の高緯度での発散領域とつながっている。一方、NICAMglevel-10 予報値では、全体的に細かい変動がみられてきている。突然昇温の最盛期(23日から24日)になると、JCDAS データでは、10 hPa の高緯度で収束、中緯度で発散がみられる。NICAMglevel-10 予報値では、以前、全体的に細かい変動がみられてきている。突然昇温の衰弱期(24日以降)になると、JCDAS データでは、10 hPa ではほとんど収束している。NICAMglevel-10 予報値では、最後まで全体的に細かい変動がみられてきている。

以上、EP Flux についてまとめると、NICAMglevel-10 予報値は、EP Flux が発達途中で止まってしまう、エネルギーを鉛直に輸送しなくなる。収束・発散では、初期値のあとすぐに、細かい変動が現れてしまい、図をみてもわかりづらい結果となった。

4.2 ブロッキングの再現

2009 年 1 月に大規模な突然昇温が発生する直前に、対流圏ではブロッキングが発生していた。Martius et al. (2009) で、ブロッキングは成層圏突然昇温の前兆現象であるとしている。今回の事例では、太平洋でブロッキングが発生し、波数 2 型の大型突然昇温が発生しており、これは Martius et al. (2009) で示された結果と同じである。よって、この章では、2009 年 1 月 19 日に北米大陸の西岸付近で発生しているブロッキングを NICAM

で再現できているのかを簡単な解析で確かめる。

4.2.1 ブロッキングの水平構造

ここでは、2009年1月19日に北米大陸の西岸付近で発生しているブロッキングの水平構造を500 hPaの高度場、海面更正気圧、700 hPaの気温場、850 hPaの比湿場の4つの観点から再現性を調べる。

図10は、500 hPaでの北半球のジオポテンシャル高度である。左図がJCDASデータ、右図がNICAMglevel-10予報値をあらわす。上から、2009年1月15日12Zから1日ごとに2009年1月22日12Zまでをあらわす。コンター間隔は50でm、アノテーション間隔は100mである。今回は、ブロッキングに焦点を当てたため、2009年1月22日12Zまで図に示した。2009年1月15日12Zの図から、JCDASデータ、NICAMglevel-10予報値ともに、すでに北米大陸の西岸で偏西風が大きく蛇行して、ブロッキングもすでに見え始めている。その後も、北米大陸西岸で発生したブロッキングは、19日までずっと強さを保ったままほとんど同じ場所で維持されている。ブロッキングのパターンは、切離低気圧が見えないので、オメガ型であることがわかる。20日過ぎると、ブロッキングは崩壊し始めて、徐々に減衰していく。しかし、アラスカで再び偏西風が蛇行し始め、弱い双極子型のブロッキングができてきている。NICAMglevel-10予報値では、そのブロッキングはあまり予報できていない。JCDASデータとNICAMglevel-10予報値を比較すると、巨大なオメガ型のブロッキングはNICAMでも再現できているが、その後の双極子型の再現性があまりよくない。

図11は、北半球の海面更正気圧である。左図がJCDASデータ、右図がNICAMglevel-10予報値をあらわす。上から、2009年1月15日12Zから1日ごとに2009年1月22日12Zまでをあらわす。コンター間隔は4 hPaで、アノテーション間隔は8 hPaである。15日から19日の図から、ブロッキングができていた間は、北米大陸で高気圧が形成されている。海面更正気圧の図からも切離低気圧は確認することができず、ブロッキングの型はオメガ型であることがわかる。JCDASデータと比較すると、NICAMglevel-10予報値は比較的よく再現できているといえるが、NICAMglevel-10予報値では、所々で急激な変動が現れている。これは、グリーンランドや大きい山脈があるところで起きているので、地形の影響であるといえる。

図12は、北半球の700 hPaの気温である。左図がJCDASデータ、右図がNICAMglevel-10予報値をあらわす。上から、2009年1月15日12Zから1日ごとに2009年1月22日12Zまでをあらわす。コンター間隔は2 Kで、アノテーション間隔は4 Kである。15日から19日の図から、ブロッキングができていた場所では高

温域となっている。ブロッキングが形成されていた期間は比較的再現されているが、NICAMglevel-10 予報値のほうが1日早く、ブロッキングに伴う高温域が崩れている。21日以降の双極子型のブロッキングによる高温域はあまり再現されていない。また、全体的にNICAMglevel-10 予報値では細かい変動が見られ始めているのが確認できる。

図13は、北半球の850 hPaの比湿である。左図がJCDASデータ、右図がNICAMglevel-10 予報値をあらわす。上から、2009年1月15日12Zから1日ごとに2009年1月22日12Zまでをあらわす。コンター間隔は1 g/kgで、アノテーション間隔は2 g/kgである。15日から19日の図から、ブロッキングができていた期間には比湿は極向きに伸びているのがわかる。NICAMglevel-10 予報値は、22日まで比較的よく再現されているのがわかる。

4.2.2 ブロッキングの鉛直構造

次に、ブロッキングの鉛直構造についてみていく。ここでは、ジオポテンシャル高度、帯状平均気温、帯状平均比湿の鉛直構造がどれくらい再現できているのかを調べた。

図14は、ジオポテンシャル高度の等圧面平均からの偏差の鉛直構造である。横からみて、上図がJCDASデータで、下図がNICAMglevel-10 予報値である。左から2009年1月15日12Zから1日ごとに2009年1月22日12Zまでをあらわしている。横軸が緯度、縦軸が気圧となっている。縦軸の気圧は、1000 hPaから10 hPaまでとした。ジオポテンシャル高度は、全球平均からの偏差を取っている。高緯度対流圏では、帯状平均ジオポテンシャル高度は常に負偏差の領域に覆われており、ピークもほとんど存在していない。JCDASデータ、NICAMglevel-10 予報値ともに大きな違いがあまりあらず、比較的再現されている。

図15は、帯状平均気温の鉛直構造である。横からみて、上図がJCDASデータで、下図がNICAMglevel-10 予報値である。左から2009年1月15日12Zから1日ごとに2009年1月22日12Zまでをあらわしている。横軸が緯度、縦軸が気圧となっている。縦軸の気圧は、1000 hPaから10 hPaまでとした。高緯度では成層圏で非常に強い低温域が見られるが、時間が進に連れ徐々に弱くなっている。対流圏では、ブロッキングの影響で、低中緯度の高温域が極の方に伸びてきている。これらは、JCDASデータ、NICAMglevel-10 予報値ともにみることができ、比較的再現されている。22日になると、高高度で、成層圏突然昇温の高温域がみられるようになった。また、NICAMglevel-10 予報値では、全体的に細かい変動がみられる。

図16は、帯状平均比湿の鉛直構造である。横からみて、上図がJCDASデータで、下図がNICAMglevel-10 予報値である。左から2009年1月15日12Zから1日ごとに2009

年1月22日12Zまでをあらわしている。横軸が緯度、縦軸が気圧となっている。縦軸の気圧は、1000 hPa から 400 hPa までとした。ブロッキングが活発な時は、湿った空気が、極に向かい伸びていることがわかる。しかし、JCDAS データでは湿った空気が北緯 75 度の地表まで伸びているのに対し、NICAMglevel-10 予報値では 900 hPa あたりでピークに達し、地表では北緯 60 度くらいまで後退している。ブロッキングが減衰し始めると、湿った空気は後退し始めている。

図 17 は、ジオポテンシャル高度の帯状平均からの偏差の経度-高度断面図 (北緯 60 度面) である。左図が JCDAS データ、右図が NICAMglevel-10 予報値をあらわす。上から、2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 22 日 12Z までをあらわす。経度は、ブロッキングが発生していた東経 180 度から東経 270 度のあいだのみをあらわしている。緯度は北緯 60 度断面である。15 日から 19 日のブロッキングが発生している期間では、ジオポテンシャル高度の位相は上層にいくほど西に傾いており、エネルギーが上方に輸送されているのがわかる。21 日以降のブロッキングが衰弱した期間では、位相は次第に縦型になり、上方へのエネルギー輸送が止まり始めている。特に NICAMglevel-10 予報値では、強くその傾向が見られている。

図 18 は、気温の帯状平均からの偏差の経度-高度断面図 (北緯 60 度面) である。左図が JCDAS データ、右図が NICAMglevel-10 予報値をあらわす。上から、2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 22 日 12Z までをあらわす。経度は、ブロッキングが発生していた東経 180 度から東経 270 度のあいだのみをあらわしている。15 日から 19 日のブロッキングが発生している期間では、対流圏でブロッキングに伴う高温偏差がみられ、比較的再現されているのがわかる。21 日以降のブロッキングが衰弱した期間では、高温偏差が弱まり始めており、NICAMglevel-10 予報値の再現性も悪くなってきている。成層圏に目を向けると、開始直後から細かい変動がみられるようになり、それが最後まで続いていることがわかる。

5 まとめと考察

5.1 成層圏突然昇温の再現実験

4.1 節では、全球非静力雲解像モデル NICAM を用いた成層圏突然昇温の再現実験を行った。

帯状平均気温と帯状平均東西風の時系列から、NICAM では他のデータよりも約 2 日早く予報していた。また、帯状平均気温の予報は JMA/GPV/GSM の予報よりも早く減衰してしまい、ピークも小さくなった。しかし、帯状平均東西風の予報は、JMA/GPV/GSM の予報よりも西風減速が進み、反転に近づいていた。

水平構造は、高度場できれいな波数 2 型の構造がみられたが、シベリアの低高度領域が他に比べ弱くなった。気温場では、細かい変動が現れてしまい、構造がよくわからなくなった。

極夜ジェットは、JCDAS データと比べ、早く極に移動し、減衰していった。北緯 60 度ではなく、北緯 80 度でピーク時に東風が発生した。

これらの問題を解決するため、EP Flux を用いて波のエネルギー輸送の解析を行った。その結果、帯状平均気温がピークに達した 2009 年 1 月 21 日あたりから、鉛直方向の輸送が急激に弱まり、再現されなくなった。

NICAM の予報が早かったり、エネルギー輸送が止まってしまうなどの、原因はまだよくわかっていない。今後、要素を波数ごとに分解し、波数ごとのプラネタリー波の鉛直伝播や波数ごとの EP Flux の鉛直成分をみて、原因の究明を進めていく必要がある。また、帯状平均東西風の緯度-高度断面や 10 hPa 面の気温場でみられた細かい変動は重力波が原因であると考えられる。NICAM は水平解像度が非常に細かいため、細かいスケールの重力波が明確にみられるようになってくる。重力波とは、約 5 分から十数時間以上の時間スケールで、重力を復元力とする波である。発生原因は、台風などの擾乱、ジェット気流、山岳などがあげられる。対流圏では、主に水平スケールが大きいプラネタリー波が卓越し、重力波が見えづらくなっている。しかし、成層圏に入ると、効果が復元力であるプラネタリー波が伝播しづらくなり、代わりに重力波が非常に卓越してくる。重力波には、100 km 近く鉛直伝播するものがあり、それが成層圏以上の中間圏ではみられてくる。重力波は観測が非常に難しく、定量的な評価がされていない。そのため、気候モデルに入れるべきである重力波効果を取りこめておらず、成層圏低温バイアスという系統誤差の問題がある。よって、NICAM でも高解像度で成層圏を見る場合は重力波の効果が重要にな

ると考えられる．これは，静力モデルで使用されている重力波ドラッグが非静力モデルでは使用されていないのが原因である．

5.2 ブロッキングの再現実験

4.2 節では，成層圏突然昇温の前兆現象であるブロッキングに着目して，再現されていたのかを確認した．

500 hPa 高度場，海面更正気圧，700 hPa の気温場の水平構造から，ブロッキングは，19 日にピークになった強いオメガ型のブロッキングとその直後に切離低気圧を伴う弱い双極子型のブロッキングが発生していた．最初のオメガ型のブロッキングの再現は成功し，順圧構造が確認された．しかし，双極子型のブロッキングはあまり再現されていない．この，弱い双極子型のブロッキングも再現できていれば，この後に発生する成層圏突然昇温がよりうまく再現される可能性が考えられる．また，850 hPa の比湿は他の要素よりも比較的再現されていることがわかった．

鉛直構造をみると，帯状平均ジオポテンシャル高度と帯状平均気温は対流圏で比較的再現されているが，比湿は地表面近くで極方向の伝播が弱まっている．また，帯状平均気温に細かい変動が現れている．次に，ジオポテンシャル高度の帯状平均からの偏差をみると，上層に行くに連れ西に傾いていたのが縦型の構造に戻り始めるのが早くなっている．ジオポテンシャル高度の帯状平均からの偏差をみると，対流圏では比較的再現されているが，成層圏になると細かい変動が顕著に見られ，JCDAS データとは全く違う傾向がみられたこの細かい変動について，気温と東西風で高度ごとにホフメラー図を描いてみると，上空にいくほど同様の細かい変動が現れてくる．特に，成層圏だと顕著に見られ，重力波の影響が強いことがわかる．これらは，非静力モデルでは，重力波を砕波させるメカニズムがないことが原因だと考えられる．

6 結論

本研究では、最新の全球非静力雲解像モデル NICAM を用いて、成層圏突然昇温ターゲットにして研究を行った。気象庁現業大気大循環モデルを用いた研究では帯状平均東西風の予測が困難であったため、全球非静力雲解像モデル NICAM では改善されるのかどうかを調べた。また、全球非静力雲解像モデル NICAM の成層圏での振る舞いについて診断することを目的とした。

東西風の予報では、より西風減速が進み、反転に近づいた。しかし、現実より約 2 日早く予報をしてしまった。この原因として、成層圏突然昇温の前兆現象として発生したオメガ型のブロッキングとその直後に発生した弱い双極子型のブロッキングの予測が重要だと考えられるが、これを裏付ける結果はまだ得られなかった。この原因の解明は今後の課題である。

全球非静力雲解像モデル NICAM の成層圏の振る舞いでは、気温場と東西風場において、細かい変動が現れた。この原因は重力波であると考えられる。対流圏ではあまり見られない重力波が成層圏では重要で、モデル、観測の両方の観点から、重力波の扱いは難しい問題とされている。全球非静力雲解像モデル NICAM の成層圏での扱いには、重力波の効果を今後は考えていかなければならない。また、モデルで成層圏を扱う場合、モデルの鉛直層を非常に高くとる必要があると言われており、鉛直層についても考える必要がある。

謝辞

指導教員である筑波大学計算科学研究センターの田中博教授には、本研究での、テーマ設定、解析手法、データの提供、考察など様々なことに終始適切な御指導していただきました。

同大学計算科学研究センター寺崎康児研究員には、大循環ゼミをはじめ様々なところで貴重なアドバイスをいただきました。

同大学生命環境科学研究科の林陽生教授、上野健一准教授、植田宏昭准教授、日下博幸講師には、集中ゼミをはじめ、分野ゼミ等で貴重なご助言をいただきました。

東京大学海洋研究所の佐藤正樹准教授には、田中博教授と訪問した際、NICAM について貴重なアドバイスをいただきました。

学会等の発表の場で、意見をくださった方々には、貴重な意見をいただきました。

ともに、研究を進めた地球科学専攻、環境科学専攻の大学院生の皆様。また、筑波大学地球学類の皆様。発表の場等で、様々な質問していただきました。

最後に大学院まで進学させて頂いた家族。時折、相談にのっていただきました。

本論文は、以上の皆様のご協力により完成致することができました。心より感謝いたします。

7 参考文献

- Baldwin, M. T. Hirooka, A. O'Neill, and S. Yoden, 2003: Major stratospheric warming in the Southern Hemisphere in 2002: Dynamical aspects of the ozone hole split. *SPARC Newsletter*, **20**, 24-26.
- Charlton, A. J., and L. M. Polvani, 2007: A new look at stratospheric sudden warmings. Part I. Climatology and modeling benchmarks. *J. Clim.*, **20**, 449-469.
- Charney, J. G. and P. G. Drazin, 1961: Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **66**, L03707, 83-109.
- 廣岡 俊彦, 一丸 知子, 向川 均, 2006: 成層圏突然昇温の生起パターンと予測可能性について. 「異常気象と長期変動」研究集会報告, 北海道大学大学院地球環境科学研究院, 京都大学防災研究所, 東京大学気候システム研究センター, 京都大学大学院理学研究科 (3月), 138-141.
- 一丸 知子, 廣岡 俊彦, 向川 均, 2009: 2009年1月大規模突然昇温の特徴とその予報について. 「異常気象と長期変動」研究集会報告, 東北大学大学院理学研究科, 京都大学防災研究所, 東京大学気候システム研究センター, 東京大学大学院理学系研究科, 京都大学大学院理学研究科 (3月), 90-93.
- 小寺 邦彦, 江口 菜穂, 一丸 知子, 2009: 2009年1月の成層圏突然昇温の熱帯への影響. 「異常気象と長期変動」研究集会報告, 東北大学大学院理学研究科, 京都大学防災研究所, 東京大学気候システム研究センター, 東京大学大学院理学系研究科, 京都大学大学院理学研究科 (3月), 94-97.
- Labitzke, K., 1981: The amplification of height wave 1 in January 1979: A characteristic precondition for the major warming in February. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 983-989.
- Lindzen, R. S. and J. R. Holton, 1968: A theory of the quasi-biennial oscillation. *J. Atmos. Sci.*, **25**, 1095-1107.
- Matsuno, T., 1971: A dynamical model of the stratospheric sudden warmings. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1479-1494.
- Martius, O., L. M. Polvani, and H. C. Davies, 2009: Blocking precursors to stratospheric sudden warming events. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L14806.
- 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.
- 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:10.129/2005GL022909.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, and S. Iga, 2008: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *Journal of Computational Physics, The Special Issue on Predicting Weather, Climate and Extreme Events*, **227**, 3486-3514, doi:10.1016/j.jcp.2007.02.006.
- Scherhag R., 1952: Die explosionsartigen stratospharmungen des spatwinters 1951-52. *Ber. Deut. Wetterdienstes*, **6**, 51-63.
- Taguchi, M., 2008: Is there a statistical connection between stratospheric sudden warming and tropospheric blocking events? *J. Atmos. Sci.*, **65**, 1442-1454.
- 瓜生 道也, 1976: 波とそのまわりの平均運動. *天気*, **23**, 3-22.

