

2013年度日本気象学会  
春季大会（東京）  
惑星大気研究連絡会

2013年5月17日  
国立オリンピック記念青少年総合センター

# 地球の対流： 主に雲解像モデルを用いたシミュ レーションについて

坪木和久  
（名古屋大学地球水循環研究センター）

名大地球水循環研究センター気象学研究室では大学院生（修士・博士）を大募集しています

# 地球の対流

**水平対流**: 安定成層中に水平の温度差によって発生する対流

(海陸風、ヒートアイランド、山谷風など)

**鉛直対流**: 絶対不安定、対流不安定に発生

(乾燥対流、積雲・積乱雲など)

積乱雲は群をなす。

地球大気の特徴: 湿潤対流と雲の形成

# 対流セルとメソ対流系

## 対流セル

- ◆ 単一セル
- ◆ マルチセル
- ◆ スーパーセル

## メソ対流系

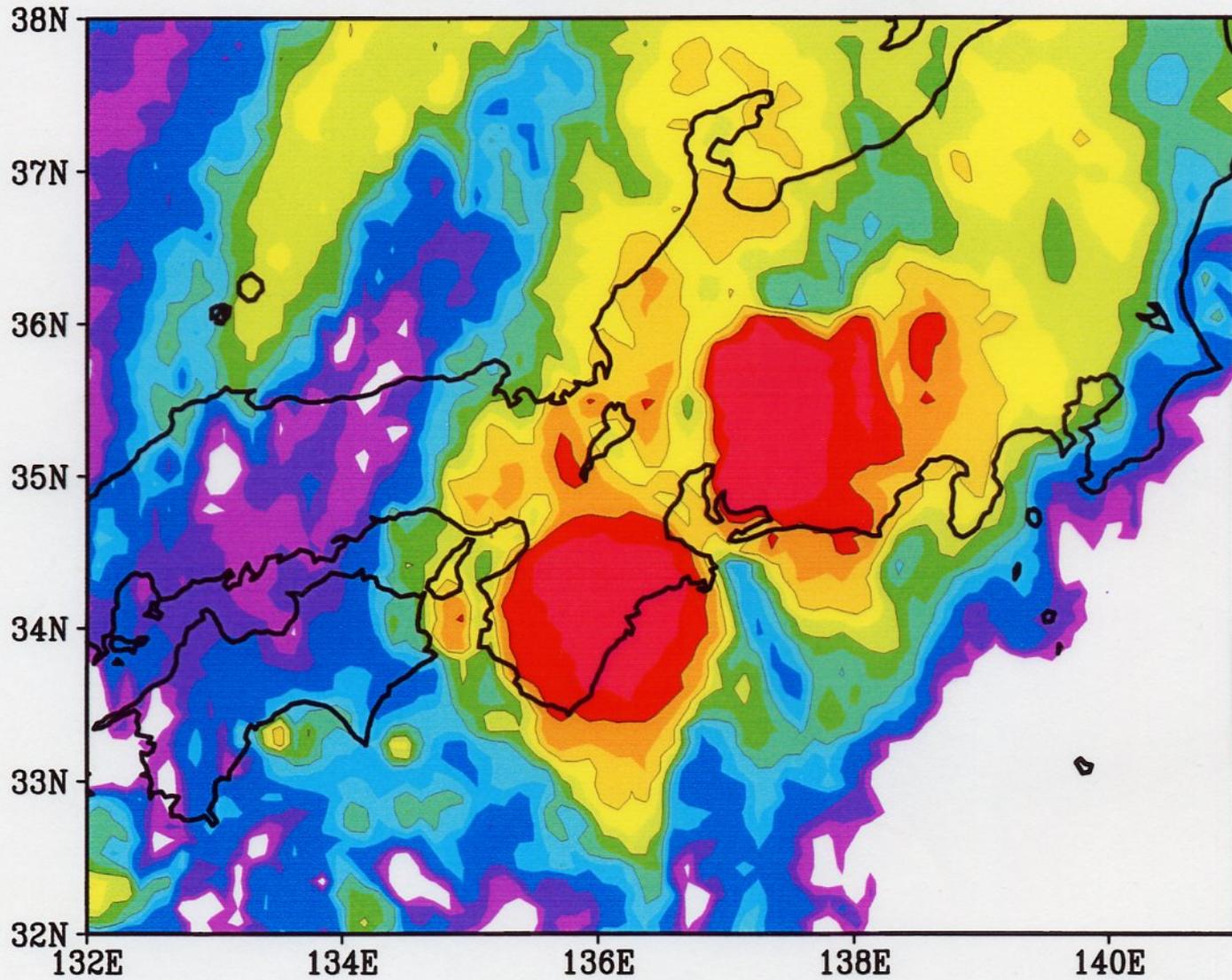
- ◆ 団塊状：
  - ◆ 組織化されていないマルチセル
  - ◆ 組織化されたマルチセル
  - ◆ スーパーセル型
  - ◆ メソ対流複合体(MCC)
- ◆ 線状：
  - ◆ スコールライン型
  - ◆ 非スコールライン型

# 積乱雲

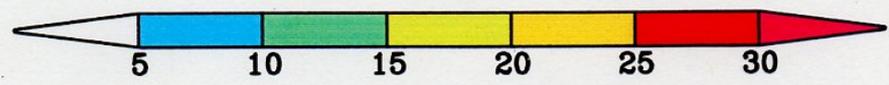
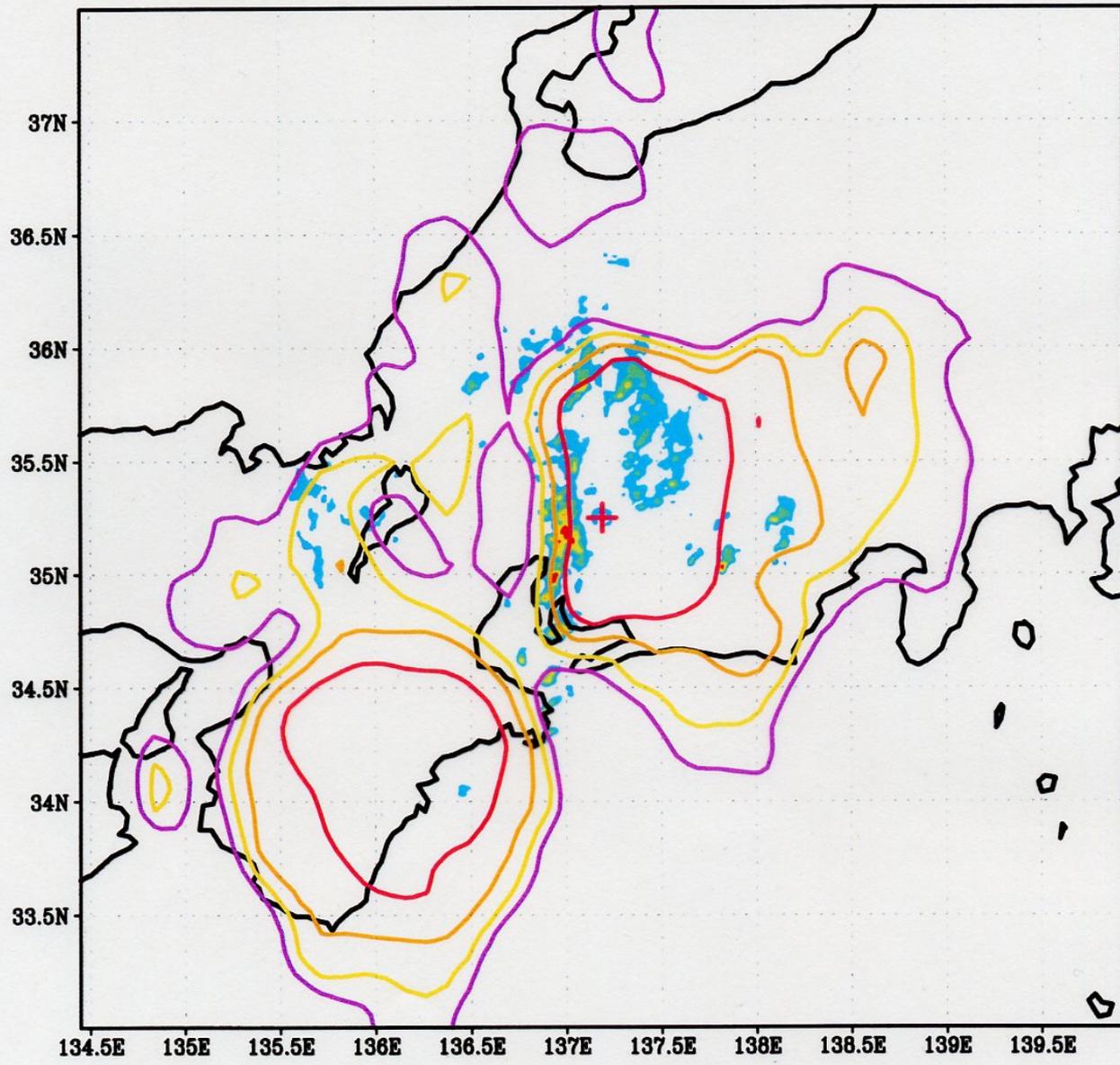




GMS 09:30Z11SEP2000



18:30Z11SEP2000





In Palau, Photo by K. Tsuboki

# CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator)

## 非静力学・雲解像シミュレーションモデル

台風、竜巻、豪雨、豪雪、スーパーセル、積乱雲などのシミュレーション

開発者：坪木和久・榊原篤志

1998年：開発開始

2002年：Ver.1(振興調整費：住教授)

2007年：Ver. 2 (HyARC共同研究)

2011年：Ver. 3(革新プログラム：坪木)

国内外の対抗するモデル

MRI-NHM(気象庁)

WRF(NCAR)

ARPS(U. of Oklahoma)

## Supertyphoons in store as seas warm

KYODO

A supertyphoon stronger than the deadly Hurricane Katrina that devastated the southern United States in 2005 could hit Japan in the latter half of this century if global warming continues, according to a study by a Japanese research team made available Monday.

