

平成 20 年度 卒業論文

夏季における北極低気圧と温帯低気圧の  
力学的・統計的比較

筑波大学 第一学群 自然学類

地球科学主専攻

200510356

高橋真司

2009 年 1 月

## 目次

## 図目次

## 表目次



# **Dynamics and Statistics of Cyclones over the Arctic Ocean Compared with Extra-tropical Cyclones**

**Shinji TAKAHASHI**

## **Abstract**

The Arctic has undergone drastic warming in recent years. During 2007, the summer minimum ice extent observed in September decreased to 4.3 million km<sup>2</sup> (the new record minimum) and at the end of the melt season, the sea ice coverage was 39% below the long-term average from 1979-2000. Overall in 2007, the ocean surface circulation regime in the Beaufort Sea was strongly anticyclonic in the winter and summer. One of the key factors contributing to the drastic loss of sea ice was the unusually persistent high-surface pressure over the Beaufort Sea from June through to August, which was coupled with a persistent cyclone over the Barents Sea (Gascard et al., 2008).

In this study, the dynamics and statistical analysis of the cyclones over the Arctic Ocean are examined using the JCDAS data. The frequency of the cyclone tracks, the vertical structure of the vortex tube, air temperature, wind and the characteristic features of the life cycle of the cyclones were investigated. These factors were compared with the extratropical cyclones that are excited by baroclinic instability and a tropical cyclone (Hurricane KATRINA in 2005) which are excited by the conditional instability of the second kind (CISK). The Arctic cyclone was then, simulated by a new model (the Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model, NICAM) and contrasted with the same cyclone from the JCDAS data.

Firstly, the summer period (JJA) of 2005-2008 was examined. Cyclones with cyclogenesis at high latitudes (defined in this study as all regions north of 60°N) and life cycles

longer than three days were selected.

Five cyclones meeting the above conditions were identified. The cyclones identified in these five cases displayed several interesting characteristics; their life cycles were long (maximum:27.75-d, five Cases average:20.85-d, the detected cyclones average:2.3-d) and the direction of movement of the cyclones were uncertain. Furthermore, the cyclones exhibited a barotropic structure and were observed directly below the polar vortices at the 500 hPa height field. The vertical structure of the vertical p-velocity also indicated the distribution of the updraft at the cyclone center and the downdraft above the 200 hPa height. The distribution and the vertical structure of the air temperature at 200 hPa height showed the presence of a warm core.

Next, Case 5 (the most developed cyclone) was examined. Analysis was done for each forecast time (after the initial forecast time of 00Z, June 22nd, 2008); 24 hours, 72 hours, 120 hours and 162 hours later with the NICAM forecasts compared to the JCDAS data. To summarize, the deterministic predictability of the Arctic cyclone was shorter than a week. To conclude, it is difficult to forecast cyclones in the high latitude regions.

Thus, the Arctic cyclones had several interesting characteristics and are assumed to be created due to the warm core at the high levels; the warm core are formed as results of the downdraft with adiabatic compressive heating at the lower levels of the stratosphere.

## **Key Words**

Arctic Ocean, Arctic Cyclone, Polar Vortex, Warm Core, Downdraft, NICAM.

## 1 はじめに

近年、北極域は劇的に温暖化している。Rigor et al. (2000) では、北極での 1979-97 年での地表気温を解析した結果、有意な温暖傾向を示した。海水の減少についても、変化は劇的で 2002 年以降、海水の減少は加速している。2007 年 9 月には海水面積は史上最低値 (430 万  $\text{km}^2$ ) を記録し、これは 1979-2000 年の平均値を 39% 下回っている。北極海の大西洋側の領域における海水の消失は、夏季での高気圧・南風パターンの異常な持続により熱が輸送され、雲の分布は変化した。さらに南風は海水を大西洋側へと輸送した (Gascard et al., 2008)。Shimada et al. (2006) では、大陸沿岸部付近の海水が減少することで、海水運動によって海水の変動が大きくなり北極海から海水が流出したり、北極海の流動性の上昇で海水の形成が妨げられる。つまり、海水の流動性の上昇により北極海が動的な環境に変化し海水は激減した。Ogi and Wallace (2007) では、海水に覆われていない海域が地域的アルベドと秋期における大気への熱フラックスの強化を減少させる。強い低気圧パターンは海水の高い変動性により海水を分散させ、海水の減少傾向を助長する。また北極海に、大西洋から海水流入が増加したことによって、北極海が大西洋化したことによって多くの変化が生じた (Polyakov et al. 2005; Holland et al. 2006)。そして北極海は新しい・温暖な局面に移行したと Walczowski and Piechura (2006) は示唆した。Serreze and Barrett (2008) では、傾圧性により形成された低気圧が北極海中央部に集中し、同じ領域に長時間存在した。低気圧によって形成された気圧パターンにより、海水はかき回され、海水は徐々に減少した。2007 年、ボーフォート海での海洋表面の循環パターンは、夏季・冬季ともに強い高気圧性循環を示している。海水の劇的な減少の重要な要因の 1 つは、夏季の異常なボーフォート高気圧の持続とバレンツ海での低気圧の持続が合わさり、強い循環がもたらされたことである。

東京大学気候システム研究センター (CCSR) と地球環境フロンティア研究センター・海洋研究開発機構 (FRCGC/JAMSTEC) では、非静力学を用いた正 20 面体大気モデルの開発が進められた (M. Satoh et al., 2007)。この新しいモデルが NICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) である。NICAM は、地球シミュレータの計算力を用いることにより、水平格子間隔を 5 km 以下の解像度に上げ、“全球雲解像モデル”として用いられることを目的としている。また、NICAM は一週間程度の気象システムにおける短期予報と同時に、準平衡な気候システムを表現する長期予報を目的として作られた。将来的には

温暖化に対する雲応答について、より信頼に足る結果を得られると期待されている。

## 2 目的

これまで北極域の低気圧について、研究はなされていた。しかし、本研究で述べるような特徴を持つ低気圧についての論文はあまり見当たらない。本研究では、この特徴的な低気圧を北極低気圧 (Arctic Cyclones) とする。この北極低気圧について適当な事例を選別し、様々な要素から特徴を明らかにする。また北極低気圧について、熱帯低気圧や温帯低気圧との類似点・相違点についても示す。また、NICAM で北極低気圧数値実験を行い、NICAM の予報データと JCDAS データを各要素において比較を行う。

## 3 データ

### 3.1 JCDAS

本研究で用いた解析データは、気象庁気候データ同化システム (JCDAS: JMA Climate Data Assimilation System) のデータである。2006 年 3 月よりリアルタイム運用を開始した JCDAS は、JRA-25 と同じシステムで計算するデータ同化サイクルを現在まで延長したもので、対象期間は 2005 年 1 月以降となっている。データの詳細は以下の通りである。

---

期間	: 2005 年～2008 年の夏季 (JJA)
内容	: 気圧面解析値
水平格子系	: 等緯度経度系
時間間隔	: 00Z, 06Z, 12Z, 18Z の 1 日 4 回 (6 時間間隔)
水平格子間隔	: $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 間隔 (格子数 $288 \times 145$ )
鉛直格子	: 1000 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 600 hPa, 500 hPa, 400 hPa, 300 hPa, 250 hPa, 200 hPa, 150 hPa, 100 hPa, 70 hPa, 50 hPa, 30 hPa, 20 hPa, 10 hPa, 7 hPa, 5 hPa, 3 hPa, 2 hPa, 1 hPa, 0.4 hPa (全 23 層)
データ形式	: GRIB 形式
気象要素	: ジオポテンシャル高度, 温度, 比湿, 東西風速, 南北風速, 海面更正気圧, 相対渦度, 鉛直 $p$ 速度 など

---

### 3.2 ハリケーントラックデータ

本研究で用いた熱帯低気圧のトラックデータは、国立ハリケーンセンター (National Hurricane Center; NHC) の 2005 年のハリケーンカトリーナ (Hurricane KATRINA) についての Historical Hurricane Tracks を用いた。

### 3.3 NICAM 予報データ

#### 3.3.1 初期値作成

NICAM の初期値を JMA-GSM の初期時刻における予報値を用いて作成した。具体的には、等緯度経度系 ( $0.28125^\circ \times 0.28125^\circ$  間隔) でさらに  $p$  系 17 層である JMA-GSM の初期時刻における予報値を、正 20 面体格子系でさらに地形に従った座標  $z$  系 (幾何学的  $z$  系) 40 層に変換して、NICAM の初期値を作成した。

#### 3.3.2 解析用予報データ作成

NICAM の出力は、等緯度経度系 ( $0.28125^\circ \times 0.28125^\circ$  間隔 [glevel-8])、幾何学的  $z$  系 (鉛直 40 層) の GrADS 形式である。 $0.28125^\circ \times 0.28125^\circ$  間隔の水平格子間隔、幾何学的  $z$  系では解析の際不都合なので、NuSDaS (Numerical Prediction Standard Dataset System) のデータ形式と同じ  $0.28125^\circ \times 0.28125^\circ$  間隔の水平格子間隔、 $p$  系に内挿して、NICAM の解析用予報データを作成した。本研究では事例 5 について NICAM での数値実験を行った。事例 5 は、5 事例中最も北極低気圧が発達した事例であり、詳細については??に示しており、概要としては 2008 年 6 月 5 日 00Z に発生し、2008 年 6 月 29 日 00Z に消滅、持続時間は 24 日間である。初期値を 6 月 21 日 00Z として 7 日間予報を行っている。

#### 3.3.3 NuSDaS について

2007 年 4 月に気象庁と日本気象学会の間で気象研究コンソーシアムが締結された。気象研究コンソーシアムとは、気象庁と日本気象学会は学会に所属する研究者が気象庁との共同研究を円滑に実施できるようにするための共同研究契約である。世界の気象学研究においては、観測データの同化やアンサンブル手法による予測可能性など、高度にシステム化された研究が行われるようになってきた。また、研究成果の社会還元を目指して、気象データの提供者と利用者との共同研究も盛んになっている。日本の気象学が、このような世界の気象学研究をリードしていくためには、各研究機関と最先端の現業システムを持つ気象庁との連携が不可欠である。これまで各研究機関がそれぞれに進めてきた観測、データ解析、理論、数値モデル、データ同化、予測可能性、気象データ高度活用などの研究に、気象庁が持つ豊富なデータや現業で培われたさまざまな技術を組織的に組み合わせることにより、より具体的で大きな研究成果が期待される。その一環として気象庁からは現業の全球モデルのモデル面解析値が

公開されている。モデルは非常に高解像度で TL959L60（水平方向は三角切断で波数 959 ま  
で、鉛直 60 層）である。AFES (AGCM for Earth Simulator) や NICAM (Nonhydrostatic  
Icosahedral Atmospheric Model) のような数値予報モデルのデータもあるが、このような  
高解像度の解析値を我々は使うことができなかった。気象学の世界ではデータの配布形式と  
して主に netCDF や grib 形式でしているが、気象庁では NuSDaS というファイルの形式を  
用いている。このデータ形式についての説明は気象庁より配布されている資料を参照されたい。  
本研究では気象研究コンソーシアムで気象庁より提供されている全球  $\eta$  面ガウス解析値  
を用いた。NuSDaS のデータについて以下に示す。

---

モデル	: 全球スペクトルモデル
解像度	: TL959L60
東西格子間隔	: $0.1875^\circ$ , 1920 個
南北格子間隔	: ガウシアングリッド, 960 個
鉛直座標系	: $\eta$ 座標系
使用したデータの要素	: 水平風 $u, v$ , 鉛直 $p$ -速度 $\omega$ , ジオポテンシャル高度 $Z$ , 気温 $T$ , 比湿 $q$ , 地表面気圧 $p_s$

---



## 4 方法

### 4.1 相対渦度

相対渦度  $\zeta$  については、大気の密度  $\rho$  の影響を排除するために密度補正を行っている。相対渦度  $\zeta$  は以下の式で示される。JCDAS のデータセットには相対渦度があるため本研究では JCDAS データを用いる。

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

ここで  $u$  は東西風、 $v$  は南北風を示す。式 (1) について密度補正を行う。

$$\zeta_{dc} = \frac{\zeta}{\sqrt{\rho}} = \zeta \times \sqrt{\frac{p_s}{p}} \quad (2)$$

ここで、 $\zeta_{dc}$  とは密度補正を行った相対渦度を、 $p$  は気圧、 $p_s$  は標準気圧 (1000 hPa) を示し、本研究ではこの  $\zeta_{dc}$  を相対渦度として用いる。また、作図する際には便宜上  $10^5$  を  $\zeta_{dc}$  にかけている。

### 4.2 低気圧のトラッキング

#### 4.2.1 地上気圧

本研究では、低気圧の検出およびトラッキングについて Adachi and Kimura (2007) と同じ手法を用いており、これは Serreze (1995) のアルゴリズムを修正して用いている。はじめに、JCDAS の地表面気圧を用いると地形の影響を受けてしまうため、低気圧の中心を検出するのに不適切である。そのため、6 時間ごとの地表面気圧からおおの 31 日移動平均の地表面気圧気候値を算出し、JCDAS の地表面気圧から気候値を除し、地表面気圧アノマリーデータを作成する。本研究の対象地域は北緯  $50^\circ$  以北の北極域であるため、等緯度経度系である JCDAS データをそのまま用いると北極点に格子点が集中する問題が生じる。そのため、カリフォルニア州サンタバーバラにある国立地理情報分析センター (the National Center for Geographic Information and Analysis; NCGIA) の等間隔グリッド (Equal-Area Scalable Earth grid; EASE-grid) に線形内挿を行い用いることにする。この EASE-grid の投影法は図??で示したランベルト正積方位図法を用い、EASE-grid の例として図??を示す。

#### 4.2.2 低気圧の中心の検出

ある格子点について、ある格子点を中心とする空間格子 ( $3\times 3, 5\times 5, 7\times 7$ ) を考える。ある格子点と周囲の格子点 (8, 16, 24) との差分をおのおの取る。もし 3 つの空間格子中 ( $3\times 3, 5\times 5, 7\times 7$ ) 1 つでも、すべての格子点 (8, 16, 24) の気圧が、ある格子点よりも 1.1 hPa でも高ければ、そのある格子点は低気圧の中心の候補とする。この作業を全ての格子点について行っていく。もし隣り合う格子点が低気圧の中心の候補となった場合は、それらの格子点の平均の位置を低気圧の中心の候補とする。ここで、検出した低気圧が熱帯低気圧である可能性があるため、地域特別気象センター (The Regional Specialized Meteorological Center; RSMC) の熱帯低気圧データ (RSMC Best Track Data) を用いて熱帯低気圧を除外した。

#### 4.2.3 低気圧のトラッキング

低気圧のトラッキングにおいては、最近傍法 (nearest-neighbour method) を用いる。最近傍法で検索する領域の範囲は、東西南北に 500 km の正方形である。前 (6 時間前) の低気圧の位置からの領域内で最も近くに存在するものを次 (6 時間後) の同一の低気圧の位置とする。もし条件に合うものが見つからない場合、この低気圧は消滅したものとする。

### 4.3 事例解析

北極域における低気圧について統計的な解析は多くの先行研究があるが、個々の事例について細かく解析したものはあまり見られない。そのため本研究では個々の事例について細かく解析する方が有意義である。したがって、本研究では 2005 年～2008 年の夏季 (JJA) について代表的な事例を 5 事例選定し、各事例について解析を行った。先に述べたアルゴリズムにより検出された北半球における低気圧数は、1 ヶ月でおよそ 150 個程度である。その中から、以下の条件を満たし、なおかつ持続時間が長いものに注目し事例を選定した。

1. 北緯 60 度以北で発生した低気圧であること
2. 持続時間が 3 日 (72 時間) 以上であること

北緯 60 度以北に限定したのは、対象とする地域は北極域であるためである。また持続時間についての条件については、持続時間があまりにも短い (24 時間以下) の低気圧は検出エラーの可能性があるので排除した。

検出された低気圧について詳しく見ると、同一の低気圧が別のものとして扱われている場合が多々見られた。そのため今回解析を行った事例については検出データの修正を行っている。なお、解析を行った事例において低気圧の追跡データが欠如している期間については値を与えず、欠如区間については直線で経路を繋いでいる。検出があまりうまくいっていないのは、対象地域内で低気圧のマージングがよく見られたためこれが正確な検出を困難にしていると考えられる。解析を行った時刻については、全て低気圧が最も発達した時刻であり、位置はおおのこの低気圧の中心位置である。低気圧の検出結果については表??で示す。

これより本研究で解析を行った 5 事例について概要を示す。

<事例 1: 2005 年 7 月 16 日 06Z>

低気圧の発生時刻と位置	: 2005 年 7 月 12 日 12Z, 80.88°N / 21.88°E
低気圧の消滅時刻と位置	: 2005 年 7 月 24 日 12Z, 81.30°N / 84.91°E
解析時刻と位置	: 2005 年 7 月 16 日 06Z, 83.55°N / 37.87°E
持続時間	: 288 時間 (12.00d)

<事例 2: 2005 年 8 月 17 日 06Z>

低気圧の発生時刻と位置	: 2005 年 8 月 13 日 18Z, 55.90°N / 112.69°E
低気圧の消滅時刻と位置	: 2005 年 9 月 9 日 00Z, 86.93°N / 263.86°E
解析時刻と位置	: 2005 年 8 月 17 日 06Z, 82.28°N / 106.96°E
持続時間	: 642 時間 (26.75d)

<事例 3: 2006 年 8 月 18 日 18Z>

低気圧の発生時刻と位置	: 2006 年 7 月 27 日 12Z, 76.99°N / 182.49°E
低気圧の消滅時刻と位置	: 2006 年 8 月 24 日 06Z, 86.96°N / 337.50°E
解析時刻と位置	: 2006 年 8 月 18 日 18Z, 85.95°N / 54.59°E
持続時間	: 666 時間 (27.75d)

<事例 4: 2007 年 8 月 2 日 18Z>

低気圧の発生時刻と位置 : 2007 年 7 月 28 日 06Z, 74.92°N / 77.01°E  
低気圧の消滅時刻と位置 : 2007 年 8 月 11 日 00Z, 81.06°N / 145.31°E  
解析時刻と位置 : 2007 年 8 月 2 日 18Z, 76.25°N / 146.25°E  
持続時間 : 330 時間 (13.75d)

<事例 5 : 2008 年 6 月 22 日 18Z >

低気圧の発生時刻と位置 : 2008 年 6 月 5 日 00Z, 74.72°N / 182.49°E  
低気圧の消滅時刻と位置 : 2008 年 6 月 29 日 00Z, 74.96°N / 337.50°E  
解析時刻と位置 : 2008 年 6 月 22 日 18Z, 82.50°N / 166.25°E  
持続時間 : 576 時間 (24.00d)

<事例 ETC : 2007 年 12 月 14 日 12Z >

低気圧の発生時刻と位置 : 2007 年 12 月 13 日 12Z, 37.18°N / 144.90°E  
低気圧の消滅時刻と位置 : 2007 年 12 月 19 日 06Z, 53.01°N / 150.26°E  
解析時刻と位置 : 2007 年 12 月 14 日 12Z, 44.11°N / 150.52°E  
持続時間 : 144 時間 (6.00d)

<事例 TC : 2005 年 8 月 28 日 18Z >

低気圧の発生時刻と位置 : 2005 年 8 月 23 日 18Z, 23.10°N / 284.90°E  
低気圧の消滅時刻と位置 : 2005 年 8 月 31 日 06Z, 40.10°N / 277.10°E  
解析時刻と位置 : 2005 年 8 月 28 日 18Z, 26.30°N / 271.40°E  
持続時間 : 186 時間 (7.75d)

以上の 5 事例と温帯低気圧の事例 (事例 ETC: Extratropical Cyclone) と熱帯低気圧の事例 (事例 TC: Tropical Cyclone) について解析を行った。北極低気圧について、温帯低気圧と熱帯低気圧とを比較した。ここで事例 2 については条件 1 を満たしていないが、事例 2 の低気圧の発生位置が条件に近い上、他と類似の特徴を持つ事例であるため扱う。

## 4.4 数値実験

本研究では NICAM での北極低気圧の数値実験を事例 5 について行う。JMA-GSM の初期時刻における予報値を NICAM の初期値として入力し、その予報値と JCDAS データによる実測値とを比較する。比較する予報時間は、24 時間後、72 時間後、120 時間後、162 時間後である。

## 5 結果

### 5.1 事例解析

ここでは各事例について、全 7 要素 (高度場, 低気圧の移動経路, 相対渦度, 気温, 比湿, 風, 鉛直  $p$  速度オメガ) からそれぞれの事例の特徴について示す。

#### 5.1.1 事例 1 : 2005 年 7 月 16 日 06Z

■高度場 図??の SLP(Sea Level Pressure) を見るとフランツヨセフ島 (Franz Josef Land) 付近に発達した北極低気圧 (事例 1) がある。さらに、デンマーク海峡 (Denmark Strait) とハドソン湾 (Hudson Bay) や東シベリア海 (East Siberian Sea) にも低気圧が、ボーフォート海 (Beaufort Sea) には弱いながらも高気圧が位置している。500 hPa や 200 hPa から事例 1 と同じ位置に極渦が位置しており、極渦の真下に低気圧が存在している。

■低気圧の移動経路 図??よりスヴァールバル諸島 (Svalbard) 上で発生した事例 1 は、反時計回りに旋回をし南に急速に移動した後、さらに北上しながら反時計回りに旋回し、また南に急速に移動した後、北東に進みながら反時計回りに旋回しセヴェルナヤ・ゼムリヤ諸島 (Severnaya Zemlya) 近くで消滅した。

■相対渦度 図??は各高度における相対渦度を、図??は事例 1 の中心について緯度・経度に沿って切断した相対渦度の鉛直断面である。まず、図??をみるとフランツヨセフ島付近にて全高度において、事例 1 に対応する渦度分布がみられる。また、500 hPa においてははっきりと渦が巻いている様子が分かる。その他の低気圧の地点においても同様に全高度において正の渦度がみられる。さらに SLP にて高気圧がみられたボーフォート海付近においては弱いながらも負の渦度領域がみられる。次に図??をみると、事例 1 の中心において正の渦度領域が地表から極渦 (300 hPa 付近) を経て 30 hPa 高度ぐらいまで垂直的にひと繋がりとなっている。また図??の下図においては、200°E 付近の下層において弱い負の渦度領域があり、これは図??からもみられた高気圧 (ボーフォート海付近) に対応し、この高気圧の中心は 300 hPa 程度となっている。

■気温 図??は各高度における気温場を、図??は事例 1 の中心について緯度・経度に沿って切断した気温偏差 (帯状平均) の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 1 の位置するフラン

ツヨセフ島付近では 500 hPa までは周りよりも気温が低いが、200 hPa では周辺よりも 9 度ほど高くなっている。東シベリア海付近の低気圧においても同様の傾向がみられるが、デンマーク海峡とハドソン湾の低気圧は全高度で周囲よりも気温が高くなっている。さらに SLP にて高気圧がみられたボーフォート海付近では、500 hPa までは周囲よりも気温は高く、逆に 200 hPa では周囲よりも気温は低くなっている。次に、図??をみると低気圧の中心位置において、200 hPa を中心に高温偏差 (ウォームコア) がみられる。地表から 300 hPa までは低温偏差 (負偏差)、300 hPa から上層においては高温偏差 (正偏差) となっている。また図??の右上図 (217.5°E line) において、68°N あたりには、高気圧 (ボーフォート海付近) に対応する分布がみられ下層では高温偏差、上層では低温偏差となっている。

■比湿 図??は各高度における比湿場の図である。地上 2 m(左上図) では大規模な水蒸気の流れははっきりしていない。850 hPa から 200 hPa の図では事例 1 が位置しているフランツヨセフ島を取り囲むように南から水蒸気が流れ込んでいる。その他の低気圧についても同様に水蒸気が流れ込んでいる。高気圧が位置しているボーフォート海付近では比湿は相対的に低い値となっている。

■風 図??は事例 1 の中心について緯度・経度に沿って切断した風 (上図：東西風, 下図：南北風) の鉛直断面である。図??より、低気圧の中心ではっきりと風の分布が変化することが分かる。低気圧の中心の東で南風、西で北風、南で西風、北で東風といった反時計回りの風の場、つまり典型的な低気圧性循環を示している。

■鉛直  $p$  速度オメガ 図??は各高度における鉛直  $p$  速度オメガ (以下鉛直流  $\omega$  とする) を、図??は事例 1 の中心について緯度・経度に沿って切断した鉛直流  $\omega$  の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 1 の位置しているフランツヨセフ島付近にて 200 hPa 以外の高度で上昇気流がみられるが、低気圧の中心が上昇気流の分布の中心であるわけではない。その他の低気圧の地点においても同様である。さらに高気圧が位置しているボーフォート海付近においては下降気流がみられる。次に、図??をみると事例 1 の中心においてはあまりはっきりしていないが上昇気流が位置している。上昇気流は 300 hPa 付近をまで到達している。また図??の下図においては、200°E 付近において弱いながらも下降気流があり、これは図??からもみられた高気圧 (ボーフォート海付近) に対応している。

### 5.1.2 事例 2 : 2005 年 8 月 17 日 06Z

■高度場 図??の SLP を見るとセヴェルナヤ・ゼムリヤ諸島付近に非常に発達した北極低気圧(事例 2)がある。さらに、デンマーク海峡に低気圧が、チュクチ海 (Chukchi Sea) には高気圧が位置している。500 hPa や 200 hPa から事例 2 と同じ位置に極渦が位置しており、極渦の真下に北極低気圧が存在している。

■低気圧の移動経路 図??よりバイカル湖付近で発生した事例 2 は北上し、北極海上に進むと移動速度は減速した。低気圧は弱まりながら北極点付近で反時計回りに旋回した後、南下しセヴェルナヤ・ゼムリヤ諸島付近で東進しボーフォート海の北で別の低気圧とマージングした後、反時計回りに旋回し北上する。さらに別の低気圧とマージングをして反時計回りに旋回した後北極点付近で消滅した。

■相対渦度 図??は各高度における相対渦度を、図??は事例 2 の中心について緯度・経度に沿って切断した相対渦度の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 2 の位置するセヴェルナヤ・ゼムリヤ諸島付近にて全高度において正の渦度がみられる。また、500 hPa においてははっきりと渦が巻いている様子が分かる。デンマーク海峡付近に見られた低気圧の地点においても同様に全高度において正の渦度がみられる。しかしながら、200 hPa においては正の渦度領域の中心がずれている。さらに SLP にて高気圧がみられたチュクチ海付近においては負の渦度領域がみられる。次に図??をみると、低気圧の中心において正の渦度領域が地表から極渦 (300 hPa 付近) を経て 50 hPa 高度ぐらいまでひと繋がりになっている。ただ、事例 1 と違い 300 hPa 付近でドーナツ型の渦度分布になっている。極渦の中心高度と考えられる 300 hPa 付近ではドーナツ型の正の渦度領域を形成している。また図??の下図においては、200°E 付近において負の渦度領域があり、これは図??からもみられた高気圧 (チュクチ海付近) に対応し、この高気圧の中心は 300 hPa 程度となっている。

■気温 図??は各高度における気温場を、図??は事例 2 である低気圧の中心について緯度・経度に沿って切断した気温偏差 (帯状平均) の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 2 の位置するセヴェルナヤ・ゼムリヤ諸島付近では 500 hPa までは周りよりも気温が低いが、200 hPa では周辺よりも 9 度ほど高くなっている。デンマーク海峡付近の低気圧においても同様の傾向がみられる。さらに SLP にて高気圧がみられたチュクチ海付近では、500 hPa までは周囲よりも気温は高く、逆に 200 hPa では周囲よりも気温は低くなっている。次に、図??を



みると低気圧の中心位置において、200 hPa を中心に高温偏差 (ウォームコア) がみられる。地表から 300 hPa までは低温偏差、300 hPa から上層においては高温偏差となっている。また図??の下図において、210°E あたりに、高気圧 (チュクチ海付近) に対応する分布がみられ下層では高温偏差、上層では低温偏差がみられる。