Table 1 成層圏突然昇温カレンダー

	9	10	11	12	1	2	3	80 81	9	10	11	12	1	2	3
49 50															
50 51								80 81							
51 52							81 82								
52 53							82 83								
53 54							83 84								
54 55							84 85								
55 56							85 86								
56 57							86 87								
57 58							87 88								
58 59							88 89								
59 60							89 90								
60 61							90 91								
61 62							91 92								
62 63							92 93								
63 64							93 94								
64 65							94 95								
65 66							95 96								
66 67							96 97								
67 68							97 98								
68 69							98 99								
69 70							99 00								
70 71							00 01								
71 72							01 02								
72 73							02 03								
73 74							03 04								
74 75							04 05								
75 76							05 06								
76 77							06 07								
77 78							07 08								
78 79							08 09								
79 80							09 10								

Table 2 NICAM の水平解像度

glevel	水平解像度
5	224 km
6	112 km
7	56 km
8	28 km
9	14 km
10	7 km
11	3.5 km

Table 3 NICAM の並列化

rlevel	領域数
0	10
1	40
2	160
3	640
4	2560

10hPa-80N Zonal-Mean Air Temperature

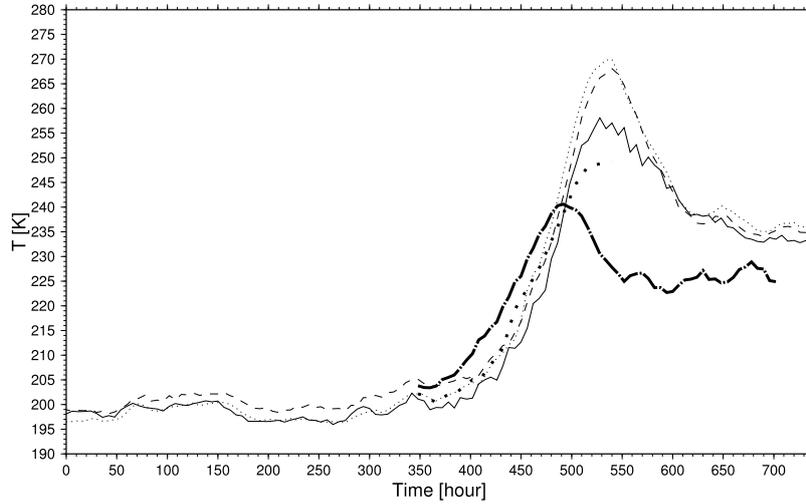


Fig.1 北緯 80 度, 10hPa 高度での帯状平均気温の時系列．細実線が NCEP/NCAR 再解析データ, 細破線が JCDAS データ, 細点線が JMA/GPV/GSM 解析値, 太点線が JMA/GPV/GSM 予報値, 太一点破線が NICAMglevel-10 をあらわしている．

10hPa-60N Zonal-Mean Zonal Wind

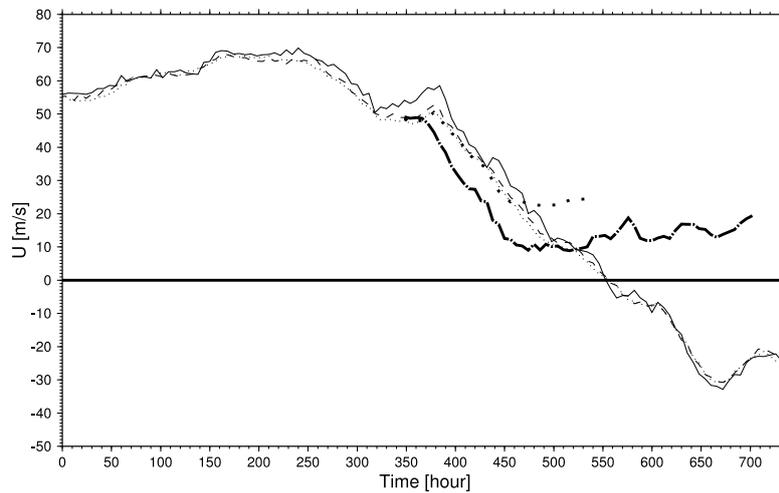
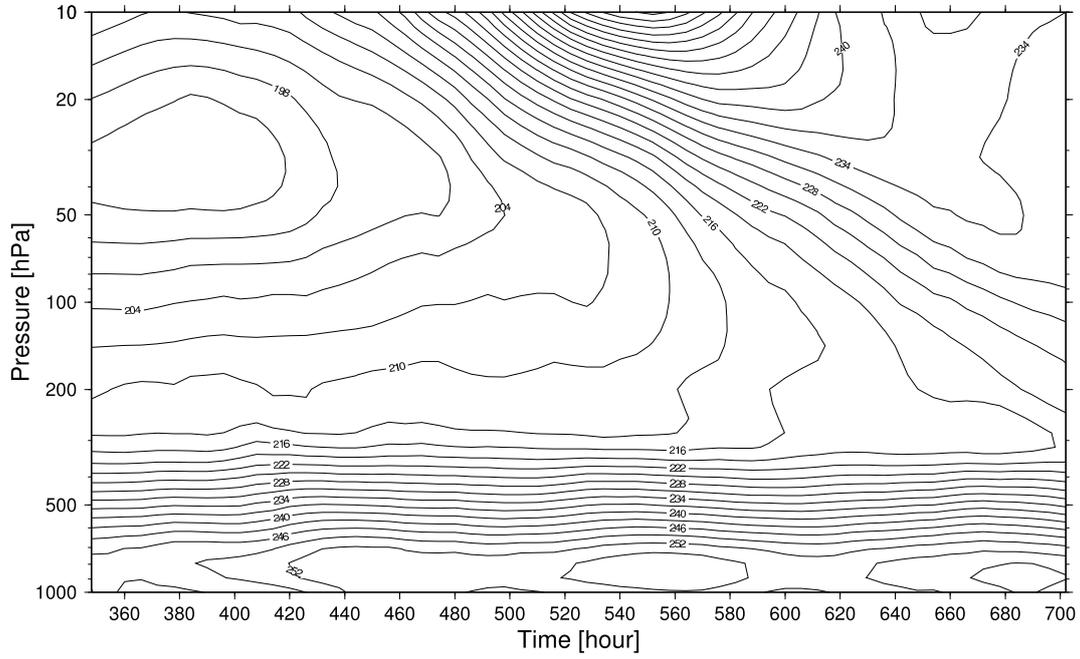


Fig.2 北緯 60 度, 10hPa での帯状平均東西風の時系列．細実線が NCEP/NCAR 再解析データ, 細破線が JCDAS データ, 細点線が JMA/GPV/GSM 解析値, 太点線が JMA/GPV/GSM 予報値, 太一点破線が NICAMglevel-10 をあらわしており, また, 太実線で 0 線を引いている．

Zonal Mean T [K] Vertical structure [80N]
JRA-25/JCDAS 2009/01/15/12Z + 15 day



79.98N Zonal Mean T [K]
NICAM glevel-10 2009/01/15/12Z + 15-day forecast

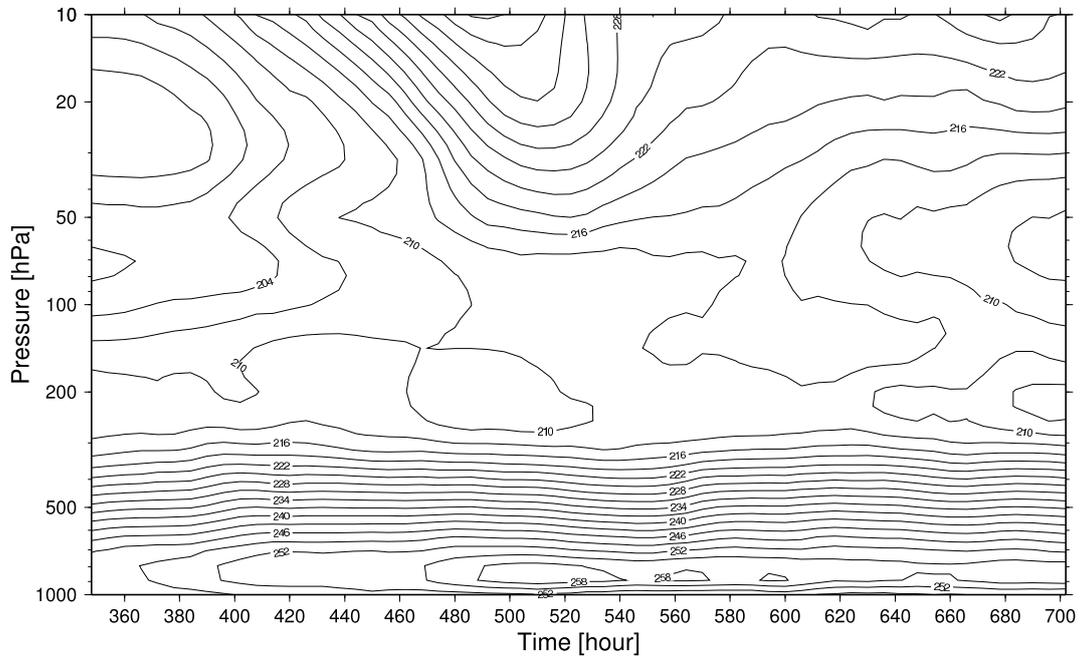
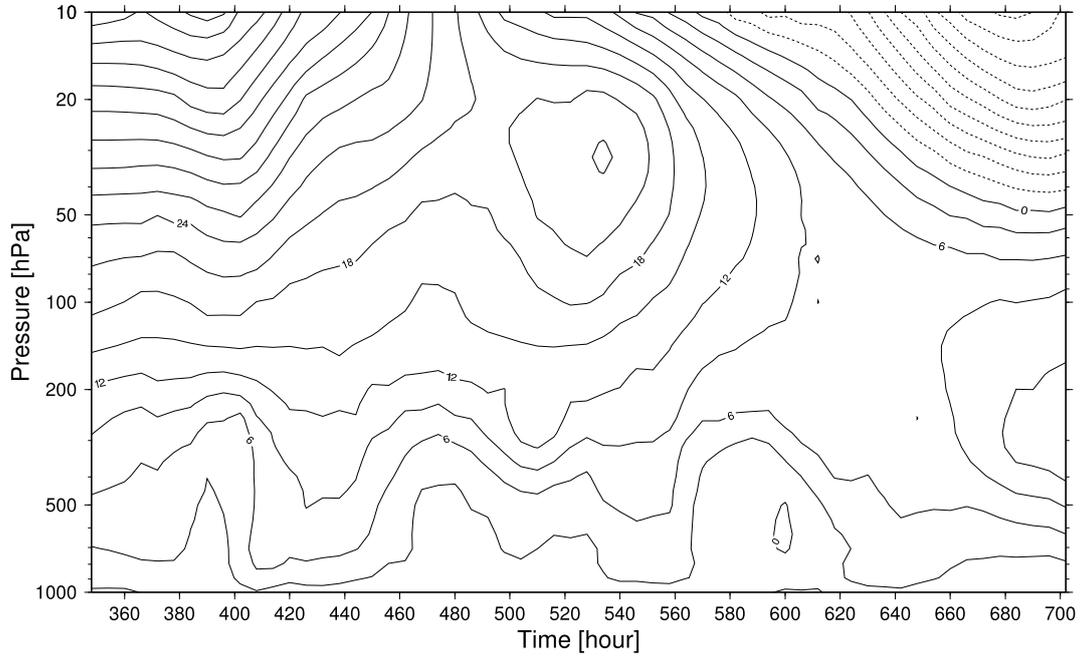


Fig.3 北緯 80 度での帯状平均気温の鉛直時系列 . 上図が JCDAS データで , 下図が NICAMglevel-10 データである .

**Zonal Mean U [m/s] Vertical structure [60N]
JRA-25/JCDAS 2009 January**



**60.01N Zonal Mean U [m/s]
NICAM glevel-10 2009/01/15/12Z + 15-day forecast**

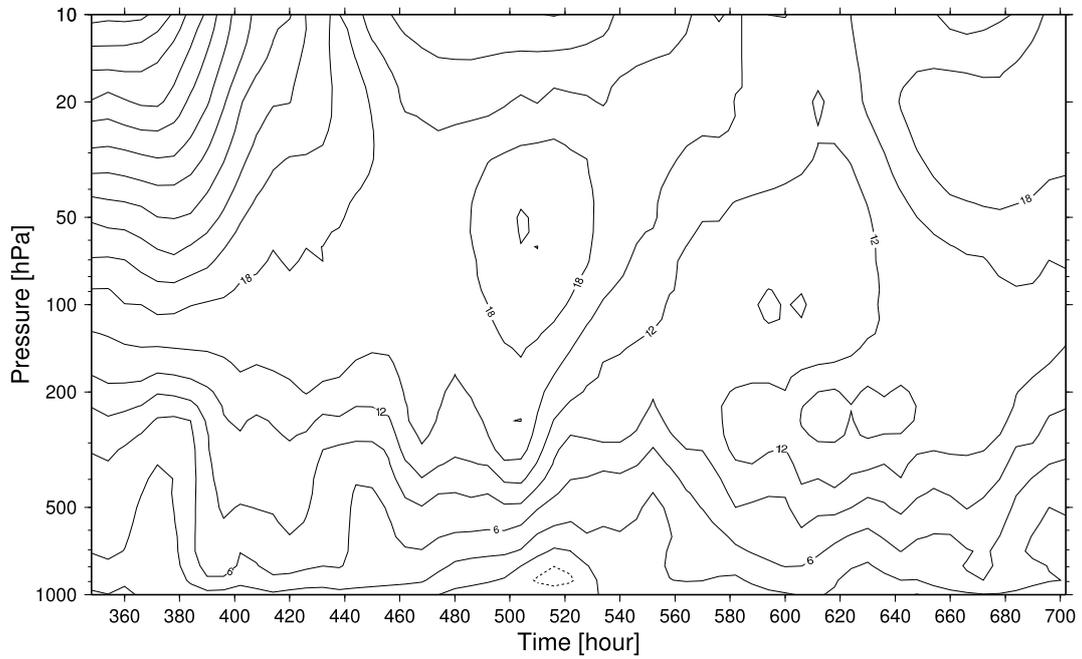
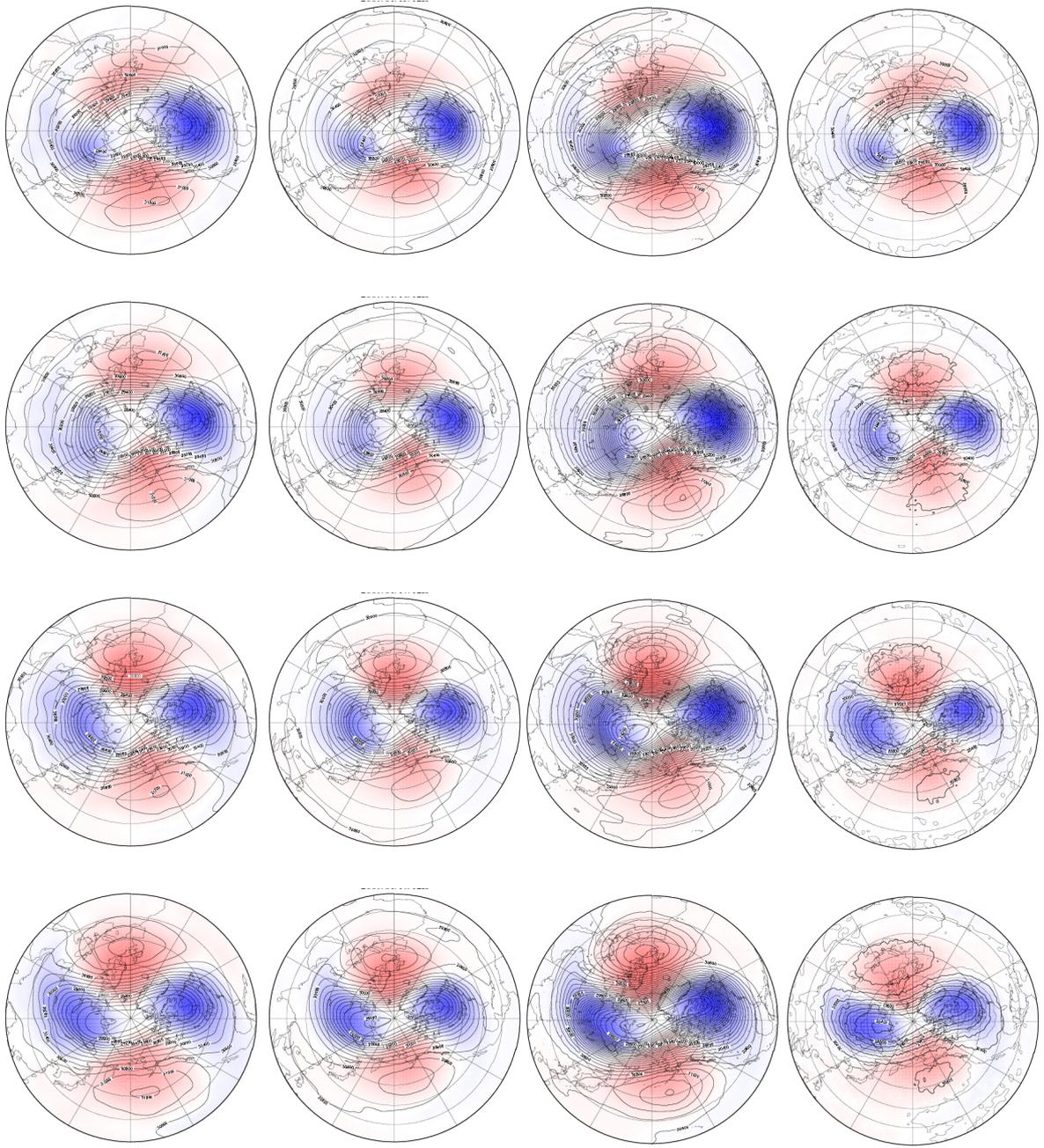
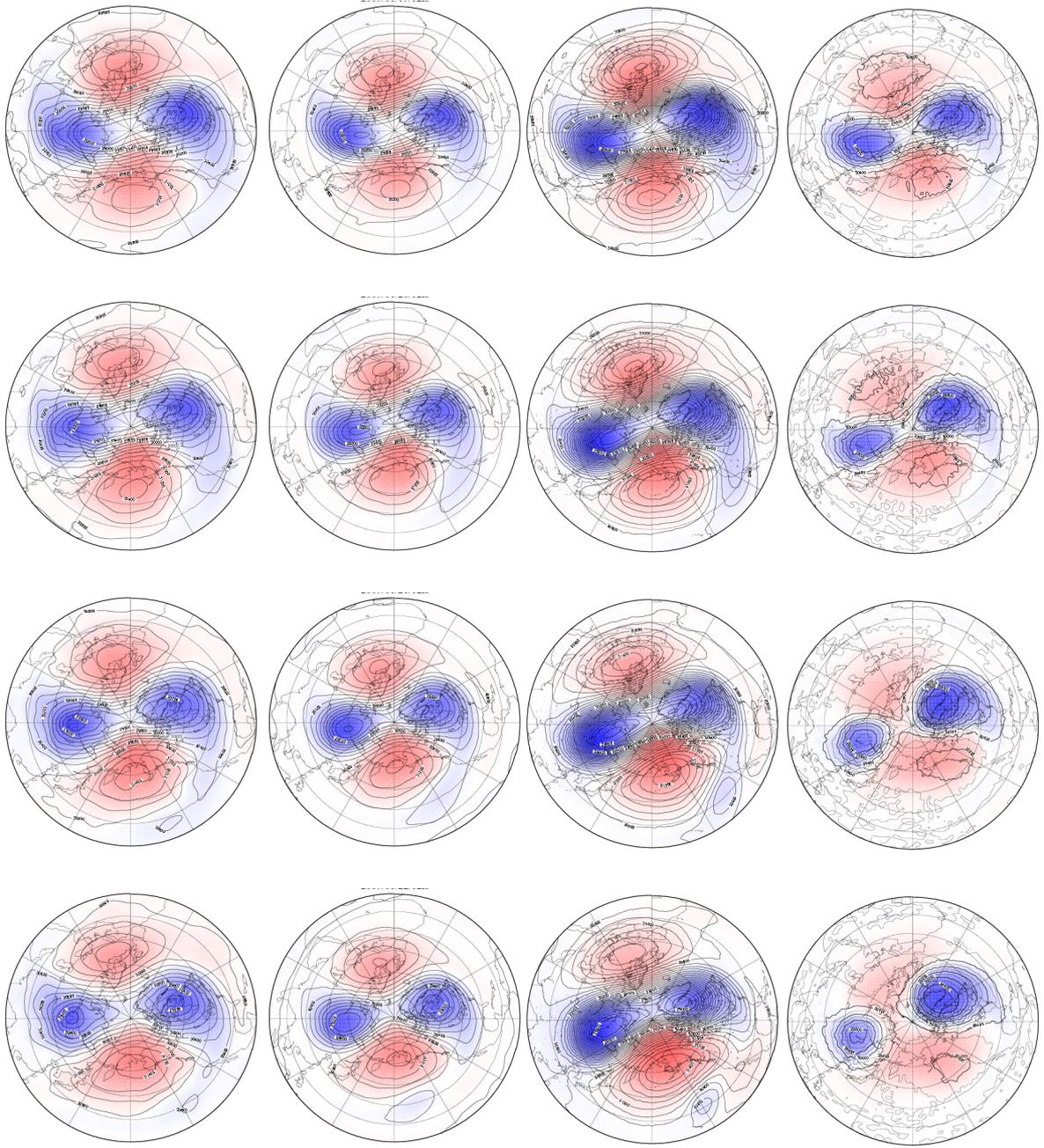