Typhoons packing winds of at least 241.2 kph are often called supertyphoons, but the one feared by the researchers could blow as strong as 288 kph on the ground, the team from Nagoya University and the Meteorological Research Institute said.

Several supertyphoons may also develop between 2074 and 2087 due to a projected 2-degree rise in sea temperatures in the Western Pacific south of Japan, the study showed, based on a scenario drawn up by the Intergovernmental Panel on Climate Change in which average global temperatures will rise about 3 degrees from preindustrial levels by the end of the century.

“Given that global warming is under way, it is little wonder that typhoons develop in an extreme way,” Nagoya University associate professor Kazuhisa Tsuboki said. “The point is

how we will forecast them and take disaster control measures.”

Using the Earth Simulator supercomputer, the team predicted in detail the occurrence and development of typhoons around Japan during the 2074-2087 period.

A rise in sea temperatures generally makes typhoons more powerful because they develop by taking energy from warm seas. Such typhoons would also bring heavy rain because warmer temperatures will increase water vapor in the air.

If global warming is arrested, supertyphoons are less likely, the team said.

One of the expected supertyphoons could have a minimum atmospheric pressure of 866 hectopascals at its center and maximum winds of 288 kph on the ground, which is stronger than Katrina at 902 hectopascals or the devastating typhoons that have struck Japan.

It could have a short, steep decline in central pressure and rapid development, according to the team.

Another predicted typhoon could bring more than 1 meter of rainfall in the Tohoku region, according to the simulation.

国内利用機関・組織：京大防災研、東大、東北大、山梨大、岩手大、福島大、会津大、京都産業大、愛媛大、長崎大、酪農学園大、JAMSTEC、防災科研、土木研、国土地理院、東京海上日動、明星電気、東芝、中電CTI他。

### 国外利用国

カナダ、台湾、韓国、中国、バングラデシュ、ベトナム他。

### 主要プロジェクト・プログラム

21世紀気候変動予測革新プログラム(文部科学省)

国土交通省XバンドMPLレーダプロジェクト(国土交通省)

気候変動リスク情報創生プログラム(文部科学省)、他

主要論文 (CReSSを用いた査読付論文 21編)

Tsuboki, K and A. Sakakibara, 2002: *High Performance Computing*

Iwabuchi, H. and K. Tsuboki, 2004: *Journal of Visualizations* (SGI賞)

Akter, N. and K. Tsuboki 2012: *Monthly Weather Review*

**The Japan Time (2009.9.8)**

**革新プログラムの成果の記事**

# 気象の数値モデルの種類

## 目的による分類

- 全球モデル(GCM, global model)
- 気候モデル
- 領域モデル(メソスケールモデル)
- 領域気候モデル
- 雲解像(領域)モデル

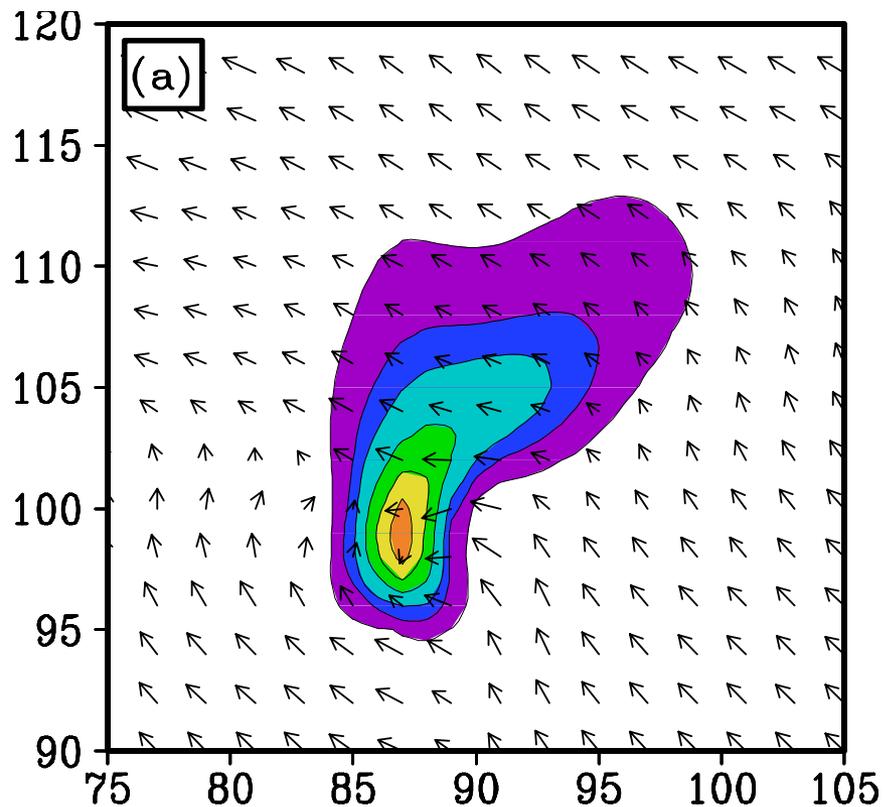
## 方程式の近似による分類

- 鉛直方向の運動方程式の近似
  - 静力学モデル
  - 非静力学モデル
- 連続の式の近似
  - ブシネスクモデル
  - 非弾性系モデル
  - 弾性系モデル