■比湿 図??は各高度における比湿場の図である。地上 2 m(左上図) では大規模な水蒸気の流れははっきりしていない。850 hPa から 200 hPa の図では事例 2 が位置しているセヴェルナヤ・ゼムリヤ諸島を取り囲むように南から水蒸気が流れ込んでいるのがわかる。その他の低気圧についても同様に水蒸気が流れ込んでいる。高気圧が位置しているチュクチ海付近では、比湿の通り道となっているため低い値をとっていない。

■風 図??は事例 2 の中心について緯度・経度に沿って切断した風 (上図：東西風, 下図：南北風) の鉛直断面である。図??より、低気圧の中心ではっきりと風の分布が変わっていることが分かる。低気圧の中心の東で南風、西で北風、南で西風、北で東風といった反時計回りの風の場合、つまり典型的な低気圧性循環を示している。

■鉛直  $p$  速度オメガ 図??は各高度における鉛直流  $\omega$  を、図??は事例 2 の中心について緯度・経度に沿って切断した鉛直流  $\omega$  の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 2 の位置しているセヴェルナヤ・ゼムリヤ諸島周辺にて 200 hPa 以外の高度で上昇気流がみられるが、上昇気流の分布の中心が事例 2 の中心位置であるわけではない。その他の低気圧の地点においても同様である。さらに高気圧が位置しているチャクチ海付近においては下降気流がみられる。次に、図??をみると事例 2 の中心では上昇気流が位置しているが、上昇気流の軸は北と、西に傾いている。ただ上昇気流は 300 hPa 付近をまで到達している。また図??の下図においては、200°E 付近においては上昇気流がみられ、これは図??からもみられた高気圧 (チュクチ海付近) に対応しているが、これは高気圧の中心を通る断面図ではない。

### 5.1.3 事例 3 : 2006 年 8 月 18 日 18Z

■高度場 図??の SLP をみると北極海中央に同心円状の発達した北極低気圧 (事例 3) がある。さらに、アラスカに低気圧が、チュクチ海には高気圧が位置している。500 hPa や 200 hPa から事例 3 と同じ位置に極渦が位置しており、極渦の真下に低気圧が存在している。

■低気圧の移動経路 図??より、東シベリア海の北で発生した事例 3 は北上し、かなり弱体化した低気圧は北極点付近で迷走し、同時に周囲の弱い低気圧とマージングしながら南下する。セヴェルナヤ・ゼムリャ諸島付近で別の低気圧とマージングして発達した後、北極点付近で消滅した。

■相対渦度 図??は各高度における相対渦度を、図??は事例 3 の中心について緯度・経度に沿って切断した相対渦度の鉛直断面である。まず、図??をみると北極海中央にて全高度において正の渦度がみられる(事例 3)。また、500 hPa においてははっきりと渦が巻いている様子が分かる。アラスカに見られた低気圧の地点においても同様に全高度において正の渦度がみられる。さらに SLP にて高気圧がみられたチュクチ海付近においては負の渦度領域がみられる。次に図??をみると、事例 3 の中心において正の渦度領域が地表から極渦(300 hPa 付近)を経てかなりの上空まで垂直的にひと繋がりとになっている。

■気温 図??は各高度における気温場を、図??は事例 3 の中心について緯度・経度に沿って切断した気温偏差(帯状平均)の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 3 の位置する北極海中央付近では 500 hPa までは周りよりも気温が低いが、200 hPa では周辺よりも 12 度ほど高くなっている。また本事例の低気圧においては等温線がはっきりとした円形になっている。アラスカにある低気圧においても同様の傾向がみられる。さらに SLP にて高気圧がみられたチュクチ海付近では、500 hPa までは周囲よりも気温は高く、逆に 200 hPa では周囲よりも気温は低くなっている。次に、図??をみると低気圧の中心位置において、200 hPa を中心に高温偏差(ウォームコア)がみられる。地表から 300 hPa までは低温偏差、300 hPa から上層においては高温偏差となっている。

■比湿 図??は各高度における比湿場の図である。地上 2 m(左上図)では大規模な水蒸気の流れははっきりしていない。850 hPa から 200 hPa の図ではオホーツク海沿岸に位置する低気圧に向かって水蒸気が流れ込んでおり、さらに北(北極海中央)にある事例 3 に向かって南から比較的少量の水蒸気が流れ込んでいる。高気圧が位置しているチュクチ海付近では比湿は相対的に低い値となっている。

■風 図??は事例 3 の中心について緯度・経度に沿って切断した風(上図：東西風, 下図：南北風)の鉛直断面である。図??より、低気圧の中心でははっきりと風の分布が変わっていることが分かる。低気圧の中心の東で南風、西で北風、南で西風、北で東風といった反時計回りの

風の場合、つまり典型的な低気圧性循環を示している。

■鉛直  $p$  速度オメガ 図??は各高度における鉛直流  $\omega$  を、図??は事例 3 の中心について緯度・経度に沿って切断した鉛直流  $\omega$  の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 3 の位置している北極海中央にて 200 hPa 以外の高度で上昇気流がみられる。その他の低気圧の地点においても同様である。さらに高気圧が位置しているチャクチ海付近においては下降気流がみられる。次に、図??をみると事例 3 の中心では上昇気流が位置している。上昇気流は 300 hPa 付近をまで到達している。また図??の上右図 (235°E line) においては、78°N 付近で下降気流がみられ、これは図??からもみられた高気圧 (チュクチ海付近) に対応している。また、65°N 付近でみられる上昇気流はアラスカにある低気圧に対応する。

#### 5.1.4 事例 4 : 2007 年 8 月 2 日 18Z

■高度場 図??の SLP を見るとラフテフ海に北極低気圧 (事例 4) がある。さらに、デンマーク海峡とノルウェー海 (Norwegian Sea)、ハドソン湾、クイーンエリザベス諸島 (Queen Elizabeth Islands) に低気圧が、カラ海 (Kara Sea) とボーフート海に弱い高気圧が位置している。本事例においては極渦は弱く複数個に分裂しており、分裂している極渦の真下に低気圧が存在している。

■低気圧の移動経路 図??より、カラ海上で発生した事例 4 は大陸沿岸に沿って東進した後、ノヴォシビルスク諸島 (Novosibirsk Islands) 付近で低気圧は停滞し、ノヴォシビルスク諸島の北で消滅した。

■相対渦度 図??は各高度における相対渦度を、図??は事例 4 の中心について緯度・経度に沿って切断した相対渦度の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 4 の位置しているラフテフ海付近にて全高度において正の渦度がみられる。本事例については、これらの高度では渦を巻いている様子はみられず、単に円形の正の渦度領域がみえる。その他の低気圧の地点においても同様に全高度において正の渦度がみられる。さらに SLP にて高気圧がみられたカラ海とボーフート海付近においては負の渦度領域がみられる。次に図??をみると、事例 4 の中心において正の渦度領域が地表から極渦 (300 hPa 付近) を経て 30 hPa 高度ぐらいまで垂直的にひと繋がりになっている。また図??の下図においては、90°E 付近と 200°E 付近において負の渦度領域があり、これは図??からもみられた 2 つの高気圧 (カラ海とボーフート海付近) に対応し、これらの高気圧の中心は 300 hPa 程度となっている。

■気温 図??は各高度における気温場を、図??は事例 4 の中心について緯度・経度に沿って切断した気温偏差 (帯状平均) の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 4 の位置するラフテフ海付近では 500 hPa までは周りよりも気温が低い、200 hPa では周辺よりも 9 度ほど高くなっている。その他の低気圧については、200 hPa 以外の高度においては傾向はバラバラであるが、200 hPa では周囲よりも気温が高くなっている。さらに SLP にて高気圧がみられたカラ海とボーフォート海付近では、500 hPa までは周囲よりも気温は高く、逆に 200 hPa では周囲よりも気温は低くなっている。次に、図??をみると低気圧の中心位置において、200 hPa を中心に高温偏差 (ウォームコア) がみられる。地表から 300 hPa までは低温偏差、300 hPa から 50 hPa までは高温偏差となっている。また図??の下図において、270°E 付近にある低気圧に対応し、事例 4 と同様に 200 hPa を中心に高温偏差がある。90°E と 210°E 付近の高気圧に対応し、地表付近は高温偏差、200 hPa を中心とした上層に低温偏差がある。

■比湿 図??は各高度における比湿場の図である。地上 2 m(左上図) では大規模な水蒸気の流れははっきりしていない。850 hPa から 200 hPa の図では事例 4 が位置しているラフテフ海を取り囲むように南から水蒸気が流れ込んでいる。その他の低気圧についても同様に水蒸気が流れ込んでいる。高気圧が位置しているカラ海とボーフォート海付近では比湿は相対的に低い値となっている。

■風 図??は事例 4 の中心について緯度・経度に沿って切断した風 (上図：東西風, 下図：南北風) の鉛直断面である。図??より、低気圧の中心ではっきりと風の分布が変わっていることが分かる。低気圧の中心の東で南風、西で北風、南で西風、北で東風といった反時計回りの風場、つまり典型的な低気圧性循環を示している。

■鉛直  $p$  速度オメガ 図??は各高度における鉛直流  $\omega$  を、図??は事例 4 の中心について緯度・経度に沿って切断した鉛直流  $\omega$  の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 4 の位置しているラフテフ海付近で事例 4 の中心位置を取り囲むように上昇気流が位置している。その他の低気圧の地点においても同様の傾向がみられる。加えて、デンマーク海峡付近にある強い低気圧の地域では、強くはっきりした上昇気流の分布がみられる。さらに高気圧が位置しているカラ海とボーフォート海付近においては弱いながらも下降気流がみられる。次に、図??をみると事例 4 の中心よりも周辺部に上昇気流が位置している。上昇気流はおおよそ 300 hPa 近くまで到達している。図??の上右図 (326.25°E line) においては、60°N 付近で上昇気流が

みられ、これはデンマーク海峡付近にある強い低気圧に対応する。下図 (76.25°N line) においては、90°E, 220°E 付近ではカラ海とボーフート海に位置する高気圧に、280°E, 340°E 付近ではクイーンエリザベス諸島とノルウェー海に位置する低気圧に対応する。

#### 5.1.5 事例 5 : 2008 年 6 月 22 日 18Z

■高度場 図??の SLP を見ると北極海中央に非常に発達した北極低気圧 (事例 5) がある。さらに、スヴァールバル諸島と北海とクイーンエリザベス諸島に低気圧が、ノヴァヤゼムリヤ (Novaya Zemlya) 付近に高気圧が位置している。500 hPa や 200 hPa から事例 5 と同じ位置に極渦が位置しており、極渦の真下に低気圧が存在している。

■低気圧の移動経路 図??より、東シベリア海の北で発生した事例 5 は西進し、ノヴォシビルスク諸島付近で停滞した後、別の低気圧とマージングし西進する。フランツヨセフ島付近で停滞した後、進路を東に変えセヴェルナヤ・ゼムリヤ諸島でさらに別の低気圧とマージングした。発達しながら反時計回りに旋回しながら徐々に衰退しラプテフ海 (Laptev Sea) で消滅した。

■相対渦度 図??は各高度における相対渦度を、図??は事例 5 の中心について緯度・経度に沿って切断した相対渦度の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 5 の位置する北極海中央付近にて全高度において正の渦度がみられる。また、SLP においてははっきりと渦が巻いている様子が分かる。北海付近の低気圧においても同様に全高度において正の渦度がみられたが、スヴァールバル諸島付近の低気圧については 500 hPa までは正の渦度がみられたが、それよりも上層については逆に負の渦度領域のようになっている。さらに SLP にて高気圧がみられたノヴァヤゼムリヤ付近においては負の渦度領域が 850 hPa まではみられるが、それよりも上層では正の渦度領域になっている。次に図??をみると、事例 5 の中心においては鉛直方向にて正の渦度領域が地表から極渦 (300 hPa 付近) を経て 30 hPa 高度ぐらいまで垂直的にひと繋がりになっている。また図??の下図においては、260°E 付近ではクイーンエリザベス諸島付近にある低気圧に対応する正の渦度領域となっている。さらに 60°E 付近と 230°E 付近において負の渦度領域があり、これは図??からもみられた高気圧 (クイーンエリザベス諸島付近) とあまりはっきりとはしていないがボーフート海付近にある高気圧に対応し、これらの高気圧の中心は 300 hPa 程度となっている。

■気温 図??は各高度における気温場を、図??は事例 5 の中心について緯度・経度に沿って切断した気温偏差 (帯状平均) の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 5 の位置する北極海中央では 500 hPa までは周りよりも気温が低い、200 hPa では周辺よりも 9 度ほど高くなっている。他の低気圧においても同様の傾向がみられる。さらに SLP にて高気圧がみられたノヴァヤゼムリヤ付近では、500 hPa までは周囲よりも気温は高く、逆に 200 hPa では周囲よりも気温は低くなっている。次に、図??をみると低気圧の中心位置において、250 hPa を中心に 17°C と大きな高温偏差 (ウォームコア) がみられる。地表から 300 hPa までは低温偏差、300 hPa から上層においては高温偏差となっている。また図??の下図において、50°E あたりに、高気圧 (ノヴァヤゼムリヤ付近) に対応する分布がみられ下層では高温偏差、上層では低温偏差になっている。

■比湿 図??は各高度における比湿場の図である。地上 2 m(左上図) では大規模な水蒸気の流れははっきりしていない。850 hPa から 200 hPa の図では、事例 5 が位置している北極海中央を取り囲むように南から水蒸気が流れ込んでいる。その他の低気圧についても同様に水蒸気が流れ込んでいる。高気圧が位置しているノヴァヤゼムリヤ付近では比湿は相対的に低い値となっている。

■風 図??は事例 5 である低気圧の中心について緯度・経度に沿って切断した風 (上図：東西風, 下図：南北風) の鉛直断面である。図??より、低気圧の中心ではっきりと風の分布が変わっていることが分かる。低気圧の中心の東で南風、西で北風、南で西風、北で東風といった反時計回りの風の場合、つまり典型的な低気圧性循環を示している。

■鉛直  $p$  速度オメガ 図??は各高度における鉛直流  $\omega$  を、図??は事例 5 の中心について緯度・経度に沿って切断した鉛直流  $\omega$  の鉛直断面である。まず図??をみると、事例 5 の位置している北極海中央付近において上昇気流が位置している。その他の低気圧の地点においても同様の傾向がみられる。さらに高気圧が位置しているノヴァヤゼムリヤ付近においては下降気流がみられる。次に、図??をみると事例 5 の中心付近で上昇気流、その隣接部には下降気流が位置している。上昇気流はおおよそ 300 hPa 近くまで到達している。下図 (82.5°N line) においては、60°E 付近ではノヴァヤゼムリヤに位置する高気圧に、10°E 付近ではスヴァールバル諸島に位置する低気圧に対応する。

## 5.2 温帯低気圧の事例 ETC

前節で述べた北極低気圧と比較するため温帯低気圧の事例 (事例 ETC) を 1 つ示す。全 7 要素 (高度場, 低気圧の移動経路, 相対渦度, 気温, 比湿, 風, 鉛直  $p$  速度オメガ) についておこない、比較については次章で述べる。

■高度場 図??の SLP(左上図) を見ると北海道の東に事例 ETC がある。500 hPa までは低気圧が確認できるが、200 hPa になるとみることはできない。また、この事例 ETC の北東にははっきりとはしないが高気圧があり、またその北東には低気圧がみられる。これらの低気圧は気圧の谷に位置しており、低気圧の中心位置は高度とともにやや西に傾いている。また高気圧は気圧の尾根に位置している。

■低気圧の移動経路 図??より日本の東海上で発生した事例 ETC は、上空のジェット気流に流されて北北東に進んだのち、オホーツク海上で停滞し消滅した。

■相対渦度 図??は各高度における相対渦度を、図??は事例 ETC の中心について緯度・経度に沿って切断した相対渦度の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 ETC の中心部において正の渦度が分布している。その北東では高気圧とみられる負の渦度があり、さらに北東には低気圧の正の渦度がみられる。ジェット気流は帯状の正の渦度と負の渦度の間の 0 の地点に沿って吹いている。500 hPa と 200 hPa をみるとジェット気流は日本の南に位置しており、500 hPa では低気圧 (事例 ETC) の渦度はみれるが、200 hPa では判別が出来ない。次に図??をみると、上図 (150°E line) では南に傾いているように見えるが、これは 200 hPa を中心としたジェット気流が南に位置しているためである。下図 (43.75°N line) では正の渦度がやや西に傾いているのがわかる。また、185°E と 220°E 付近には低気圧が位置しているのがわかる。

■気温 図??は各高度における気温を、図??は事例 ETC の中心について緯度・経度に沿って切断した気温偏差 (帯状平均) の鉛直断面である。まず、図??より一般的に低緯度ほど高温で、高緯度ほど低温になっている。SLP や 850 hPa をみると、事例 ETC の中心のやや東で気温の高い領域が凸状に張り出している。これはこの低気圧に伴う前線に伴うものであり、南からの暖かい空気が流入している暖域である。500 hPa ではジェットに沿った分布をしている。200 hPa をみると事例 ETC 付近には高温域、その北東の高気圧付近では低温域、さらに北東

の低気圧付近では高温域がみられる。次に図??をみると、低気圧の中心位置で分布が分かれている。低気圧の中心の南で低温偏差、北で高温偏差、西で低温偏差、東で高温偏差となっている。ここで、南北の気温の分布が一般的な前線を伴う温帯低気圧の分布とは異なる。これは、低気圧の中心位置では温帯前線と寒冷前線に挟まれた暖域が分布しており、また前線が低気圧の中心位置付近では東西に伸びているためである。

■比湿 図??は各高度における比湿場の図である。まず、図??をみると事例 ETC の中心部に向かって南から水蒸気が流れ込んでいるのがわかる。その北東の高気圧付近では乾燥域が、さらに北東の低気圧付近では事例 ETC と同様南からの流入がわかる。

■風 図??は事例 ETC の中心について緯度・経度に沿って切断した風 (上図：東西風, 下図：南北風) の鉛直断面である。上図 (150°E line) より事例 ETC の中心ではっきりと風の分布が変わっていることが分かる。低気圧の中心の東で南風、西で北風、南で西風、北で東風といった反時計回りの風の場合といった典型的な低気圧性循環を示している。また、30°N 付近に亜熱帯ジェット、60°N 付近に 2 本に分流した寒帯前線ジェットがみえる。下図 (43.75°N line) では南北風の分布パターンは高気圧と低気圧の分布パターンと一致している。

■鉛直  $p$  速度オメガ 図??は各高度における鉛直流  $\omega$  を、図??は事例 ETC の中心について緯度・経度に沿って切断した鉛直流  $\omega$  の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 ETC に伴う寒帯前線に沿うように上昇気流が分布している。その北東にある高気圧付近では下降気流が、さらに北東の低気圧付近では上昇気流が位置している。次に、図??をみると事例 ETC の中心で分布が分かれており、北に上昇気流、南に下降気流が位置している。また下図 (82.5°N line) より、東に上昇気流、西に下降気流が位置している。これは一般的な前線を伴う温帯低気圧の傾向を表している。

### 5.3 熱帯低気圧の事例 TC

北極低気圧との比較のため温帯低気圧の事例 (事例 TC) として、2005 年 8 月発生したハリケーン・カトリーナの事例を示す。全 7 要素 (高度場, 低気圧の移動経路, 相対渦度, 気温, 比湿, 風, 鉛直  $p$  速度オメガ) についておこない、比較については次章で述べる。

■高度場 図??の SLP(左上図) を見るとニューオーリンズ (New Orleans) の南に事例 TC がある。500 hPa までは低気圧がみられるが、200 hPa になるとみることはできない。100 hPa



では、同じ位置にて高気圧がみられる。

■低気圧の移動経路 図??よりキューバの北で発生した事例 TC は西に移動した。ニューオリンズ沖で最盛期を迎えた後、ニューオリンズ付近で上陸、北進しオハイオ州 (OHIO) 付近で消滅した。

■相対渦度 図??は各高度における相対渦度を、図??は事例 TC の中心について緯度・経度に沿って切断した相対渦度の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 TC 付近にはっきりとした同心円状の正の渦度が分布している。事例 TC の周囲には負の渦度が分布している。次に図??をみると、低気圧の中心位置において垂直に正の渦度が分布している。正の渦度は 100 hPa 付近まで到達している。正の渦度の周囲には負の渦度が分布している。

■気温 図??は各高度における気温を、図??は事例 TC の中心について緯度・経度に沿って切断した気温偏差 (帯状平均) の鉛直断面である。まず、図??より低緯度なため気温は高く、のっぺりとした分布となっている。850 hPa から上層では、周囲よりやや高温 (2°C) になっている。200 hPa では周囲より高温 (6°C) になっている。次に図??をみると、上図 (271.25°E line) では 200 hPa を中心に高温偏差 (ウォームコア) がみられる。150 hPa から 30 hPa までに低温偏差が分布している。下図 (26.25°N line) でも同様である。

■比湿 図??は各高度における比湿場の図である。まず、図??をみると、各高度共に事例 TC の中心部は周囲よりも湿潤である。ただ、低緯度であるため湿潤であり、水蒸気の流れは分かりづらい。

■風 図??は事例 TC の中心について緯度・経度に沿って切断した風 (上図：東西風, 下図：南北風) の鉛直断面である。事例 TC の中心ではっきりと風の分布が変わっていることが分かる。低気圧の中心の東で南風、西で北風、南で西風、北で東風といった反時計回りの風の間といった典型的な低気圧性循環を示している。また、45°N 付近において偏西風ジェットがみられる。

■鉛直  $p$  速度オメガ 図??は各高度における鉛直流  $\omega$  を、図??は事例 TC の中心について緯度・経度に沿って切断した鉛直流  $\omega$  の鉛直断面である。まず、図??をみると事例 TC の周辺においてはっきりと上昇気流が分布している。次に、図??をみると事例 TC の中心位置において強い上昇気流が分布している。上昇気流は 30 hPa 程度まで到達している。

## 5.4 数値実験

NICAM での北極低気圧の数値実験を事例 5 について行った。JMA-GSM の初期時刻における予報値を NICAM の初期値として入力した予報値と JCDAS データとを比較する。比較する予報時間は、24 時間後、72 時間後、120 時間後、162 時間後である。比較する要素は、高度場、気温場、風場、鉛直流  $\omega$  である。また、高度の偏差場の鉛直断面については相対渦度の代用として用いる。鉛直断面図は対象とする北極低気圧の中心の位置についての鉛直断面を描いており、JCDAS と NICAM では鉛直断面の位置が異なる。

■高度場 図??と図??は各予報時間 (24, 72, 120, 162 時間後) の高度場の図である。初期値から 24, 72 時間後の NICAM 予報値 (図??, 図??) と JCDAS(図??, 図??) においては、大きな差はみられず北極低気圧をよく予報できている。初期値から 120 時間後の NICAM 予報値 (図??) と JCDAS(図??) においては、北極低気圧の位置がややずれているもののまだよく予報できている。初期値から 162 時間後の図??と JCDAS(図??) において、JCDAS ではみられない 2 つの低気圧があり、北極低気圧 (西) と別の低気圧 (東) がマージングしようとしている。なお、この別の低気圧 (東) は図??にて中央ユーラシアの沿岸部にある低気圧が北極海に移動してきたものである。予報はある程度はうまく行っているが、長期間になると誤差も生じる。

■高度の偏差場 図??と図??は各予報時間 (24, 72, 120, 162 時間後) の高度場の偏差 (NICAM) と相対渦度 (JCDAS) の鉛直断面図である。高度場の偏差については、各高度についてそれぞれ全球平均を求めて、予報値から除し偏差を求めている。高度場の偏差と相対渦度を単純に比較することは出来ないものの、結果としては同じである。また NICAM の図と JCDAS の図はかなり異なっており、NICAM はかなり単調なものになっている。しかし、NICAM の図については北極低気圧の中心付近を中心に負偏差 (つまり低気圧) が 150 hPa 程度までみられ、これは JCDAS において相対渦度が上層まで繋がっていることと同じである。

■気温 図??と図??は各予報時間 (24, 72, 120, 162 時間後) の気温偏差 (帯状平均) の鉛直断面図である。全体的にあまりうまく予報できていないようである。ただ、JCDAS でみられるような北極低気圧の中心位置の上空 200 hPa 付近にあるウォームコアが NICAM でもみられる。ただ NICAM の上右図 (緯度に沿った図) と下図の右側において時間を追うごとに、斑点状のものが発生し増えていつている。これはある種のバグであると考えられる。

■風 図??と図??は各予報時間 (24, 72, 120, 162 時間後) の風の鉛直断面図である。低気圧の中心ではっきりと風の分布が変わっており、北極低気圧の中心の東で南風、西で北風、南で西風、北で東風といった反時計回りの風の場合、つまり典型的な低気圧性循環を示している。ある程度は予報できているものの、気温と同様に斑点状のものが発生し増えていつている。

■鉛直  $p$  速度 図??と図??は各予報時間 (24, 72, 120, 162 時間後) の鉛直流  $\omega$  の鉛直断面図である。本研究では NICAM は JCDAS より高解像度のため、図として比較しづらい。そのため、鉛直流  $\omega$  のみ NICAM の格子間隔を  $0.1875^\circ$  間隔から  $1.125^\circ$  間隔に変更している。JCDAS では全ての予報時間において低気圧の中心にて上昇気流がみられる。NICAM においてもやや分かりづらいものの低気圧の中心にて上昇気流が位置している。ただ JCDAS と NICAM を比較すると、分布状況は異なっている。また気温や風と同様、鉛直流  $\omega$  においても斑点状のものが発生し増えていつている。

## 6 考察

### 6.1 北極低気圧と他の低気圧

5.1, 5.2 にて、北極低気圧は 5 事例、温帯低気圧は 1 事例について事例解析を行った。以上から北極低気圧に共通すること、温帯低気圧との違いについて以下述べる。

#### 6.1.1 北極低気圧について

本研究では、北極低気圧の事例として、5 つの事例をあげた。まず事例選定の条件としては高緯度(ここでは北緯 60 度以北を高緯度と定義する)で発生したものと、持続時間が 3 日以上であることをあげた。発生位置は事例 2 を除いて北緯 75 度前後の北極海上で発生している。また 5 事例の平均持続時間は、500.4 時間 (20.85-d) と 3 週間近くありかなり長いものとなっている。これらの事例で持続時間が長い理由として考えられることは、北極低気圧が衰退期になると、他の低気圧とマージングして再び発達したり、衰退期で消滅しかけるものの再度発達するといったことが多くみられた。このようなことが繰り返すことによって持続時間が延びたものと考えられる。また、この 5 事例は常に極渦の真下に存在しており、極渦から何らかの影響を受けていたとも考えられる。以下、北極低気圧について主要な要素の解析から考えられることを述べる。

■高度場 全事例において地上からおよそ 100 hPa まで順圧的な構造をしている。これには、上層に極渦が位置していることが影響していると考えられる。

■移動経路 ほとんどの北極低気圧は北極海上で発生しており、北極海上を長時間さまよい、北極海上で消滅している。これは、北極域は極偏東風領域ではあるが風は弱く、他の緯度帯のような進路を決定する支配要因が無いことによると考えられる。北極域においては、低気圧が北極海中央に集中しており、また勢力の強い低気圧も集中している。

■相対渦度 相対渦度は、上空の極渦から地上まで渦度がひと繋がり分布している。北極低気圧は、他の低気圧とのマージングにより、北極低気圧に渦度が供給され持続時間が長いものとなったと考えられる。また、本研究で扱ったような目立った北極低気圧以外においても、極渦の真下において弱い低気圧が短期間に形成・発達・消滅を繰り返しており、極渦が何らかの影響を及ぼしていると考えられる。

■気温 気温場について、北極低気圧の位置する地点では、地上から 300 hPa までは低温偏差で 300 hPa から上層では高温偏差 (ウォームコア) となっている。北極低気圧の気温偏差の分布は熱帯低気圧とは逆である。北極低気圧の形成要因としてこのウォームコアの存在が考えられる。