Fig.4 北緯 60 度での帯状平均東西風の鉛直時系列．上図が JCDAS データで，下図が NICAMglevel-10 データである．





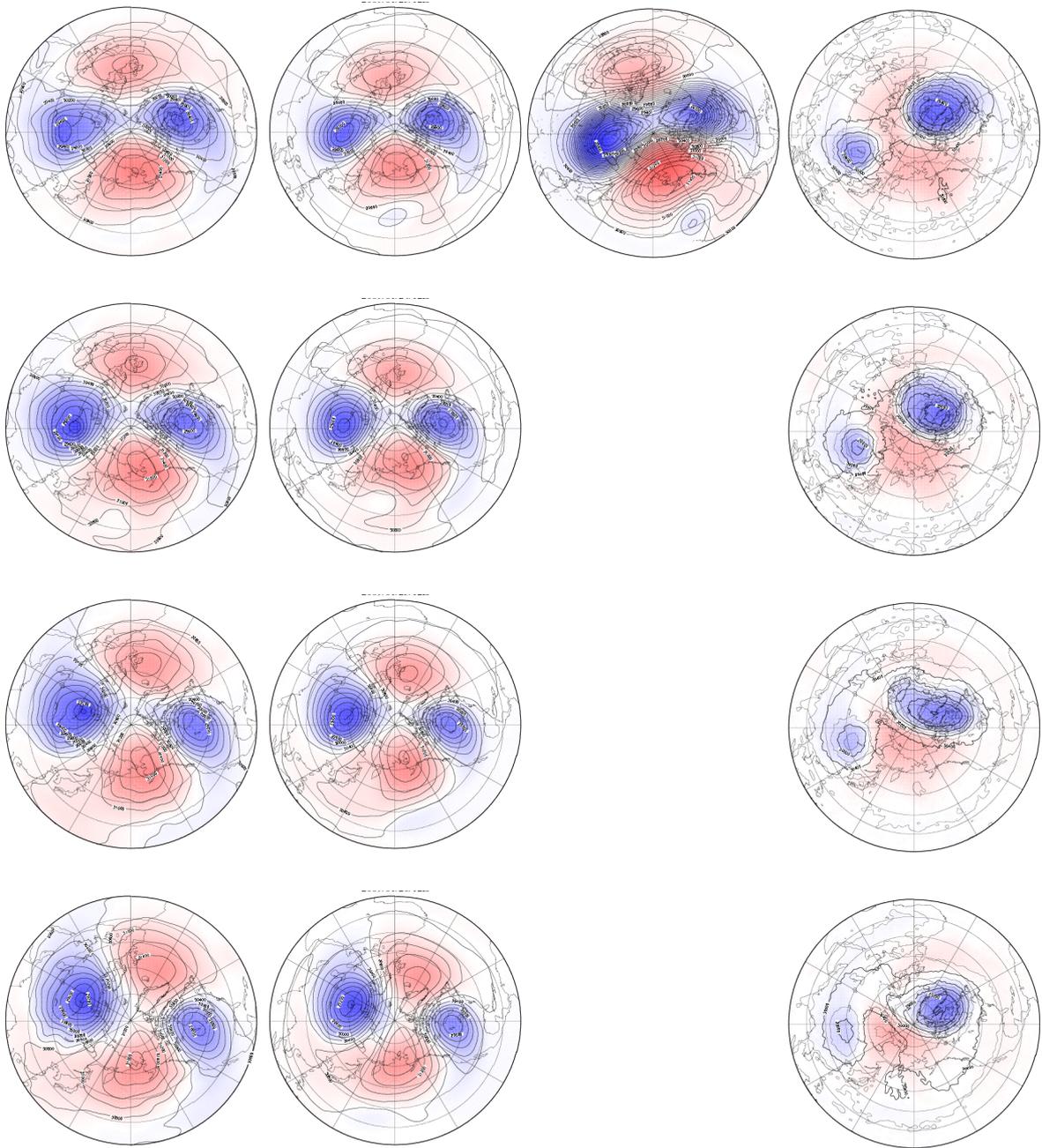
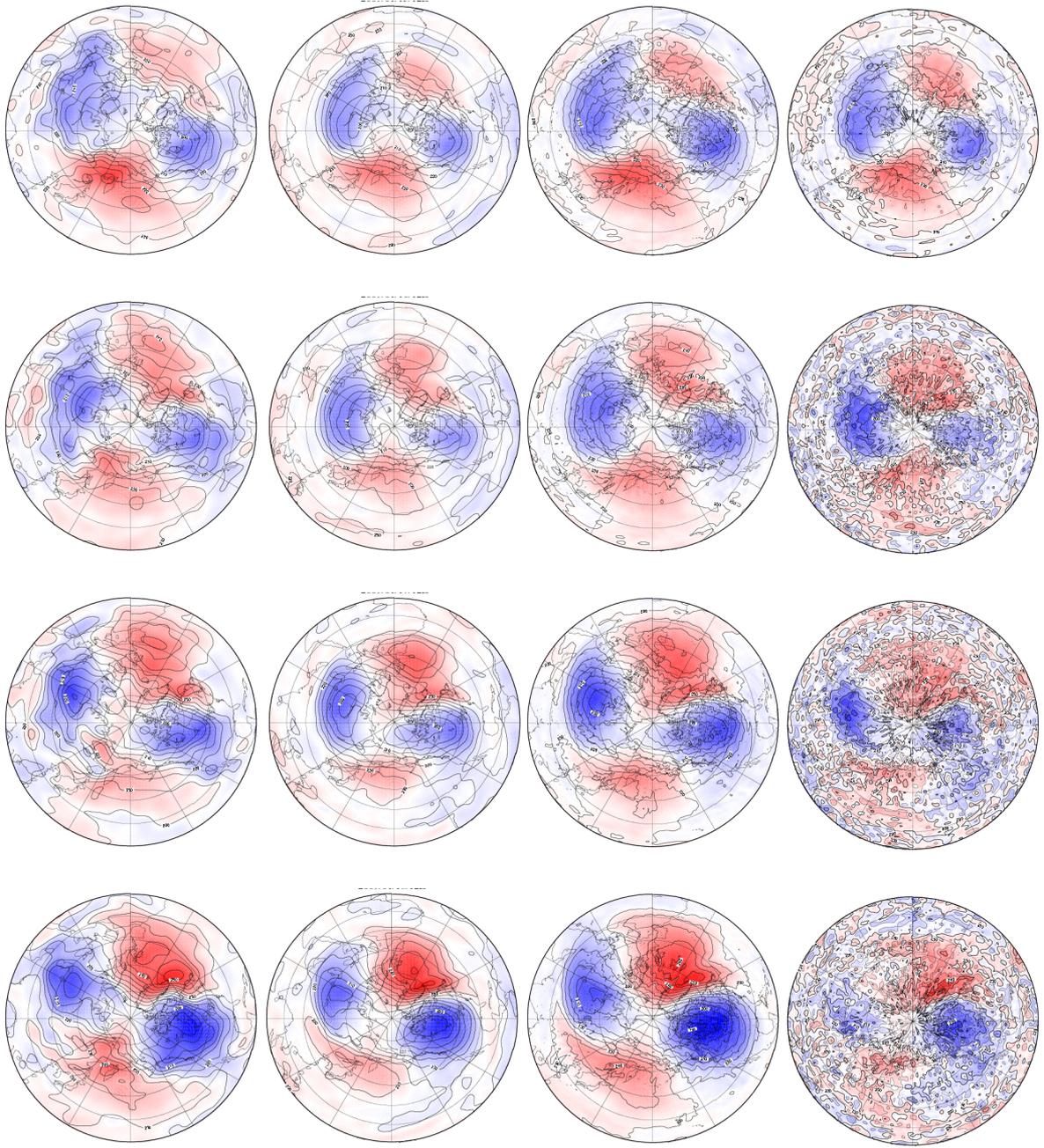
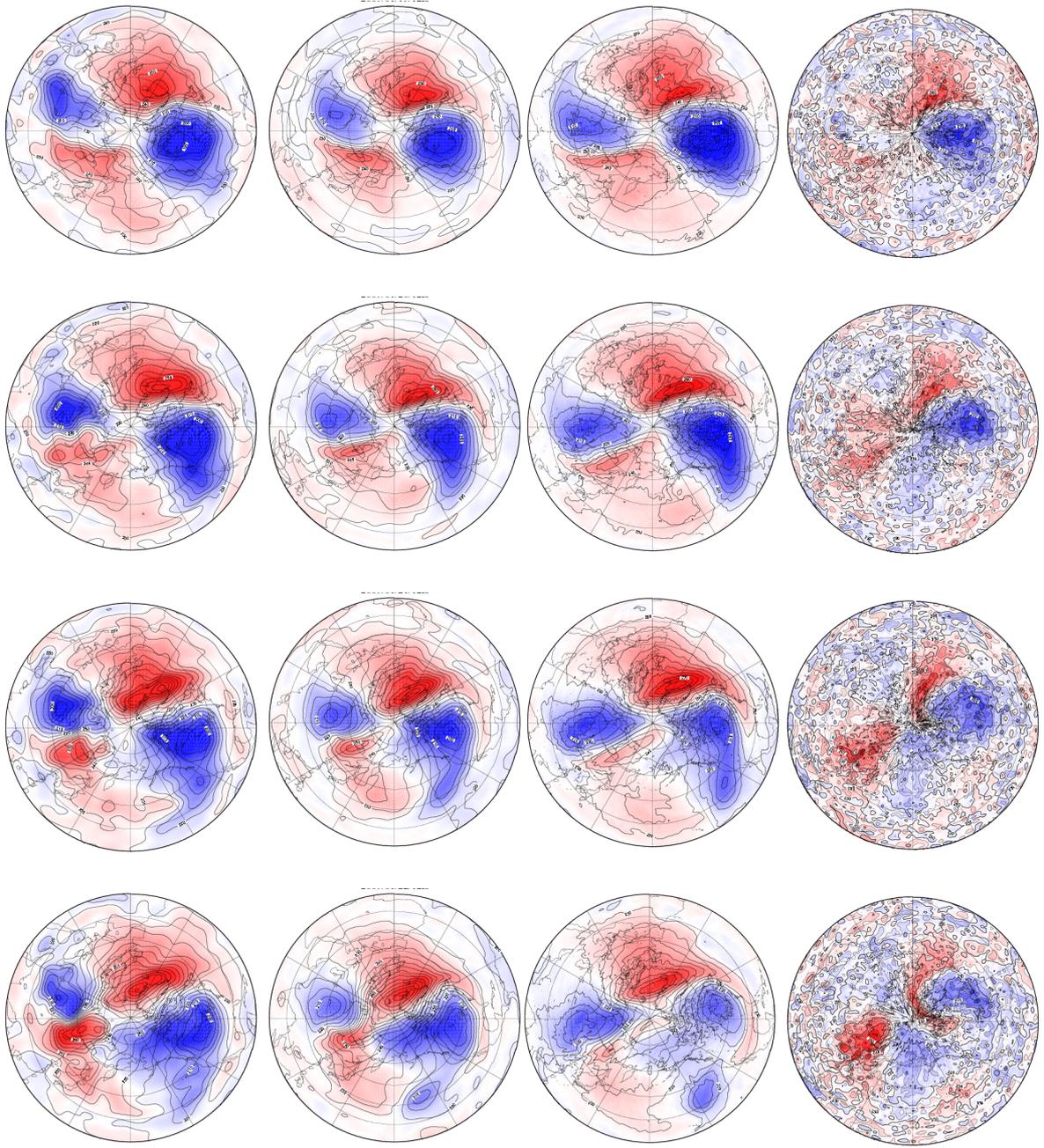


Fig.5 10 hPa での北半球ジオポテンシャル高度．左から，NCEP/NCAR 再解析データ，JCDAS データ，JMA/GPV/GSM 予報値，NICAMglevel-10 予報値．上から，2009年1月15日12Zから1日ごとに2009年1月26日12Zまでをあらわす．





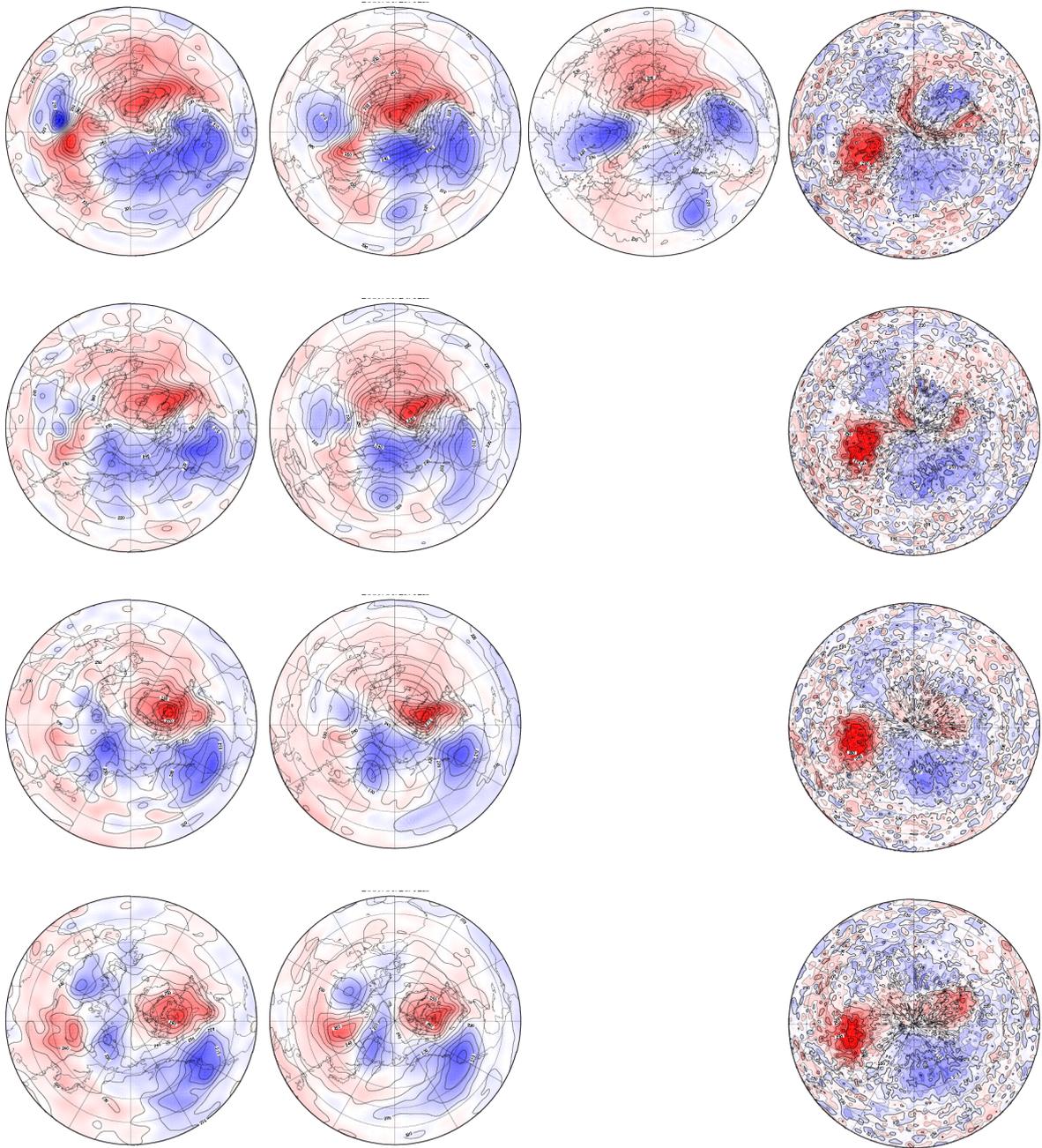
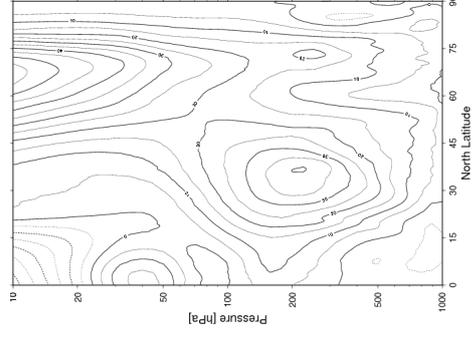
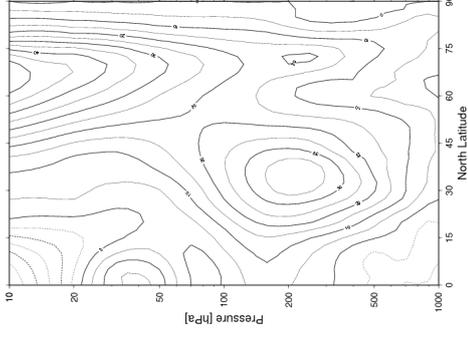
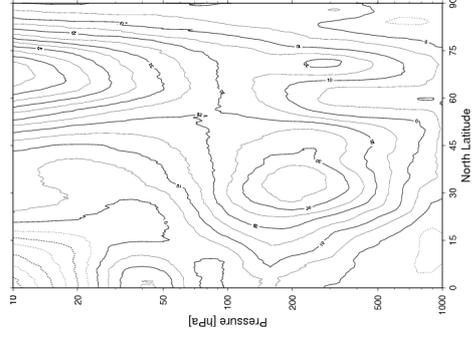
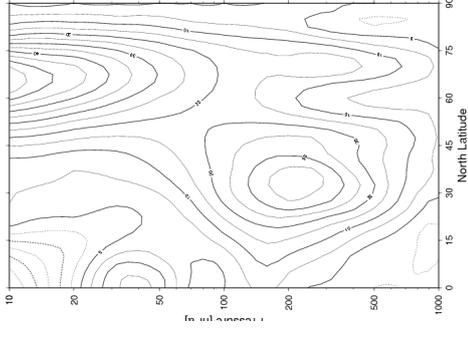
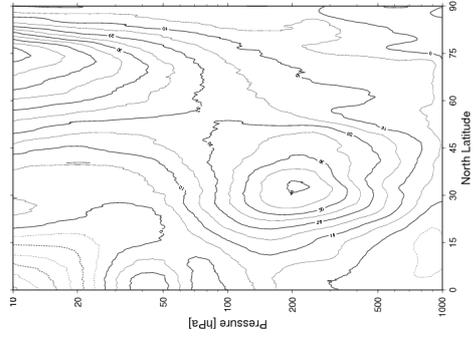
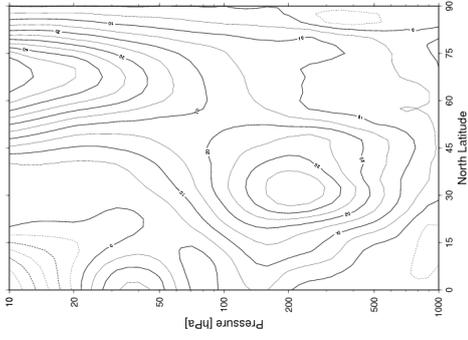
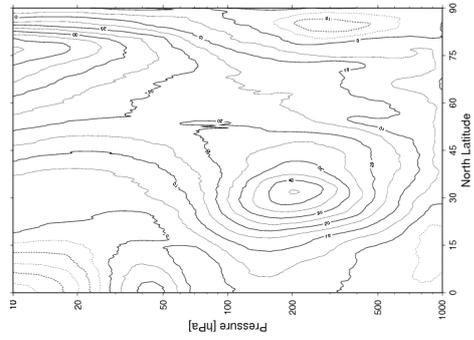
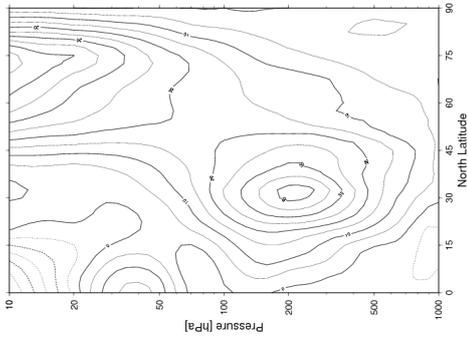
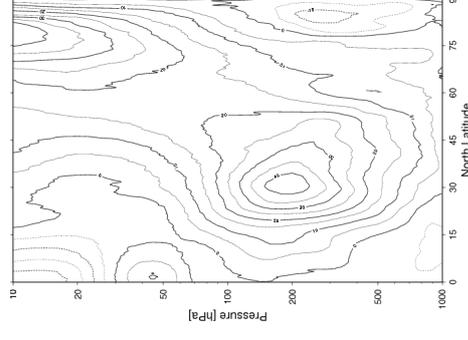
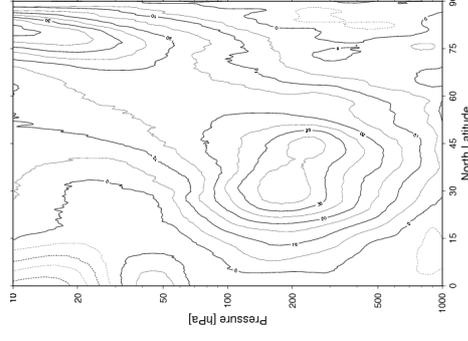
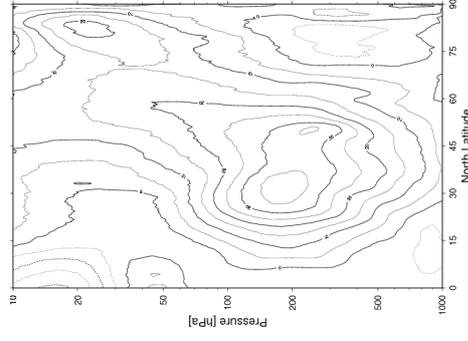
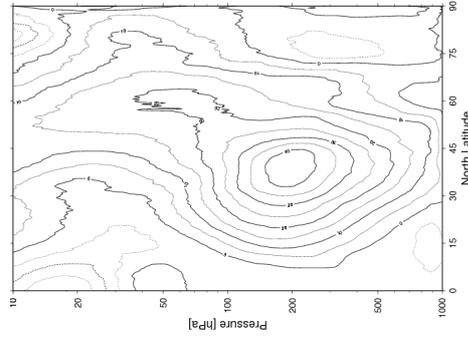
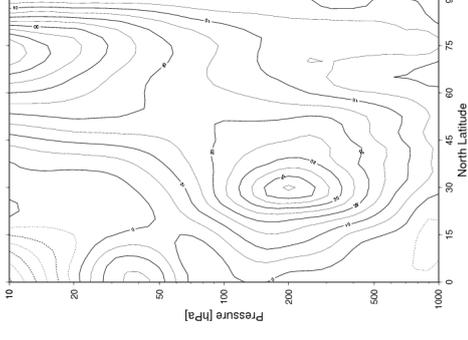
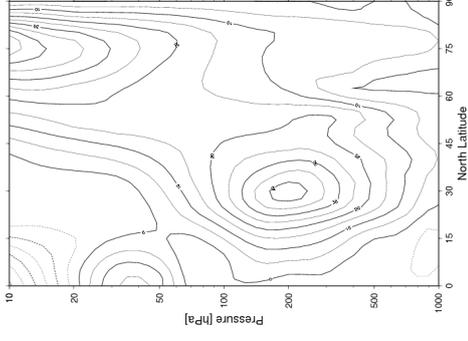
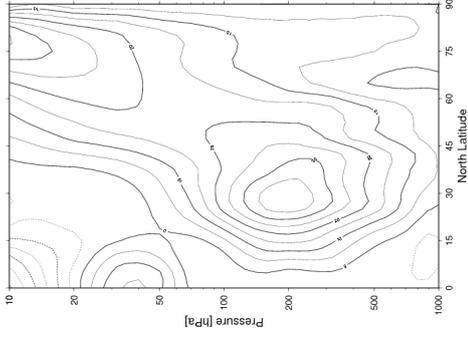
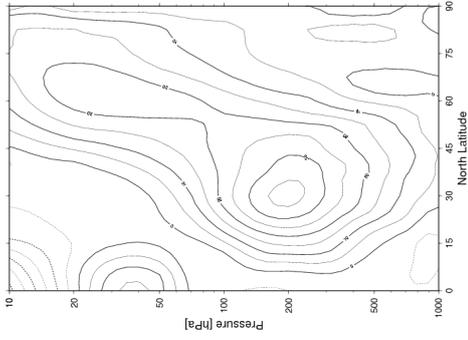