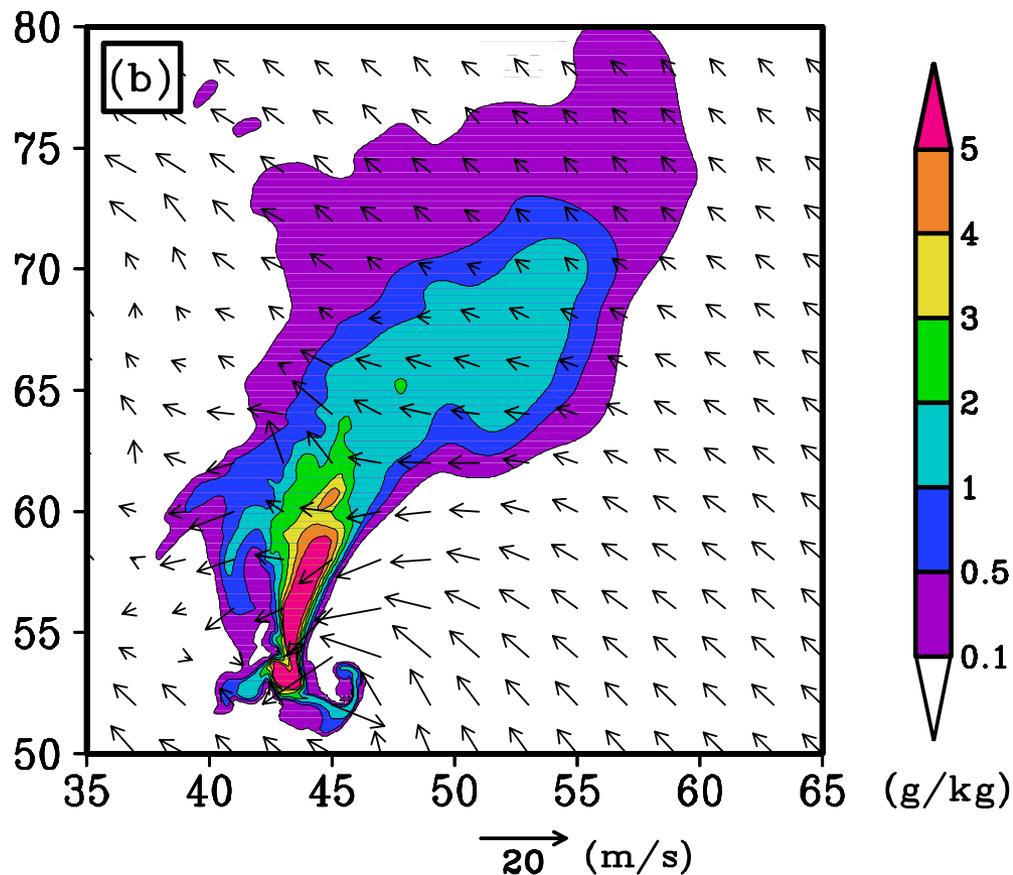


# 解像度の違いによるシミュレーション結果の違い

## 1km解像度のシミュレーション



## 100m解像度のシミュレーション

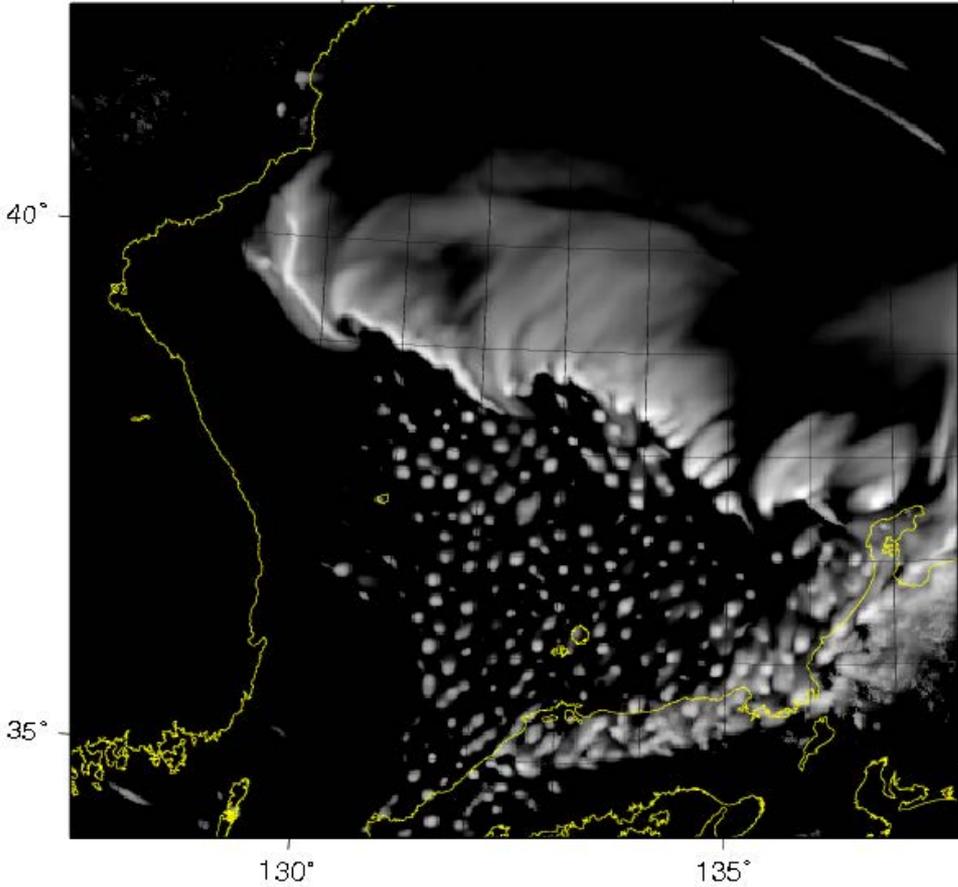


共立出版:「計算科学講座第10巻」

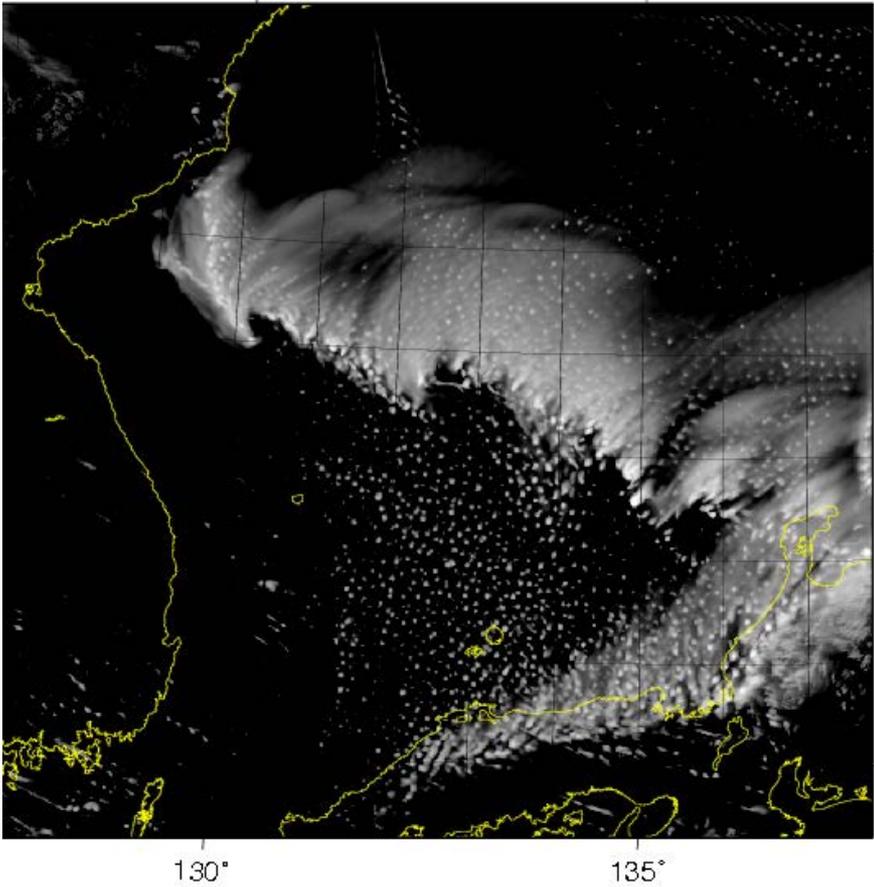
第3章「気象のシミュレーション」(坪木, 2010)より引用

# 日本海寒帯気団収束帯(JPCZ)の帯状雲と渦列

13:30 JST 29 JAN 2011



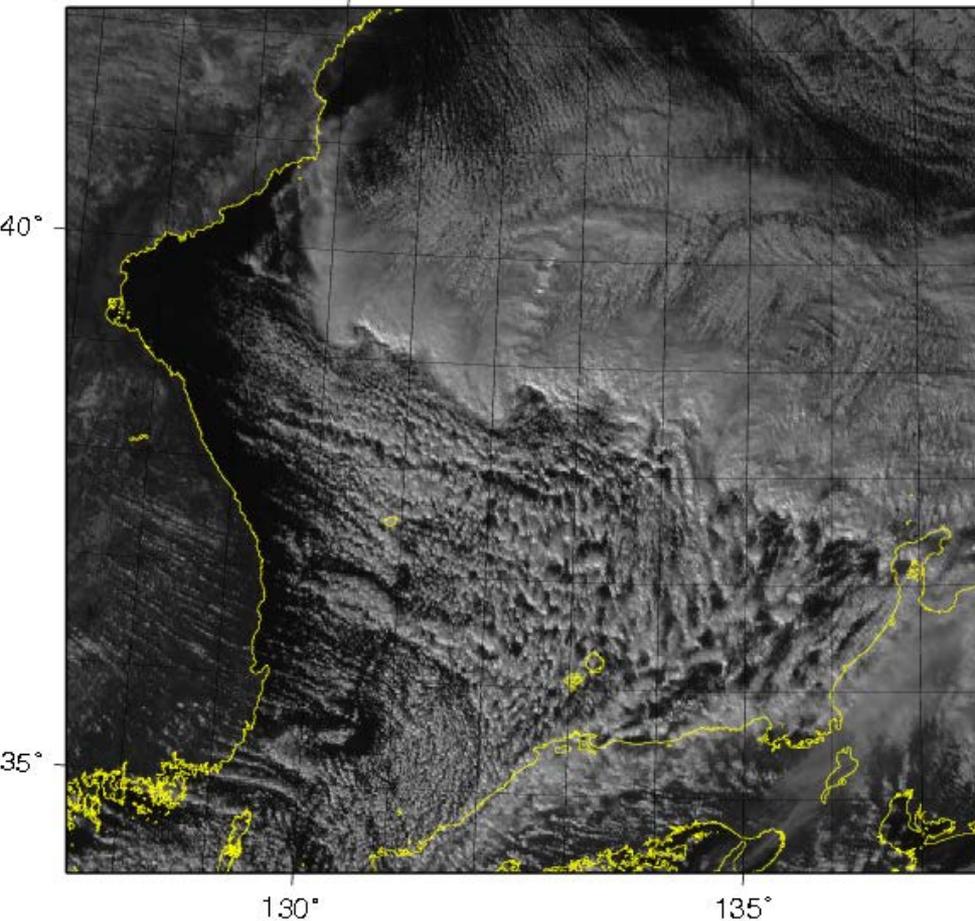
$\Delta x = 2\text{km}$



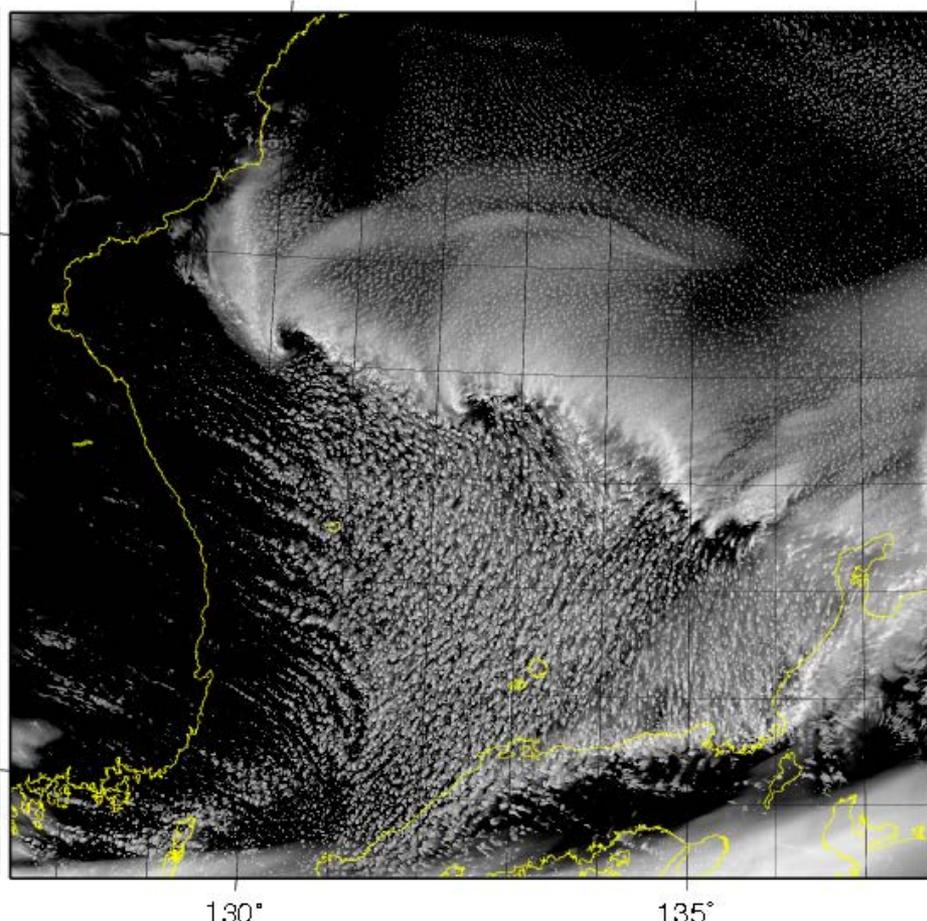
$\Delta x = 1\text{km}$

# 日本海寒帯気団収束帯(JPCZ)の帯状雲と渦列

13:30 JST 29 JAN 2011



**Satellite observation**



**CReSS ( $\Delta x=500m$ )**

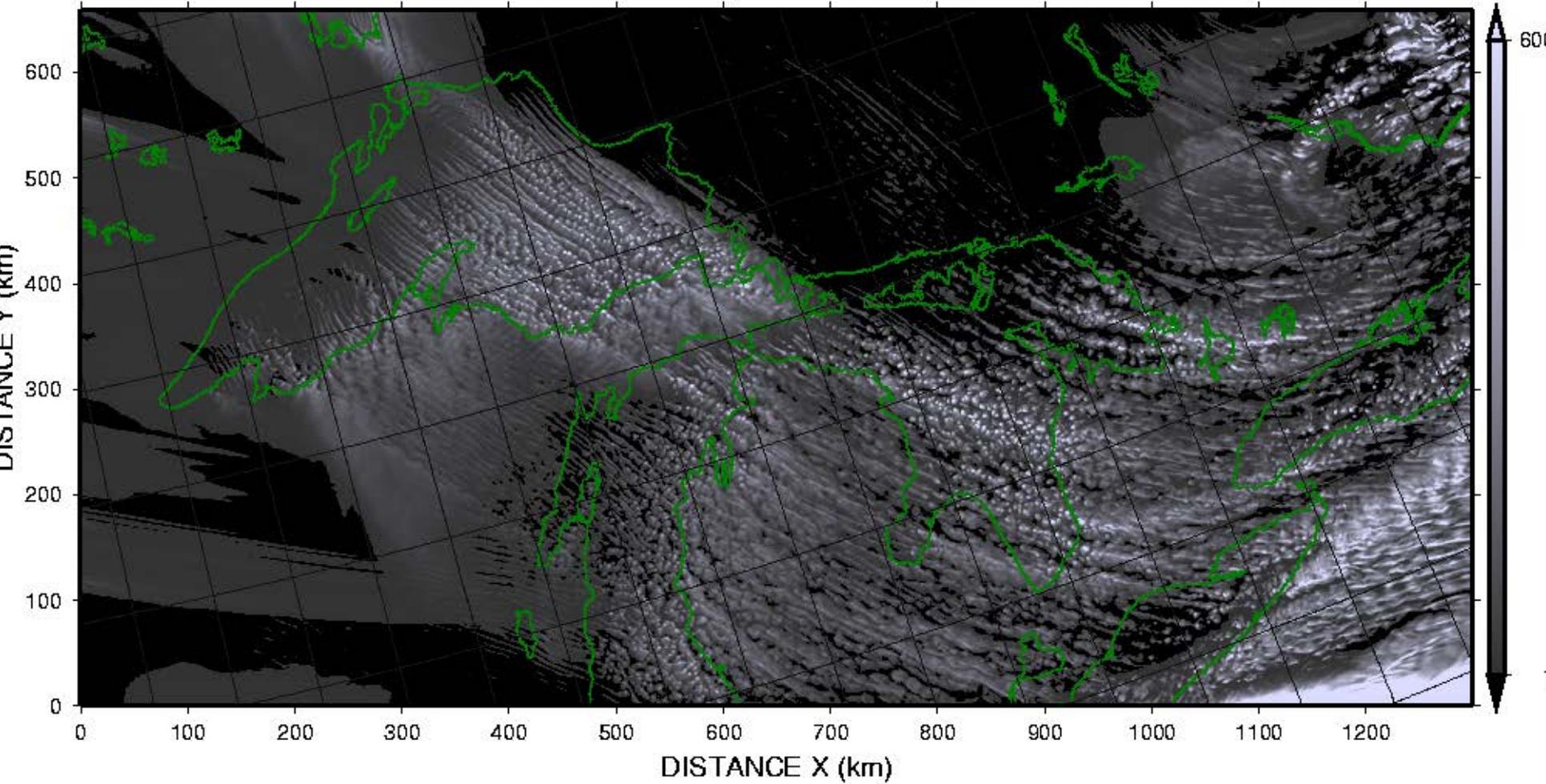
Grid Numbers 1883x1803x47

Grid Size  $\Delta x=500m$

$\Delta z=300m(80m)$