■鉛直流  $\omega$  北極低気圧の中心位置において、地表から 300 hPa までは上昇気流が分布し、さらにその上空には弱いながらも下降気流がみられる (事例 5 を除く)。前節で北極低気圧の形成要因は 200 hPa を中心としたウォームコアの存在が考えたと述べた。このウォームコアの形成要因として考えられることとしては 200 hPa 付近にみられる下降流により断熱圧縮し気温が上昇してウォームコアを形成したと考えられる。また切離低気圧では、対流圏界面が下方に垂れ下がる際に下降流がみられる。北極低気圧においては、上空に冷たい極渦が位置している。対流圏界面が下方に垂れ下がることにより下降流が生じ、断熱圧縮によりウォームコアが形成され下層に北極低気圧が形成されたと考えられる。

### 6.1.2 北極低気圧と他の低気圧との比較

今研究で扱った北極低気圧と他の緯度帯でみられる温帯低気圧と熱帯低気圧とは、一体何が異なっているのか。まず、重要なこととして温帯低気圧は前線を伴っており傾圧的な構造をしている。一方、熱帯低気圧と北極低気圧は前線を伴っておらず順圧的な構造をしているといえる (熱帯低気圧については上層に高気圧が存在する)。また北極低気圧は、他の低気圧のような移動経路を決定する支配要因が無いために迷走していると考えられる。北極低気圧の形成要因は他の低気圧とは明確に異なっている。熱帯低気圧は第 2 種の条件付不安定 (CISK: Conditional Instability of the Second Kind) であり、温帯低気圧は傾圧不安定である。北極低気圧は、上空に冷たい極渦が位置し、対流圏界面が下方に垂れ下がることにより下降流が生じる。それとともに断熱圧縮によりウォームコアが形成され下層に北極低気圧が形成されたと考えられる。以上のように、北極低気圧と他の低気圧とでは多くの違いがあるといえる。

## 6.2 数値実験

本研究では NICAM による北極低気圧の数値実験を行った。JCDAS と数値実験の結果を比較すると、総じてあまり再現できていない。ただ、北極低気圧の特徴とも言える順圧構造やウォームコアなどはみられるものの、予報時間が長くなる程、バグと思われる斑点状のエ

ラーが生じている。162 時間後の高度場については、対象としている北極低気圧とは別の低気圧が北極低気圧に接近した高度場となっており、これは JCDAS と全く異なった高度場となっている。渡辺 (2008) において、NICAM の予報限界時間は 5.00 日となっている。本研究での 162 時間は、これを超える予報時間であるため予報精度の限界であると考えられる。高度場以外の風や気温といった要素についても、162 時間後では同様に異なったものになっている。鉛直流  $\omega$  については JCDAS と同様に北極低気圧の中心において上昇気流が位置していることはみられ、分布パターンについては低気圧の中心位置について注目するとある程度は再現できている。しかし、全体的な分布パターンとなると再現は出来ていない。以上のように、NICAM で数値実験を行った結果、北極低気圧と同様の特徴をある程度再現することは出来たが、予報限界は 162 時間よりも短いと考えられる。

### 6.3 北極低気圧と海氷

北極低気圧が北極海中央付近にあることにより、北極低気圧に対応する高気圧 (ボーフォート高気圧) が形成される。近年の海氷の減少にはボーフォート高気圧が少なからず影響を及ぼしていると考えられている。本研究の解析対象である北極低気圧は長時間持続しており、北極低気圧とボーフォート高気圧によって北極海に強い循環をもたらし、海氷にも影響を及ぼしたと考えられる。

## 7 結論

### 7.1 北極低気圧

本研究では、北極低気圧を 5 事例示した。はじめに、事例選定の条件としては高緯度(ここでは北緯 60 度以北を高緯度と定義する)で発生したことと、持続時間が 3 日以上であることをあげた。発生位置は事例 2 を除いて北緯 75 度前後の北極海上で発生している。本研究では、持続時間が顕著に長いものを選んで解析を行い、それらの事例においては全て上空に極渦が存在している。

北極低気圧は他の緯度帯の低気圧(温帯低気圧・熱帯低気圧)とは異なった特性を持っている。まず、低気圧の持続時間が 3 週間近く(20.85-d)とかなり長いものとなっている。また、北極低気圧は順圧的構造をしており、主に極渦の真下にある。北極低気圧は他の低気圧のように定まった進行方向が無く、長時間北極海上を迷走している。相対渦度は極渦から地表までひと繋がりとなっている。さらに極渦の真下の地表には頻繁に北極低気圧を含め、大小様々な低気圧が形成・発達・消滅を繰り返している。気温場については、北極低気圧は 200 hPa を中心に高温偏差(ウォームコア)があり、その下層では低温偏差となっている。これは熱帯低気圧とは逆の構造(下層: 高温偏差, 上層: 低温偏差)となっている。北極低気圧の形成要因は、温帯低気圧の傾圧不安定や熱帯低気圧の CISK とは異なるものである。各低気圧について各要素からの比較は、表??にてまとめている。以上のように、北極低気圧は他の緯度帯の低気圧(温帯低気圧・熱帯低気圧)とは明確に異なっている。

### 7.2 数値実験

本研究では NICAM による北極低気圧の数値実験を行った。JCDAS と数値実験の結果を比較すると、総じてあまり再現はできていない。予報時間が長くなる程、バグと思われる斑点状の異常値が増加している。NICAM の予報限界時間は、渡辺(2008)において 5.00 日、最新の結果では 5.75 日となっている。こういった予報限界時間は北半球での平均値である。極域における予測は困難であるため、予報限界時間はこれらよりも短いものであると考えられる。

### 7.3 今後の課題

今後の課題としては、北極域に存在する低気圧と今回選定した特殊な北極低気圧との比較をすることによって両者に違いがあるのかということについて解析を行う必要がある。さらに、より多くの事例について解析し統計的アプローチをより深める必要がある。また、本研究で扱った北極低気圧について更なる要素 (渦度ポテンシャルなど) についても注目し、北極低気圧の形成要因などをより詳しく解析を行う必要がある。



## 謝辞

本研究を進めるにあたって、指導教員である筑波大学計算科学研究センター 田中 博 教授には、卒論テーマの設定、研究手法、考察などについて適切な御指導を賜り、心から感謝しております。

また、気象研究所 松枝 未遠 氏、筑波大学 生命環境科学研究科 足立 幸穂 氏、寺崎 康児 氏、近藤 圭一 氏、加藤 真悟 氏、山崎 真吾 氏、同大学環境科学研究科 瀬田 繭美 氏や田中研究室の先輩方には研究手法、数多くの図の作成などに関して多数の御助言を頂き、誠にありがとうございました。

さらに、同大学生命環境科学研究科 木村 富士男 教授、林 陽生 教授、上野 健一 准教授、植田 宏昭 講師、日下 博幸 講師には、方針発表、中間発表、最終発表およびポスター発表の場で、貴重なご意見を頂き、ありがとうございました。

最後に、同大学の大学院生の先輩方、ともに卒業研究を進めた筑波大学地球科学専攻気候学・気象学分野の4年生の皆様、さらにはこの論文を書くにあたって関わっていただいた方すべてに、感謝の意を表します。

なお、本研究で用いた主な図は、The GMT System (Wessel and Smith, 1991) にて作図しました。

## 参考文献

- Adachi, S. and F. Kimura: A 36-year Climatology of Surface Cyclogenesis in East Asia Using High-resolution Reanalysis Data, *SOLA*, **3**, 113-116.
- Gascard, J.-C., et al, 2008: Exploring Arctic transpolar drift during dramatic sea ice retreat, *Eos Trans. AGU*, **89**(3), 21-22.
- Holland, M. M., J. Finnis, and M. C. Serreze, 2006: Simulated Arctic Ocean freshwater budgets in the twentieth and twenty-first centuries. *J. Climate*, **19**, 6221-6242.
- Ogi, M., and J. M. Wallace, 2007: Summer minimum Arctic sea ice extent and the associated summer atmospheric circulation. *Gephys. Res. Lett.*, **34**, L12705, doi:10.1029/2007GL029897.
- Polyakov, I. V., and Coauthors, 2005: One more step toward a warmer Arctic. *Gephys. Res. Lett.*, **32**, L17605, doi:10.1029/2005GL023740.
- Rigor, I. G., R. L. Colony, and S. Martin, 2000: Variations in surface air temperature observations in the Arctic, 1979-97. *J. Climate*, **13**, 896-914.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, S. Iga, 2007: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comput. Phys*, doi:10.1016/j.jcp.2007.02.006, the special issue on Predicting Weather, Climate and Extreme events.
- Serreze, M. C. and Andrew P. Barrett, 2008: The summer cyclone maximum over the Central Arctic Ocean, *J. Climate*, **21**(5), 1048-1065.
- Serreze, M. C., 1995: Climatological aspects of cyclone development and decay in the Arctic, *Atmos.-Ocean*, **33**, 1-23.
- Shimada, K., T. Kamoshida, M. Itoh, S. Nishino, E. Carmack, F. McLaughlin, S. Zimmermann and A. Proshutinsky, 2006: Pacific Ocean inflow : Influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean, *Gephys. Res. Lett.*, **33**, L08605, doi:10.1029/2005GL025624.
- Simmonds, I., C. Burke and K. Keay, 2008: Arctic Climate Change as Manifest in Cyclone Behavior, *J. Climate*, **21**, 5777-5796.

- Walczowski, W., and J. Piechura, 2006: New evidence of warming propagating toward the Arctic Ocean. *Gephys. Res. Lett.*, **33**, L12601, doi:10.1029/2006GL025872.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1991: Free software helps map and display data. *EOS Trans. AGU*, **72**, 445-446.
- 渡辺 美南子, 2008: 次世代大気第循環モデル NICAM の予報精度に関する解析的研究, 筑波大学 第一学群 自然科学類 平成 19 年度卒業論文.

表 1 低気圧の検出数

年月	持続時間 24 時間以上かつ 北半球で発生	持続時間 24 時間以上かつ 北緯 60 度以北で発生	持続時間 72 時間以上かつ 北緯 60 度以北で発生
200506	150	44	5
200507	136	42	11
200508	153	54	11
200606	132	55	9
200607	148	47	12
200608	166	53	8
200706	154	53	8
200707	144	48	10
200708	146	44	12
200806	160	58	12
200807	134	47	8
200808	152	46	14
平均	147.9	48.8	10.0

表 2 北極低気圧との比較のまとめ

比較要素	北極低気圧	温帯低気圧	熱帯低気圧
持続時間	20.85 日 (5 事例の平均)	6.00 日 (事例 ETC)	7.75 日 (事例 TC)
移動経路	迷走している	一定方向	一定方向
高度場	100 hPa まで順圧的構造	傾圧的構造	地表 ~ 200 hPa: 低気圧 100 hPa: 高気圧
渦度場	極渦までひと繋がり (渦度の中心は極渦)	傾いている (渦度の中心は対流圏)	100 hPa まで ひと繋がり (垂直)
気温場	地表 ~ 300 hPa: 低温偏差 300 hPa ~ : 高温偏差 (ウォームコア)	南に寒気 / 北に暖気 西に寒気 / 東に暖気 (事例 ETC の場合)	地表 ~ 200 hPa: 高温偏差 (ウォームコア) 200 hPa ~ : 低温偏差
鉛直流 $\omega$ 場	中心位置に上昇流 200 hPa では下降流	南に下降流 / 北に上昇流 西に下降流 / 東に上昇流	中心位置に強い上昇流 下降流は周囲に位置
比湿場	南方向から流入	前線に沿って流入	周囲から流入
風の場合	低気圧性循環	低気圧性循環	低気圧性循環

# The Map of the Arctic Region



GMT 2008 Dec 11 19:48:36 S.TAKAHASHI U.Tsukuba

図1 北極域の地図.

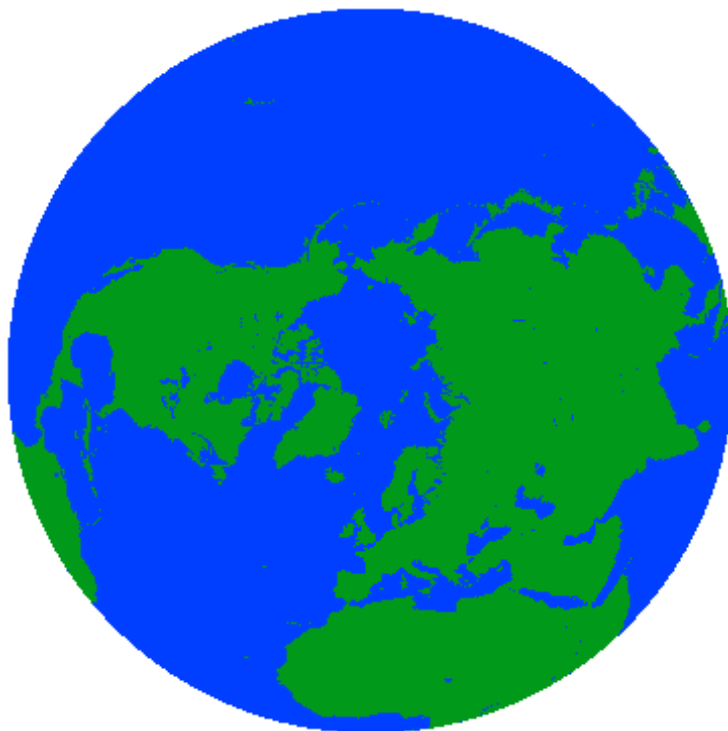


図2 EASE polar grid projection (Lambert's Azimuthal equal-area).

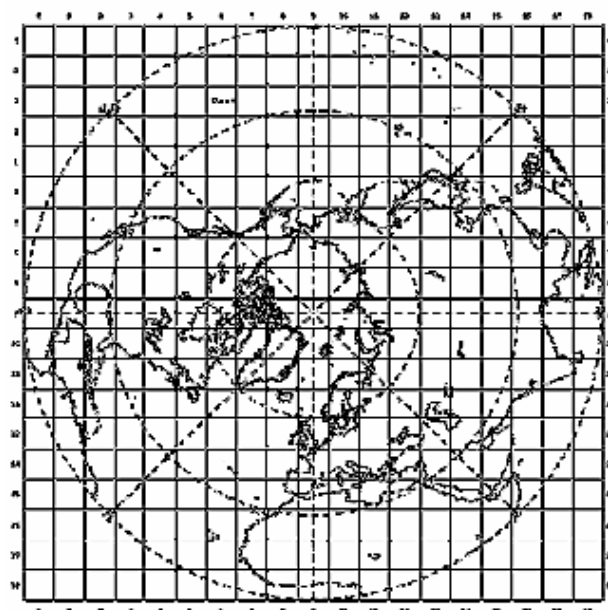


図3 EASE polar grid の例.

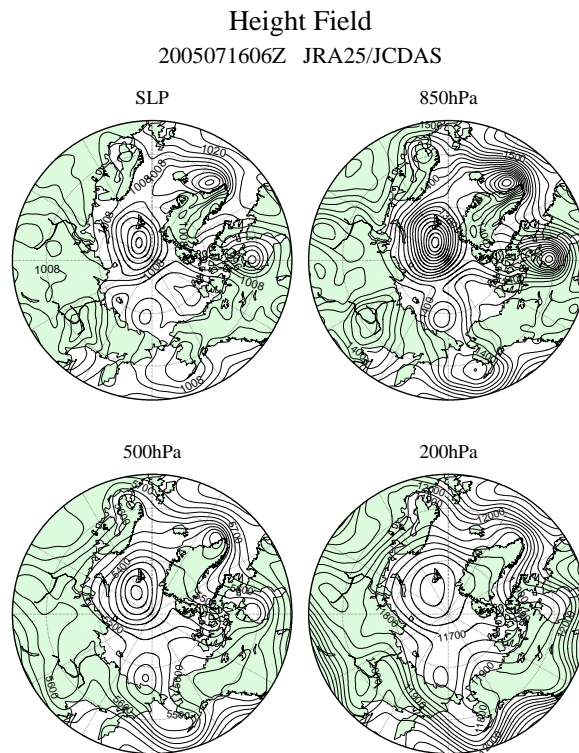


図4 事例1：2005年7月16日06Zの高度場. 左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa.

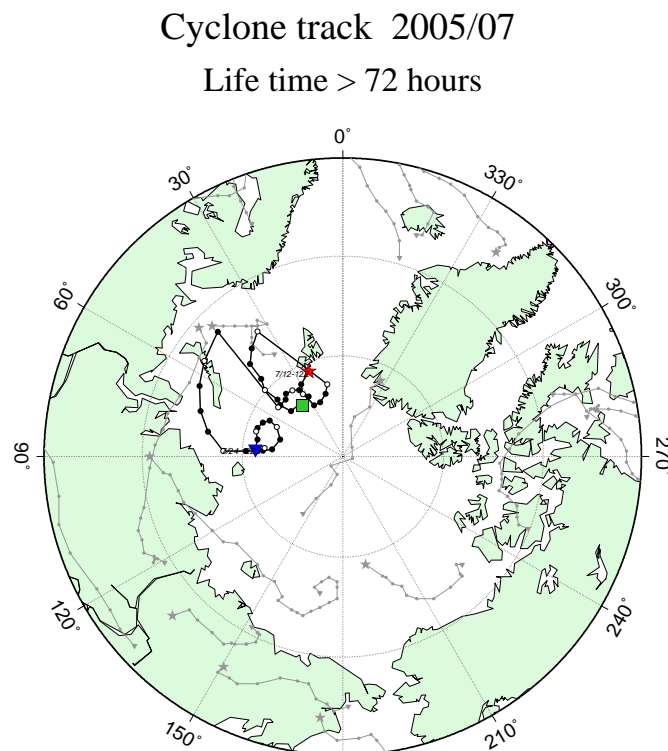


図5 事例1の低気圧の移動経路図(6時間ごとにプロット、★は低気圧の発生、▼は低気圧の消滅、中抜きの丸は00Zを表す).



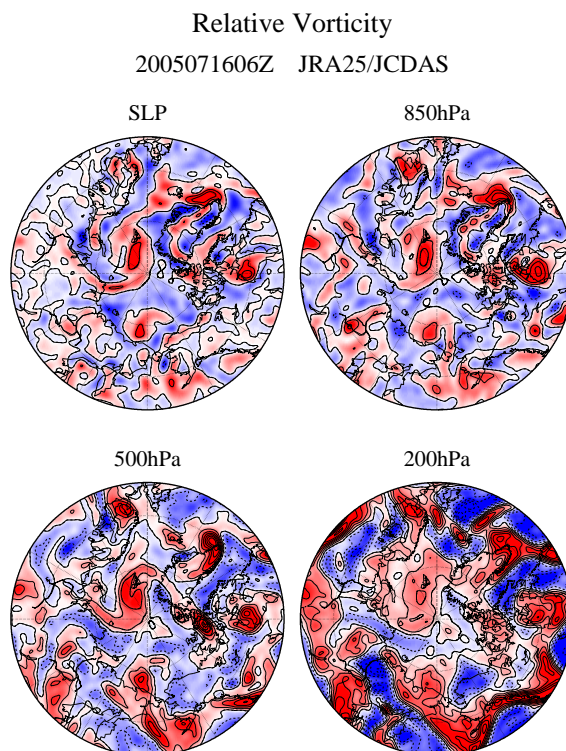


図6 事例1: 2005年7月16日06Zの各高度における相対渦度(左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa). 実線は正の渦度, 破線は負の渦度を表す.

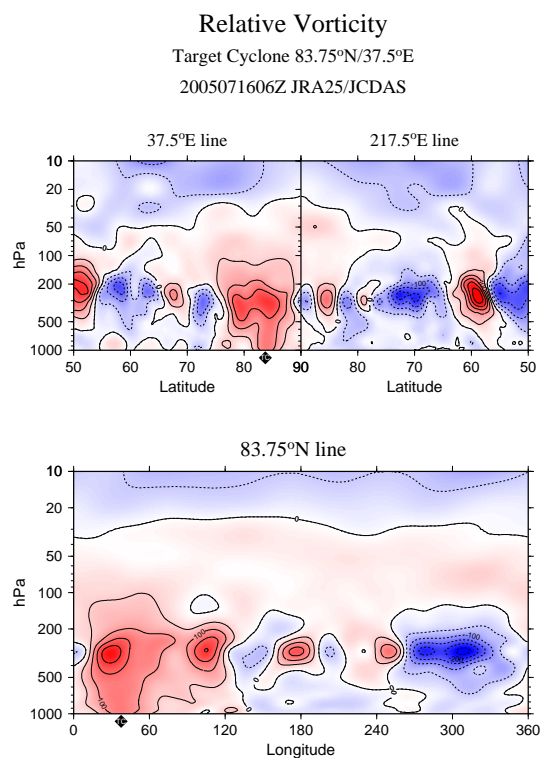


図7 事例1: 2005年7月16日06Zの相対渦度の鉛直断面図(上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は正の渦度, 破線は負の渦度, ◆は低気圧の中心を表す.

Air Temperature [K]  
2005071606Z JRA25/JCDAS

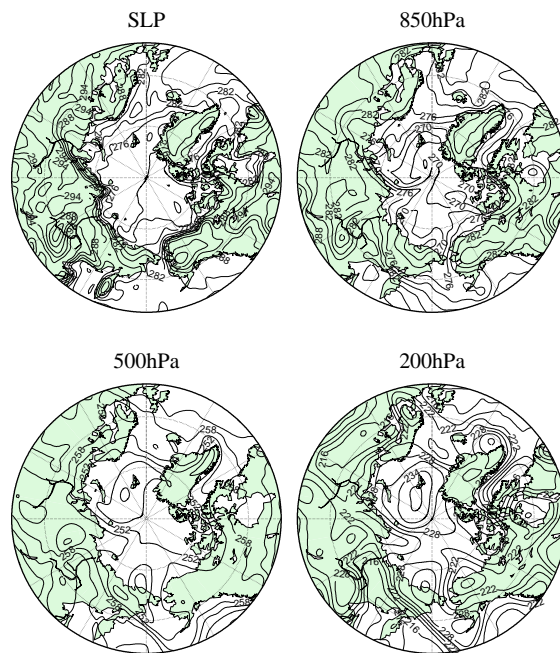


図8 事例1: 2005年7月16日06Zの気温場 (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa).

Temperature Anomalies (K)  
Target Cyclone 83.75°N/37.5°E  
2005071606Z JRA25/JCDAS

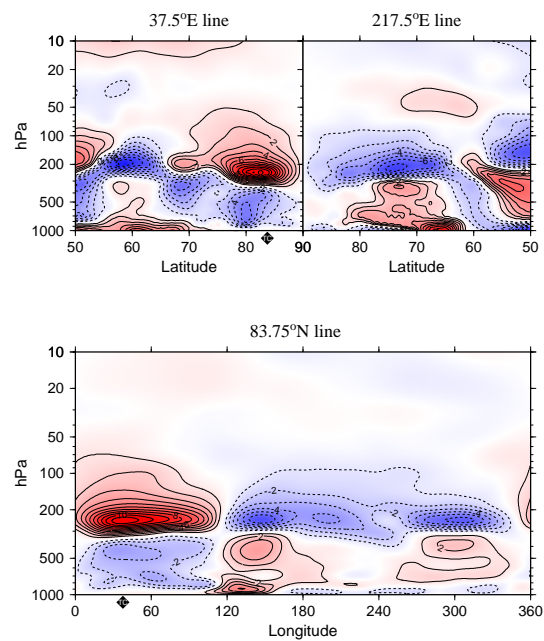


図9 事例1: 2005年7月16日06Zの気温偏差(带状平均)の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面).

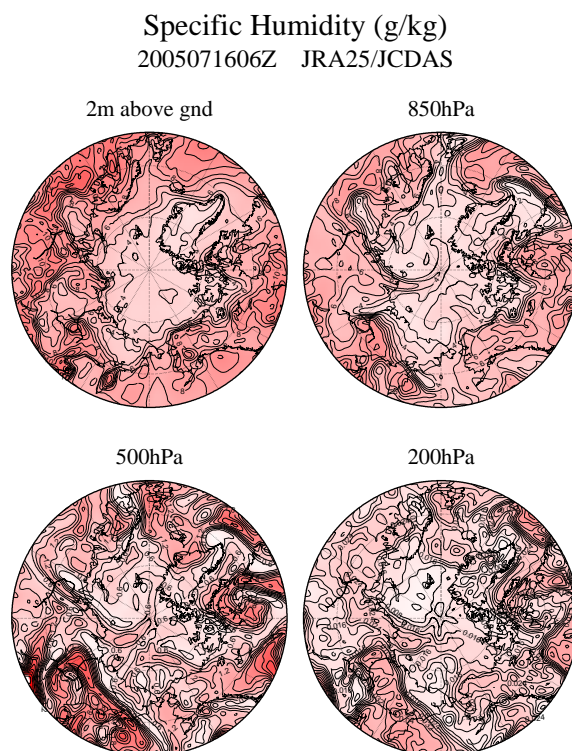


図10 事例1: 2005年7月16日06Zの比湿場 (左上: 地上2m, 右上: 850hPa, 左下: 500hPa, 右下: 200hPa).

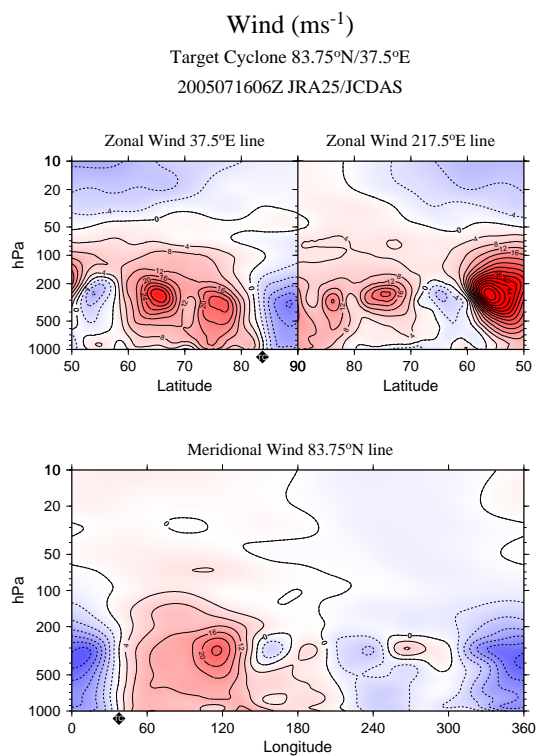


図11 事例1: 2005年7月16日06Zの風の鉛直断面図 (上: 東西風, 下: 南北風). 実線は西風/南風, 破線は東風/北風, ◆は低気圧の中心を表す.

Vertical p-Velocity  
2005071606Z JRA25/JCDAS

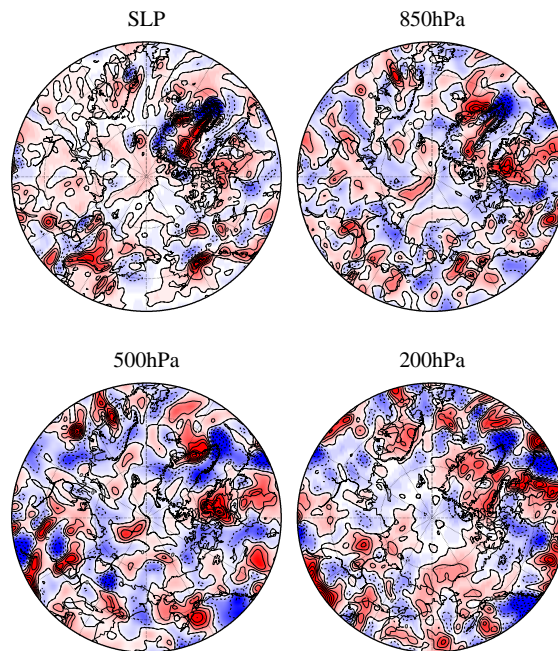


図 12 事例 1 : 2005 年 7 月 16 日 06Z の鉛直  $p$  速度オメガ (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa). 実線は上昇気流, 破線は下降気流を表す.