Fig.6 10 hPa での北半球の気温．左から，NCEP/NCAR 再解析データ，JCDAS データ，JMA/GPV/GSM 予報値，NICAMglevel-10 予報値．上から，2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 26 日 12Z までをあらわす．





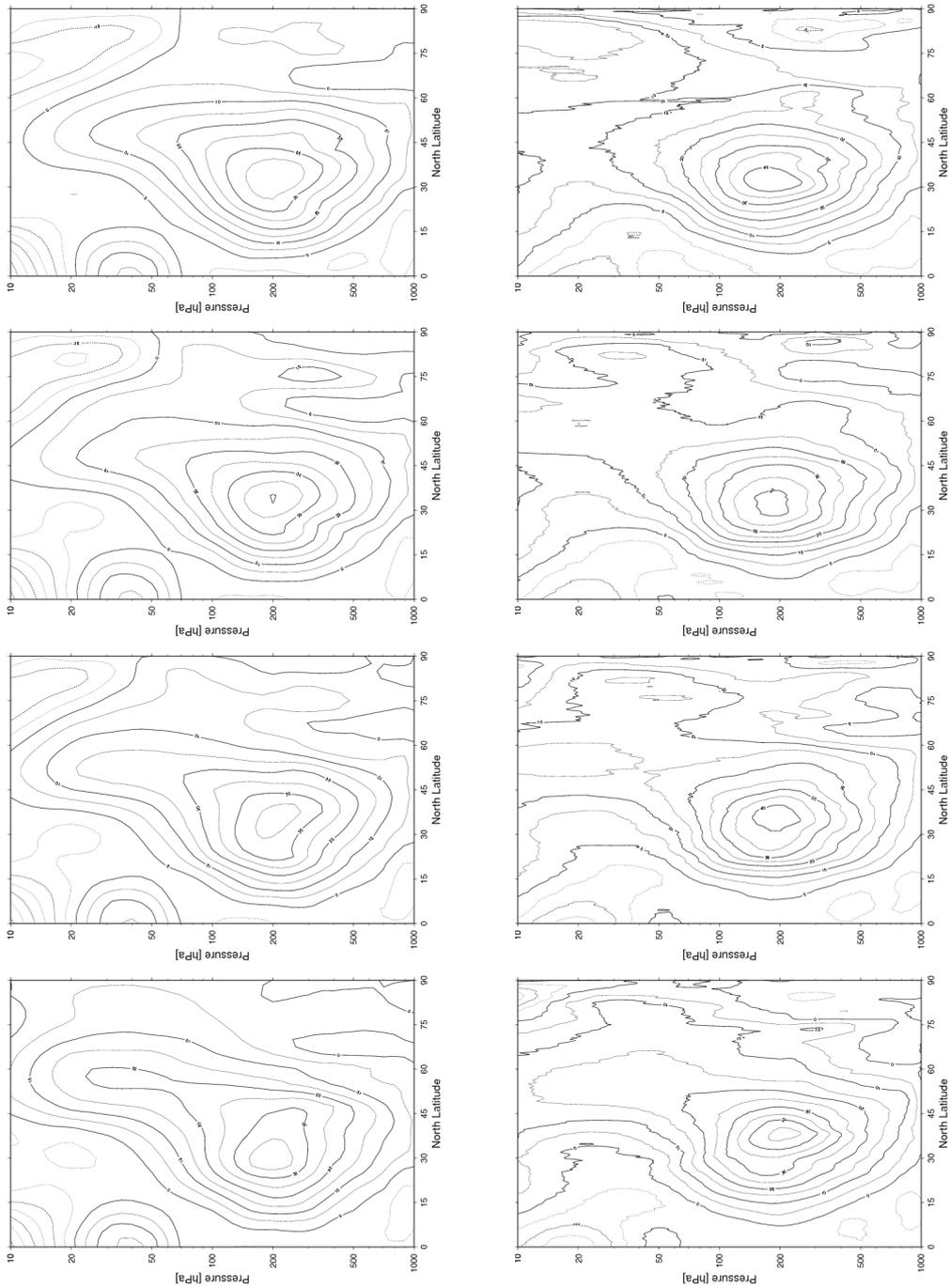
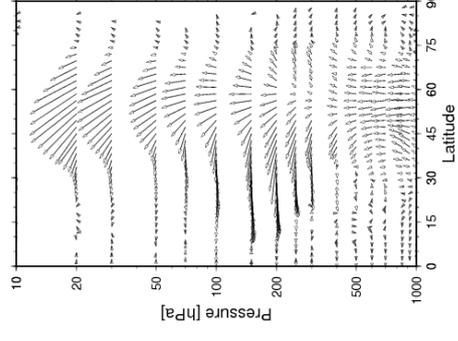
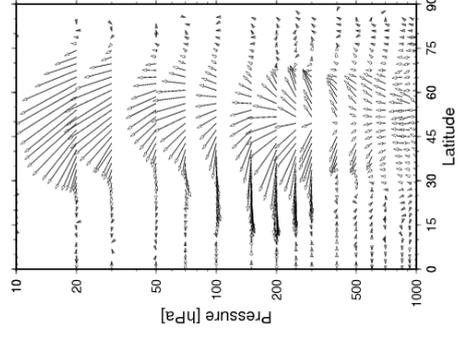
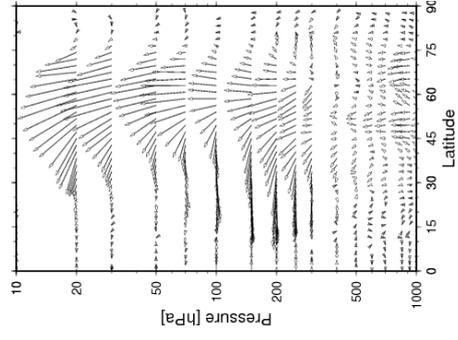
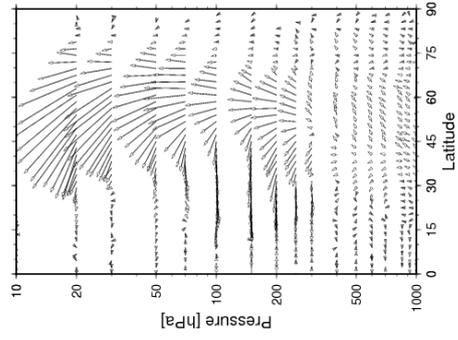
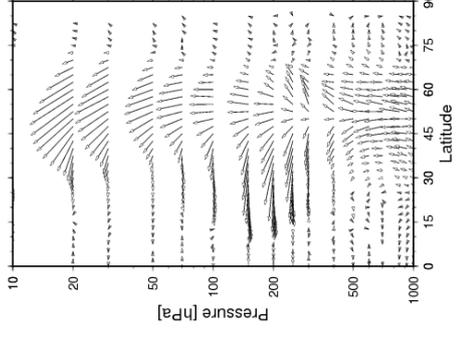
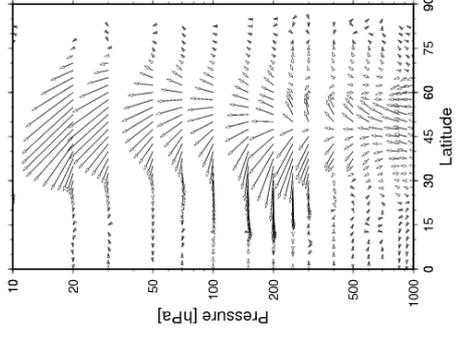
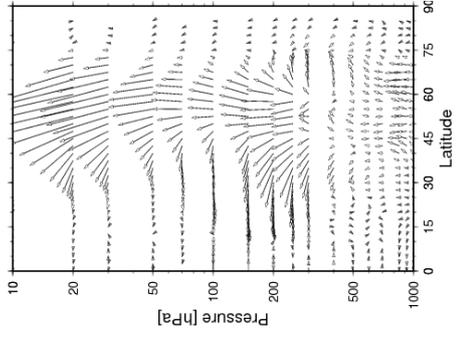
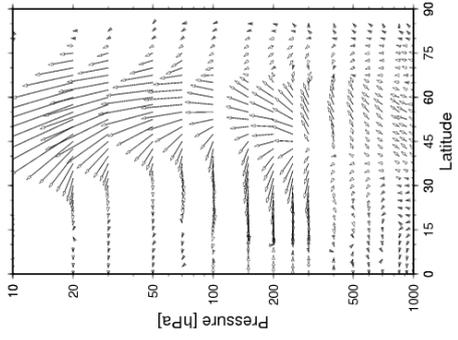
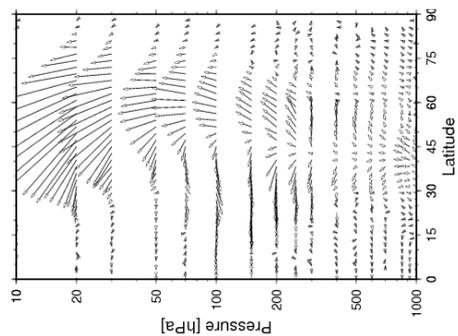
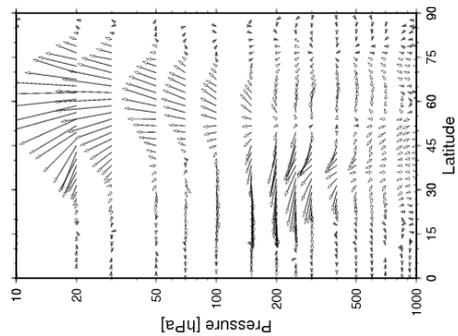
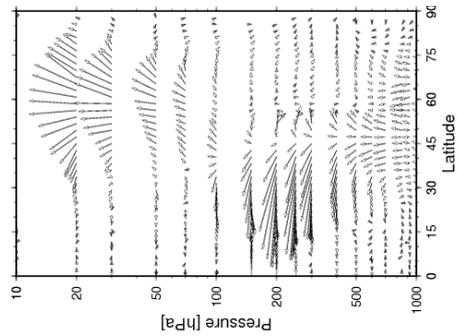
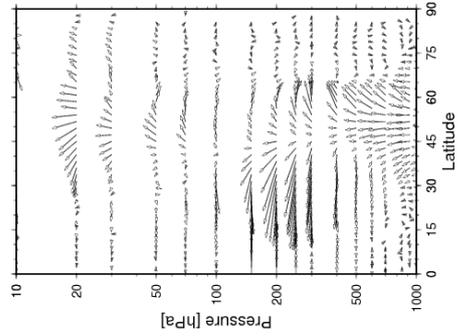
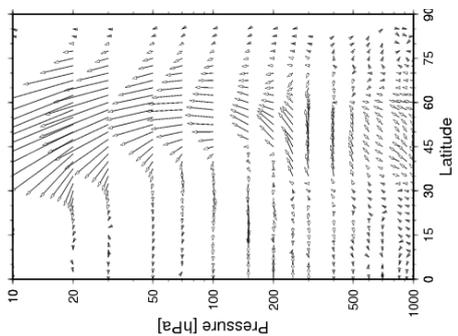
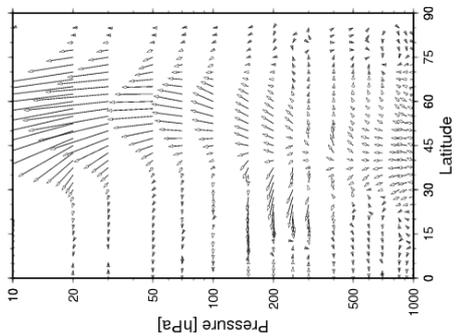
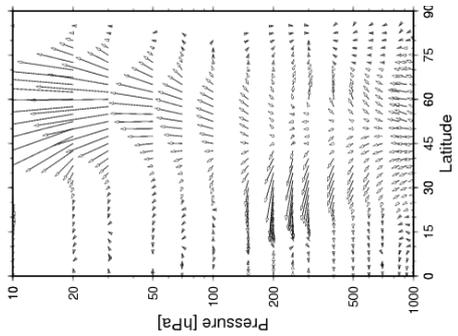
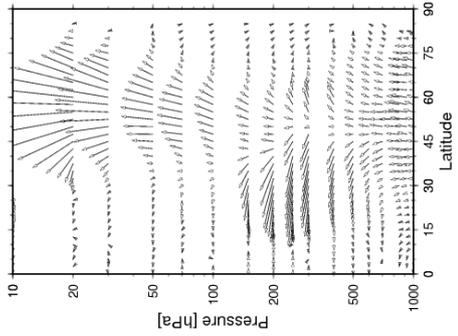


Fig.7 带状平均東西風の緯度-高度の断面図．横からみて，上図が JCDAS データで，
 下図が NICAMglevel-10 予報値である．左から 2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごと
 に 2009 年 1 月 26 日 12Z までをあらわしている．