# Snow storm over the Great Lakes in North America

VERTICALLY INTEGRATED HYDROMETEOR ( $\text{g m}^{-2}$ ),  $t = .00$  hours



**grid size:  $\Delta x = 500\text{m}$**

# 寒気流中の筋状雲の数値実験

- ▶ 冬季の高緯度では、寒気流が海上に流れ出したとき、しばしば筋状雲が形成される。
- ▶ これはシア一流中のロール状対流と理解されている一方で、下流にあたる日本海沿岸ではセル状対流で構成されていることが観測されている。
- ▶ 大気下面から加熱されて徐々に対流が発達するとき、基本場であるシアーそのものも変化する。その中でどのような対流雲が形成されるのか。
- ▶ このような筋状雲がどのように形成されるのか、上流から下流にかけて雲はどのように変質するのか、またその中でどのように降水が形成されるのかを数値実験により調べる。

# Dry model experiments

# Free convections in unstable stratified shear flows

**Domain: 3-dim 1103 × 259 × 63**

**H: 500m, 500m, V: 200m**

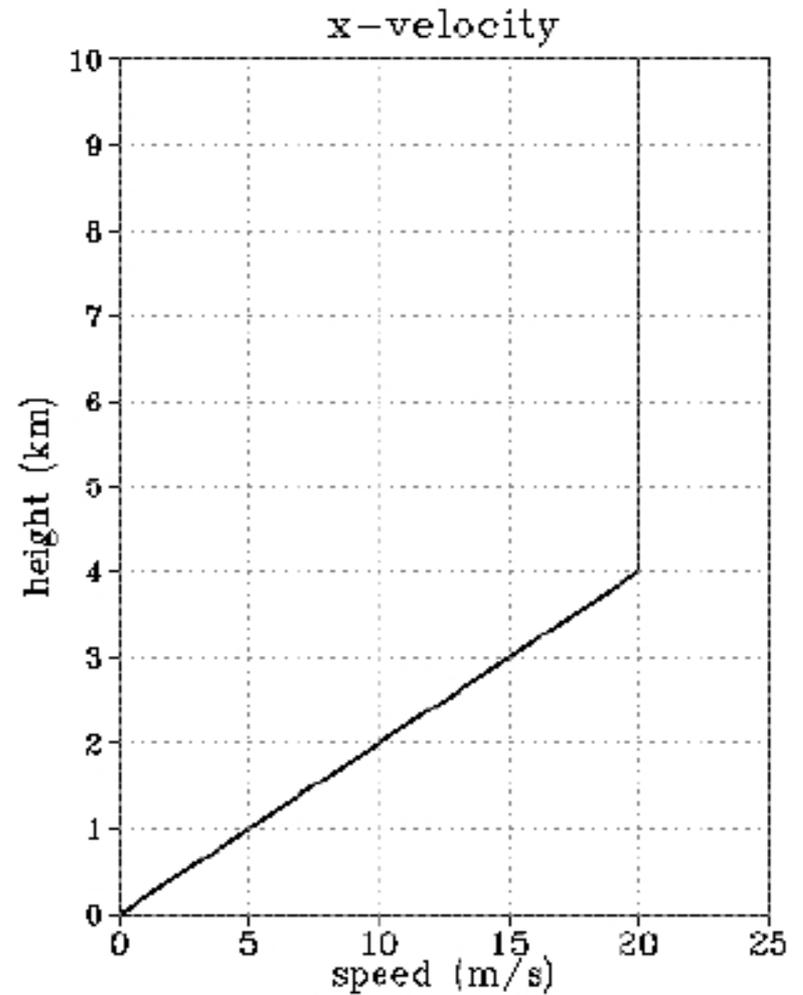
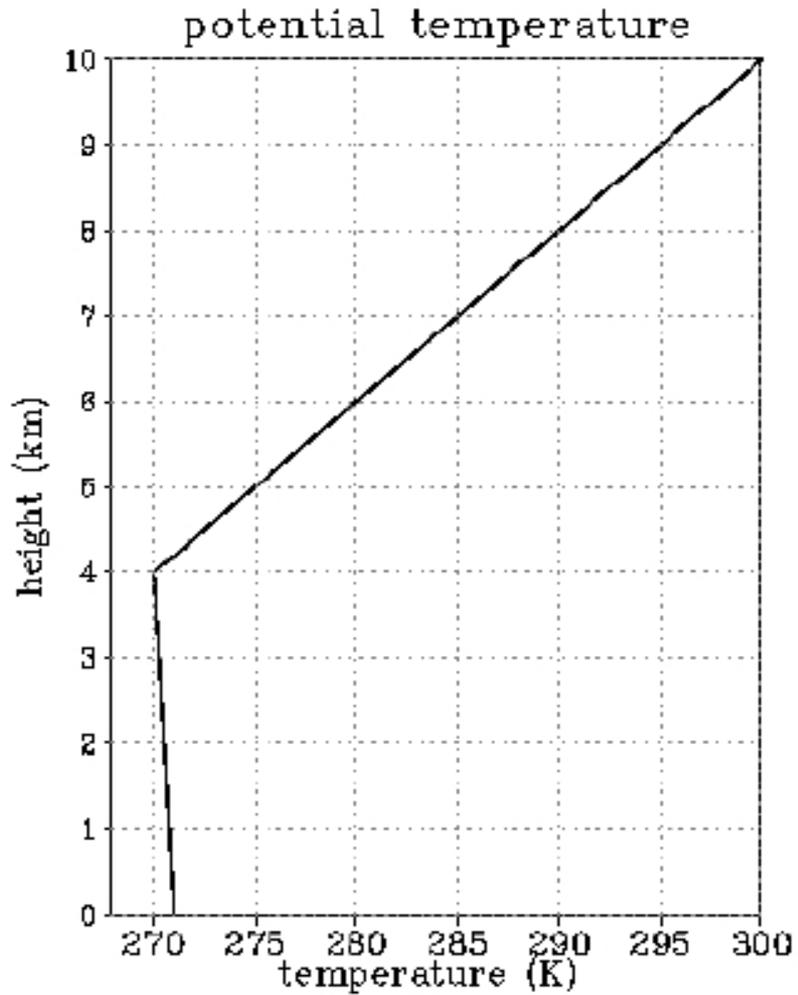
**Initial condition: unstably stratified horizontally uniform**