Vertical p-Velocity (Pa/s)  
Target Cyclone 83.75°N/37.5°E  
2005071606Z JRA25/JCDAS

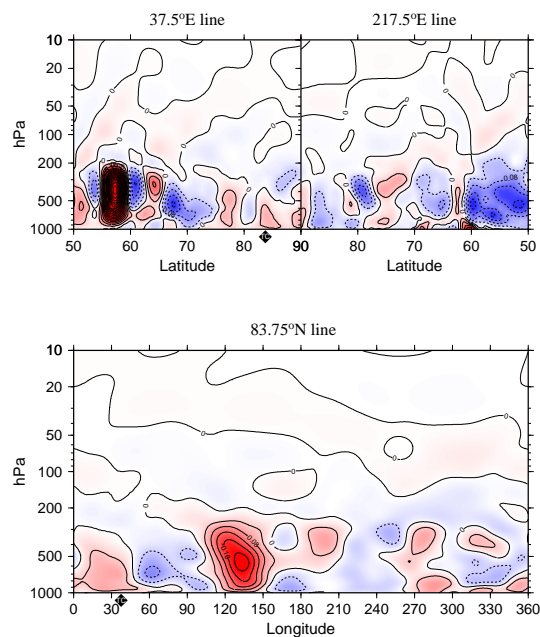


図 13 事例 1 : 2005 年 7 月 16 日 06Z の鉛直  $p$  速度オメガの鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は上昇気流, 破線は下降気流, ◆は低気圧の中心を表す.



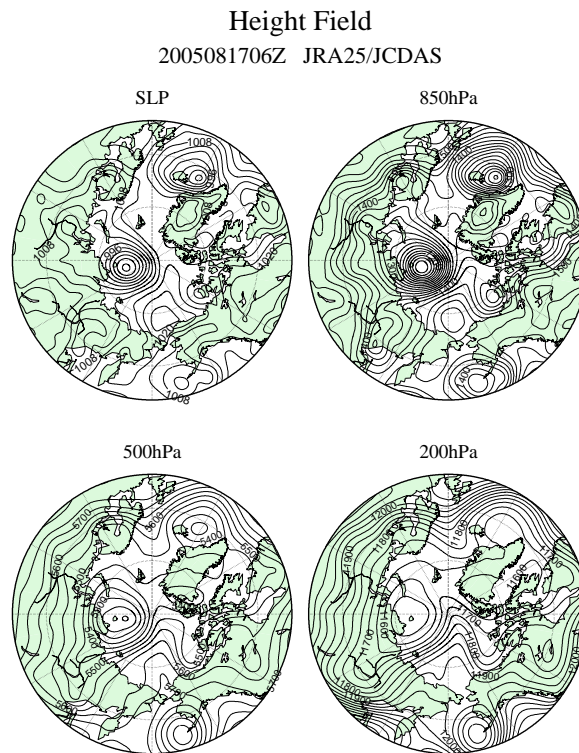


図 14 事例 2: 2005 年 8 月 17 日 06Z の高度場. 左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa.

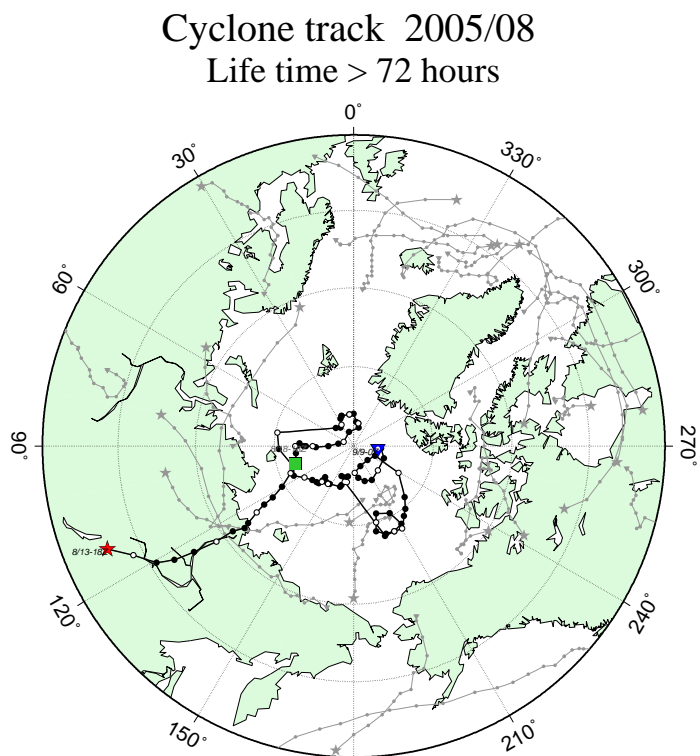


図 15 事例 2 の低気圧の移動経路図 (6 時間ごとにプロット、★は低気圧の発生、▼は低気圧の消滅、中抜きの丸は 00Z を表す).

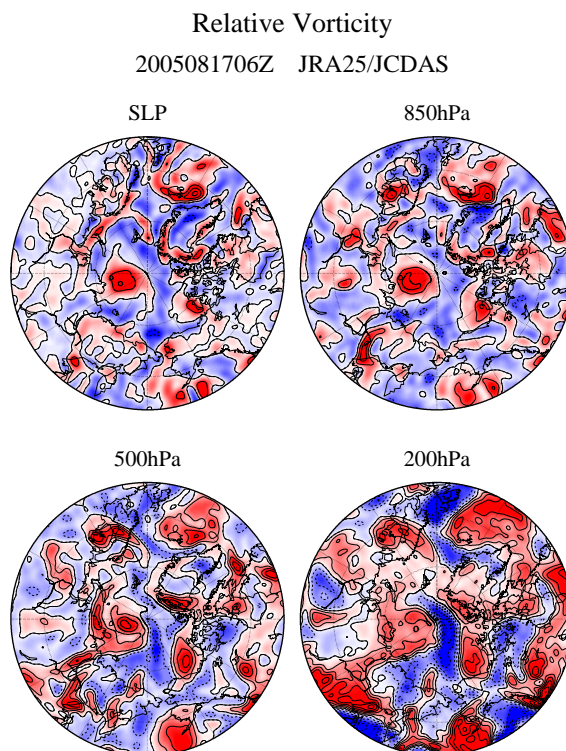


図 16 事例 2: 2005 年 8 月 17 日 06Z の各高度における相対渦度 (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa). 実線は正の渦度, 破線は負の渦度を表す.

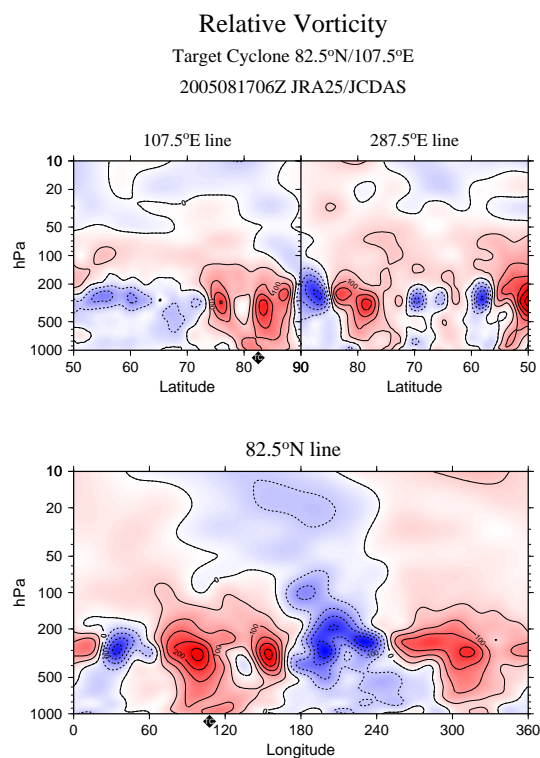


図 17 事例 2: 2005 年 8 月 17 日 06Z の相対渦度の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は正の渦度, 破線は負の渦度, ◆は低気圧の中心を表す.

Air Temperature [K]  
2005081706Z JRA25/JCDAS

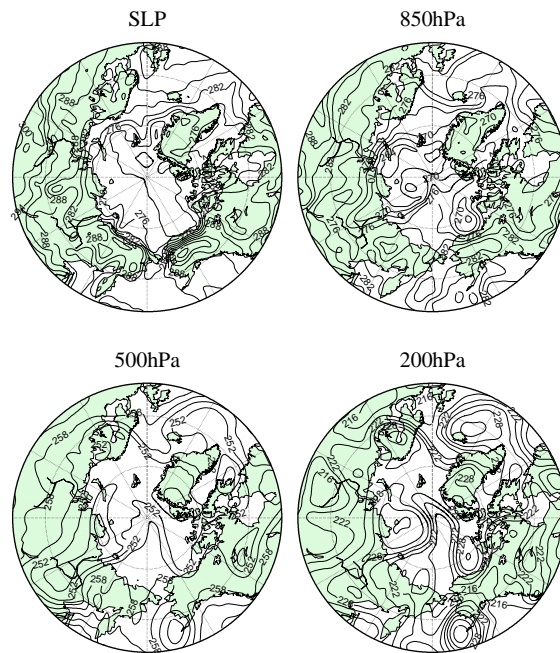


図 18 事例 2: 2005 年 8 月 17 日 06Z の気温場 (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa).

Temperature Anomalies (K)  
Target Cyclone 82.5°N/107.5°E  
2005081706Z JRA25/JCDAS

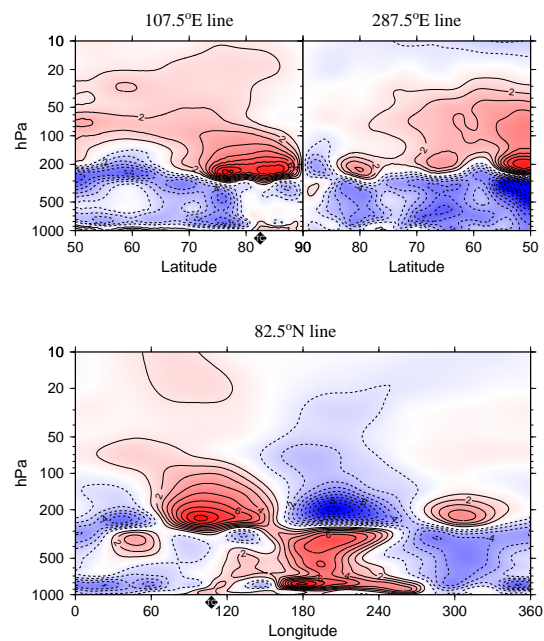


図 19 事例 2: 2005 年 8 月 17 日 06Z の気温偏差 (帯状平均) の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面).

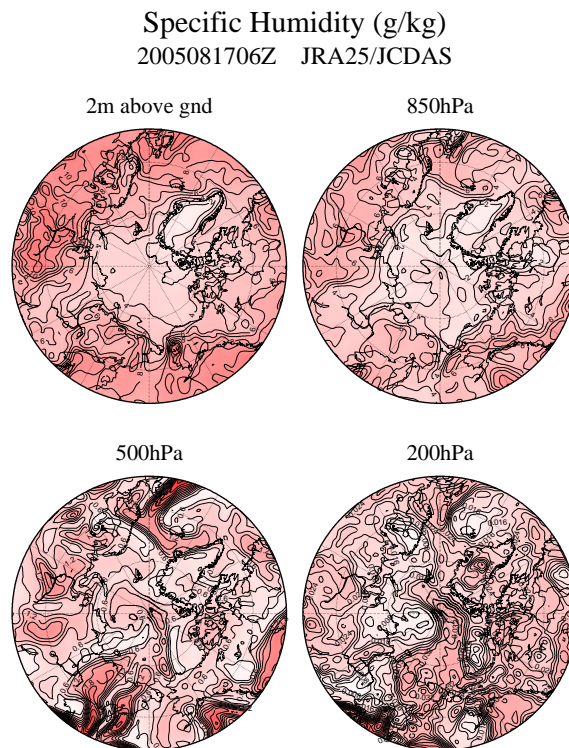


図 20 事例 2: 2005 年 8 月 17 日 06Z の比湿場 (左上: 地上 2 m, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa).

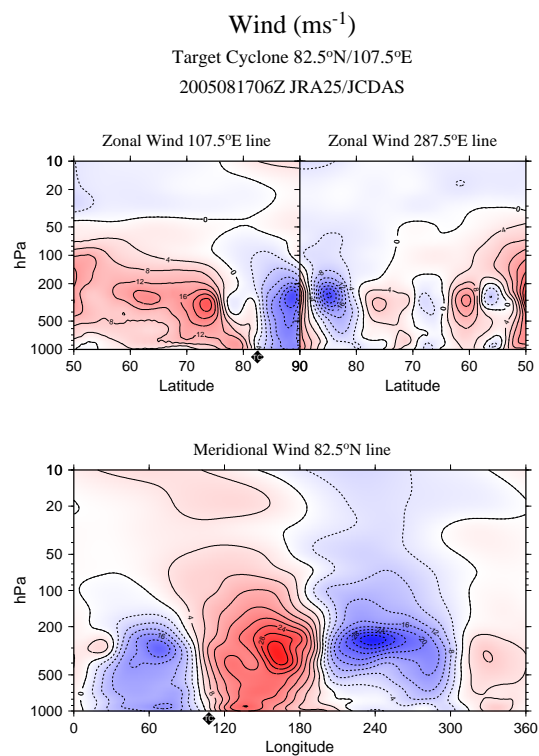


図 21 事例 2: 2005 年 8 月 17 日 06Z の風の鉛直断面図 (上: 東西風, 下: 南北風). 実線は西風/南風, 破線は東風/北風, ◆は低気圧の中心を表す.



Vertical p-Velocity  
2005081706Z JRA25/JCDAS

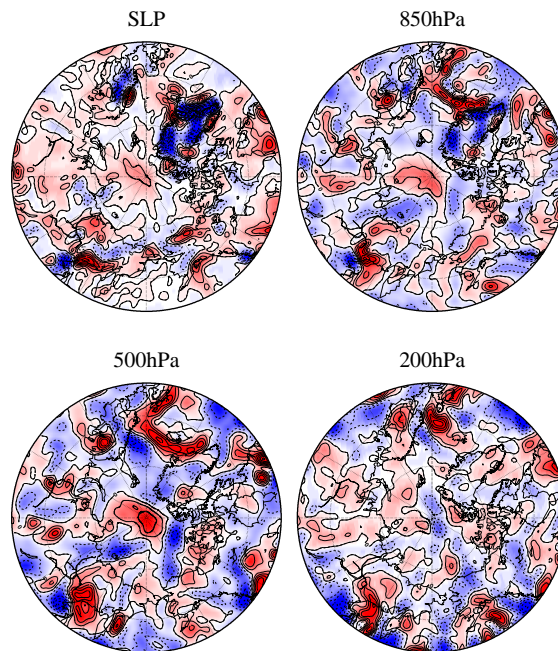


図 22 事例 2: 2005 年 8 月 17 日 06Z の鉛直  $p$  速度オメガ (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa). 実線は上昇気流, 破線は下降気流を表す.

Vertical p-Velocity (Pa/s)  
Target Cyclone 82.5°N/107.5°E  
2005081706Z JRA25/JCDAS

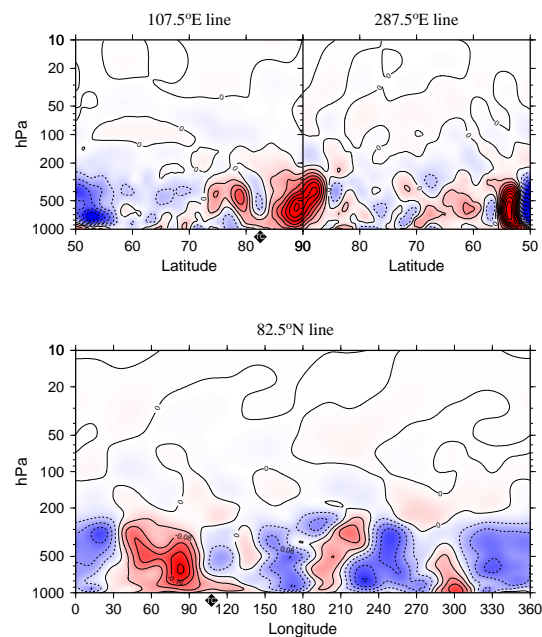


図 23 事例 2: 2005 年 8 月 17 日 06Z の鉛直  $p$  速度オメガの鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は上昇気流, 破線は下降気流, ◆は低気圧の中心を表す.

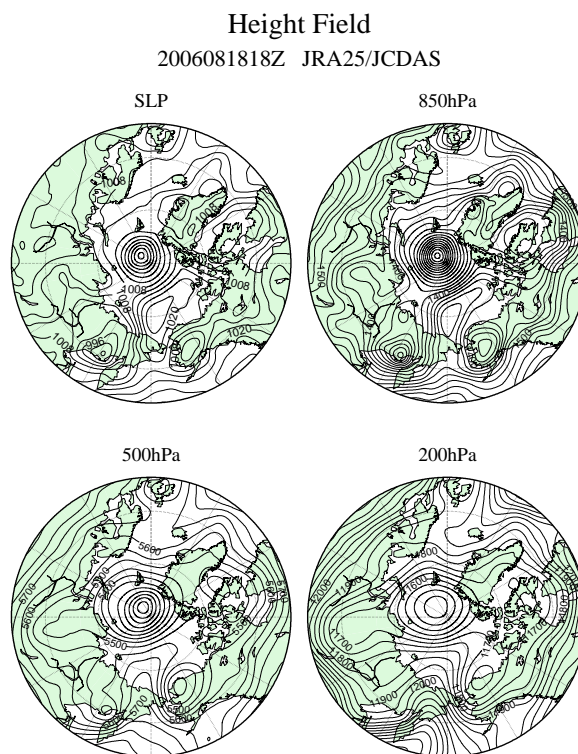


図 24 事例 3 : 2006 年 8 月 18 日 18Z の高度場. 左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa.

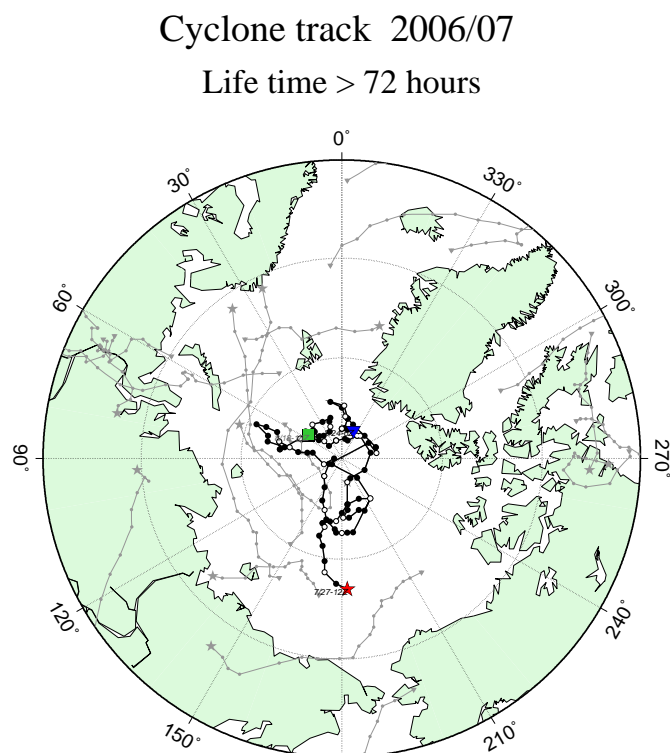


図 25 事例 3 の低気圧の移動経路図 (6 時間ごとにプロット、★は低気圧の発生、▼は低気圧の消滅、中抜きの丸は 00Z を表す).

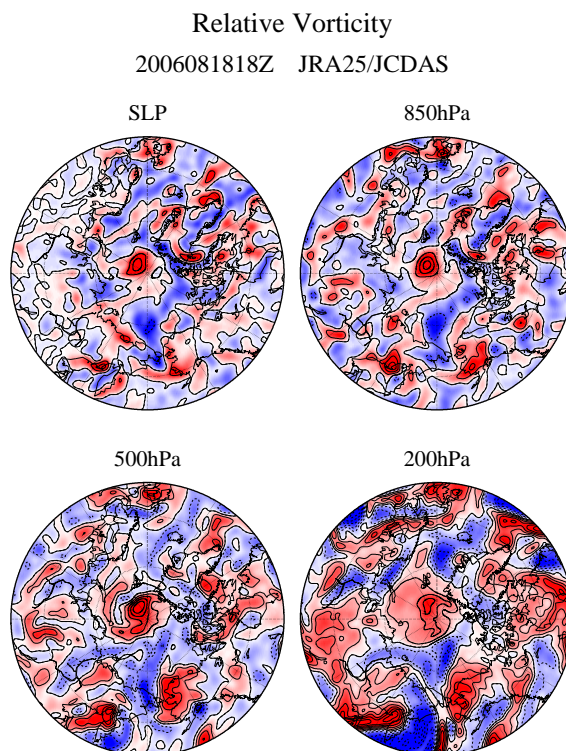


図 26 事例 3 : 2006 年 8 月 18 日 18Z の各高度における相対渦度 (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa). 実線は正の渦度, 破線は負の渦度を表す.

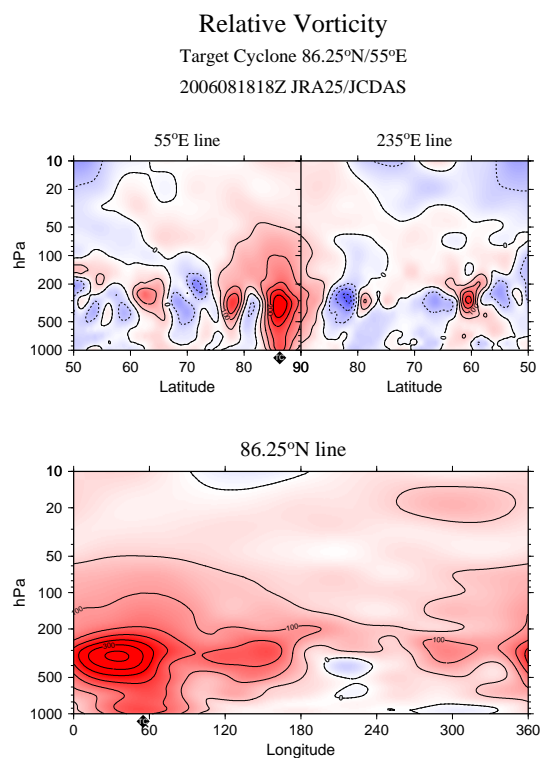


図 27 事例 3 : 2006 年 8 月 18 日 18Z の相対渦度の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は正の渦度, 破線は負の渦度, ◆は低気圧の中心を表す.

Air Temperature [K]  
2006081818Z JRA25/JCDAS

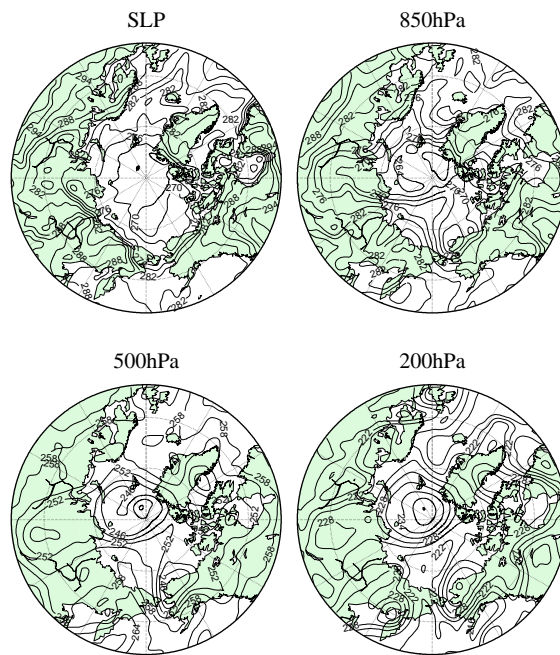


図 28 事例 3 : 2006 年 8 月 18 日 18Z の気温場 (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa).

Temperature Anomalies (K)  
Target Cyclone 86.25°N/55°E  
2006081818Z JRA25/JCDAS

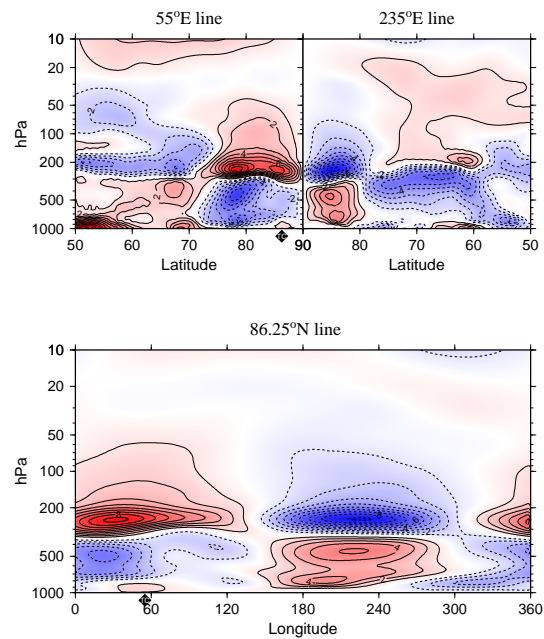


図 29 事例 3 : 2006 年 8 月 18 日 18Z の気温偏差 (帯状平均) の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面).

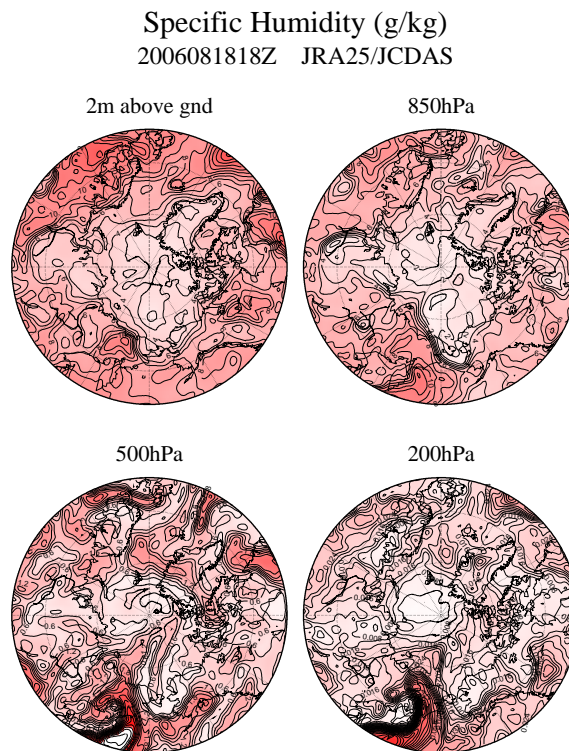


図 30 事例 3 : 2006 年 8 月 18 日 18Z の比湿場 (左上: 地上 2 m, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa).

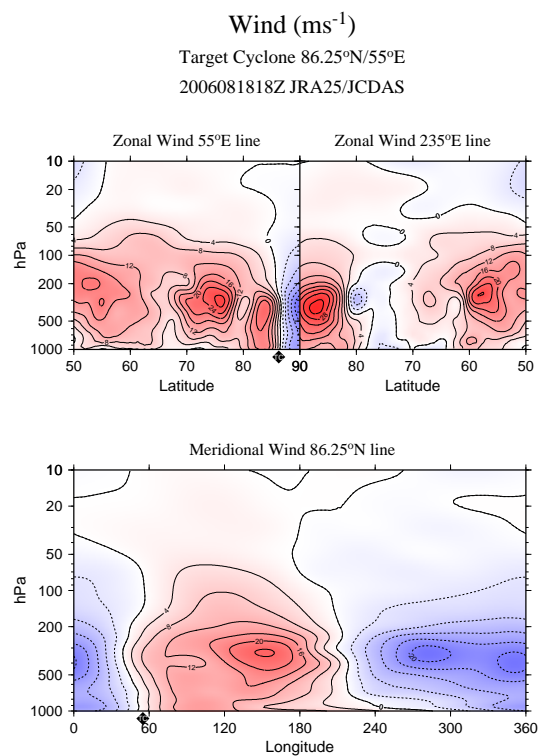


図 31 事例 3 : 2006 年 8 月 18 日 18Z の風の鉛直断面図 (上: 東西風, 下: 南北風). 実線は西風/南風, 破線は東風/北風, ◆は低気圧の中心を表す.