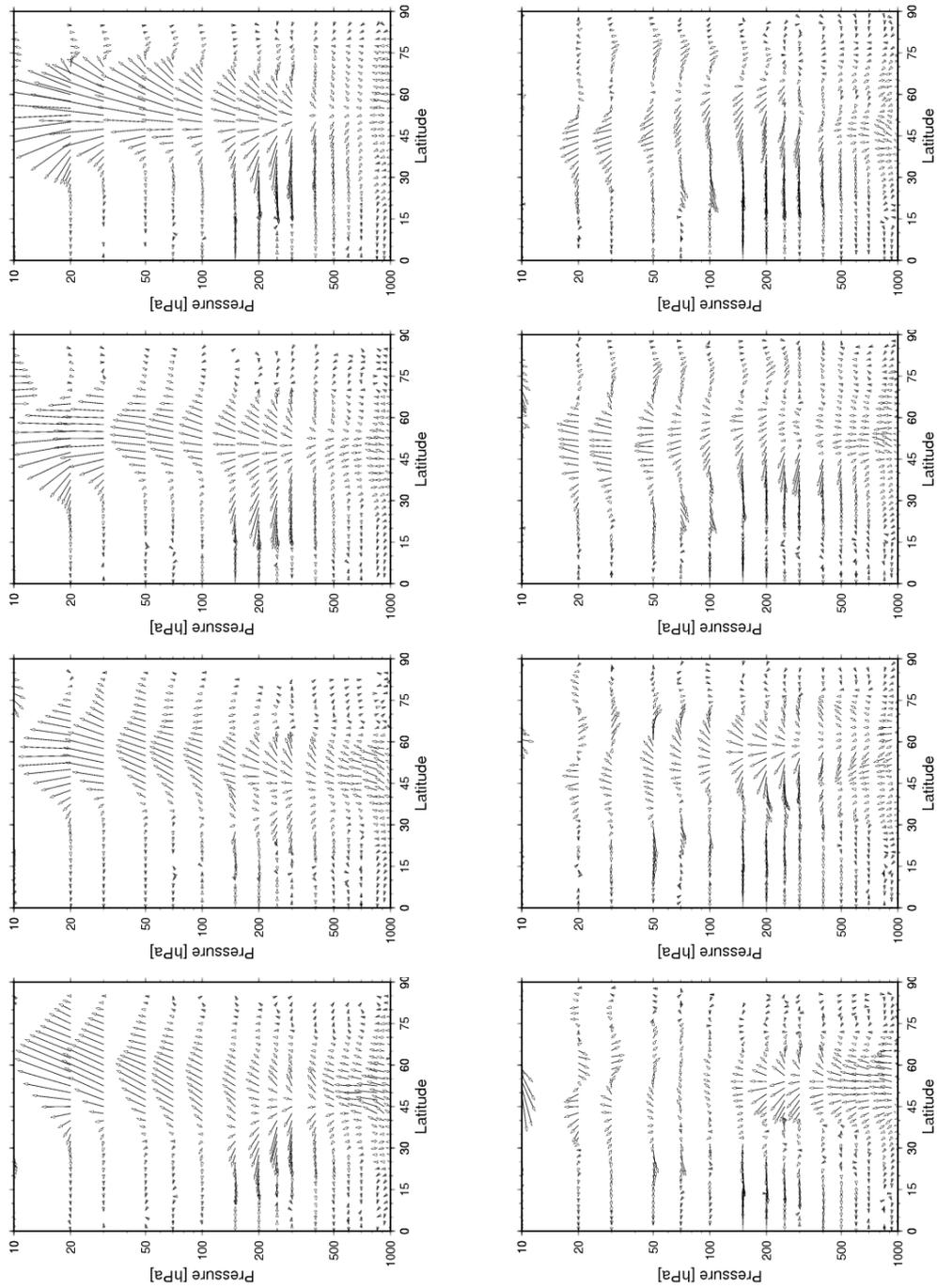
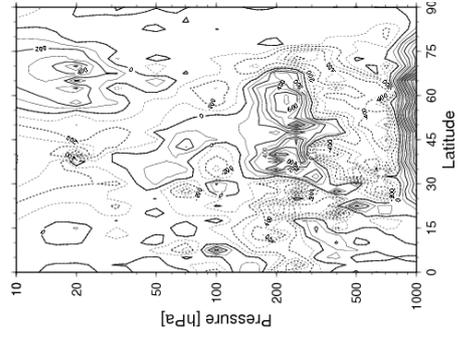
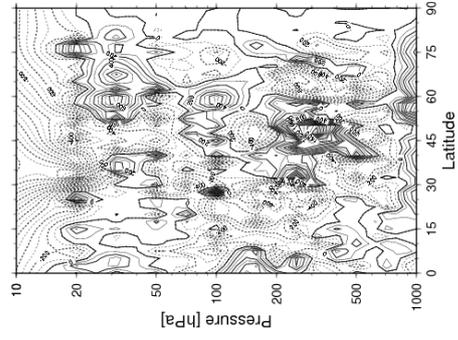
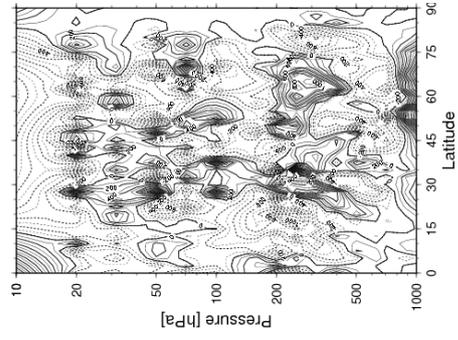
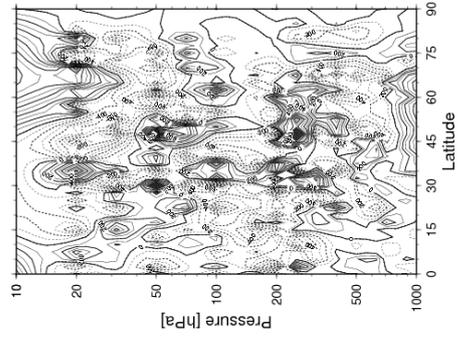
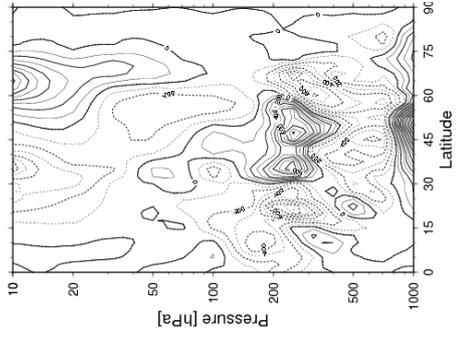
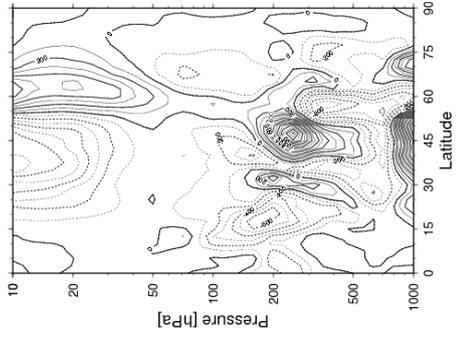
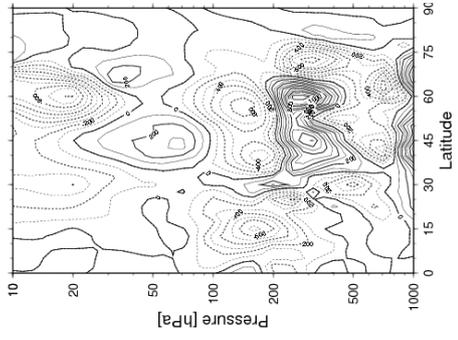
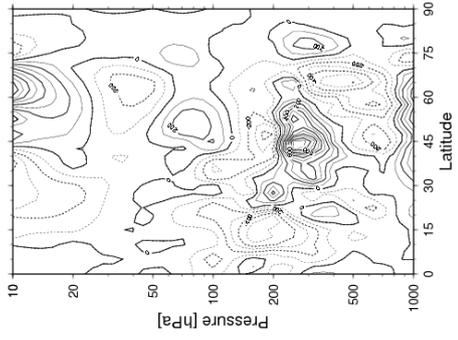
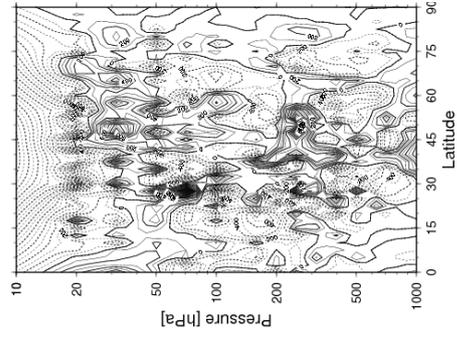
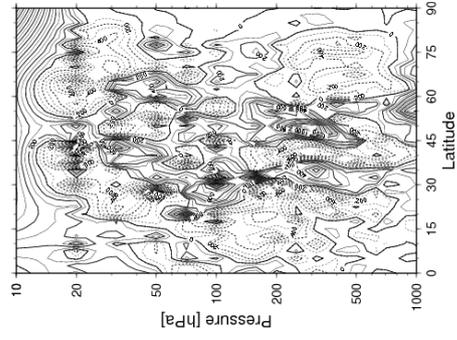
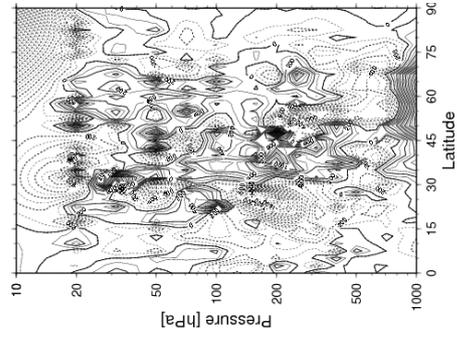
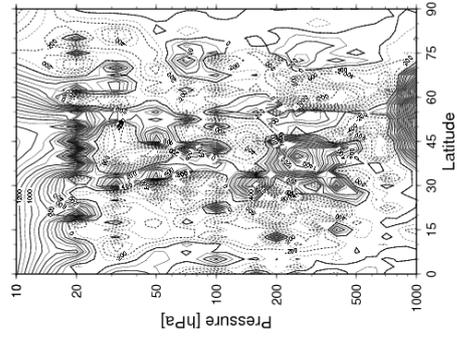
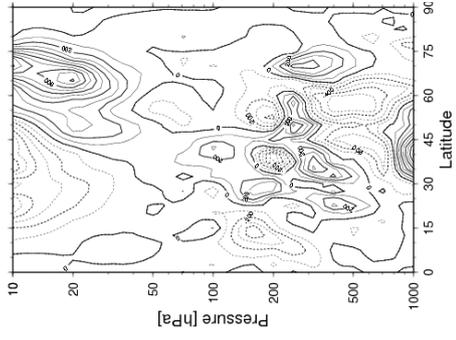
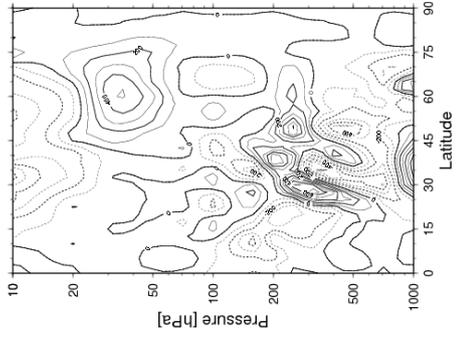
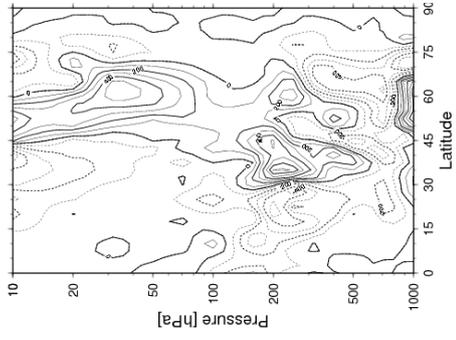
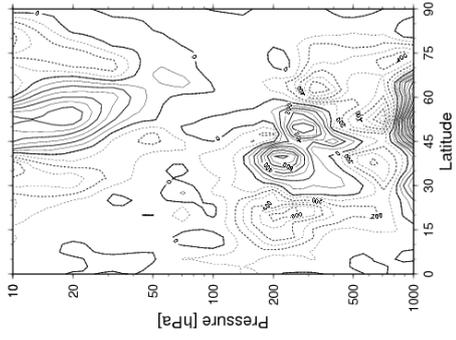


Fig.8 EPFlux の緯度-高度の断面図．横からみて，上図が JCDAS データで，下図が NICAMglevel-10 予報値である．左から 2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 26 日 12Z までをあらわしている．





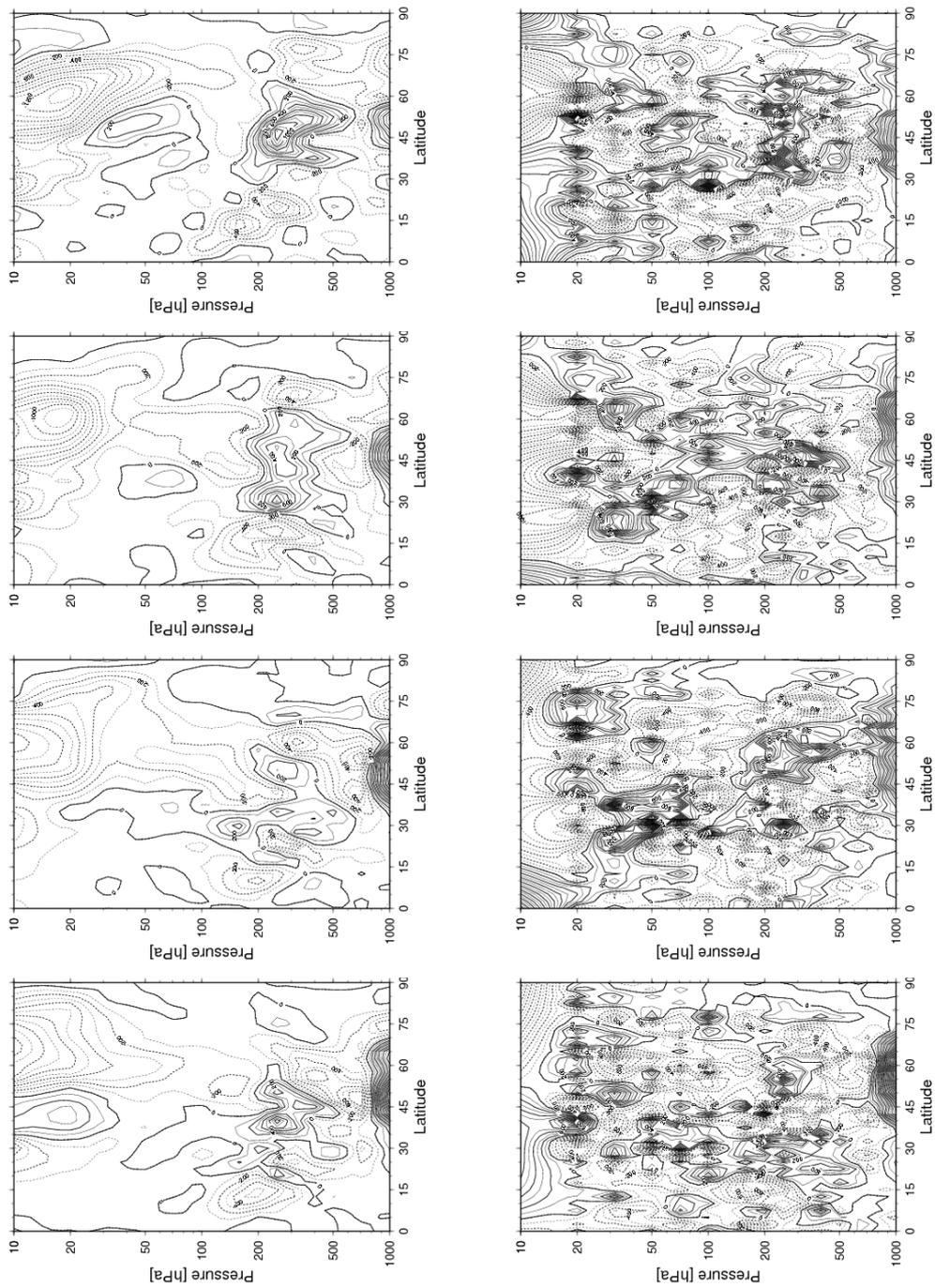
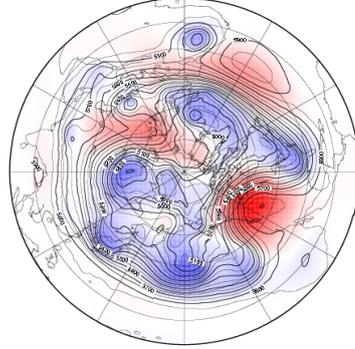
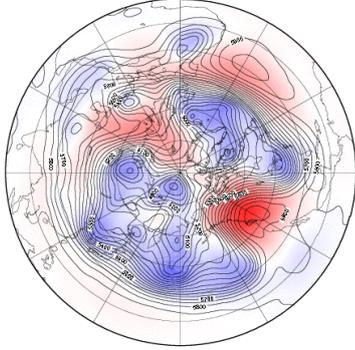
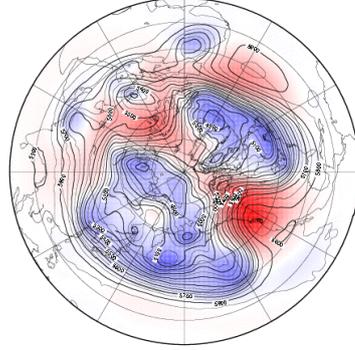
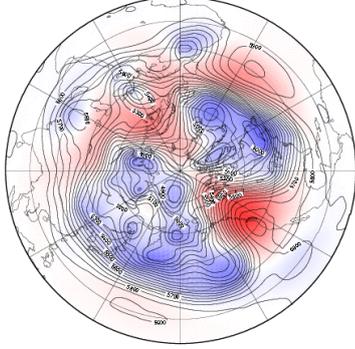
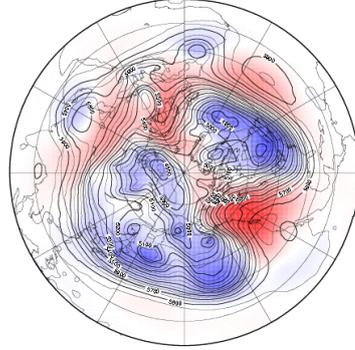
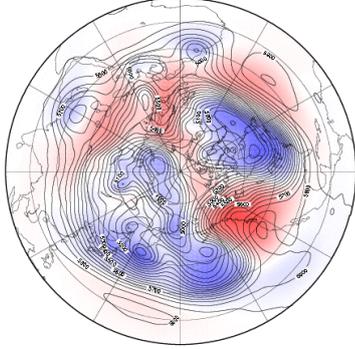
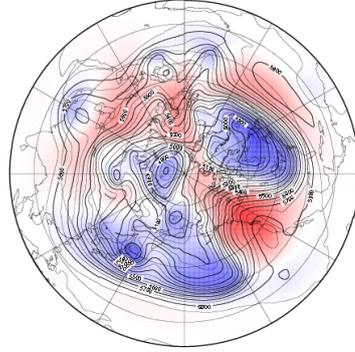
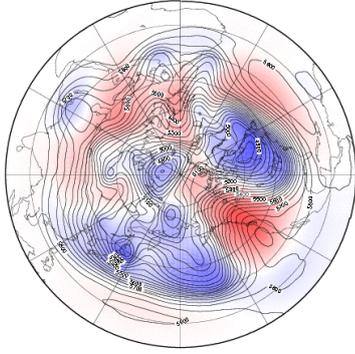


Fig.9 EPFlux の収束・発散の緯度-高度の断面図．横からみて，上図が JCDAS データで，下図が NICAMglevel-10 予報値である．左から 2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 26 日 12Z までをあらわしている．



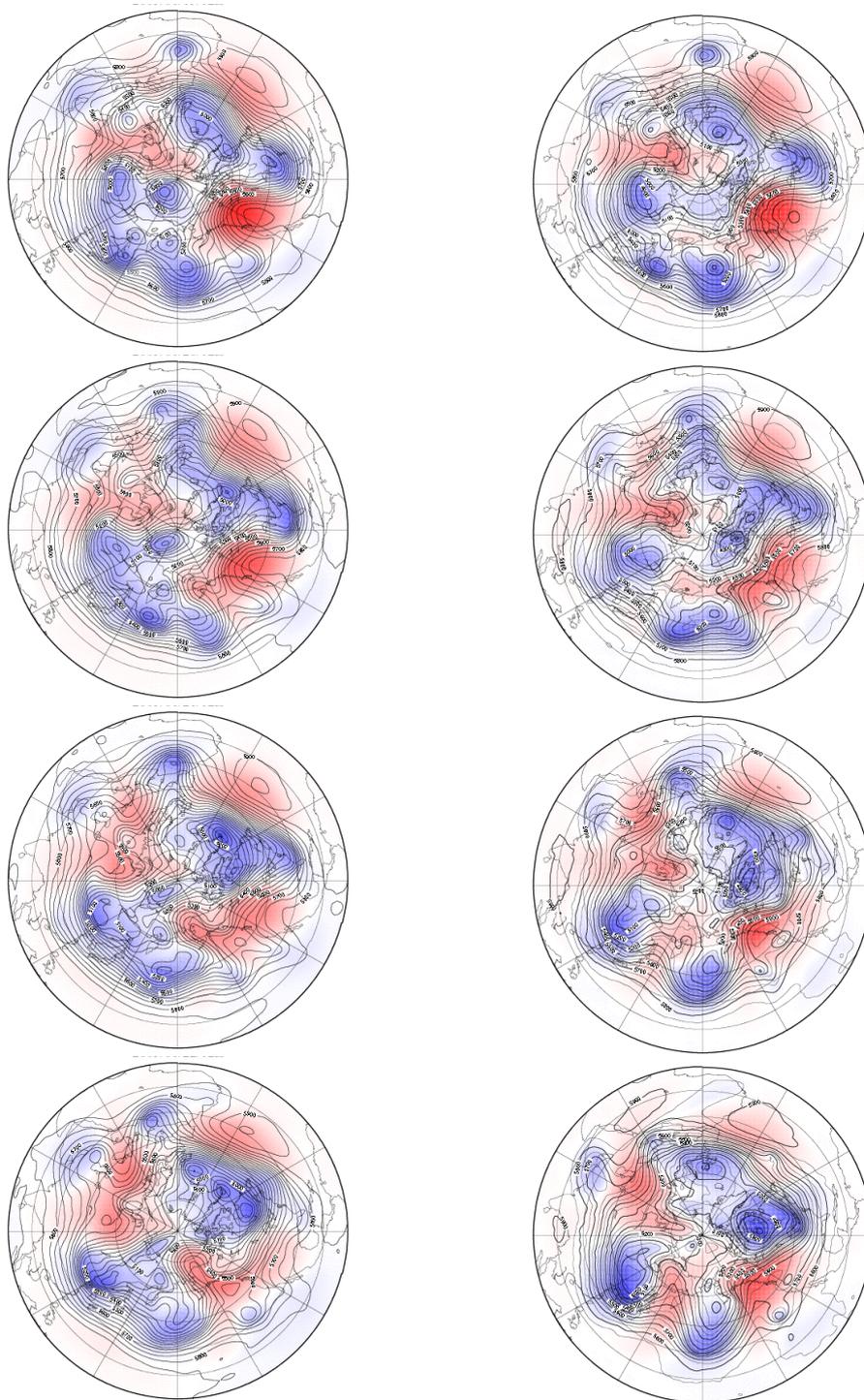
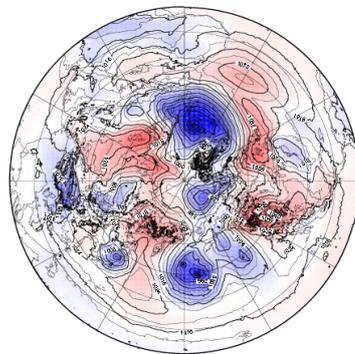
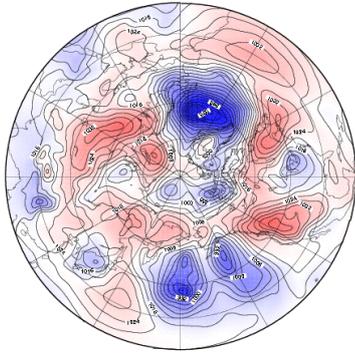
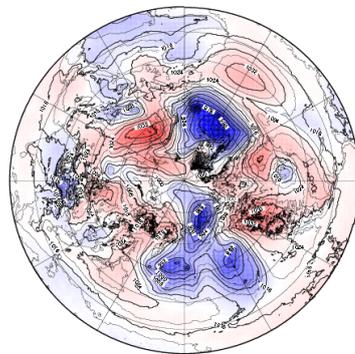
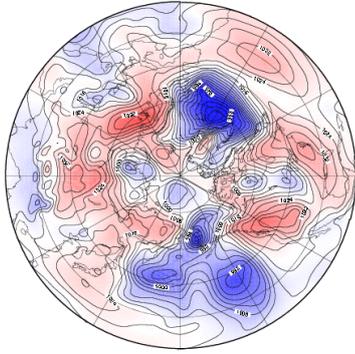
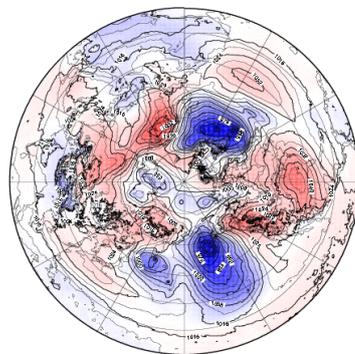
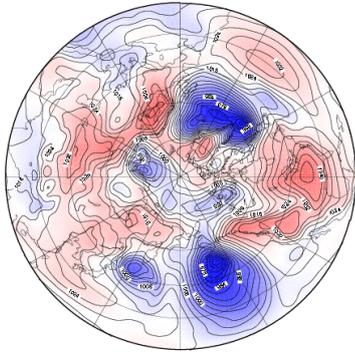
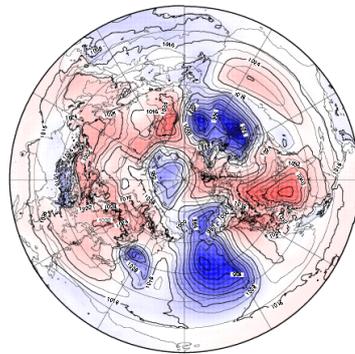
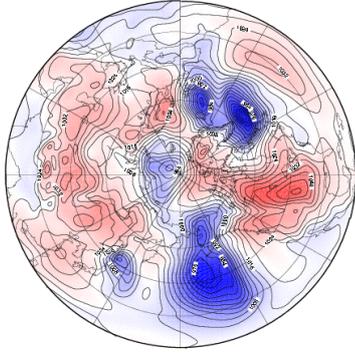