**Vertical shear: uni-directional linear shear and constant speed with turning direction**

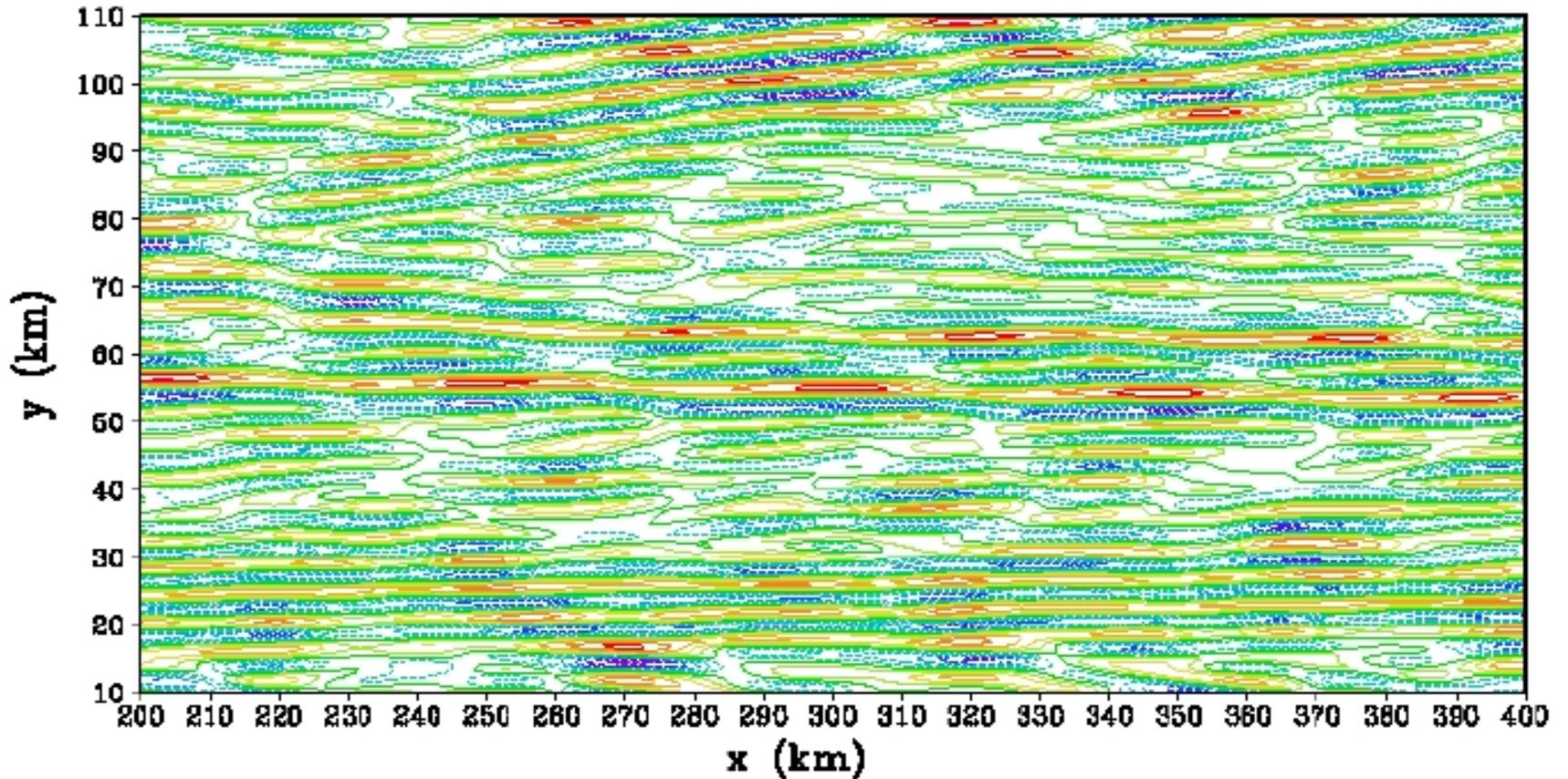
**Surface process: not included**

**Moist process: not included**

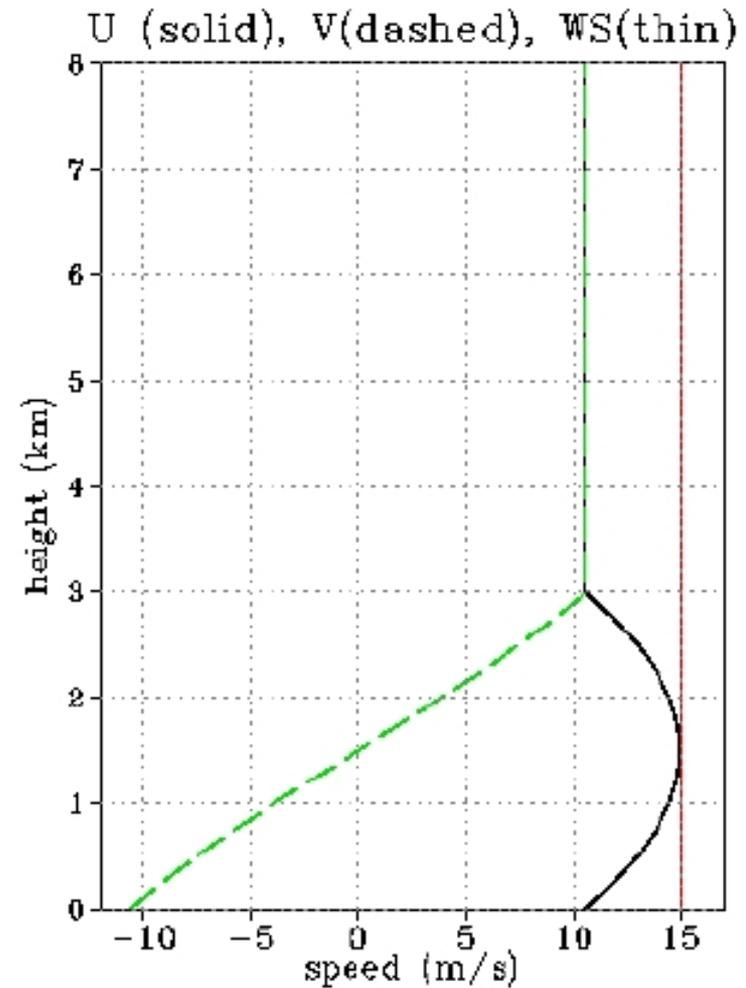
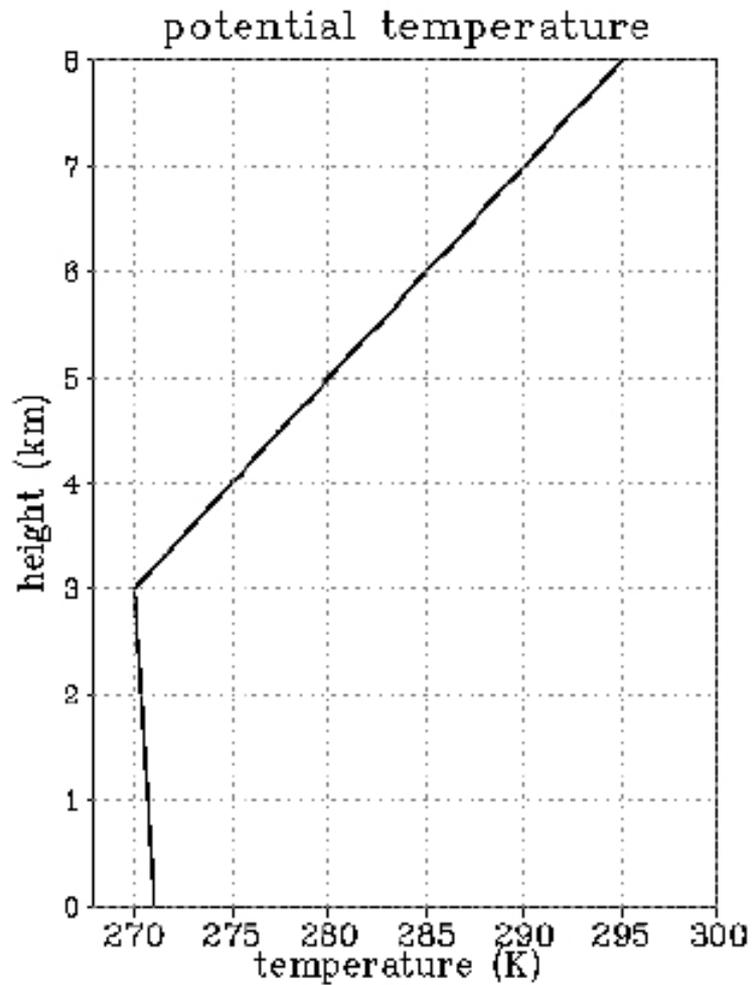
# Profiles of basic field