Vertical p-Velocity  
2006081818Z JRA25/JCDAS

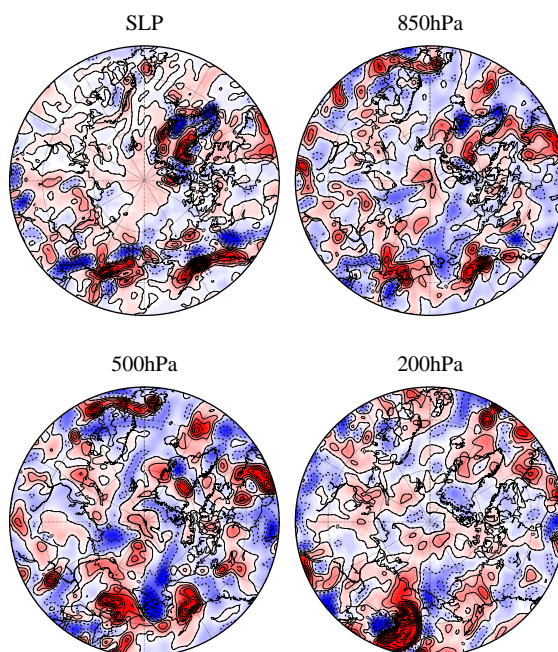


図 32 事例 3 : 2006 年 8 月 18 日 18Z の鉛直  $p$  速度オメガ (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa). 実線は上昇気流, 破線は下降気流を表す.

Vertical p-Velocity (Pa/s)

Target Cyclone 86.25°N/55°E

2006081818Z JRA25/JCDAS

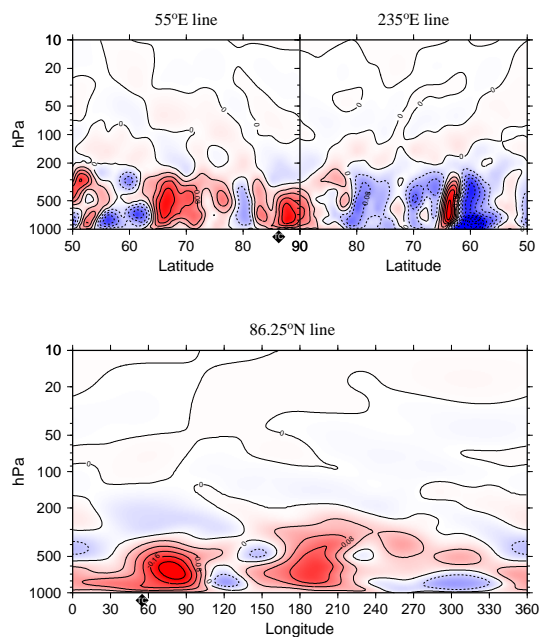


図 33 事例 3 : 2006 年 8 月 18 日 18Z の鉛直  $p$  速度オメガの鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は上昇気流, 破線は下降気流, ◆は低気圧の中心を表す.

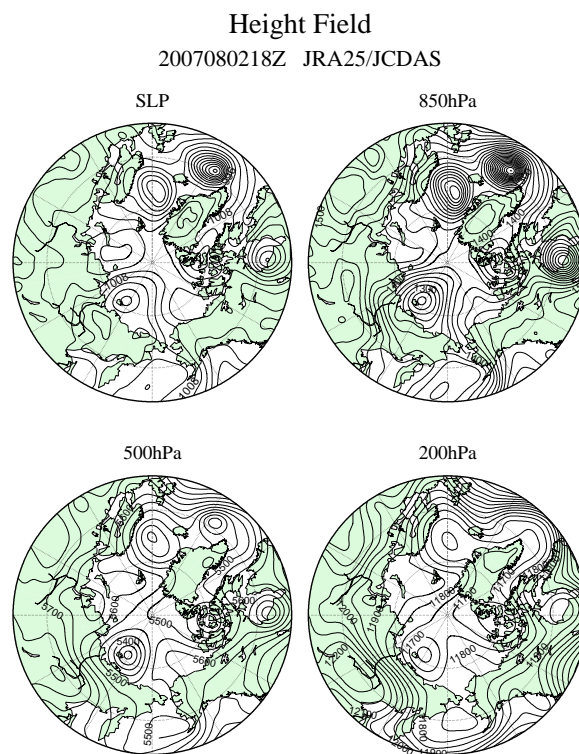


図 34 事例 4: 2007 年 8 月 2 日 18Z の高度場. 左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa.

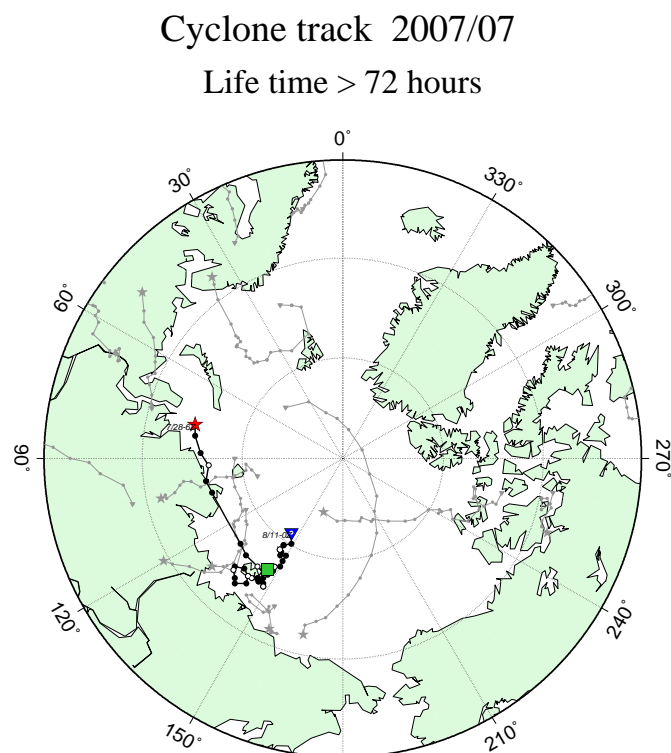


図 35 事例 4 の低気圧の移動経路 (6 時間ごとにプロット、★は低気圧の発生、▼は低気圧の消滅、中抜きの丸は 00Z を表す).

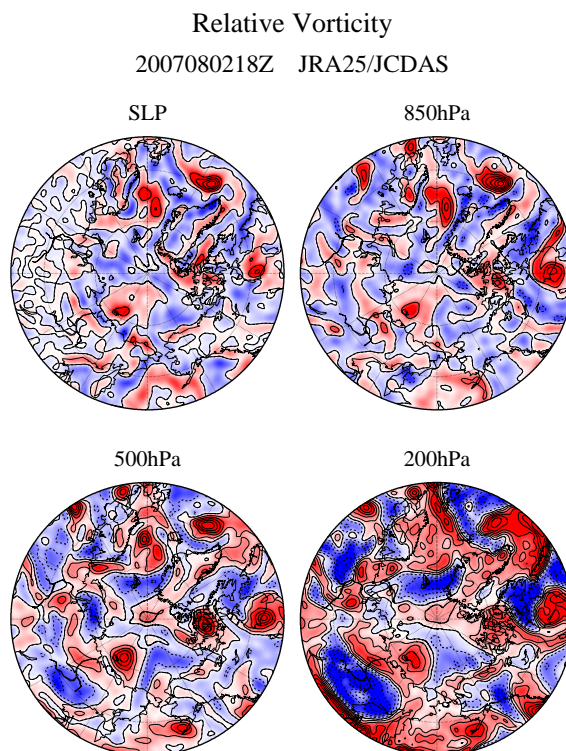


図 36 事例 4: 2007 年 8 月 2 日 18Z の各高度における相対渦度 (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa). 実線は正の渦度, 破線は負の渦度を表す.

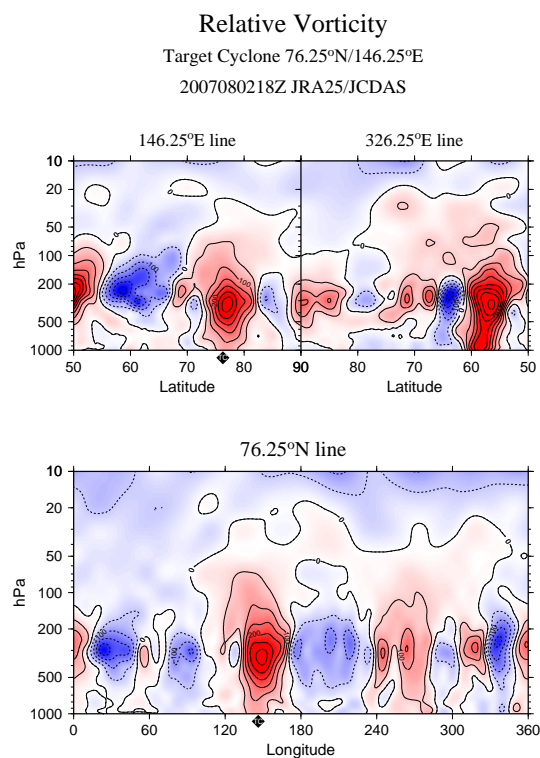


図 37 事例 4: 2007 年 8 月 2 日 18Z の相対渦度の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は正の渦度, 破線は負の渦度, ◆は低気圧の中心を表す.



Air Temperature [K]  
2007080218Z JRA25/JCDAS

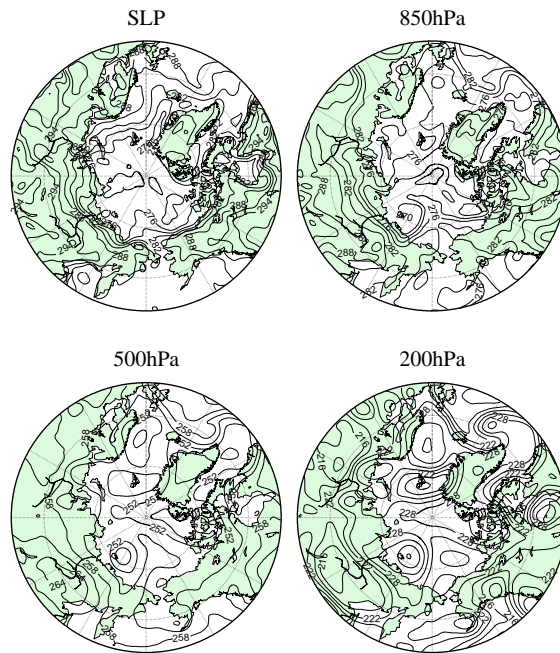


図 38 事例 4: 2007 年 8 月 2 日 18Z の気温場 (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa).

Temperature Anomalies (K)  
Target Cyclone 76.25°N/146.25°E  
2007080218Z JRA25/JCDAS

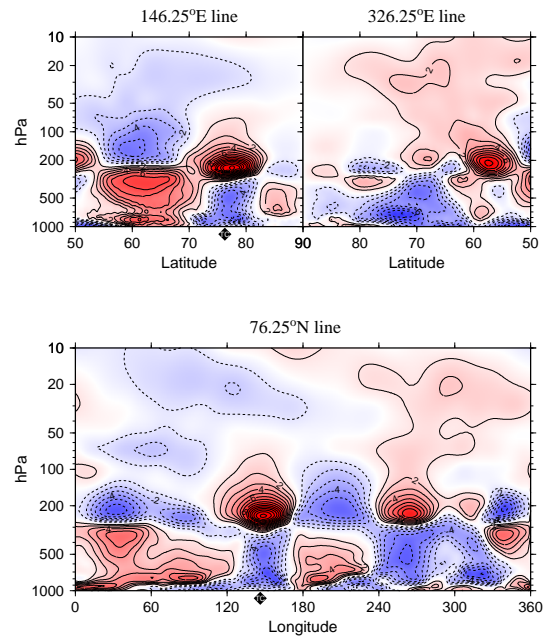


図 39 事例 4: 2007 年 8 月 2 日 18Z の気温偏差 (带状平均) の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面).

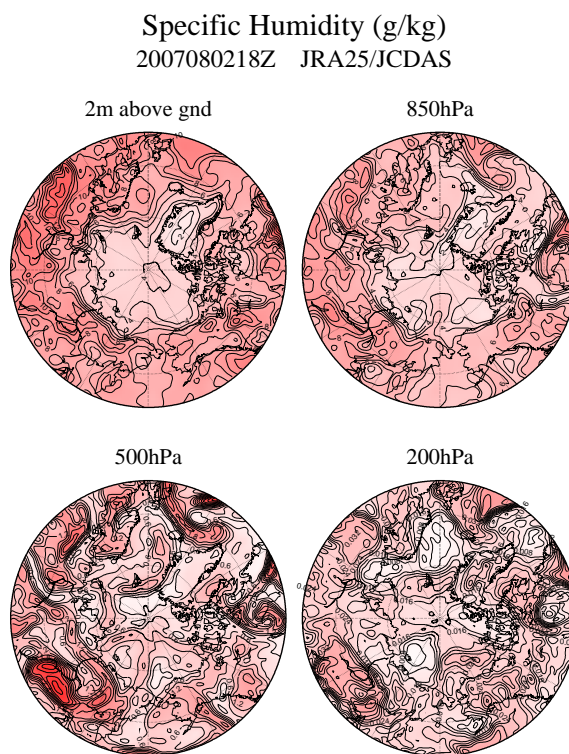


図 40 事例 4: 2007 年 8 月 2 日 18Z の比湿場 (左上: 地上 2 m, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa).

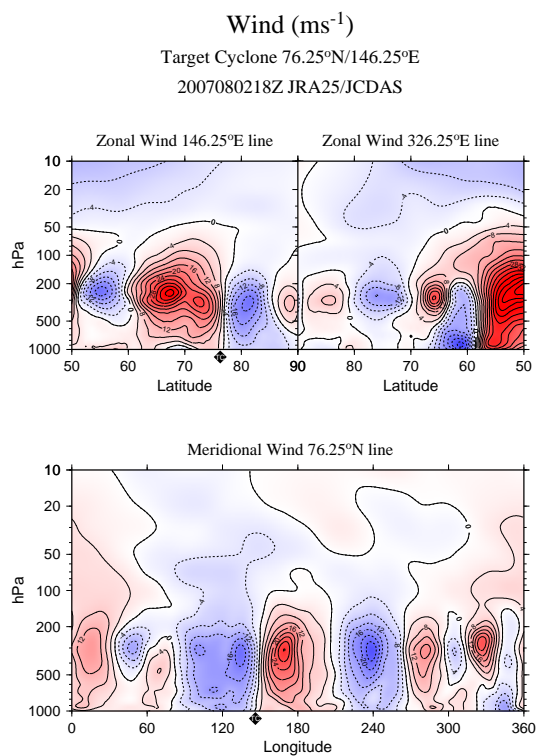


図 41 事例 4: 2007 年 8 月 2 日 18Z の風の鉛直断面図 (上: 東西風, 下: 南北風). 実線は西風/南風, 破線は東風/北風, ◆は低気圧の中心を表す.

Vertical p-Velocity  
2007080218Z JRA25/JCDAS

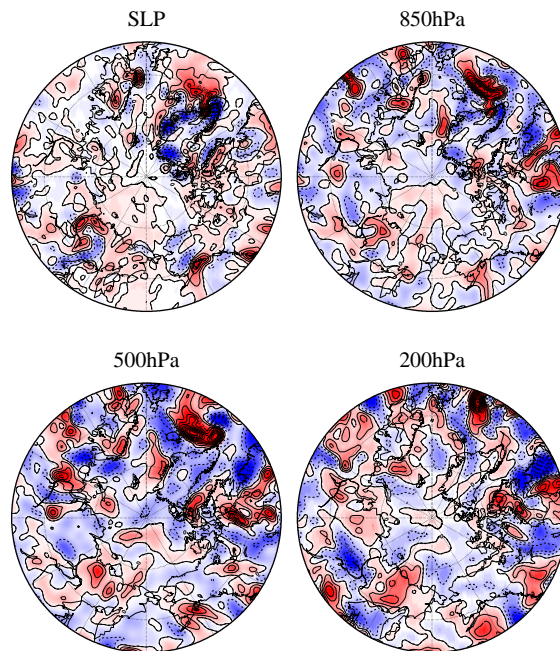


図 42 事例 4: 2007 年 8 月 2 日 18Z の鉛直  $p$  速度オメガ (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa). 実線は上昇気流, 破線は下降気流を表す.

Vertical p-Velocity (Pa/s)  
Target Cyclone 76.25°N/146.25°E  
2007080218Z JRA25/JCDAS

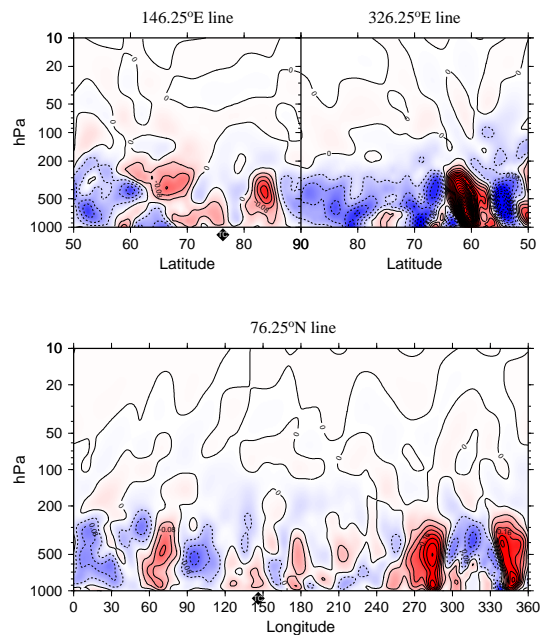


図 43 事例 4: 2007 年 8 月 2 日 18Z の鉛直  $p$  速度オメガの鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は上昇気流, 破線は下降気流, ◆は低気圧の中心を表す.

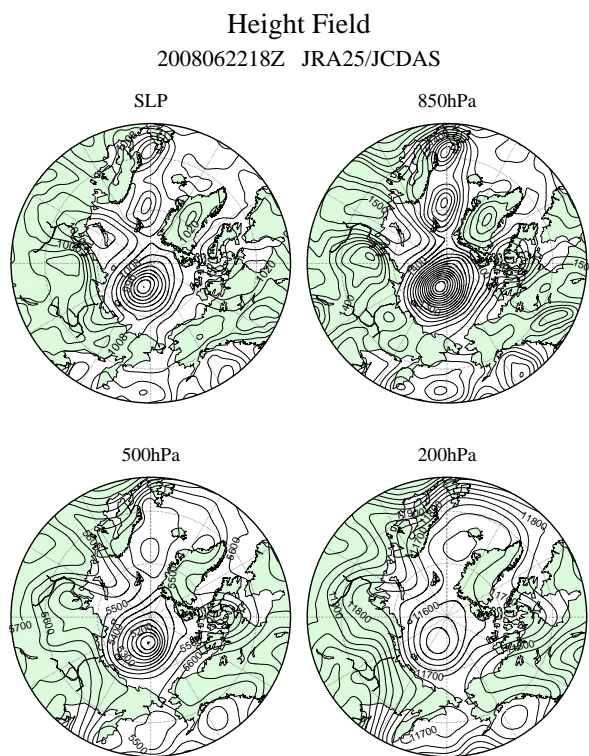


図 44 事例 5 : 2008 年 6 月 22 日 18Z の高度場. 左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa.

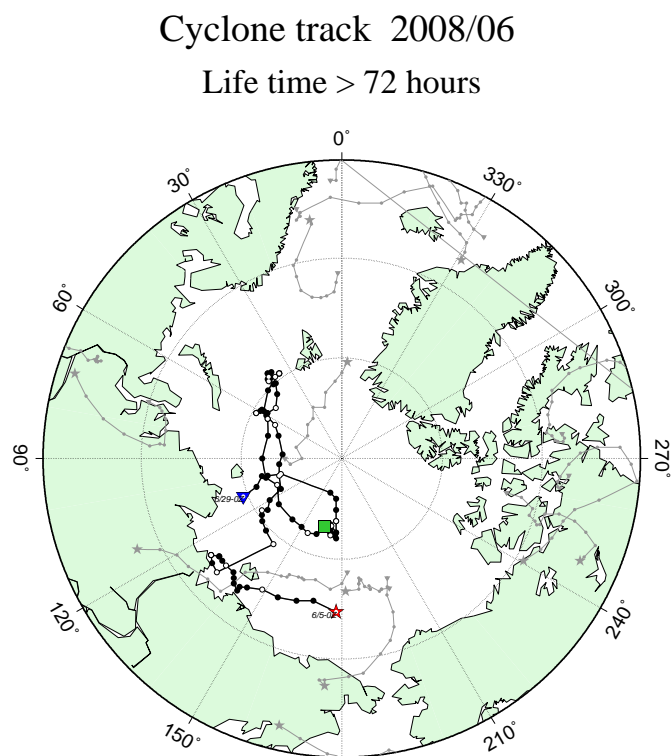


図 45 事例 5 の低気圧の移動経路図 (6 時間ごとにプロット、★は低気圧の発生、▼は低気圧の消滅、中抜きの丸は 00Z を表す).



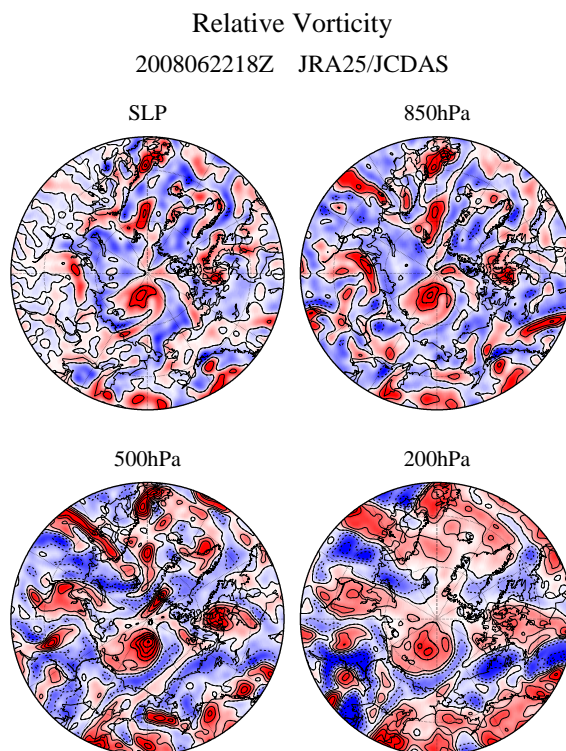


図 46 事例 5: 2008 年 6 月 22 日 18Z の各高度における相対渦度 (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa). 実線は正の渦度, 破線は負の渦度を表す.

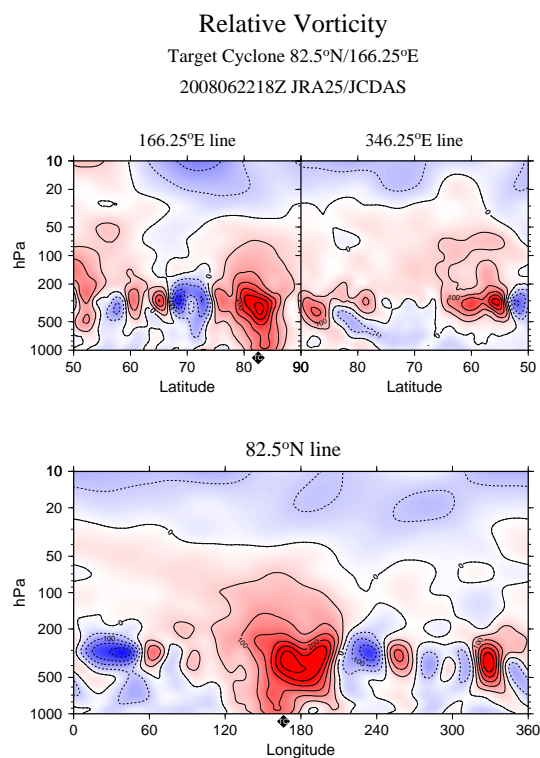


図 47 事例 5: 2008 年 6 月 22 日 18Z の相対渦度の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は正の渦度, 破線は負の渦度, ◆は低気圧の中心を表す.

Air Temperature [K]  
2008062218Z JRA25/JCDAS

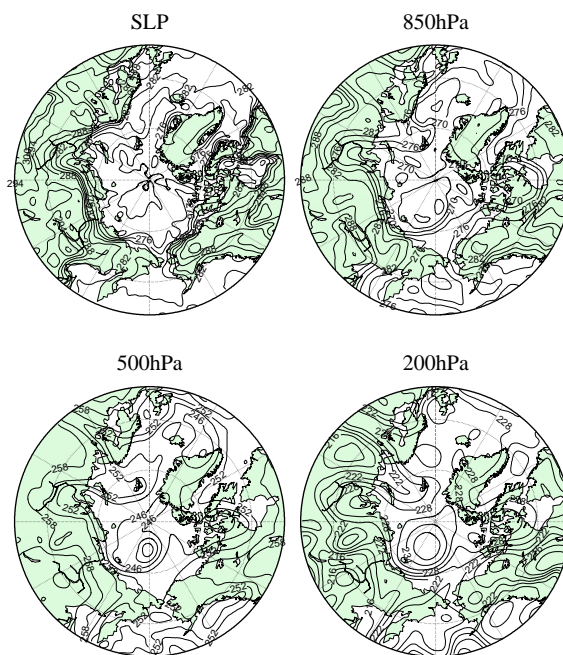


図 48 事例 5 : 2008 年 6 月 22 日 18Z の気温場 (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa).

Temperature Anomalies (K)  
Target Cyclone 82.5°N/166.25°E  
2008062218Z JRA25/JCDAS

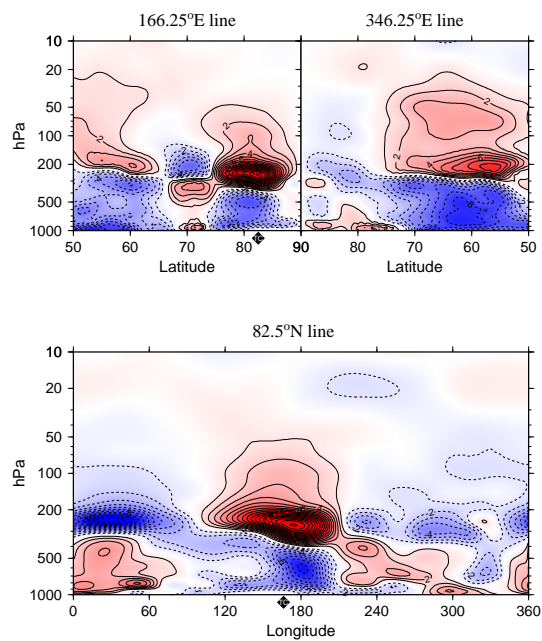


図 49 事例 5 : 2008 年 6 月 22 日 18Z の気温偏差 (帯状平均) の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面).