Fig.10 500 hPa での北半球のジオポテンシャル高度．左が JCDAS データ，右が NICAMglevel-10 予報値．上から，2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 22 日 12Z までをあらわす．



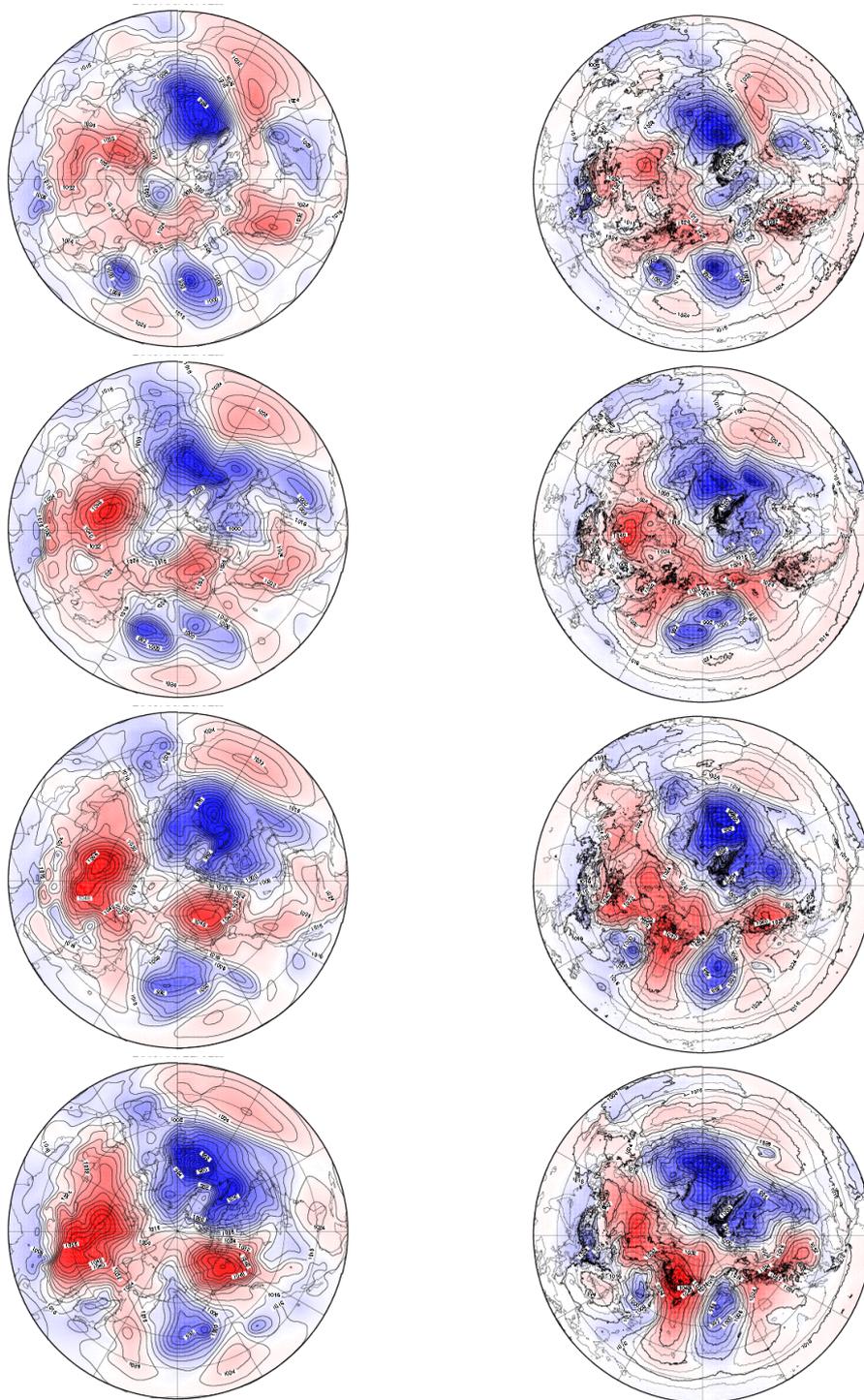
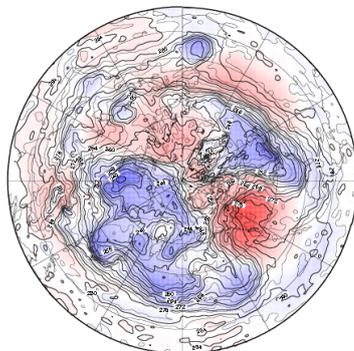
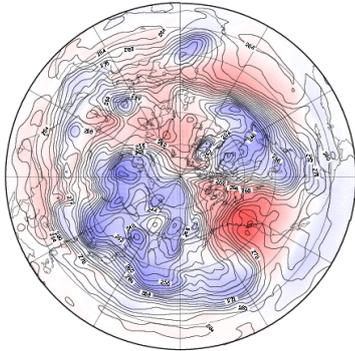
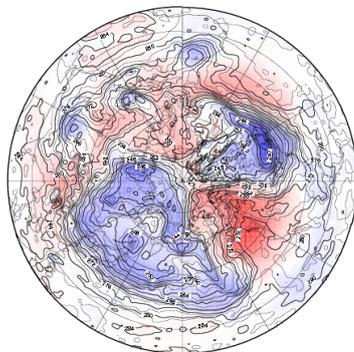
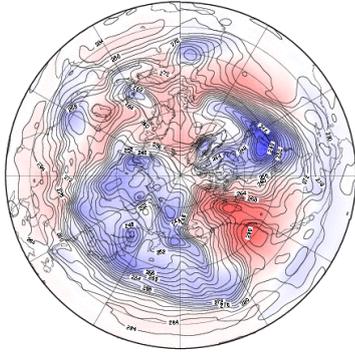
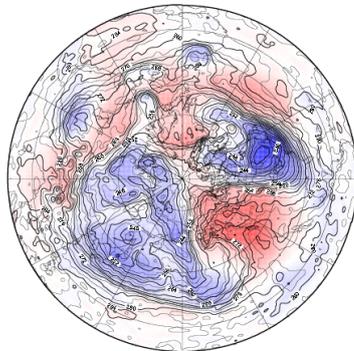
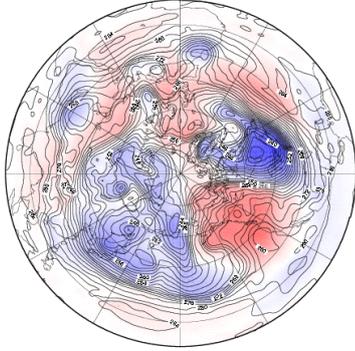
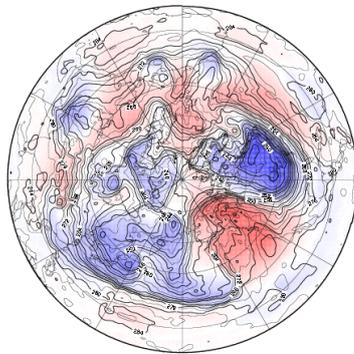
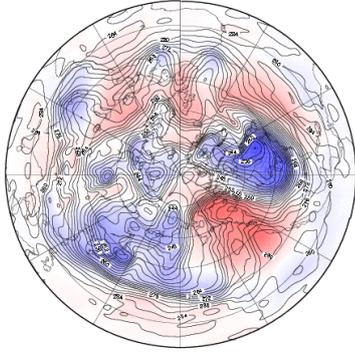


Fig.11 北半球の海面更正気圧．左が JCDAS データ，右が NICAMglevel-10 予報値．上から，2009年1月15日12Zから1日ごとに2009年1月22日12Zまでをあらわす．



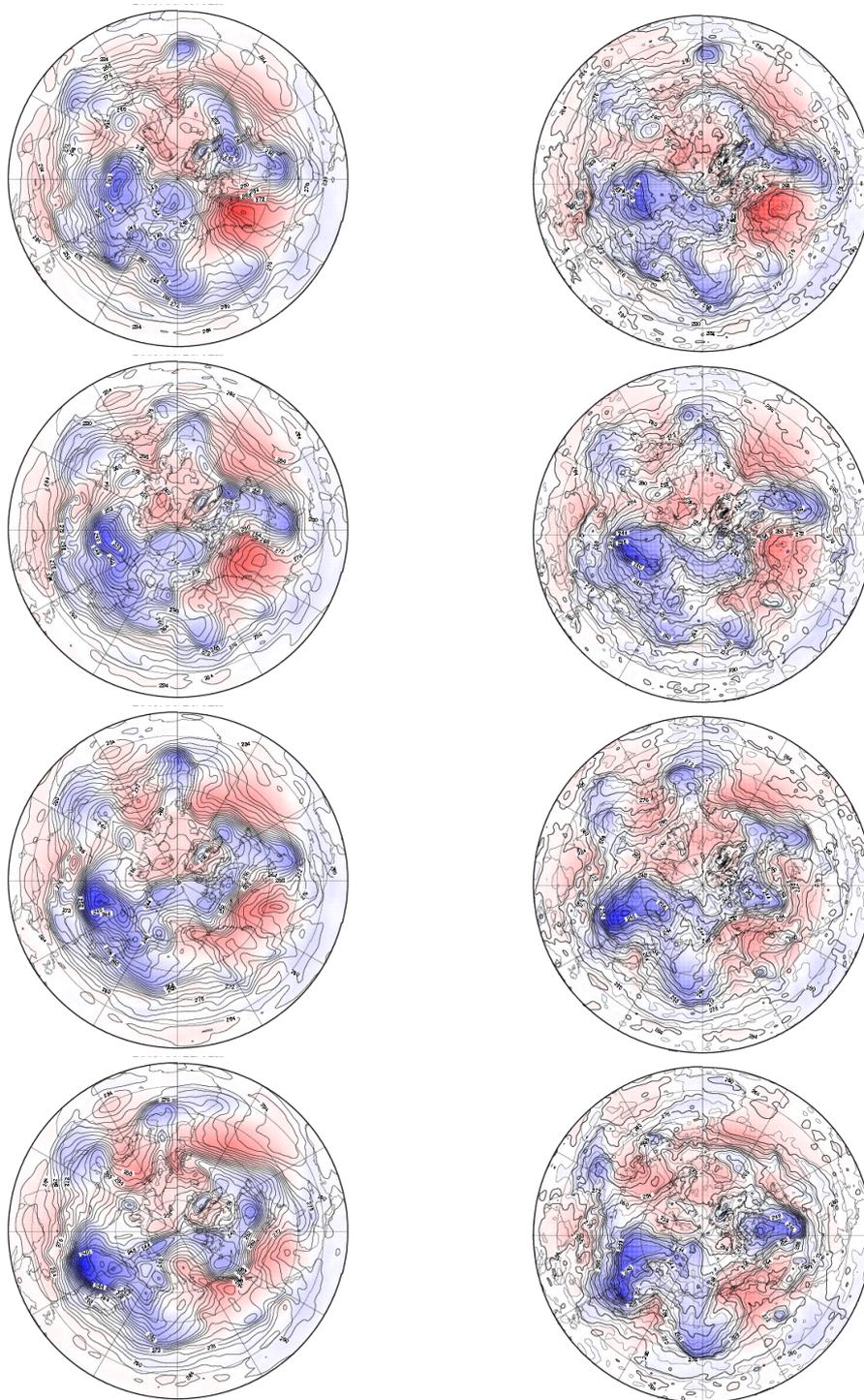
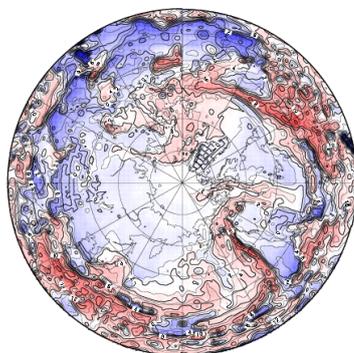
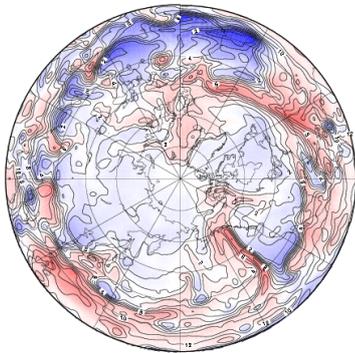
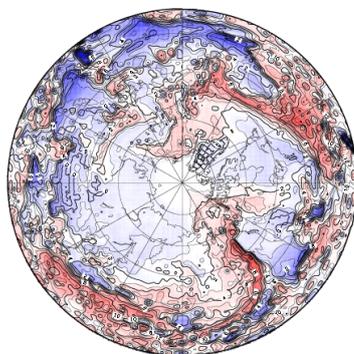
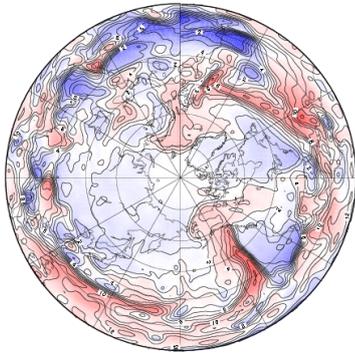
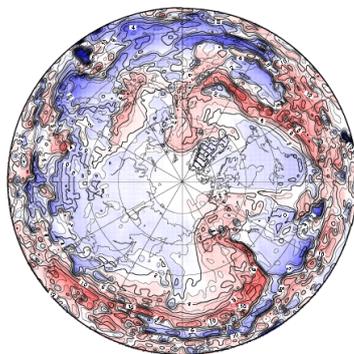
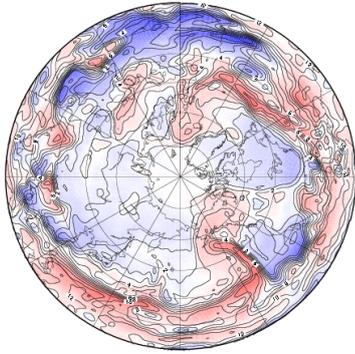
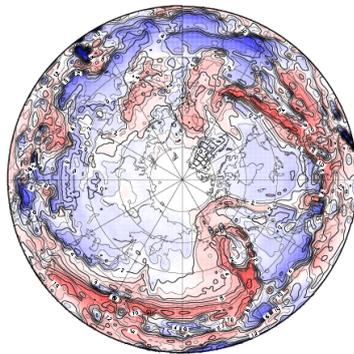
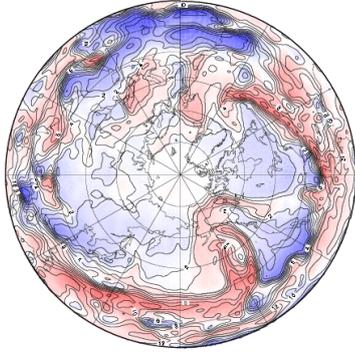


Fig.12 700 hPa での北半球の気温 . 左が JCDAS データ , 右が NICAMglevel-10 予報値 . 上から , 2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 22 日 12Z までをあらわす .