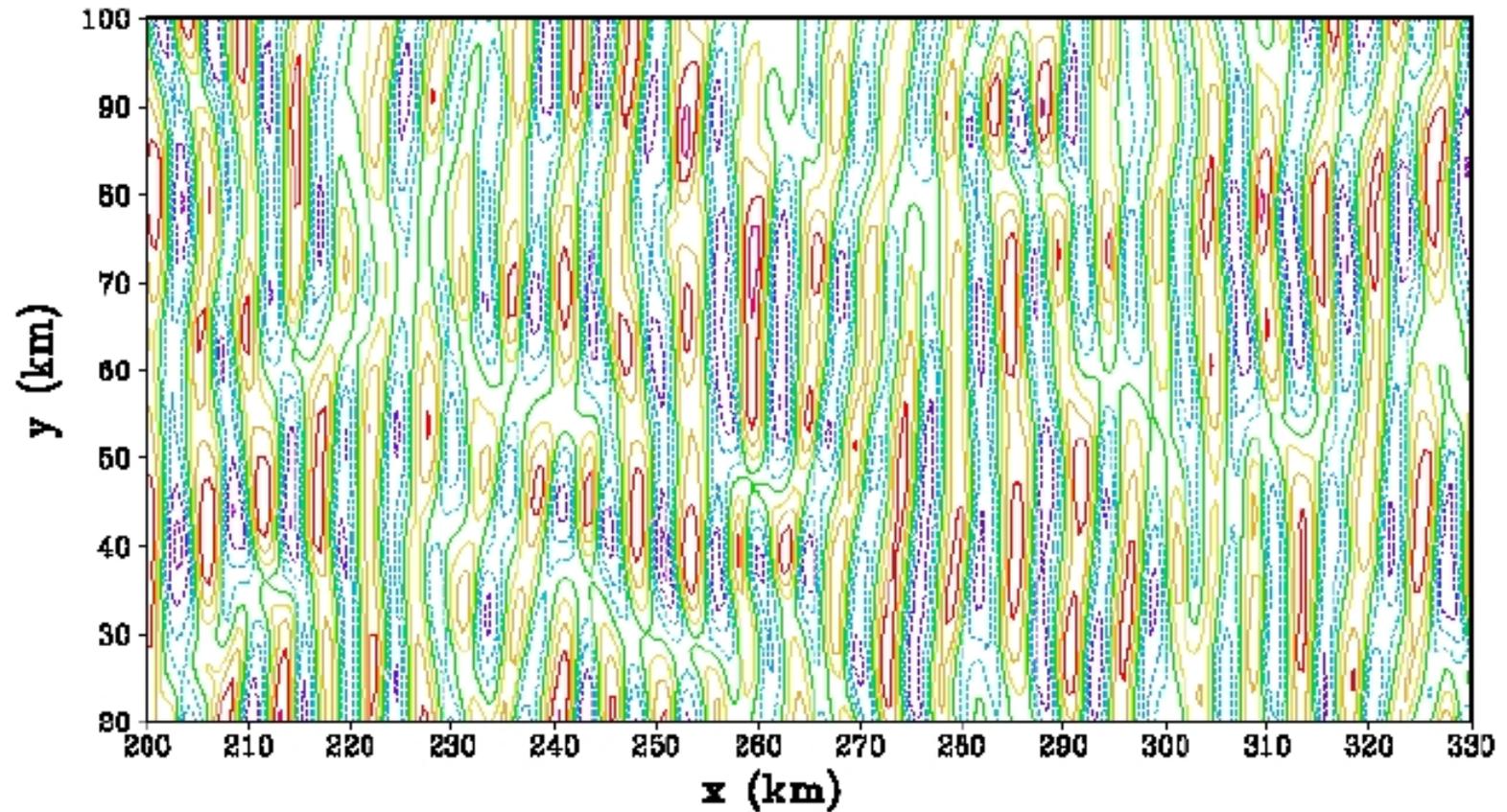
# Vertical velocity at a height of 1.5 km