Specific Humidity (g/kg)  
2008062218Z JRA25/JCDAS

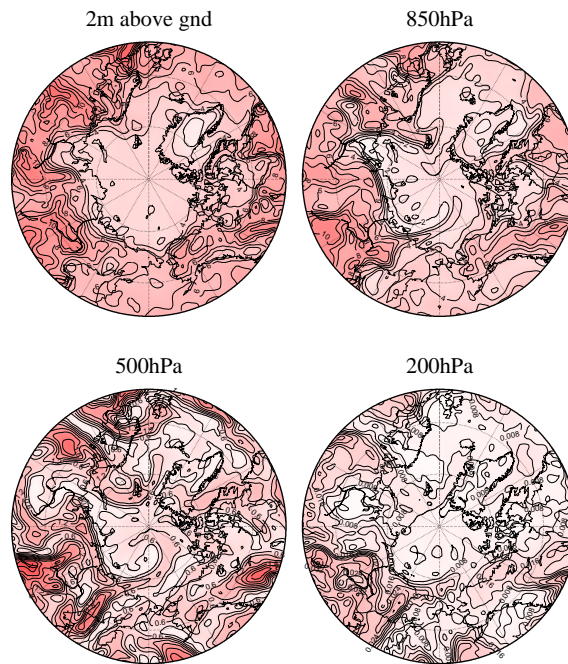


図 50 事例 5 : 2008 年 6 月 22 日 18Z の比湿場 (左上: 地上 2 m, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa).

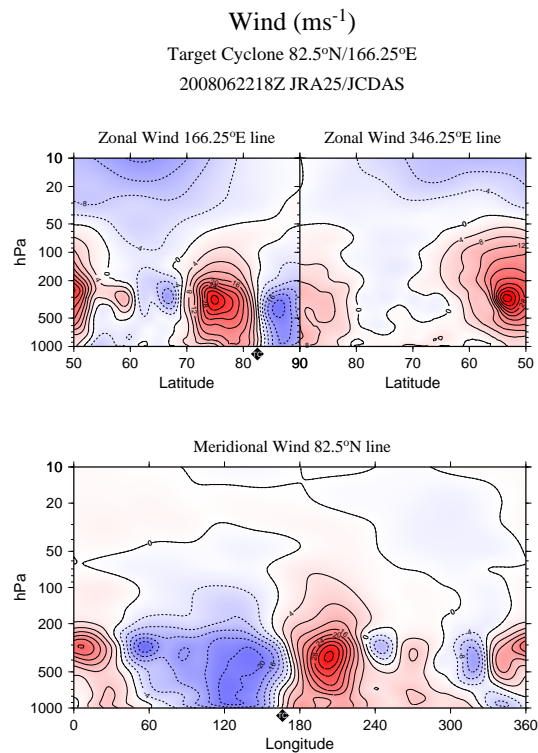


図 51 事例 5 : 2008 年 6 月 22 日 18Z の風の鉛直断面図 (上: 東西風, 下: 南北風). 実線は西風/南風, 破線は東風/北風, ◆は低気圧の中心を表す.

Vertical p-Velocity  
2008062218Z JRA25/JCDAS

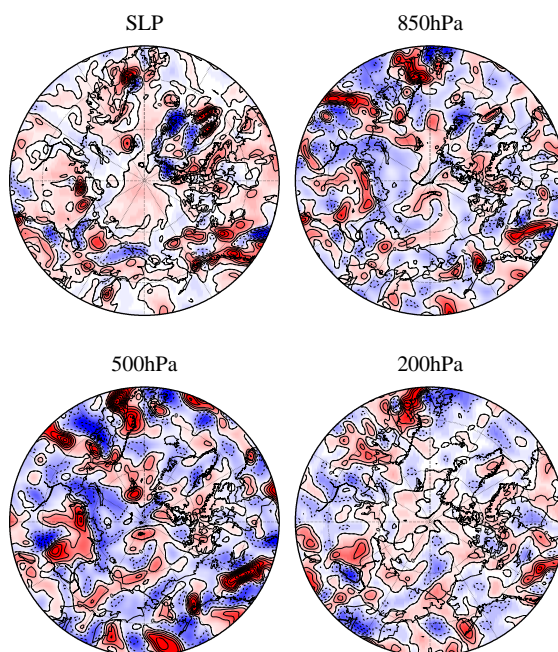


図 52 事例 5 : 2008 年 6 月 22 日 18Z の鉛直  $p$  速度オメガ (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa). 実線は上昇気流, 破線は下降気流を表す.

Vertical p-Velocity (Pa/s)

Target Cyclone 82.5°N/166.25°E

2008062218Z JRA25/JCDAS

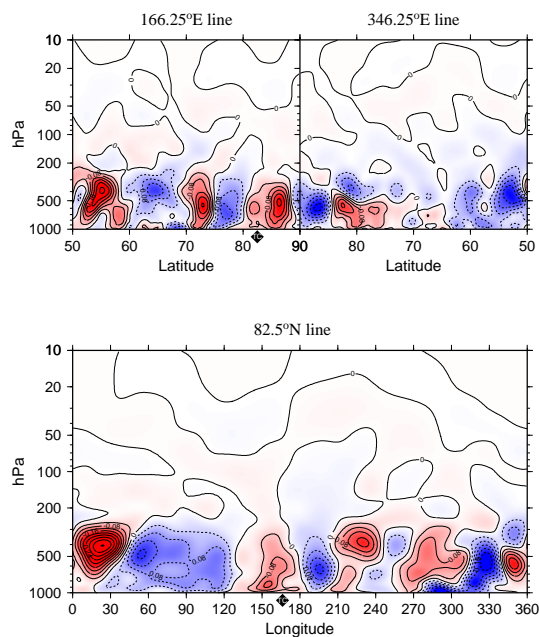


図 53 事例 5 : 2008 年 6 月 22 日 18Z の鉛直  $p$  速度オメガの鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は上昇気流, 破線は下降気流, ◆は低気圧の中心を表す.



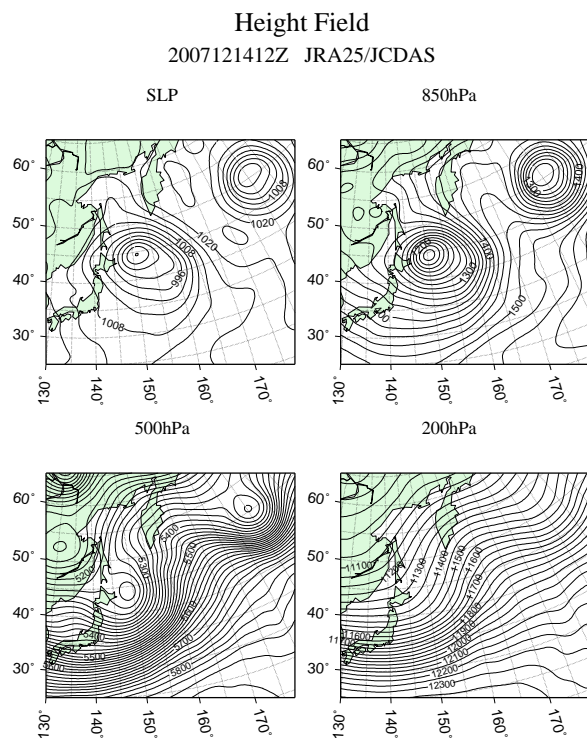


図 54 事例 ETC : 温帯低気圧 (2007 年 12 月 14 日 12Z) の高度場 (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa).

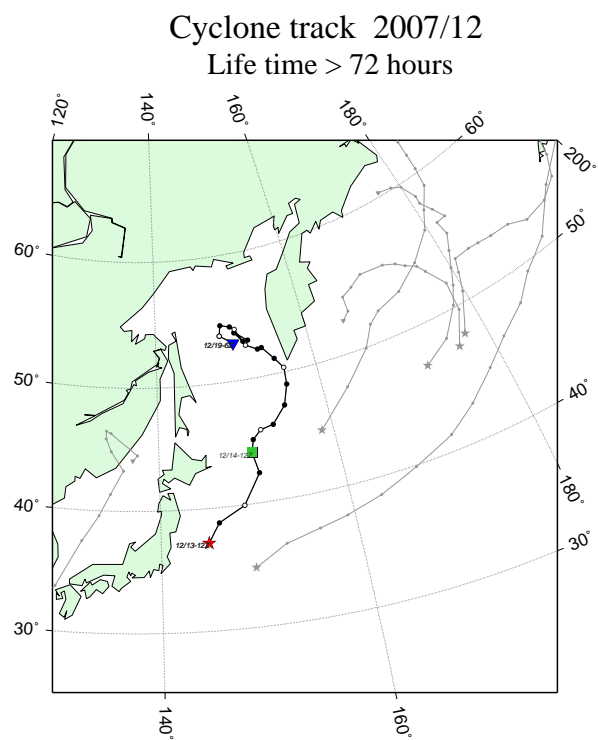


図 55 事例 ETC : 温帯低気圧の経路図 (6 時間ごとにプロット、★は低気圧の発生、▼は低気圧の消滅、中抜きの丸は 00Z を表す).

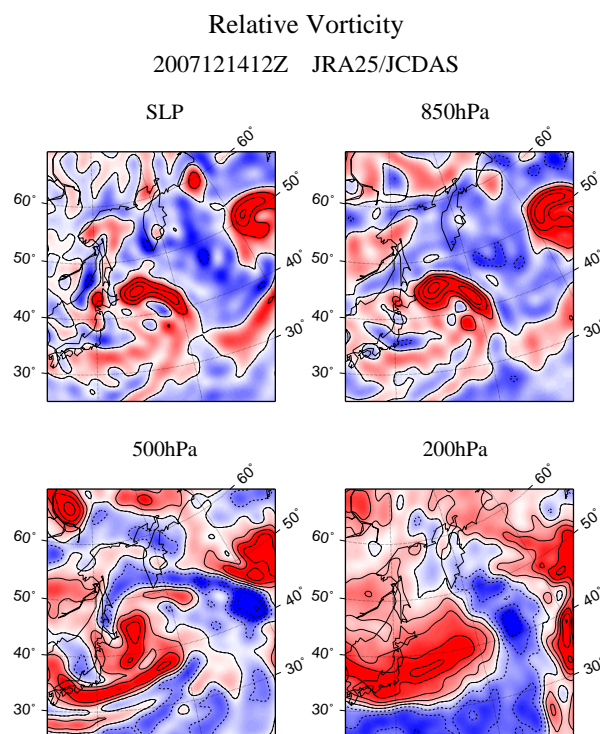


図 56 事例 ETC : 温帯低気圧 (2007 年 12 月 14 日 12Z) の相対渦度 (左上: SLP, 右上: 850hPa, 左下: 500hPa, 右下: 200hPa). 実線は正の渦度, 破線は負の渦度を表す.

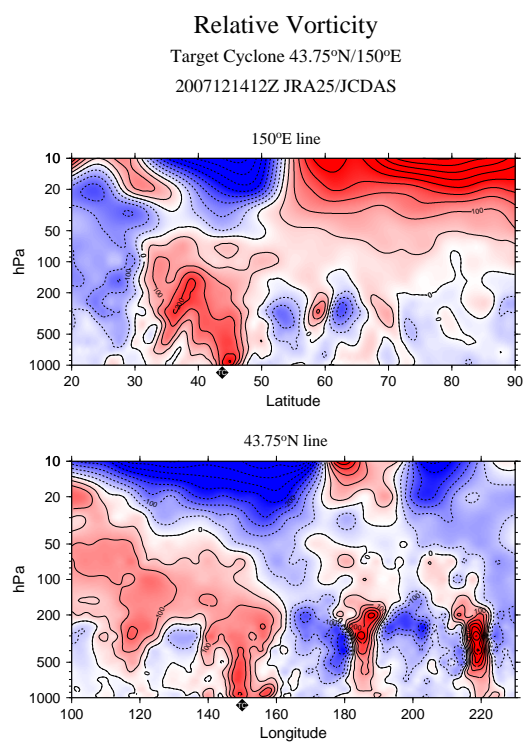


図 57 事例 ETC : 温帯低気圧 (2007 年 12 月 14 日 12Z) の相対渦度の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は正の渦度, 破線は負の渦度, ◆は低気圧の中心を表す.

Air Temperature [K]  
2007121412Z JRA25/JCDAS

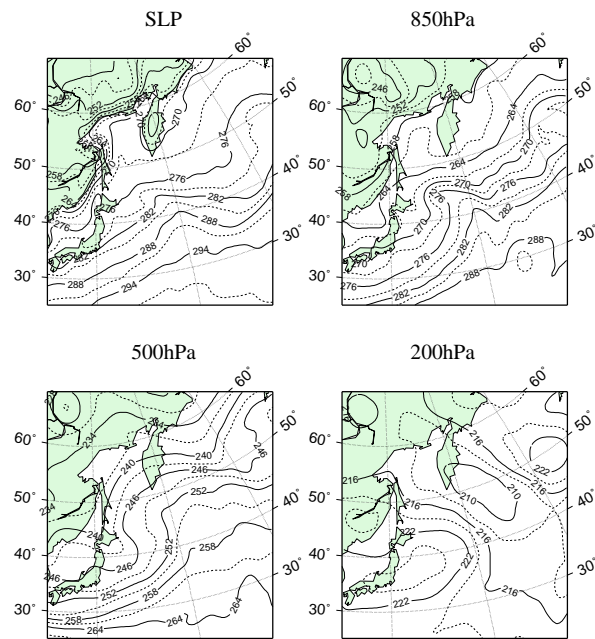


図 58 事例 ETC : 温帯低気圧 (2007 年 12 月 14 日 12Z) の気温場 (左上: SLP, 右上: 850hPa, 左下: 500hPa, 右下: 200hPa).

Temperature Anomalies (K)  
Target Cyclone 43.75°N/150°E  
2007121412Z JRA25/JCDAS

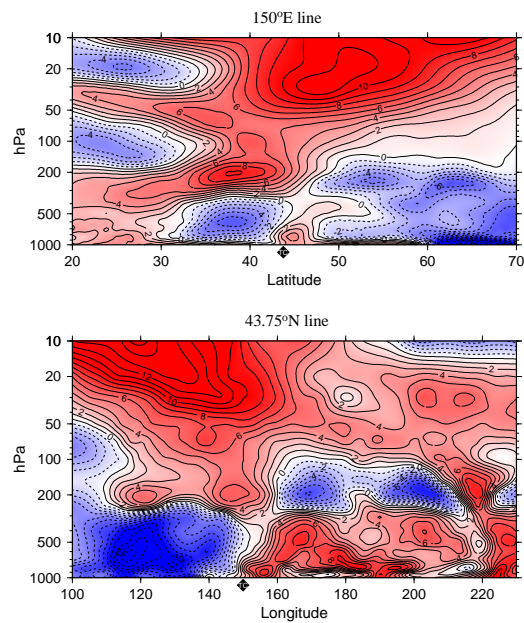


図 59 事例 ETC : 温帯低気圧 (2007 年 12 月 14 日 12Z) の気温偏差 (帯状平均) の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面).

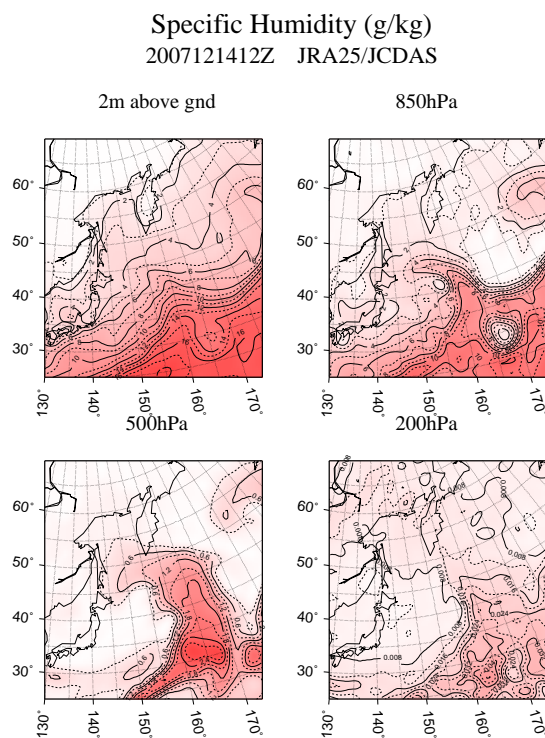


図 60 事例 ETC : 温帯低気圧 (2007 年 12 月 14 日 12Z) の比湿場 (左上: SLP, 右上: 850hPa, 左下: 500hPa, 右下: 200hPa).

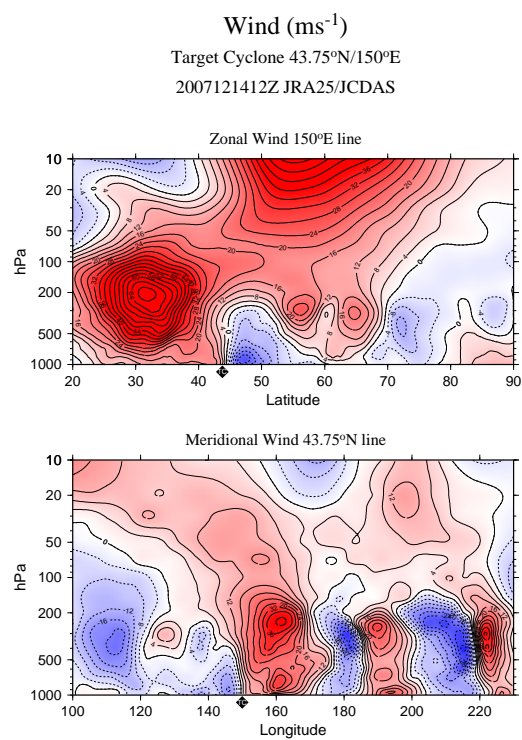


図 61 事例 ETC : 温帯低気圧 (2007 年 12 月 14 日 12Z) の風の鉛直断面図 (上: 東西風, 下: 南北風). 実線は西風/南風, 破線は東風/北風, ◆は低気圧の中心を表す.

OMEGA  
2007121412Z JRA25/JCDAS

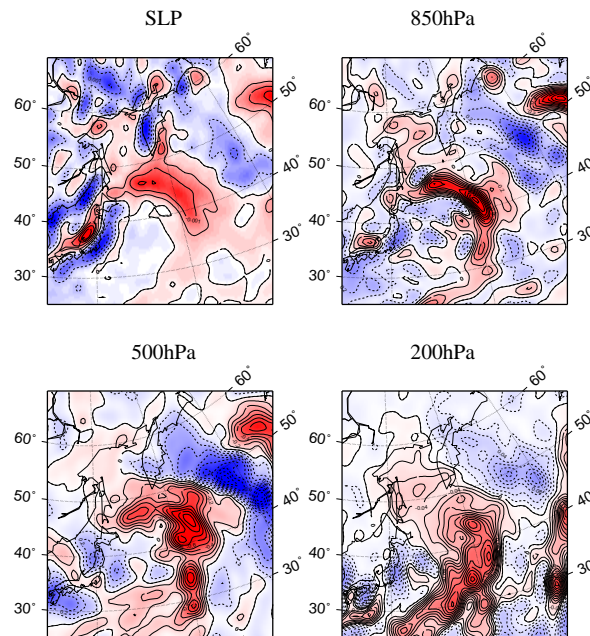


図 62 事例 ETC : 温帯低気圧 (2007 年 12 月 14 日 12Z) の鉛直  $p$  速度オメガ (左上: SLP, 右上: 850hPa, 左下: 500hPa, 右下: 200hPa). 実線は上昇気流, 破線は下降気流を表す.

Vertical  $p$ -Velocity (Pa/s)

Target Cyclone 43.75°N/150°E

2007121412Z JRA25/JCDAS

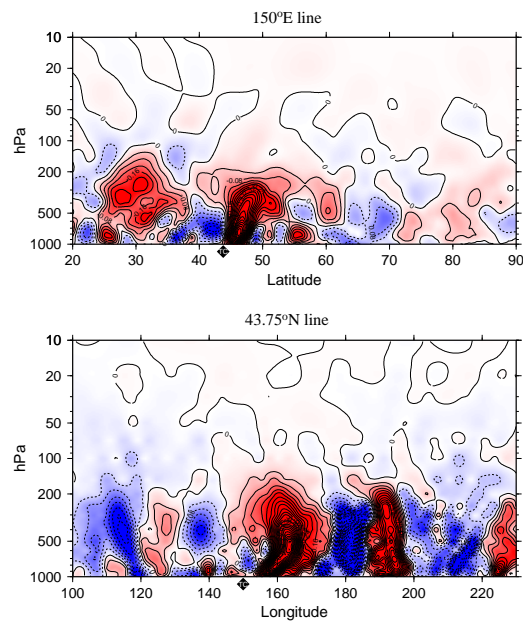


図 63 事例 ETC : 温帯低気圧 (2007 年 12 月 14 日 12Z) の鉛直  $p$  速度オメガの鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は上昇気流, 破線は下降気流, ◆は低気圧の中心を表す.



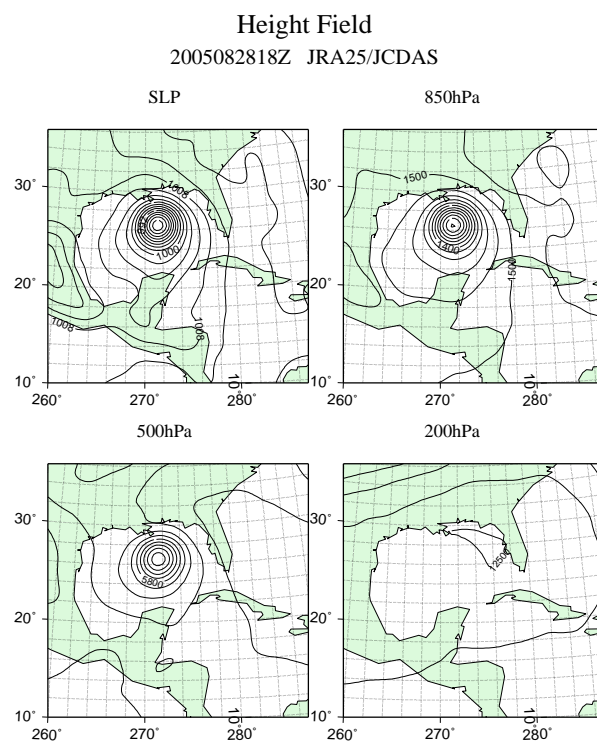


図 64 事例 TC : 熱帯低気圧 (2005 年 8 月 28 日 18Z) の高度場 (左上: SLP, 右上: 850 hPa, 左下: 500 hPa, 右下: 200 hPa).

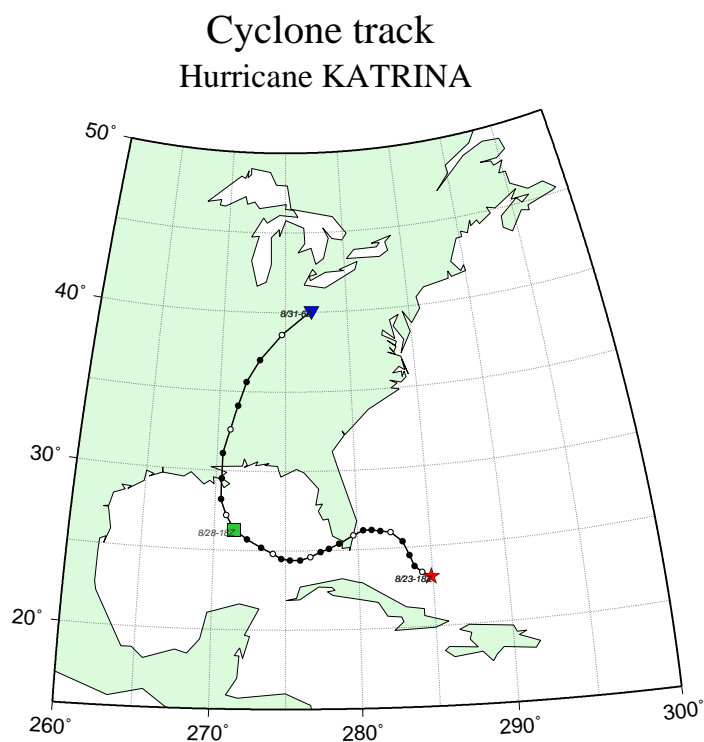


図 65 事例 TC : 熱帯低気圧の経路図 (6 時間ごとにプロット、★は低気圧の発生、▼は低気圧の消滅、中抜きの丸は 00Z を表す).

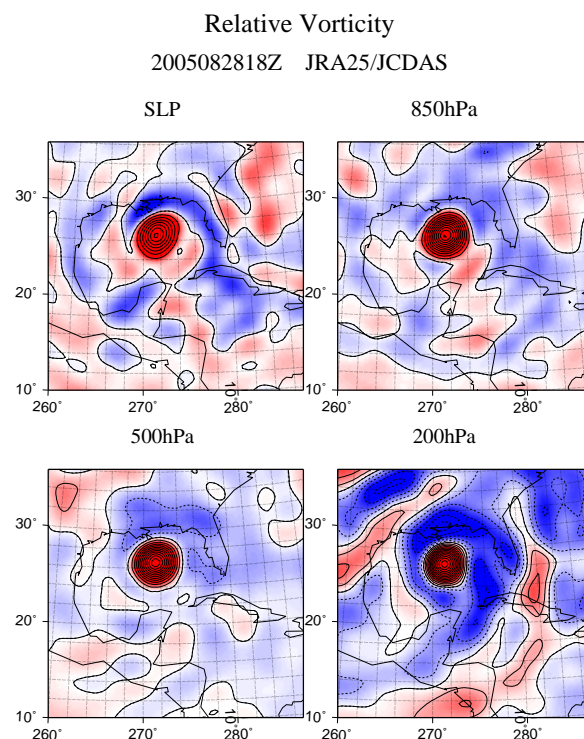


図 66 事例 TC: 熱帯低気圧 (2005 年 8 月 28 日 18Z) の相対渦度 (左上: SLP, 右上: 850hPa, 左下: 500hPa, 右下: 200hPa). 実線は正の渦度, 破線は負の渦度を表す.

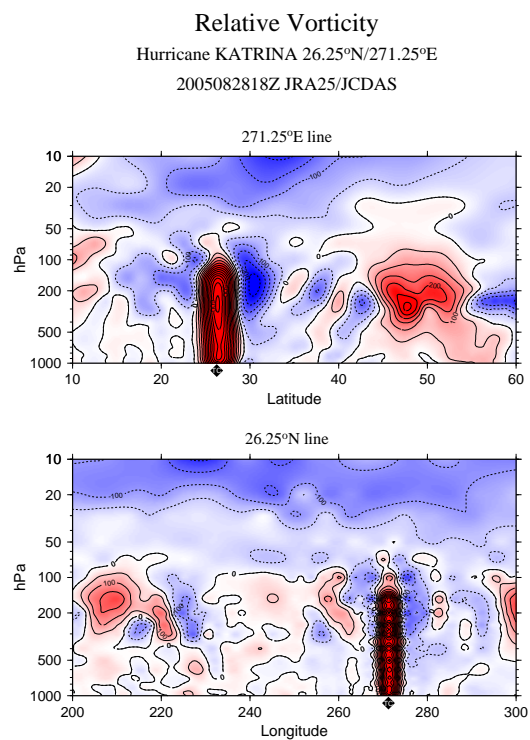


図 67 事例 TC: 熱帯低気圧 (2005 年 8 月 28 日 18Z) の相対渦度の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は正の渦度, 破線は負の渦度, ◆は低気圧の中心を表す.

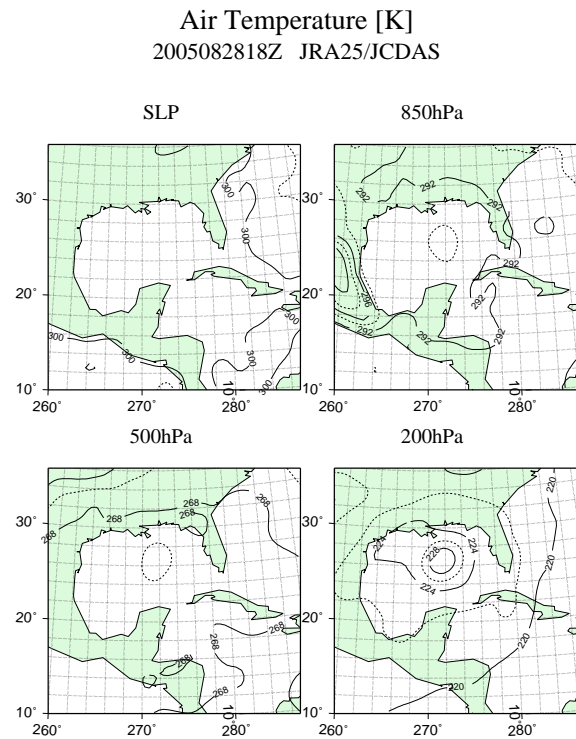


図 68 事例 TC : 熱帯低気圧 (2005 年 8 月 28 日 18Z) の気温場 (左上: SLP, 右上: 850hPa, 左下: 500hPa, 右下: 200hPa).