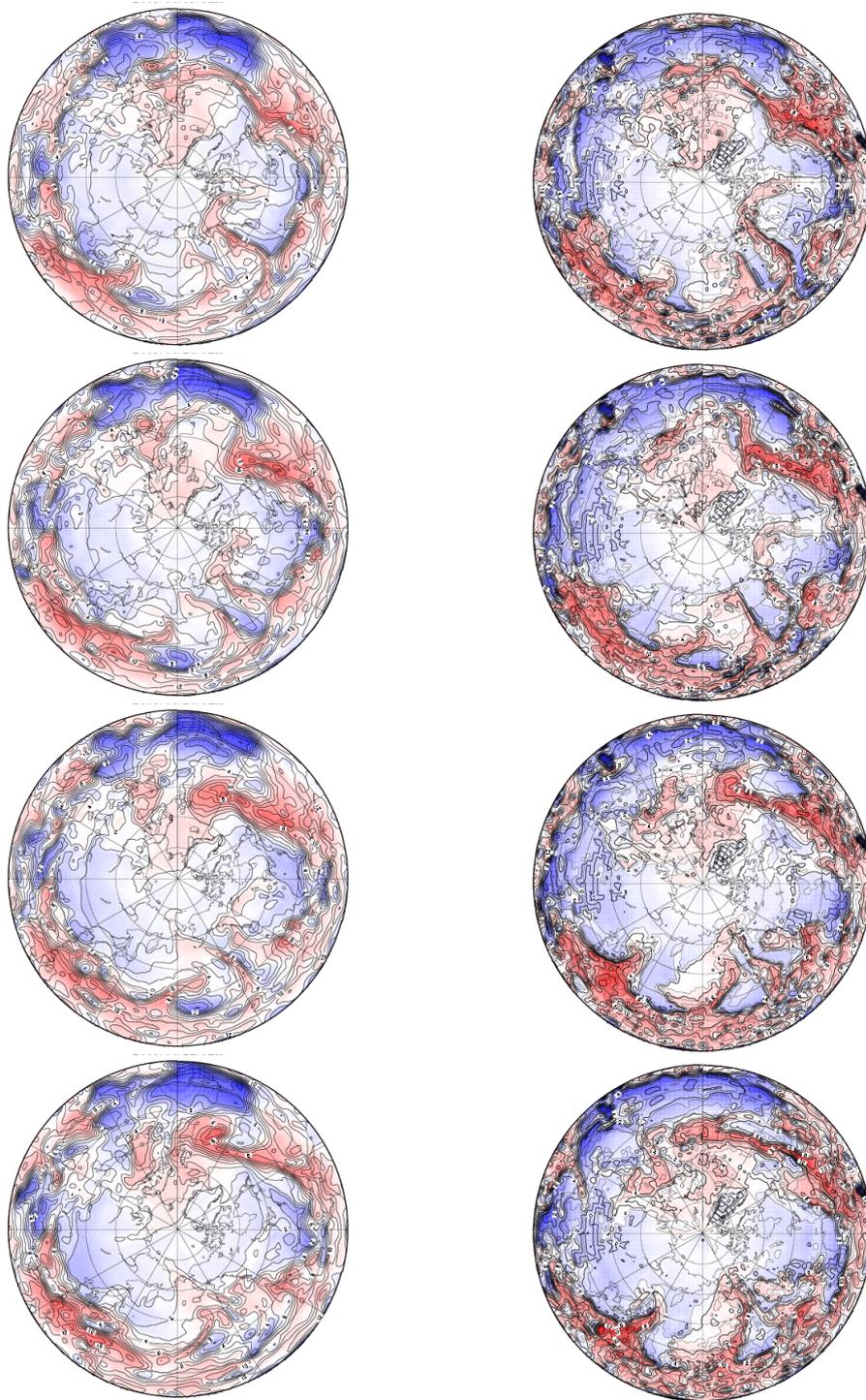
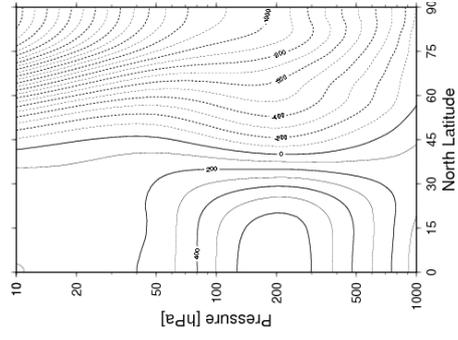
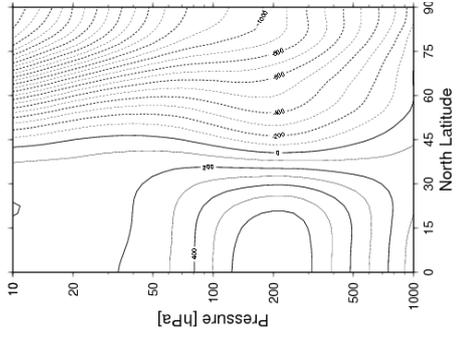
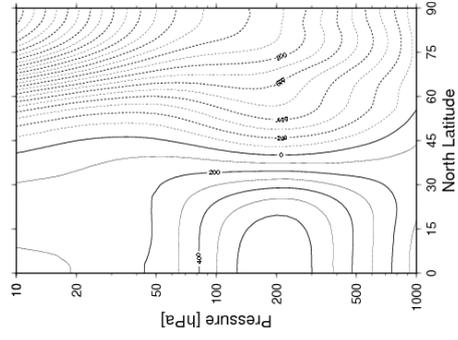
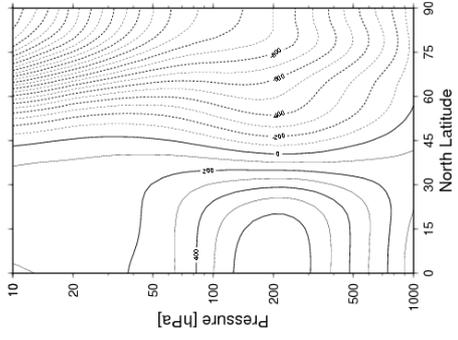
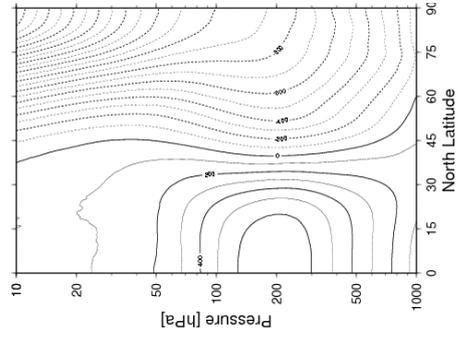
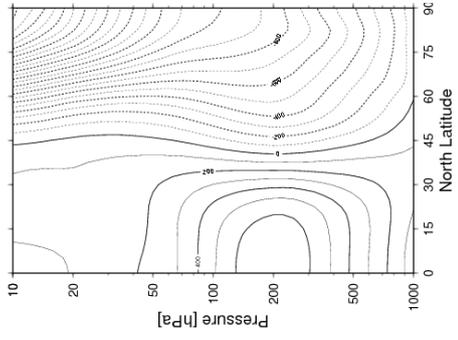
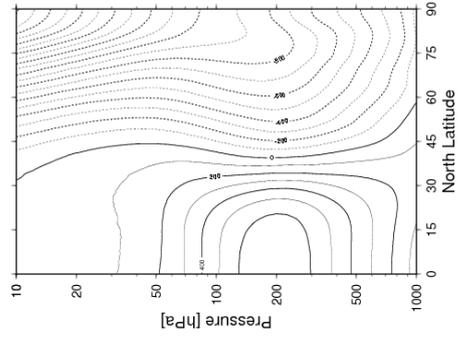
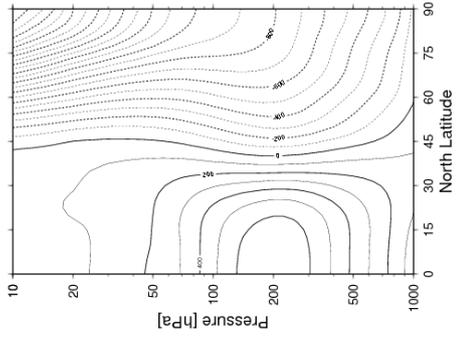


Fig.13 850 hPa での北半球の比湿 . 左が JCDAS データ , 右が NICAMglevel-10 予報値 . 上から , 2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 22 日 12Z までをあらわす .



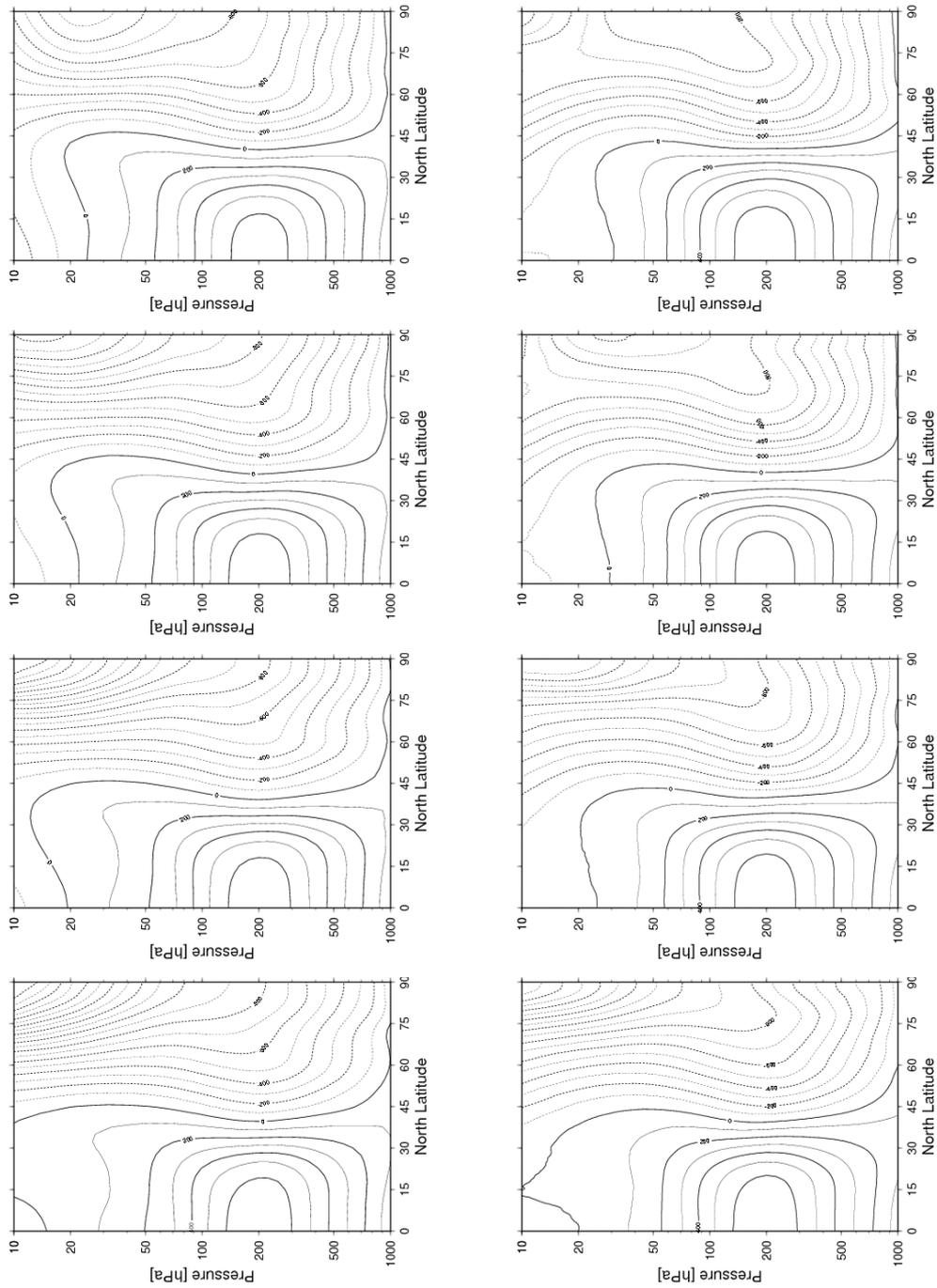
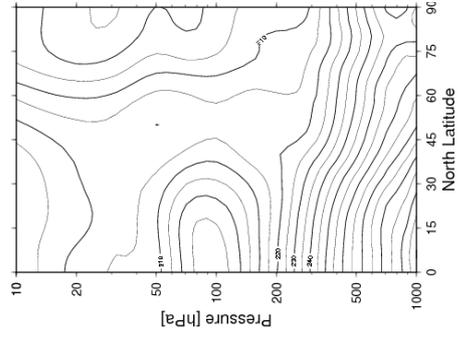
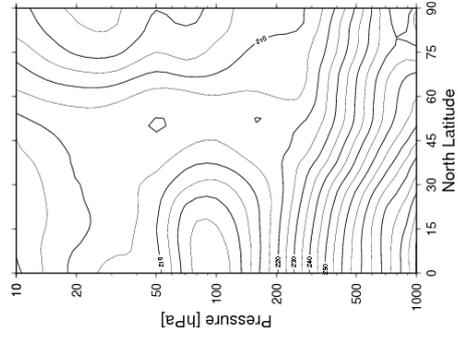
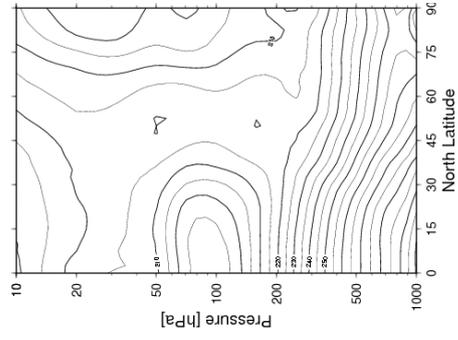
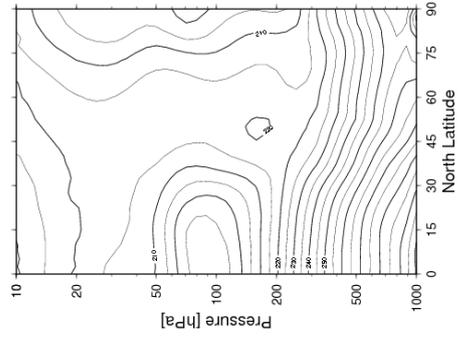
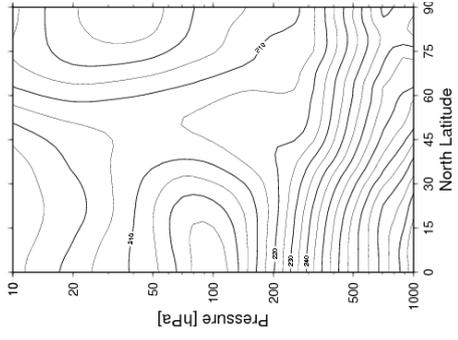
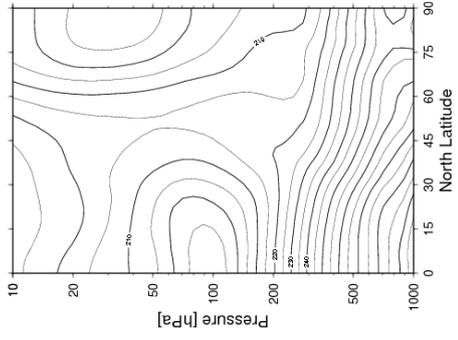
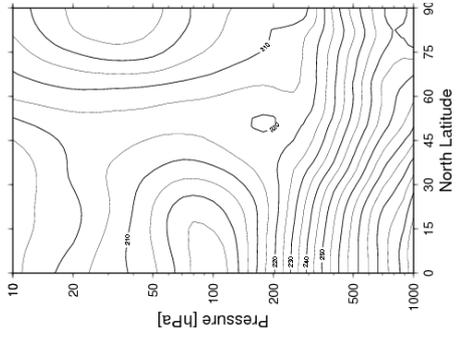
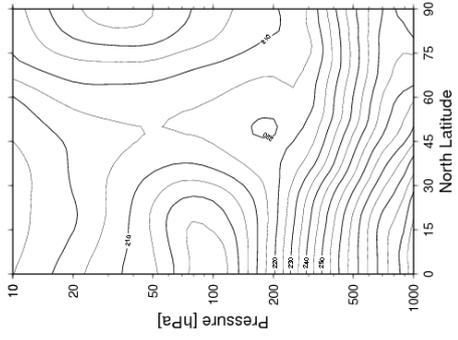


Fig.14 ジオポテンシャル高度の緯度-高度の断面図 (全球平均からの差) . 横からみて , 上図が JCDAS データで , 下図が NICAMglevel-10 予報値である . 左から 2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 22 日 12Z までをあらわしている .



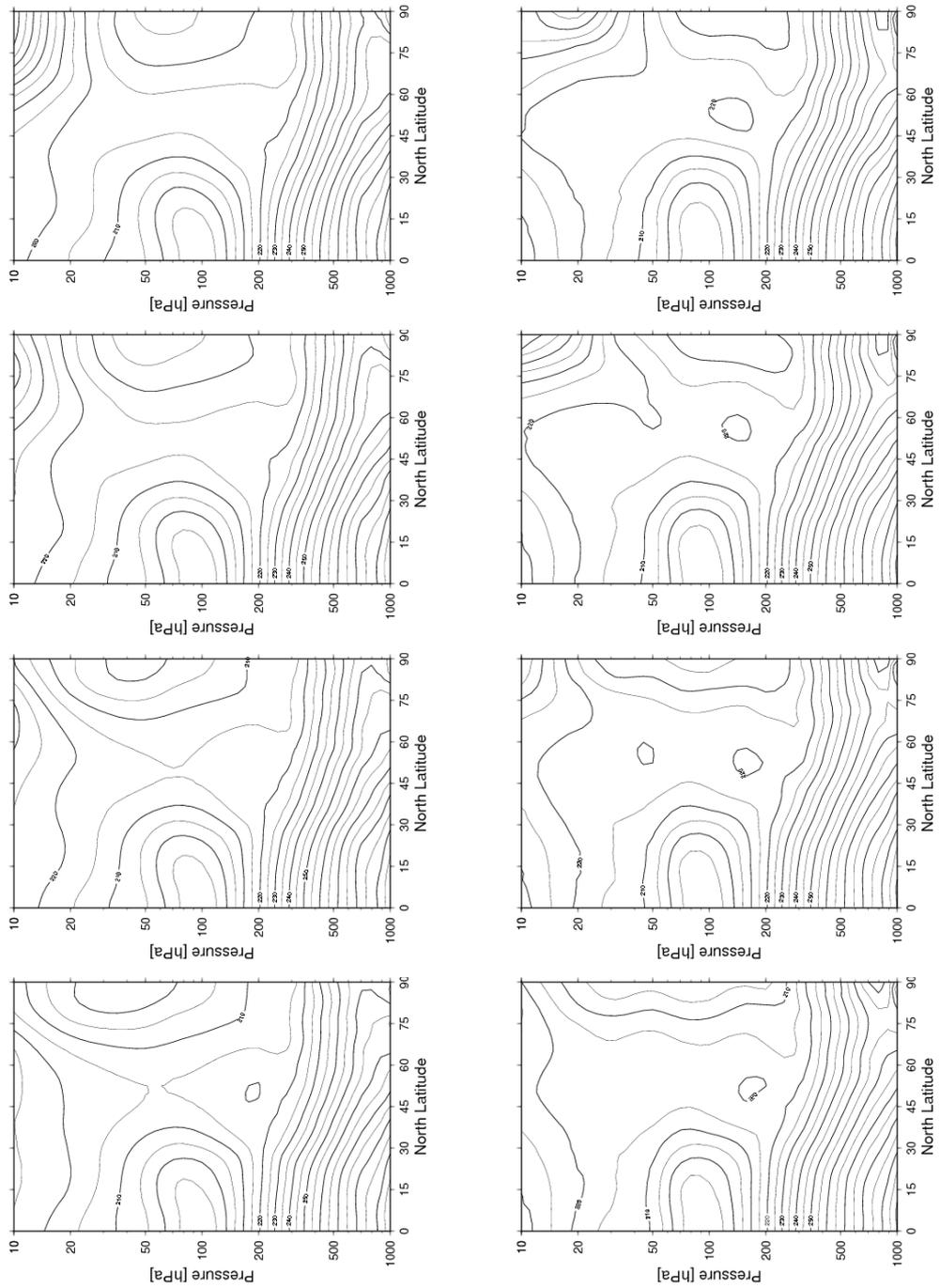
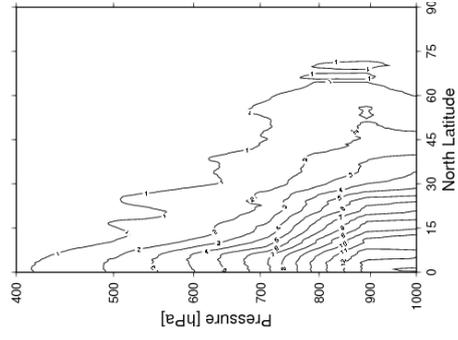
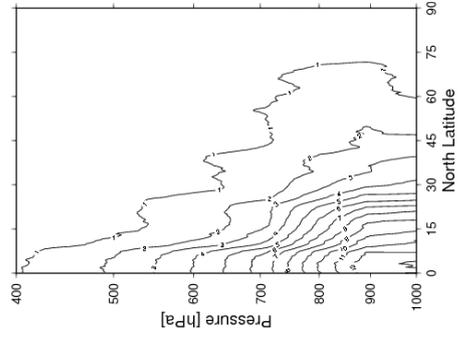
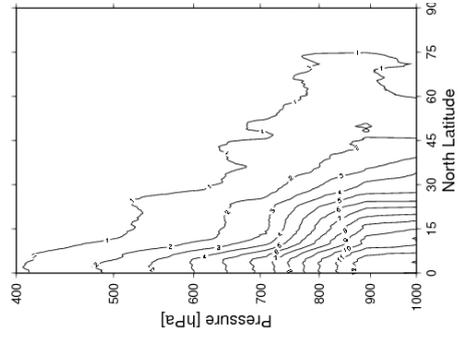
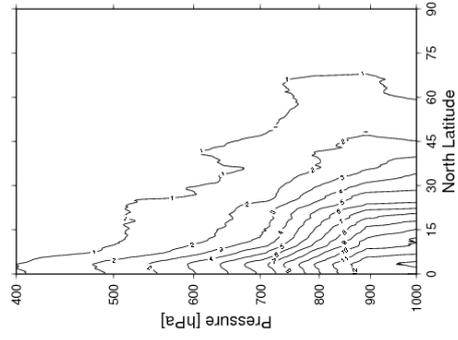
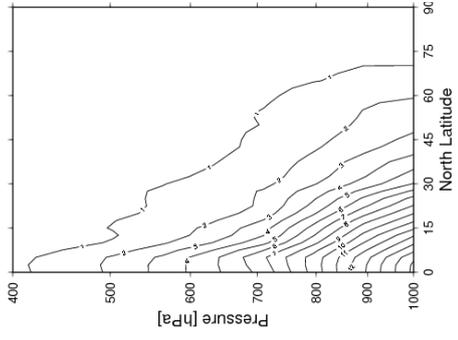
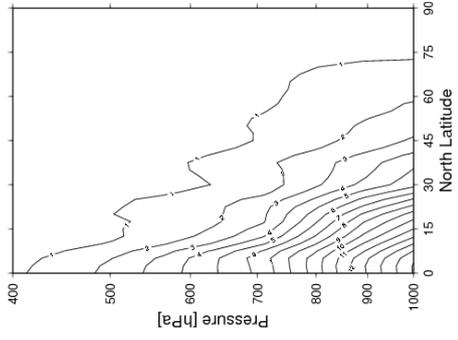
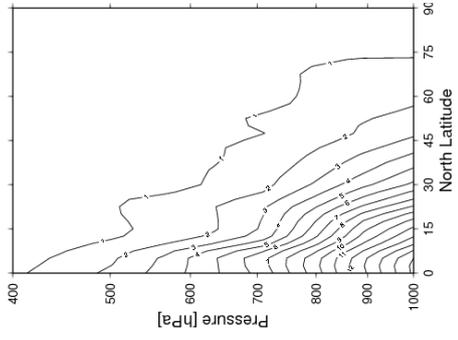
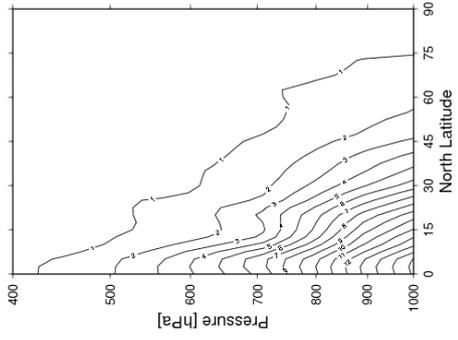