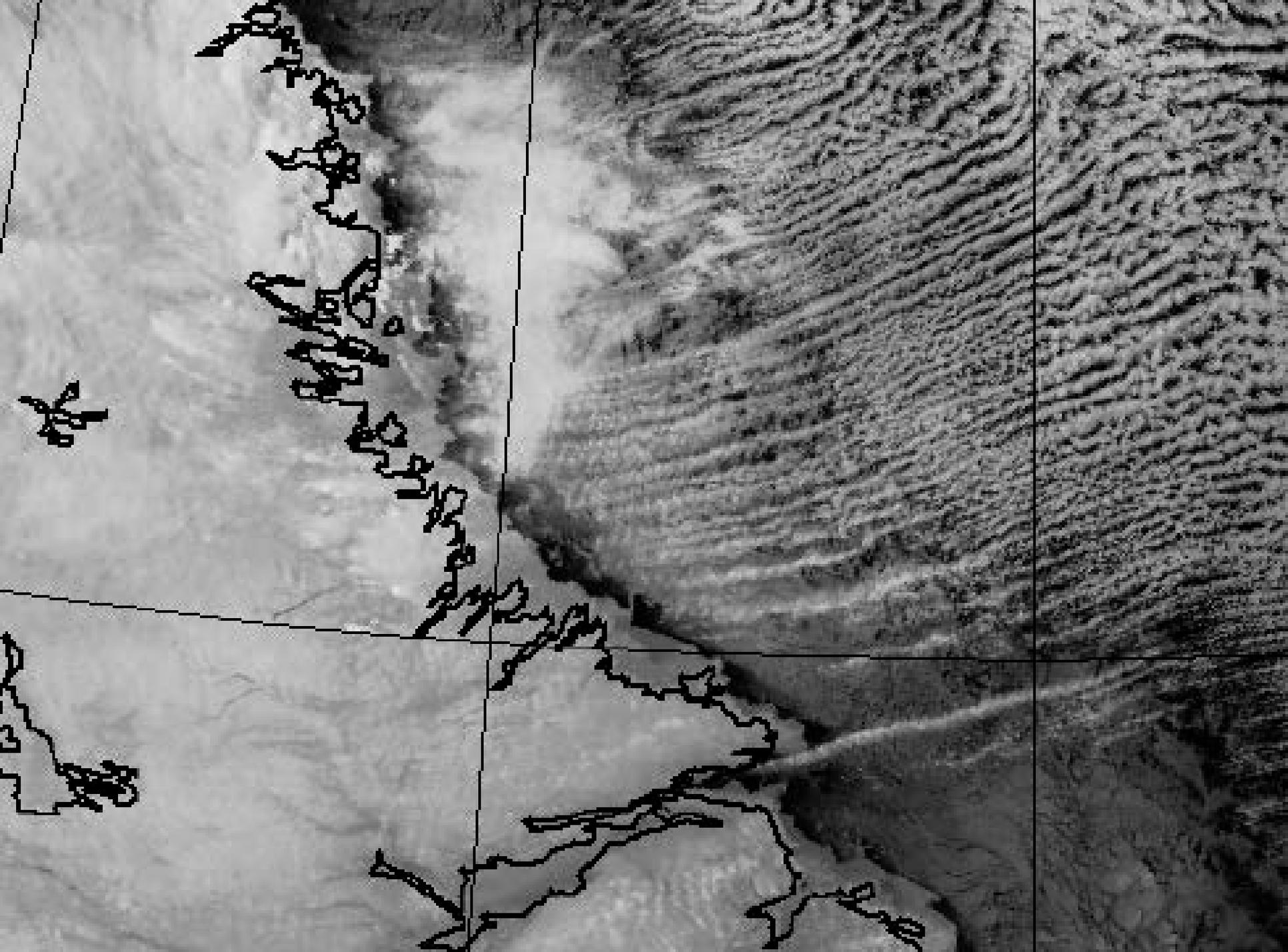
# Profiles of basic field



## Vertical velocity at a height of 1.5 km



# Simulation of snow cloud bands

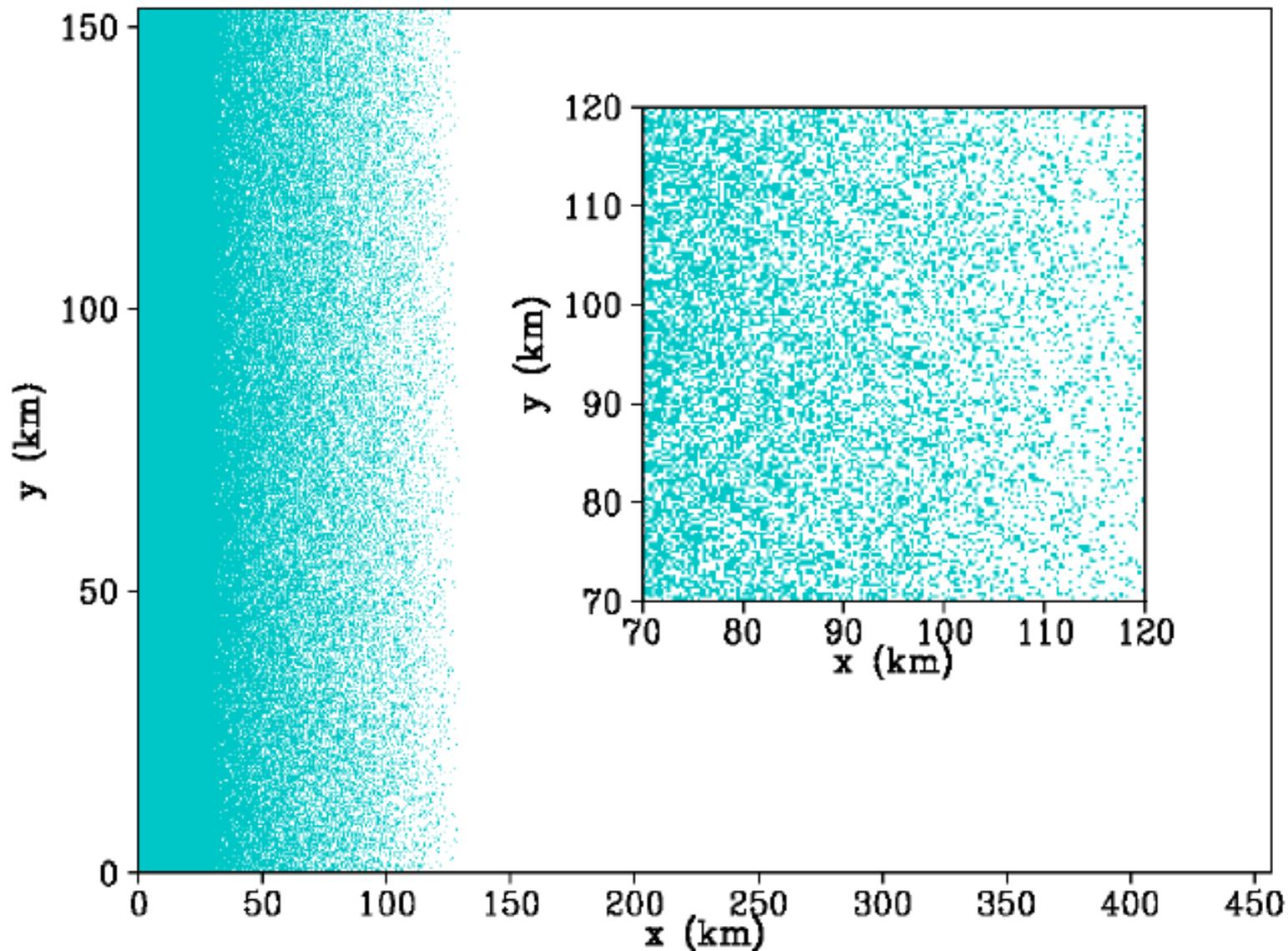


# 寒気流中の筋状雲の数値実験の設定

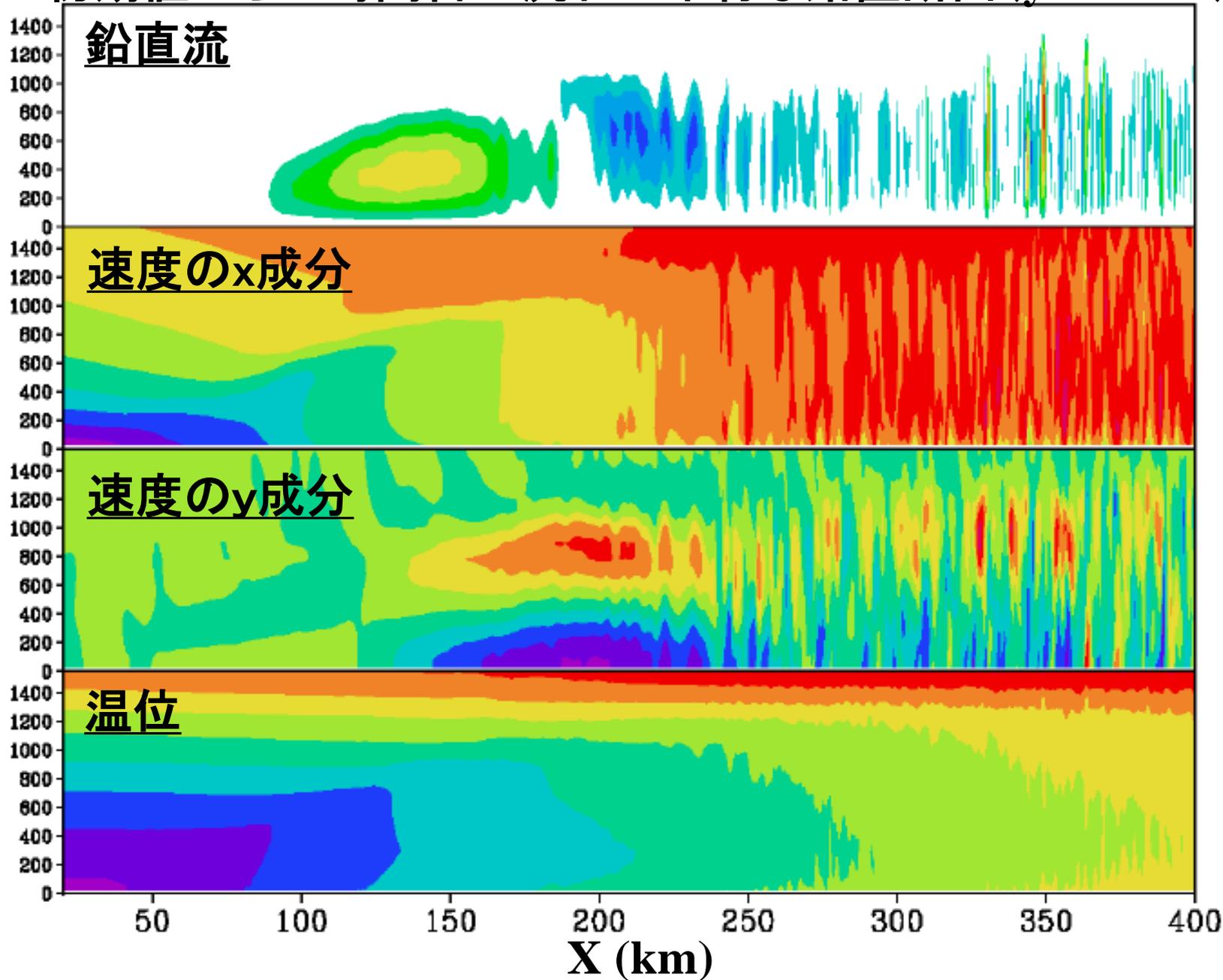
- ▶ 計算領域 水平: 457km × 153km × 鉛直: 11km
- ▶ 水平格子サイズ 300 m
- ▶ 鉛直格子サイズ 50 ~ 150m
- ▶ 格子数 水平: 1527 × 515 × 鉛直: 73
- ▶ 積分時間 20 時間
- ▶ 時間間隔 large: 1sec, small: 0.25sec
- ▶ 雲・降水の物理 冷たい雨のバルク法
- ▶ 初期条件 カナダ東岸の高層観測、初期擾乱なし
- ▶ 境界条件 放射境界条件
- ▶ 地表面条件 海氷を存在確率で格子点に配置
- ▶ 計算ノード数 32ノード (256 CPU)