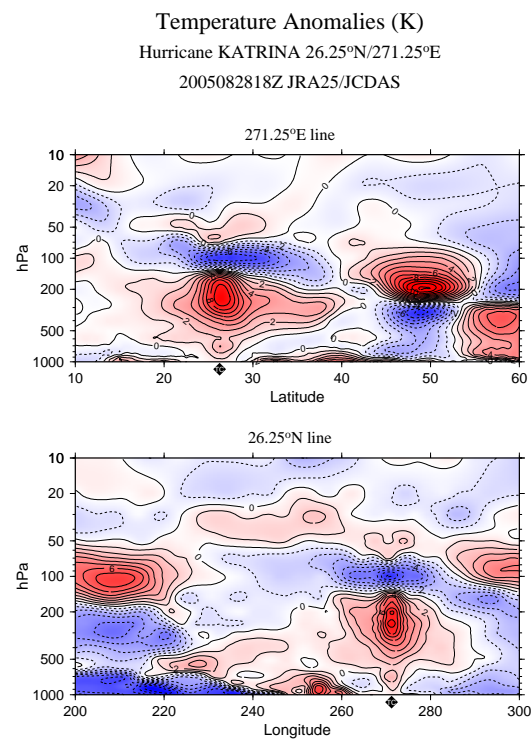


図 69 事例 TC : 熱帯低気圧 (2005 年 8 月 28 日 18Z) の気温偏差 (帯状平均) の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面).



Specific Humidity (g/kg)  
2005082818Z JRA25/JCDAS

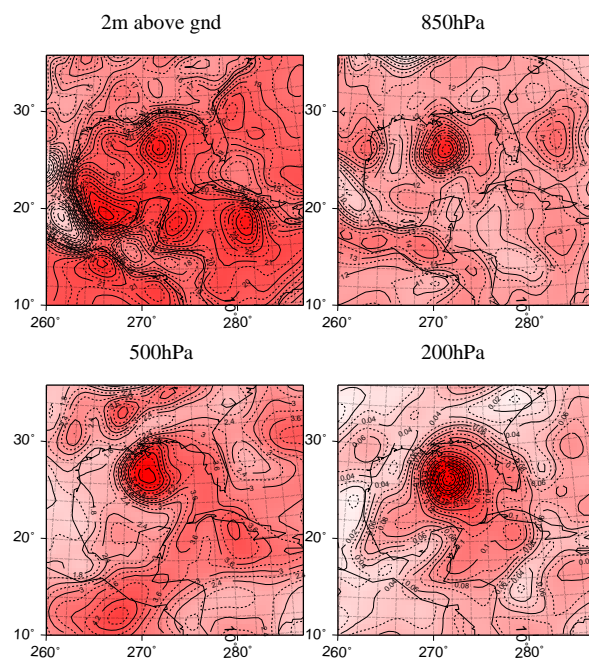


図 70 事例 TC : 熱帯低気圧 (2005 年 8 月 28 日 18Z) の比湿場 (左上: SLP, 右上: 850hPa, 左下: 500hPa, 右下: 200hPa).

Wind ( $\text{ms}^{-1}$ )

Hurricane KATRINA 26.25°N/271.25°E  
2005082818Z JRA25/JCDAS

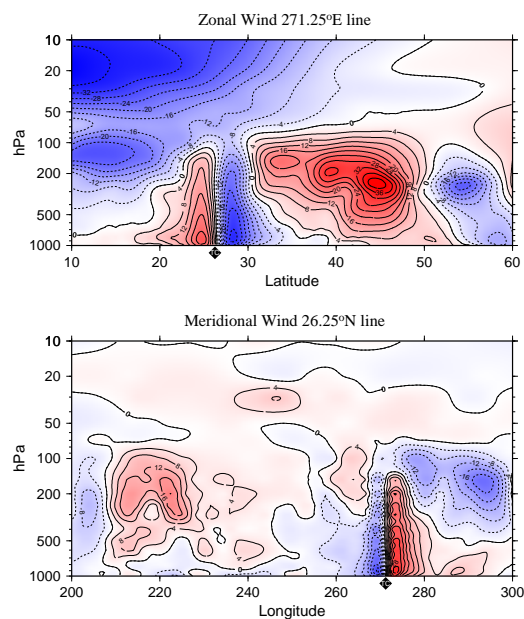


図 71 事例 TC : 熱帯低気圧 (2005 年 8 月 28 日 18Z) の風の鉛直断面図 (上: 東西風, 下: 南北風). 実線は西風/南風, 破線は東風/北風, ◆は低気圧の中心を表す.

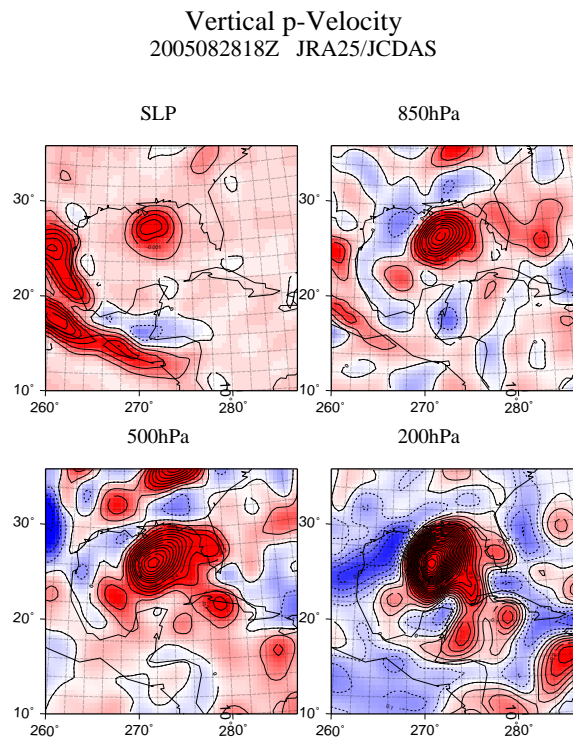


図 72 事例 TC : 熱帯低気圧 (2005 年 8 月 28 日 18Z) の鉛直  $p$  速度オメガ (左上: SLP, 右上: 850hPa, 左下: 500hPa, 右下: 200hPa). 実線は上昇気流, 破線は下降気流を表す.

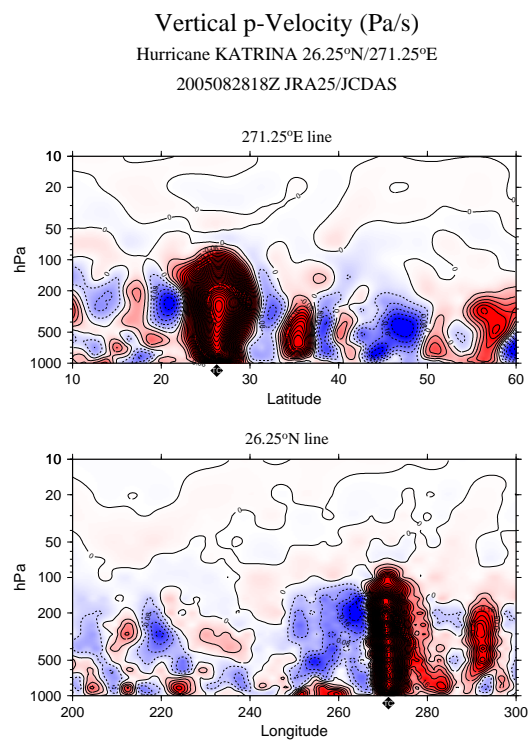


図 73 事例 TC : 熱帯低気圧 (2005 年 8 月 28 日 18Z) の鉛直  $p$  速度オメガの鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は上昇気流, 破線は下降気流, ◆は低気圧の中心を表す.

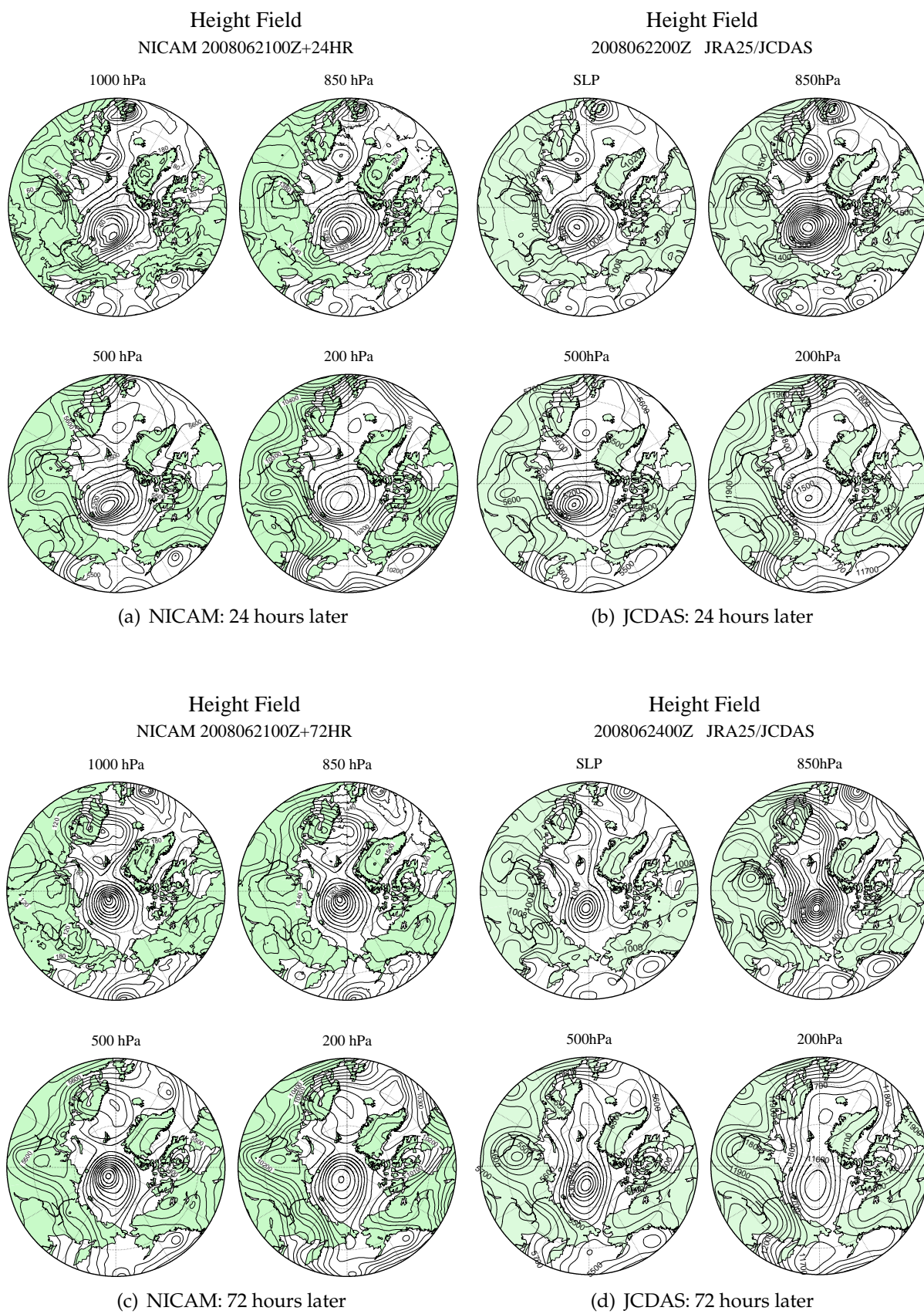


図 74 NICAM の予報値と JCDAS の比較; 2008 年 6 月 21 日 00Z 初期値の 24, 72 時間後の高度場.



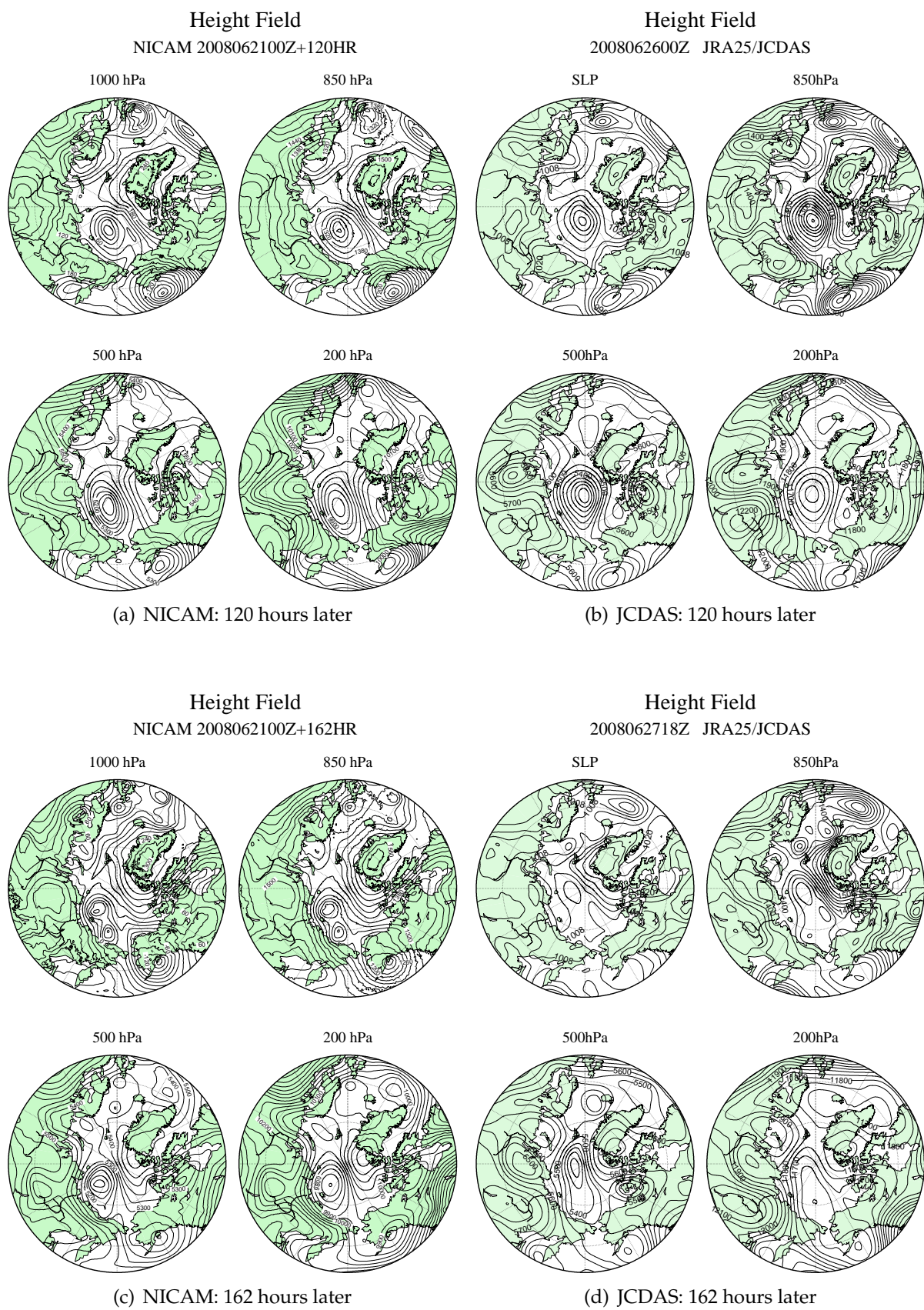
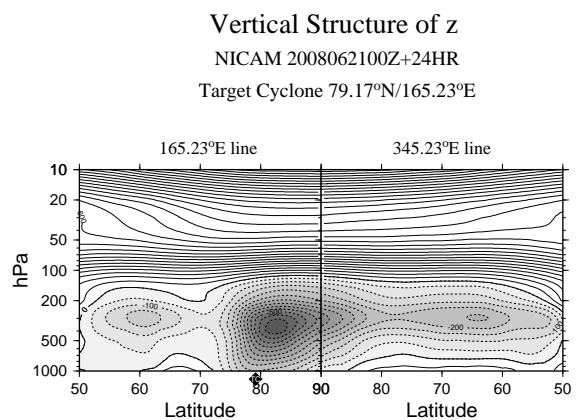
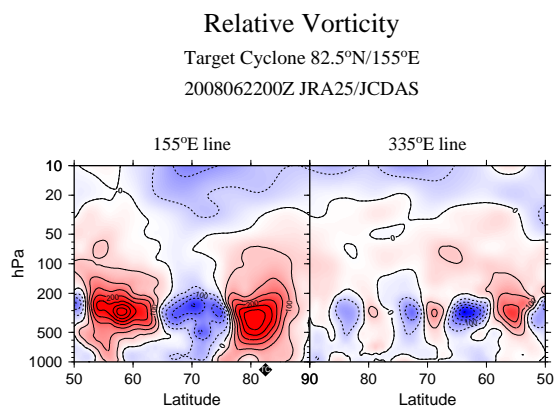


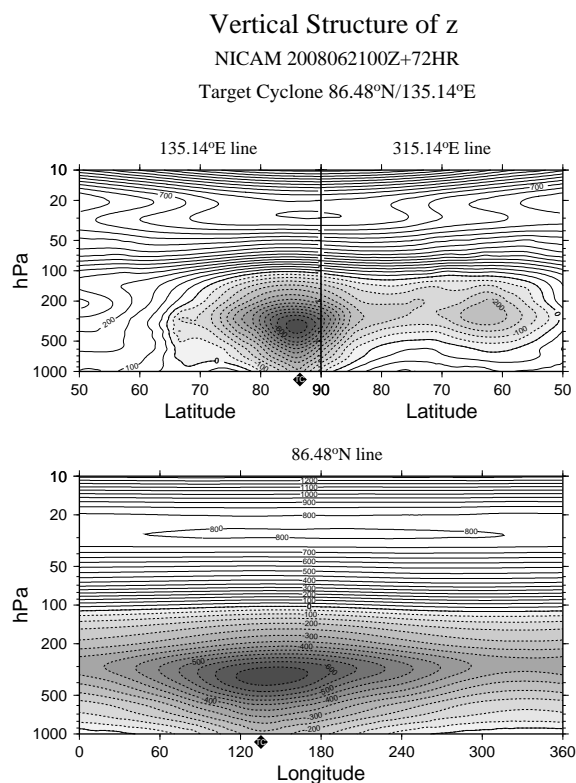
図 75 NICAM の予報値と JCDAS の比較; 2008 年 6 月 21 日 00Z 初期値の 120, 162 時間後の高度場.



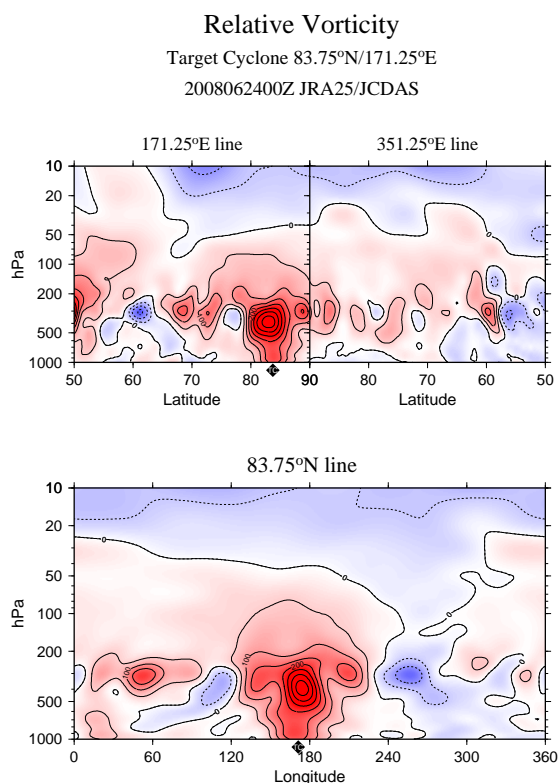
(a) NICAM: 24 hours later



(b) JCDAS: 24 hours later



(c) NICAM: 72 hours later



(d) JCDAS: 72 hours later

図 76 NICAM の予報値と JCDAS の比較; 2008 年 6 月 21 日 00Z 初期値の 24, 72 時間後の高度偏差場 (NICAM) と相対渦度 (JCDAS) の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). ◆は低気圧の中心を表す.

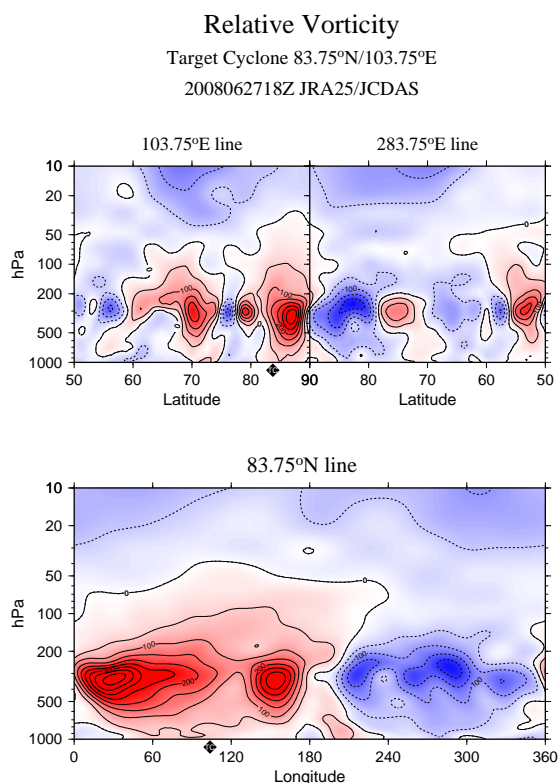
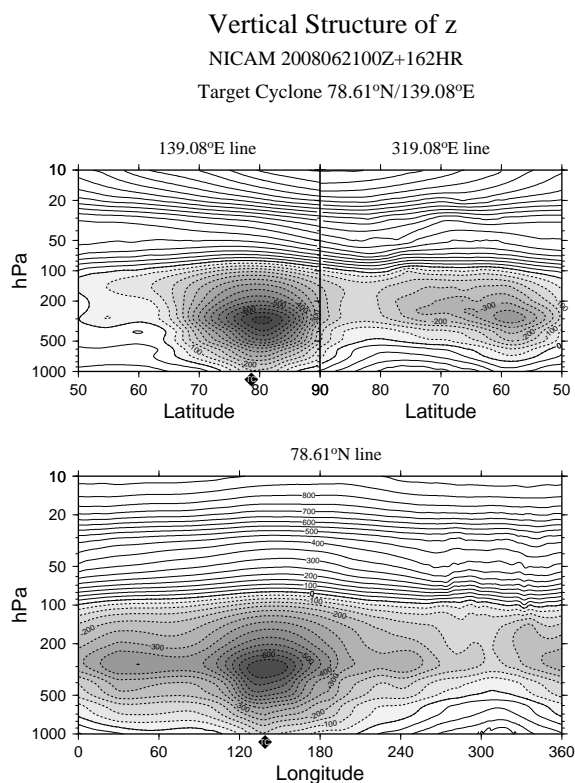
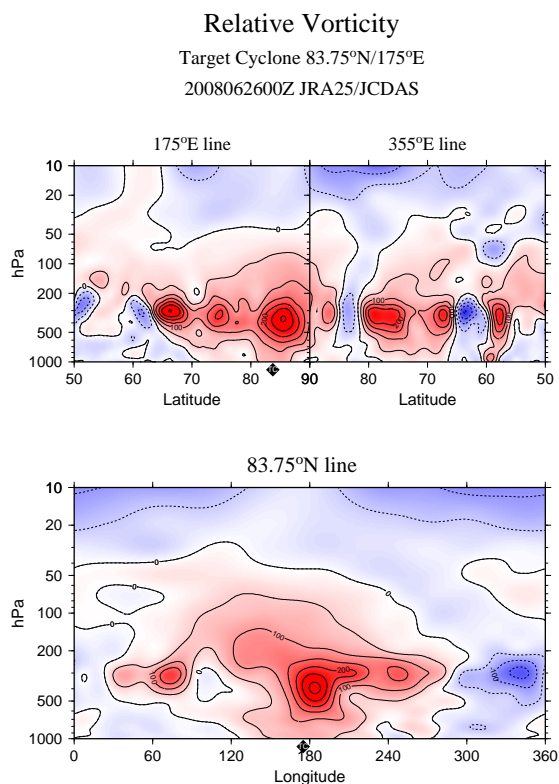
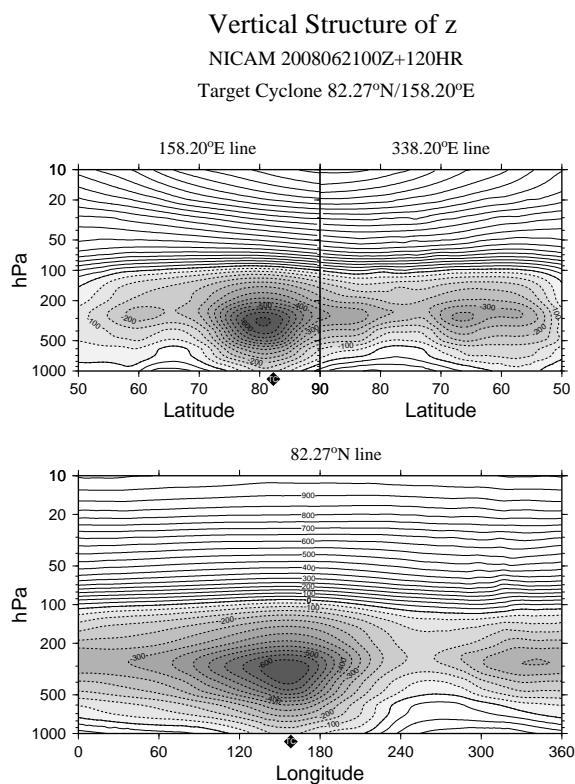
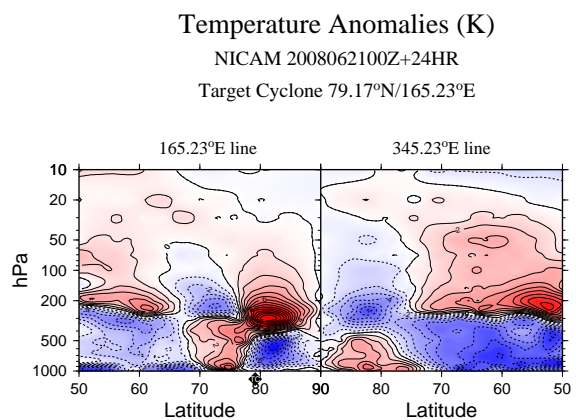
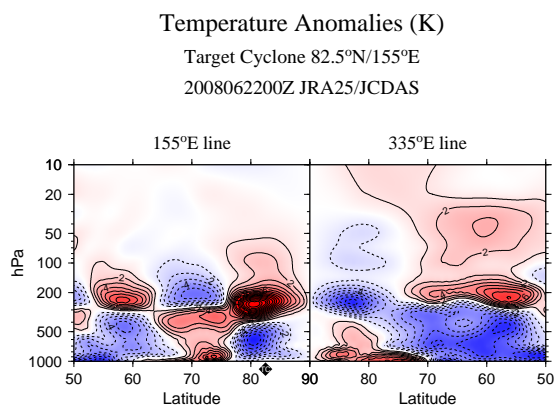


図 77 NICAM の予報値と JCDAS の比較; 2008 年 6 月 21 日 00Z 初期値の 120, 162 時間後の高度偏差場 (NICAM) と相対渦度 (JCDAS) の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). ◆は低気圧の中心を表す.