Fig.15 帯状平均気温の緯度-高度の断面図．横からみて，上図が JCDAS データで，下図が NICAMglevel-10 予報値である．左から 2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 22 日 12Z までをあらわしている．



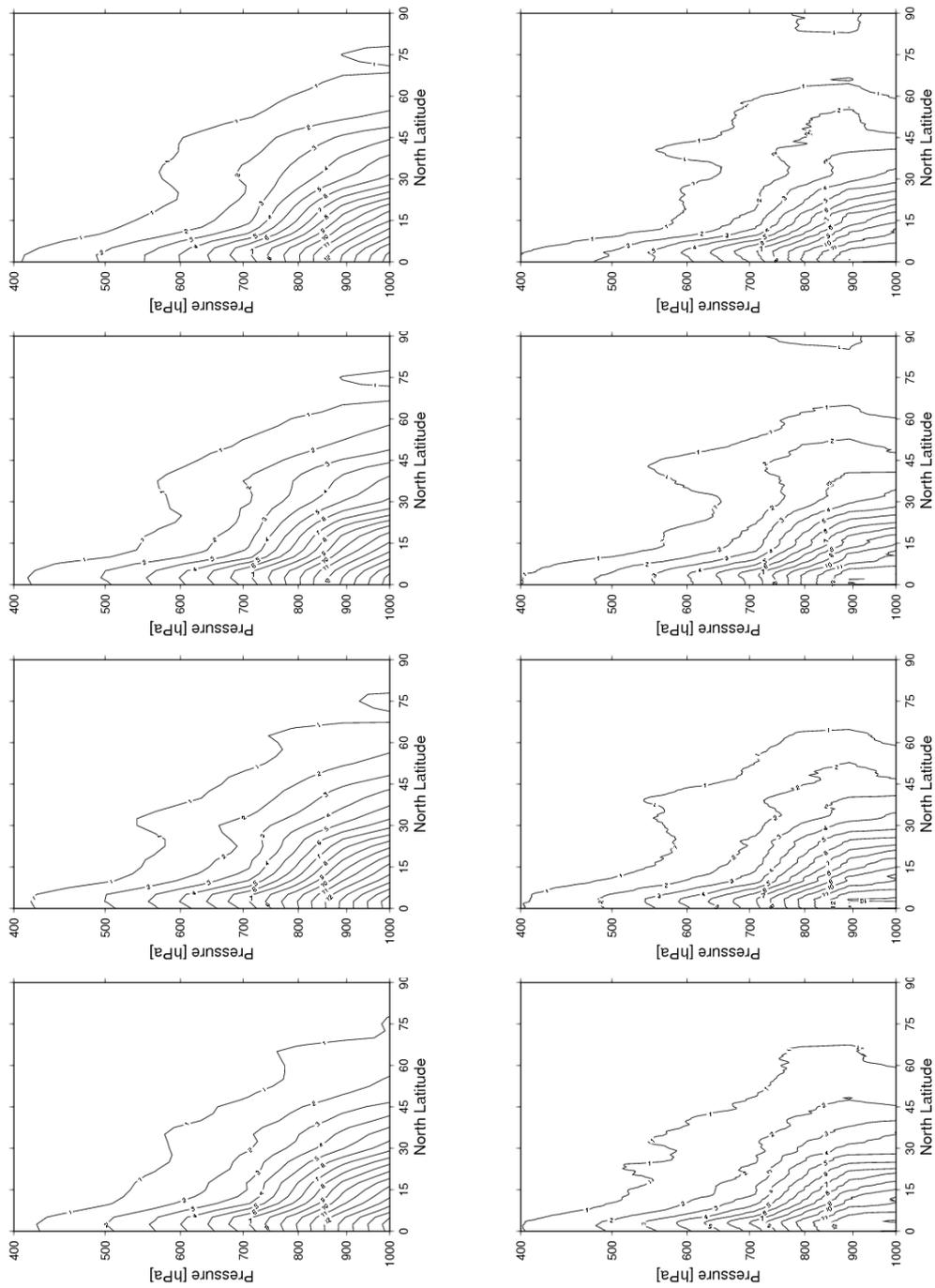
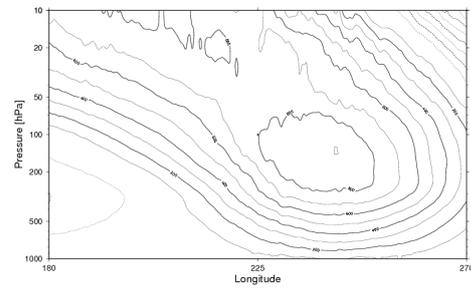
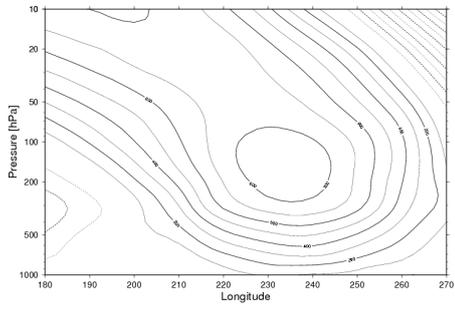
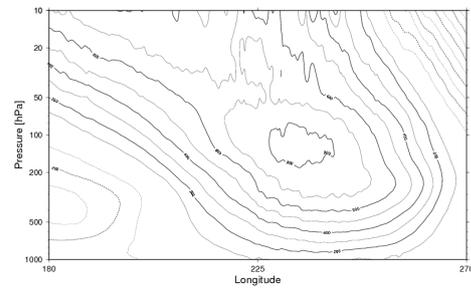
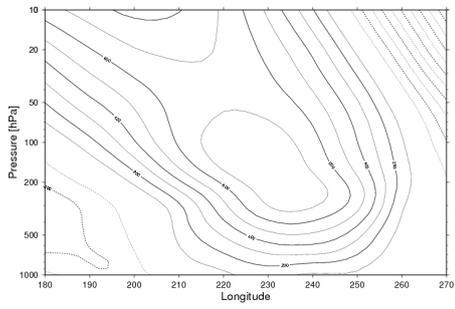
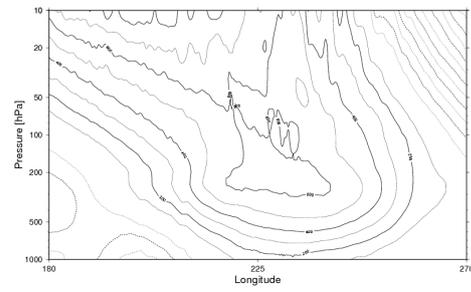
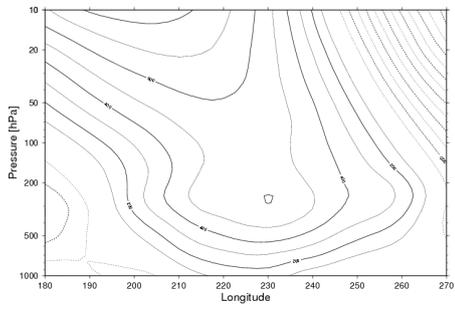
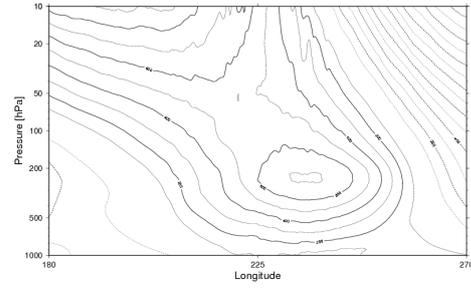
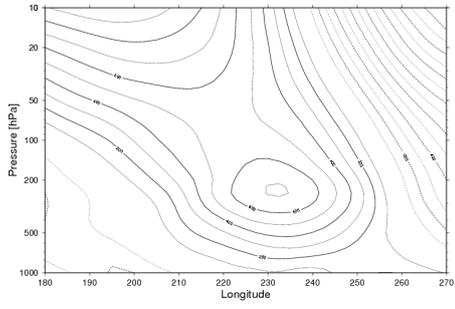


Fig.16 帯状平均比湿の緯度-高度の断面図．横からみて，上図が JCDAS データで，下図が NICAMglevel-10 予報値である．左から 2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 22 日 12Z までをあらわしている．



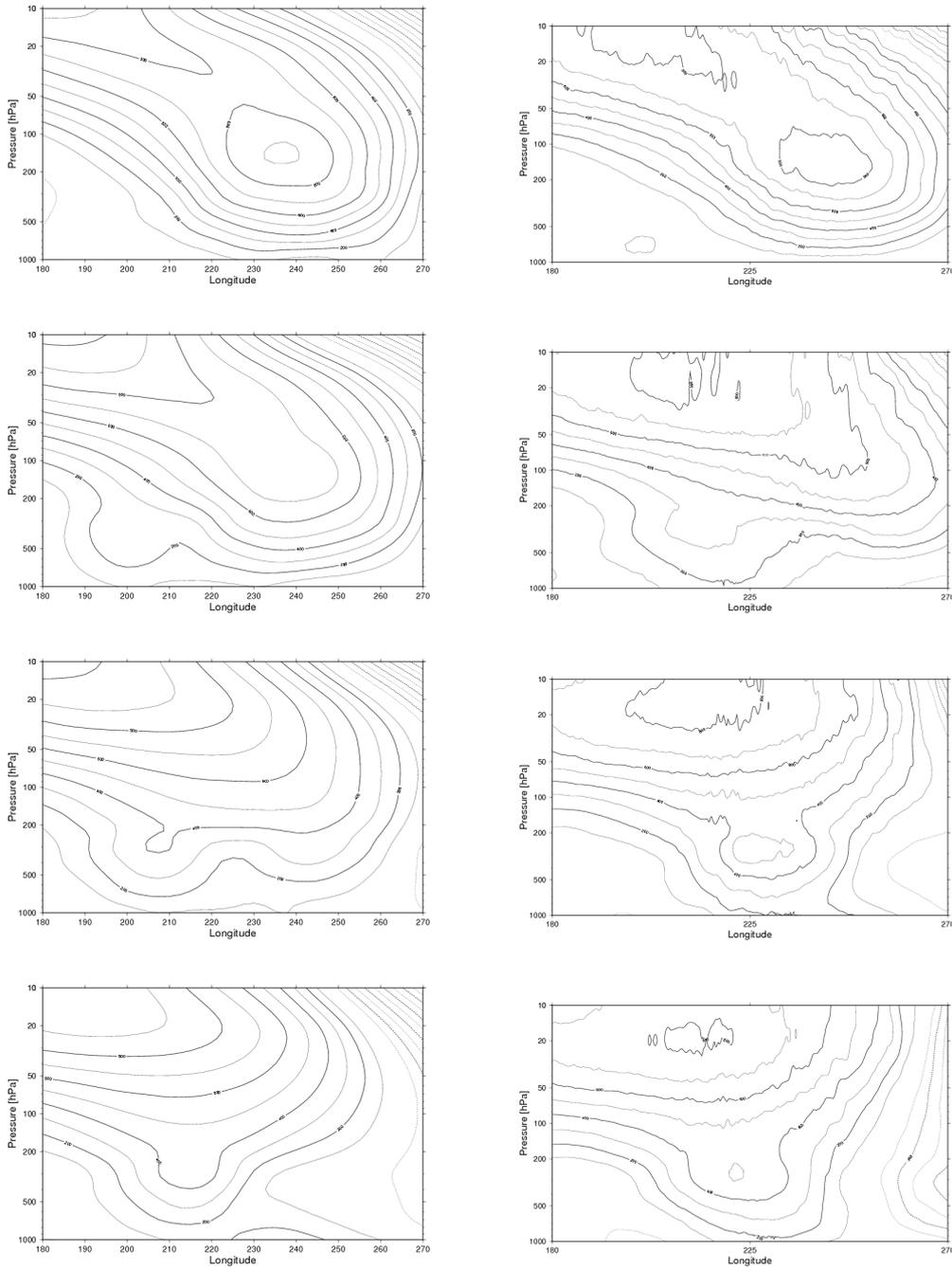
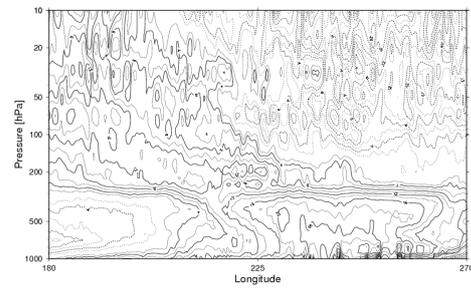
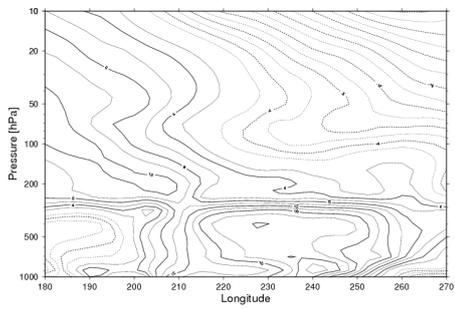
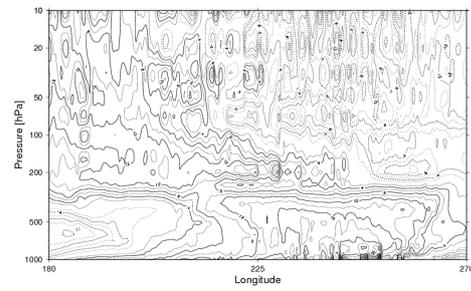
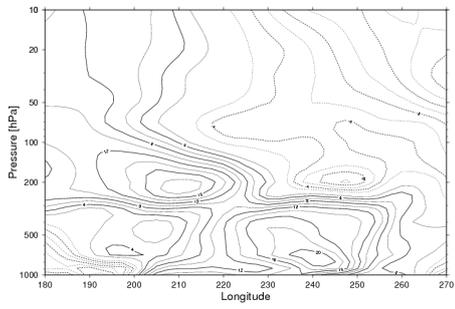
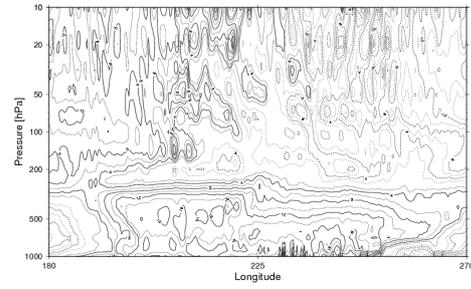
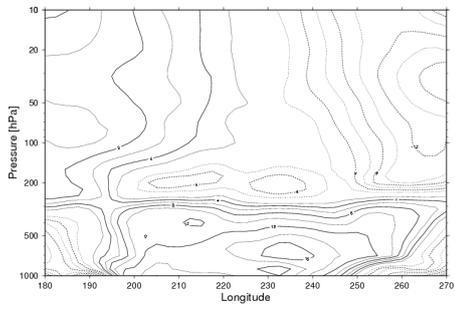
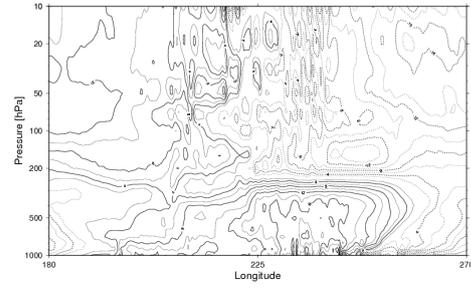
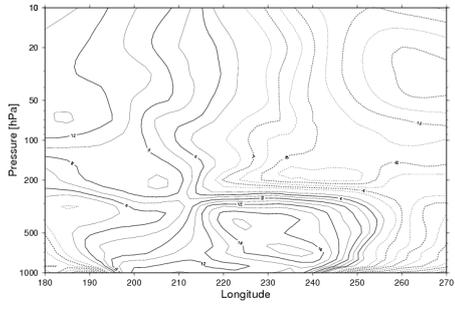


Fig.17 ジオポテンシャル高度の帯状平均からの偏差の経度-高度断面図．左図が JCDAS データで，右図が NICAMglevel-10 予報値である．上から，2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 22 日 12Z までをあらわしている．



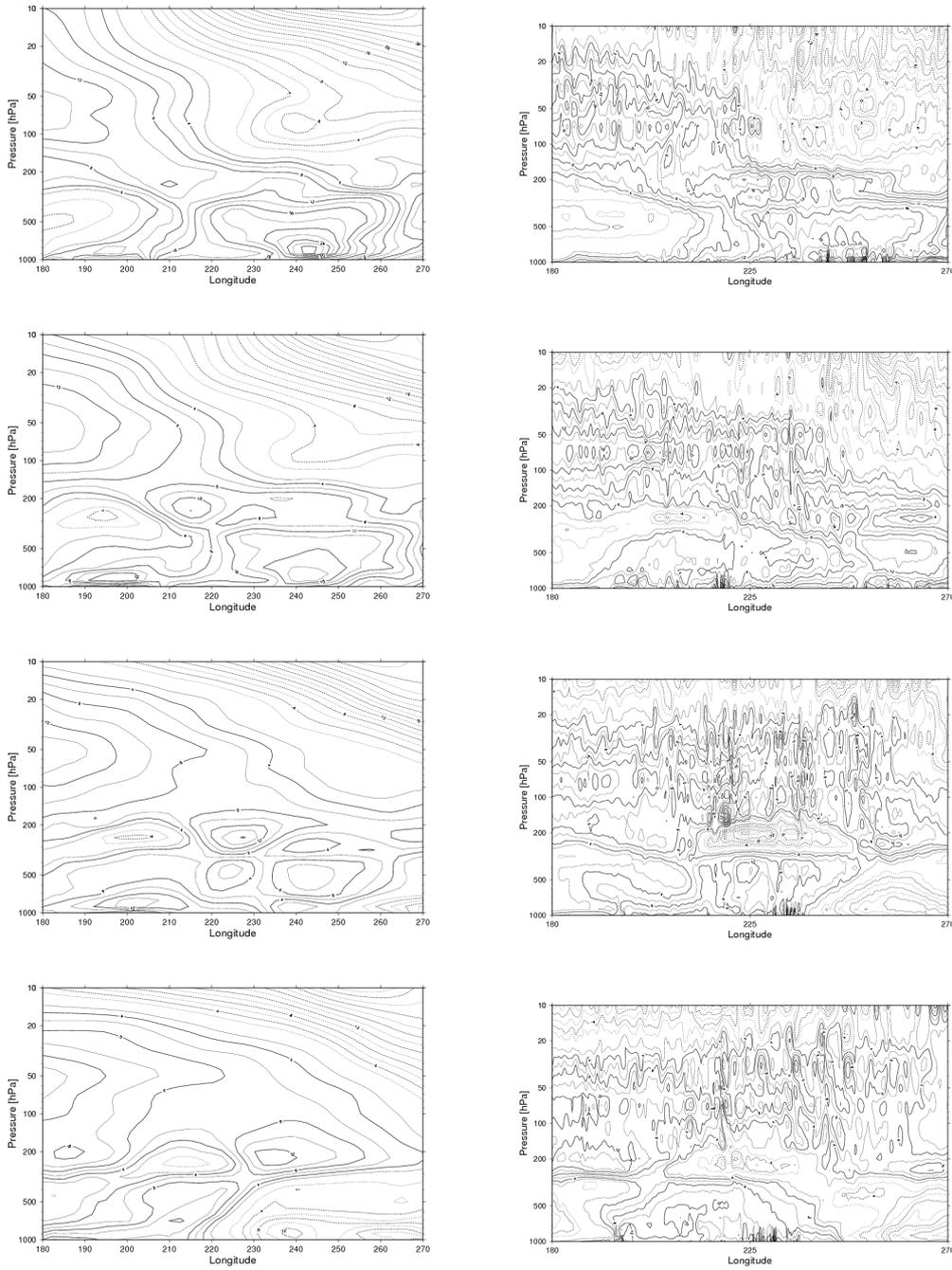


Fig.18 気温の帯状平均からの偏差の経度-高度断面図．左図が JCDAS データで，右図が NICAMglevel-10 予報値である．上から，2009 年 1 月 15 日 12Z から 1 日ごとに 2009 年 1 月 22 日 12Z までをあらわしている．