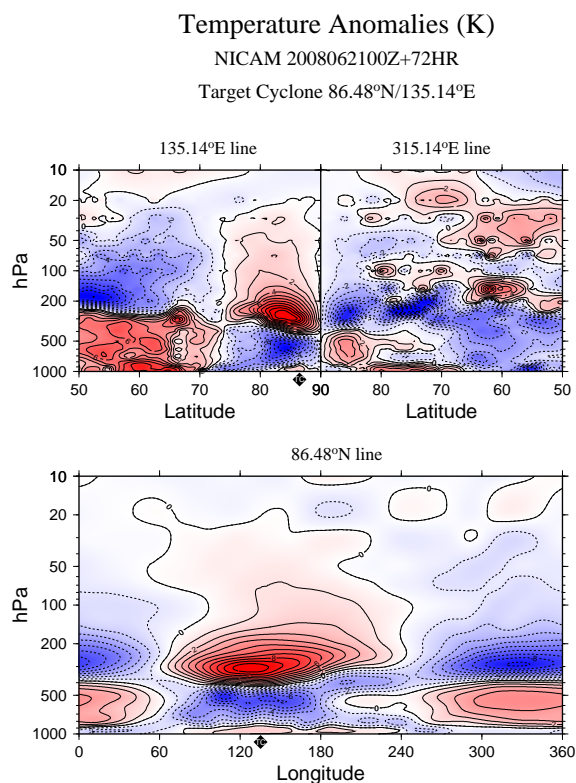




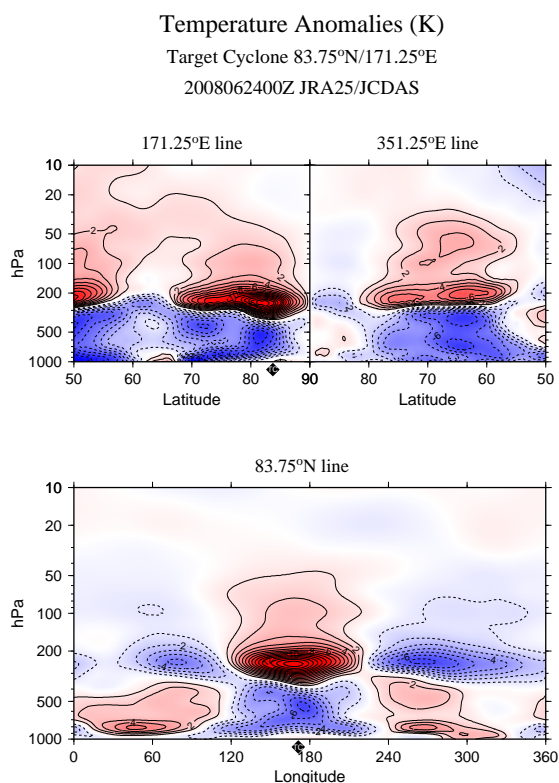
(a) NICAM: 24 hours later



(b) JCDAS: 24 hours later

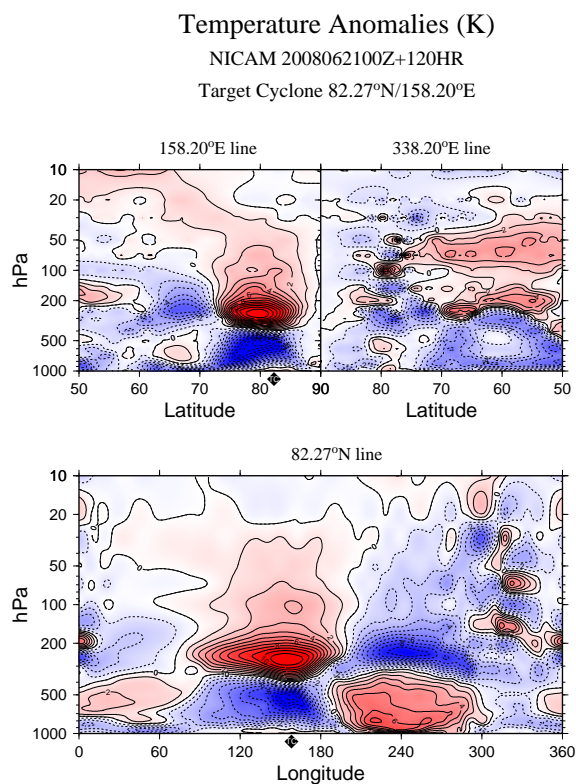


(c) NICAM: 72 hours later

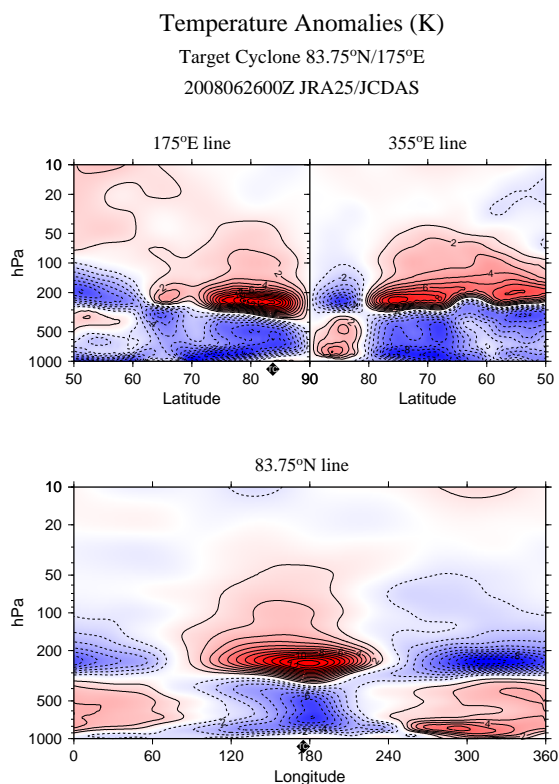


(d) JCDAS: 72 hours later

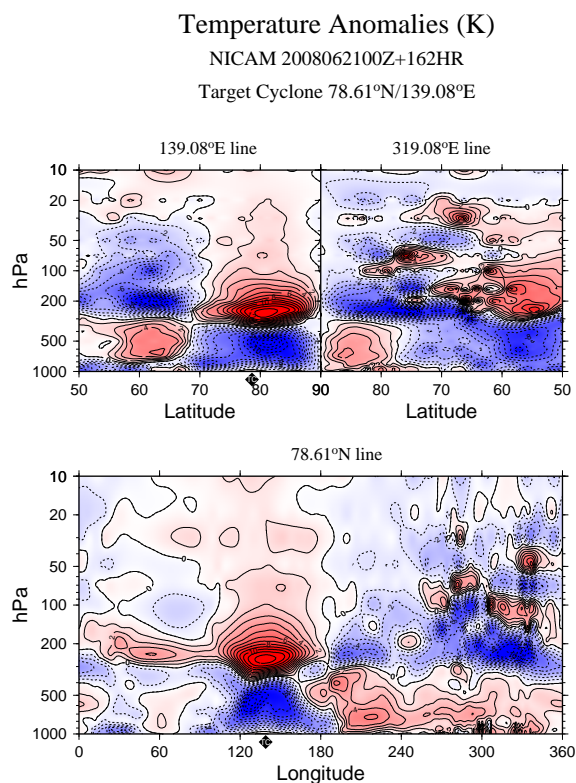
図 78 NICAM の予報値と JCDAS の比較; 2008 年 6 月 21 日 00Z 初期値の 24, 72 時間後の気温偏差 (帯状平均) の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). ◆は低気圧の中心を表す.



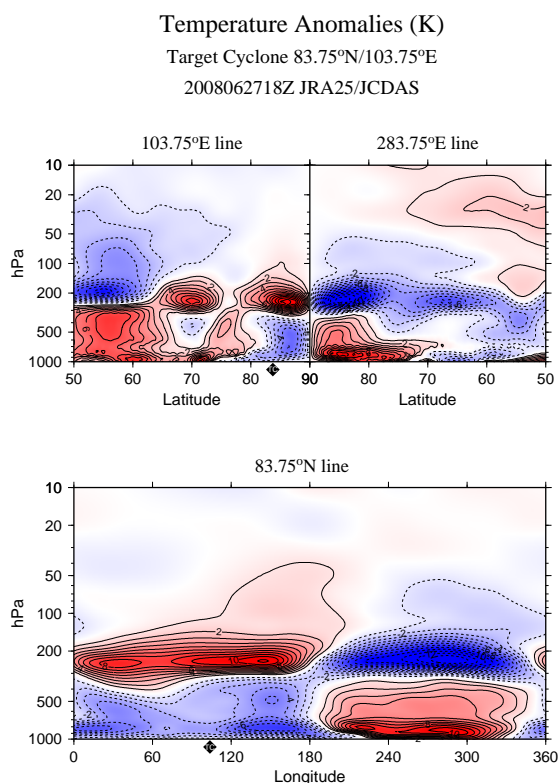
(a) NICAM: 120 hours later



(b) JCDAS: 120 hours later



(c) NICAM: 162 hours later



(d) JCDAS: 162 hours later

図 79 NICAM の予報値と JCDAS の比較; 2008 年 6 月 21 日 00Z 初期値の 120, 162 時間後の気温偏差 (帯状平均) の鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面).  
◆は低気圧の中心を表す.



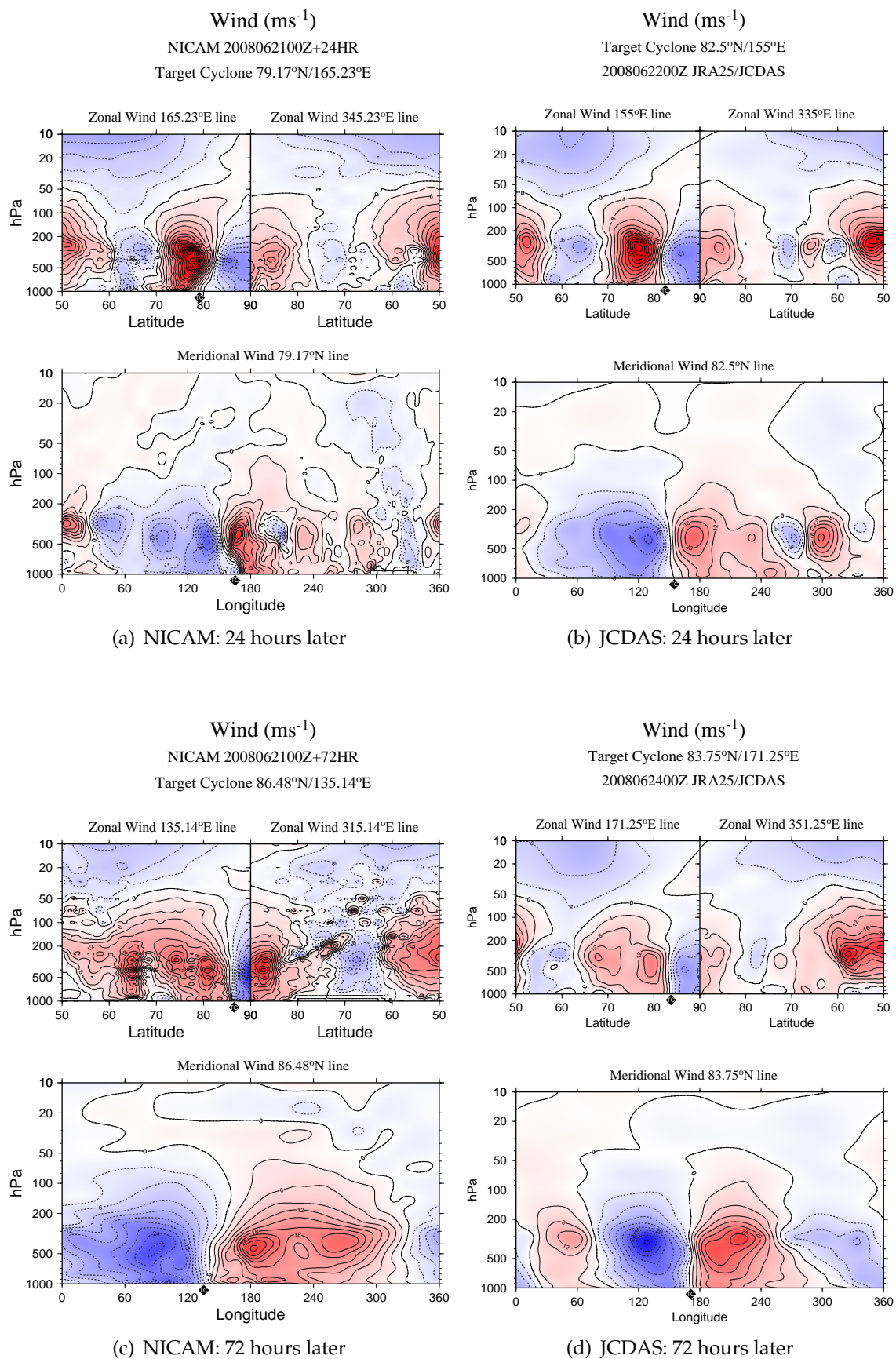


図 80 NICAM の予報値と JCDAS の比較; 2008 年 6 月 21 日 00Z 初期値の 24, 72 時間後の風の鉛直断面図 (上: 東西風, 下: 南北風). 実線は西風/南風, 破線は東風/北風, ◆は低気圧の中心を表す.

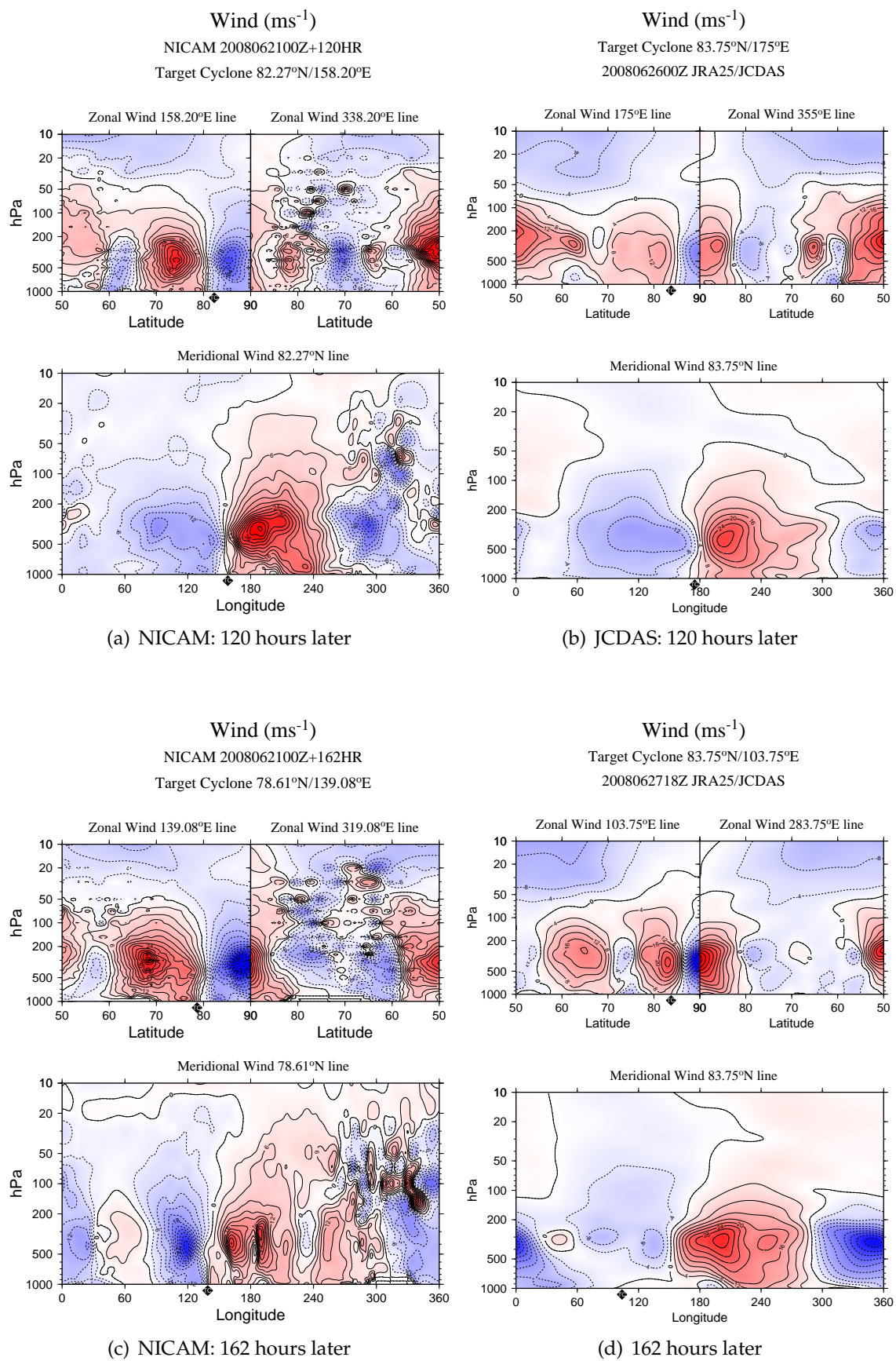
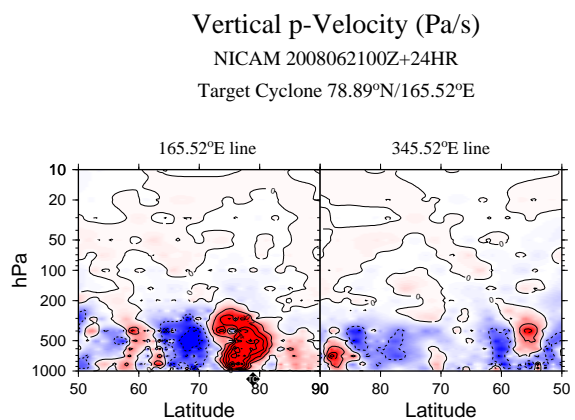
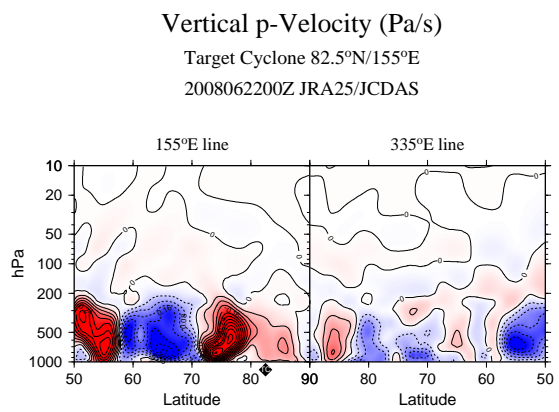


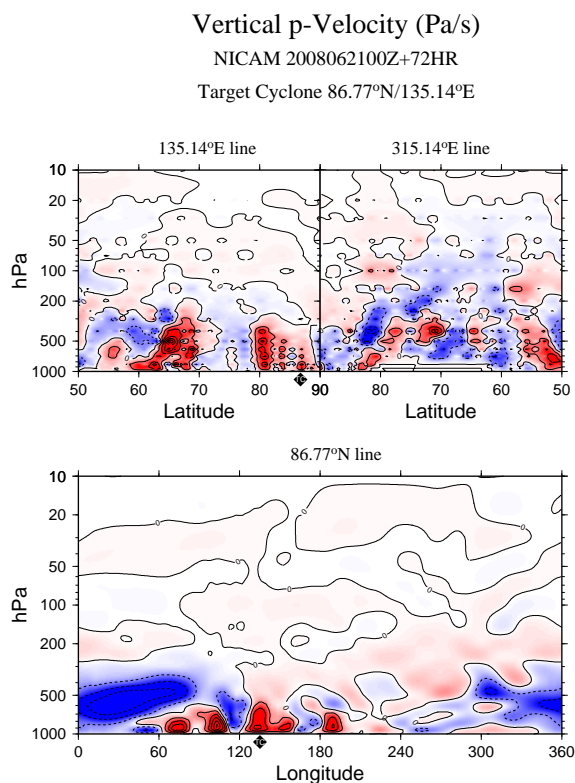
図 81 NICAM の予報値と JCDAS の比較; 2008 年 6 月 21 日 00Z 初期値の 120, 162 時間後の風の鉛直断面図 (上: 東西風, 下: 南北風). 実線は西風/南風, 破線は東風/北風, ◆は低気圧の中心を表す.



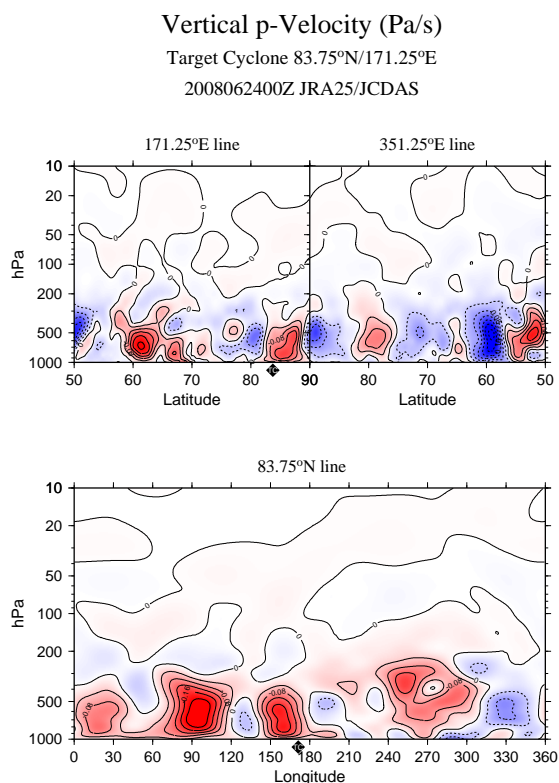
(a) NICAM: 24 hours later



(b) JCDAS: 24 hours later



(c) NICAM: 72 hours later



(d) JCDAS: 72 hours later

図 82 NICAM の予報値と JCDAS の比較; 2008 年 6 月 21 日 00Z 初期値の 24, 72 時間後の鉛直  $p$  速度オメガの鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は上昇気流, 破線は下降気流, ◆は低気圧の中心を表す.



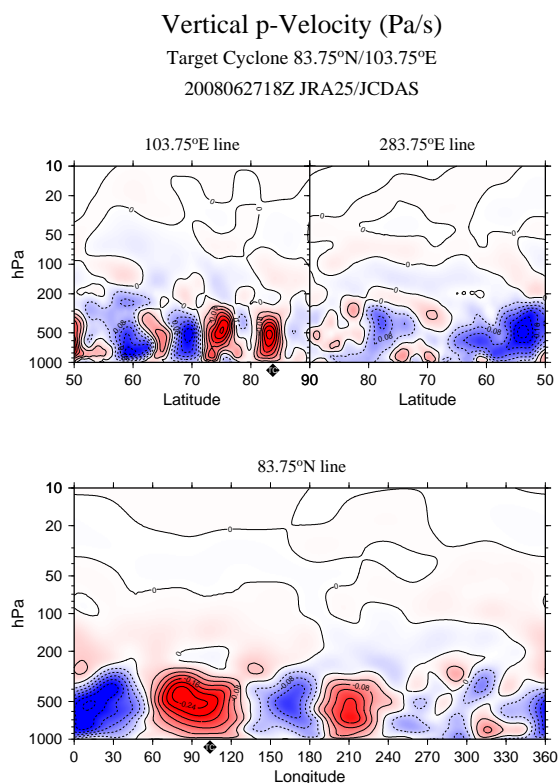
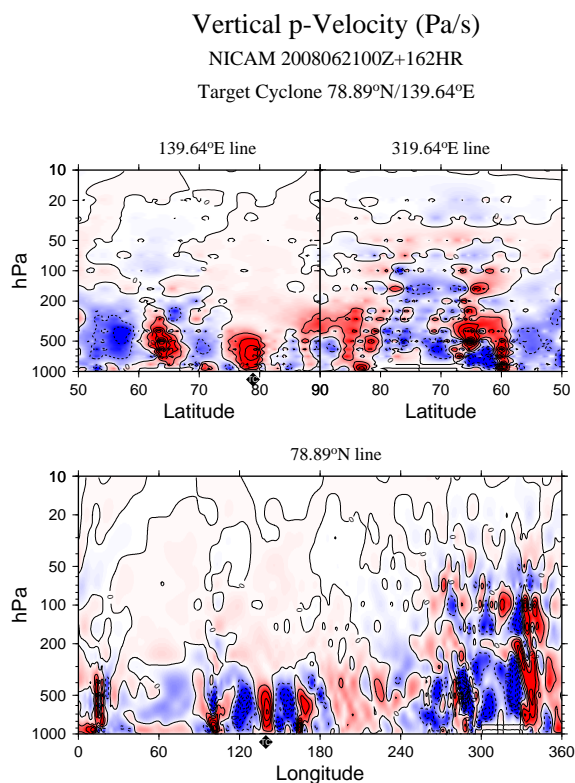
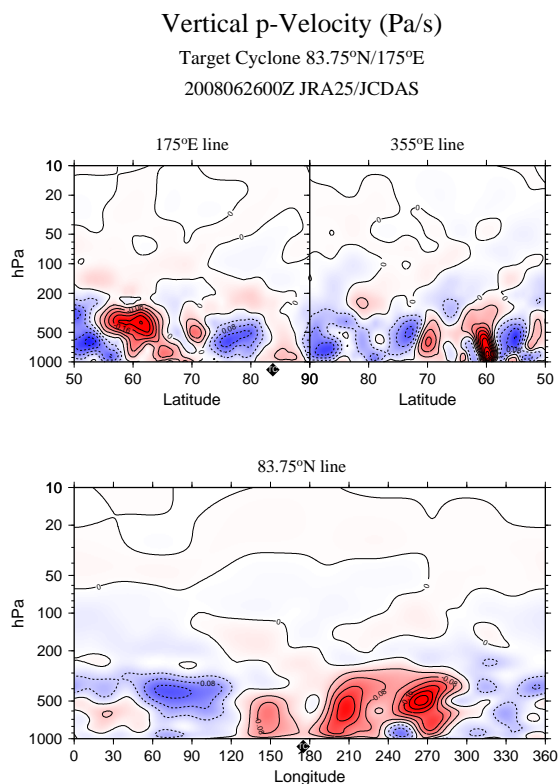
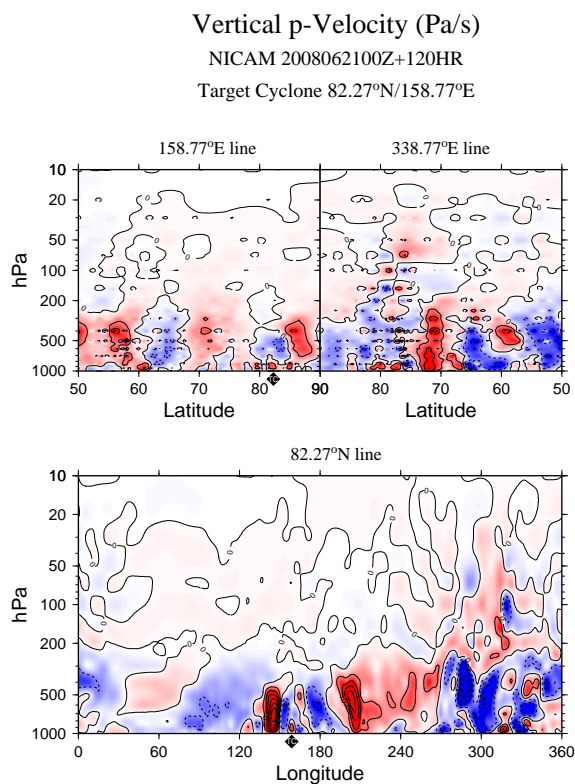


図 83 NICAM の予報値と JCDAS の比較; 2008 年 6 月 21 日 00Z 初期値の 120, 162 時間後の鉛直  $p$  速度オメガの鉛直断面図 (上: 経度に沿った断面, 下: 緯度に沿った断面). 実線は上昇気流, 破線は下降気流, ◆は低気圧の中心を表す.