# 数値実験で下面境界条件として用いた海氷の分布(全体と拡大図)

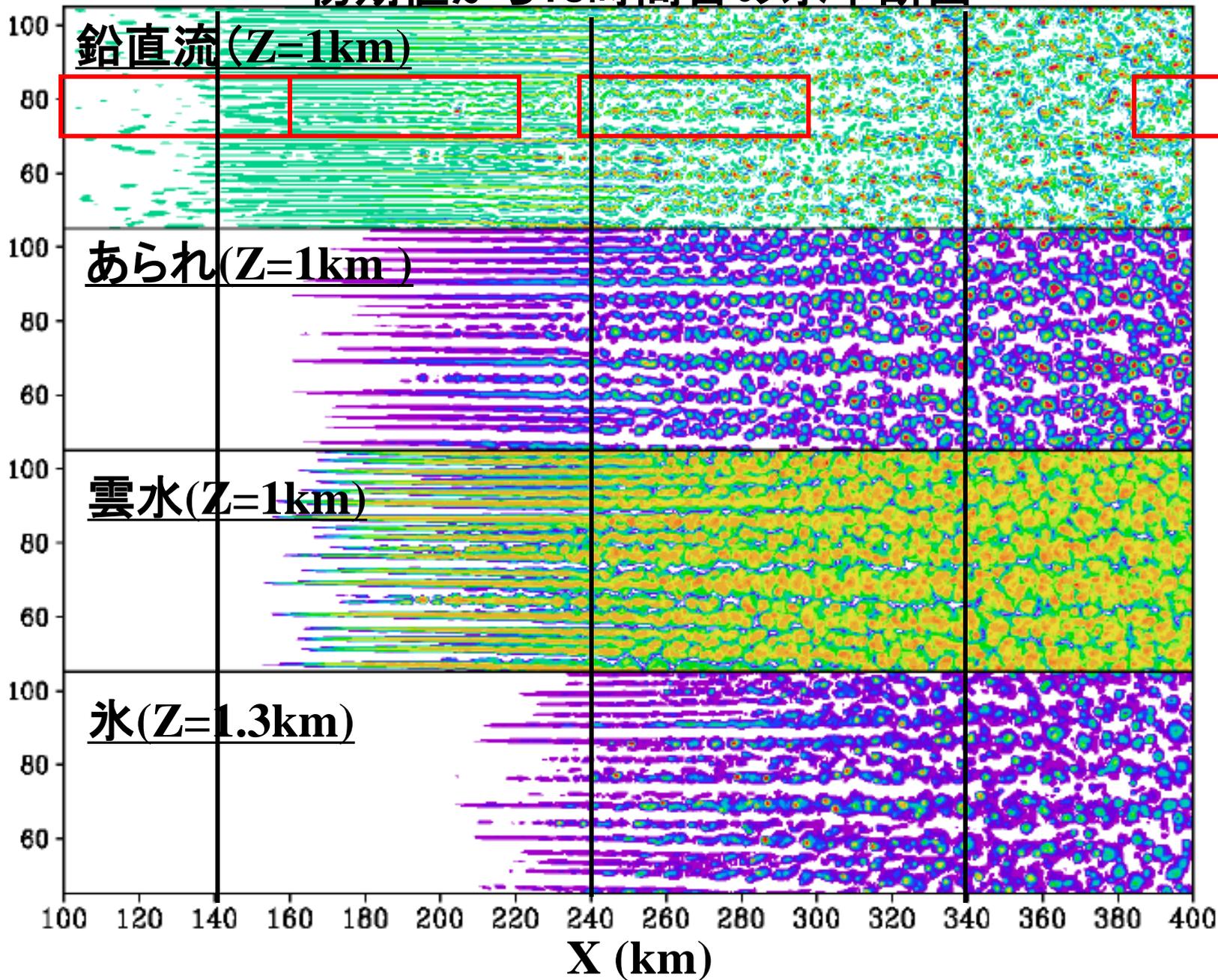
sea ice distribution



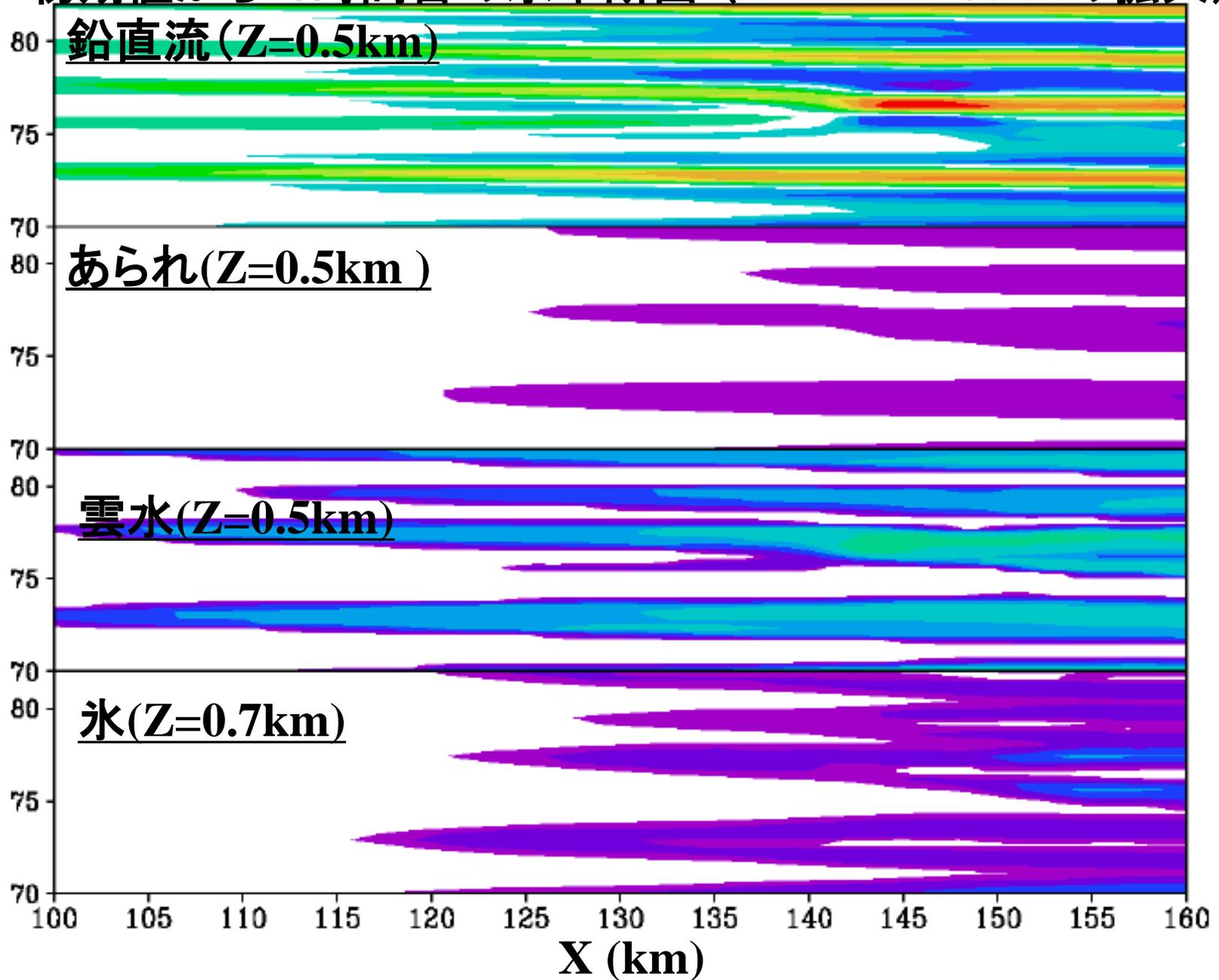
# 初期値から18時間目の流れに平行な鉛直断面 ( $y=73\text{km}$ )



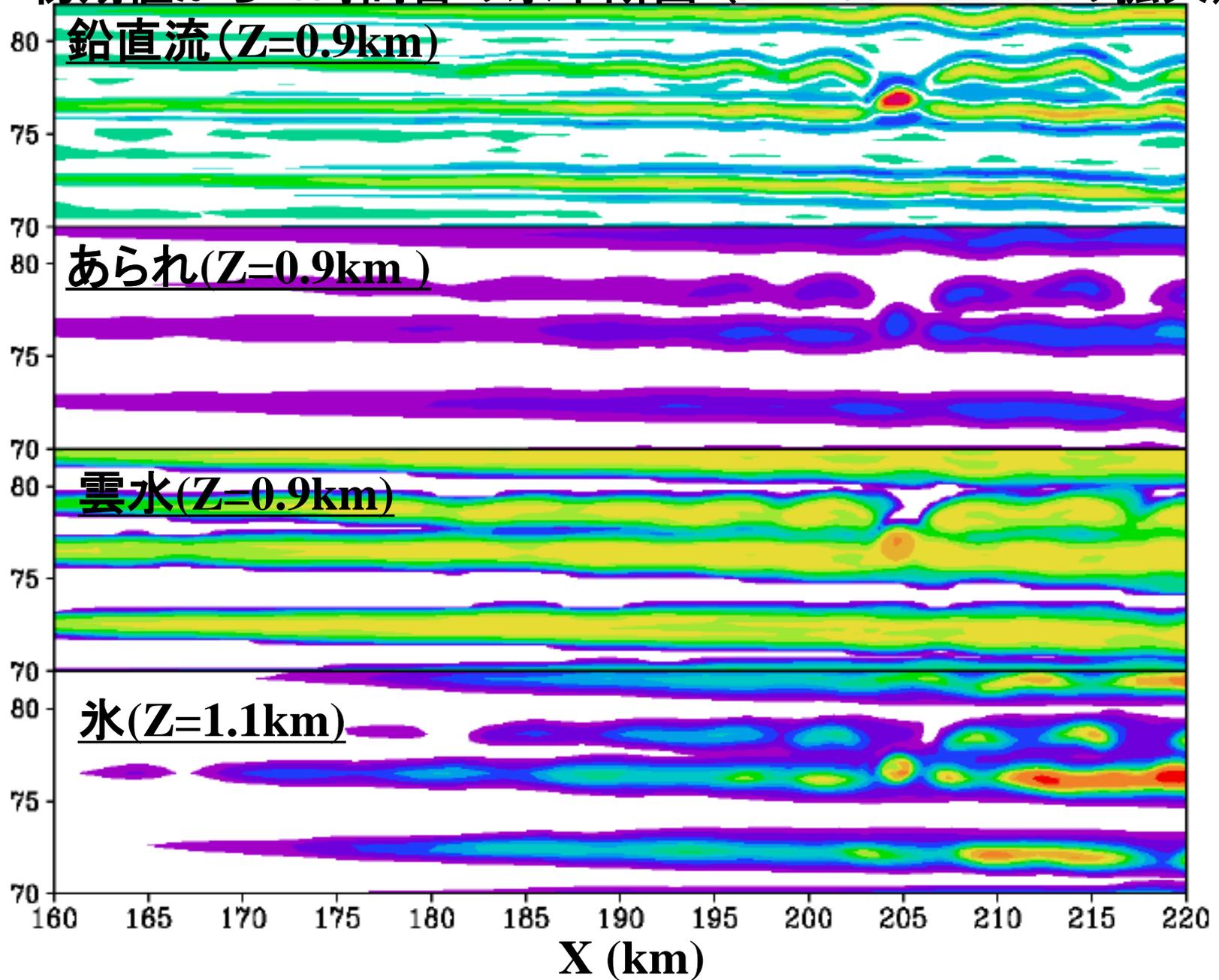
# 初期値から18時間目の水平断面



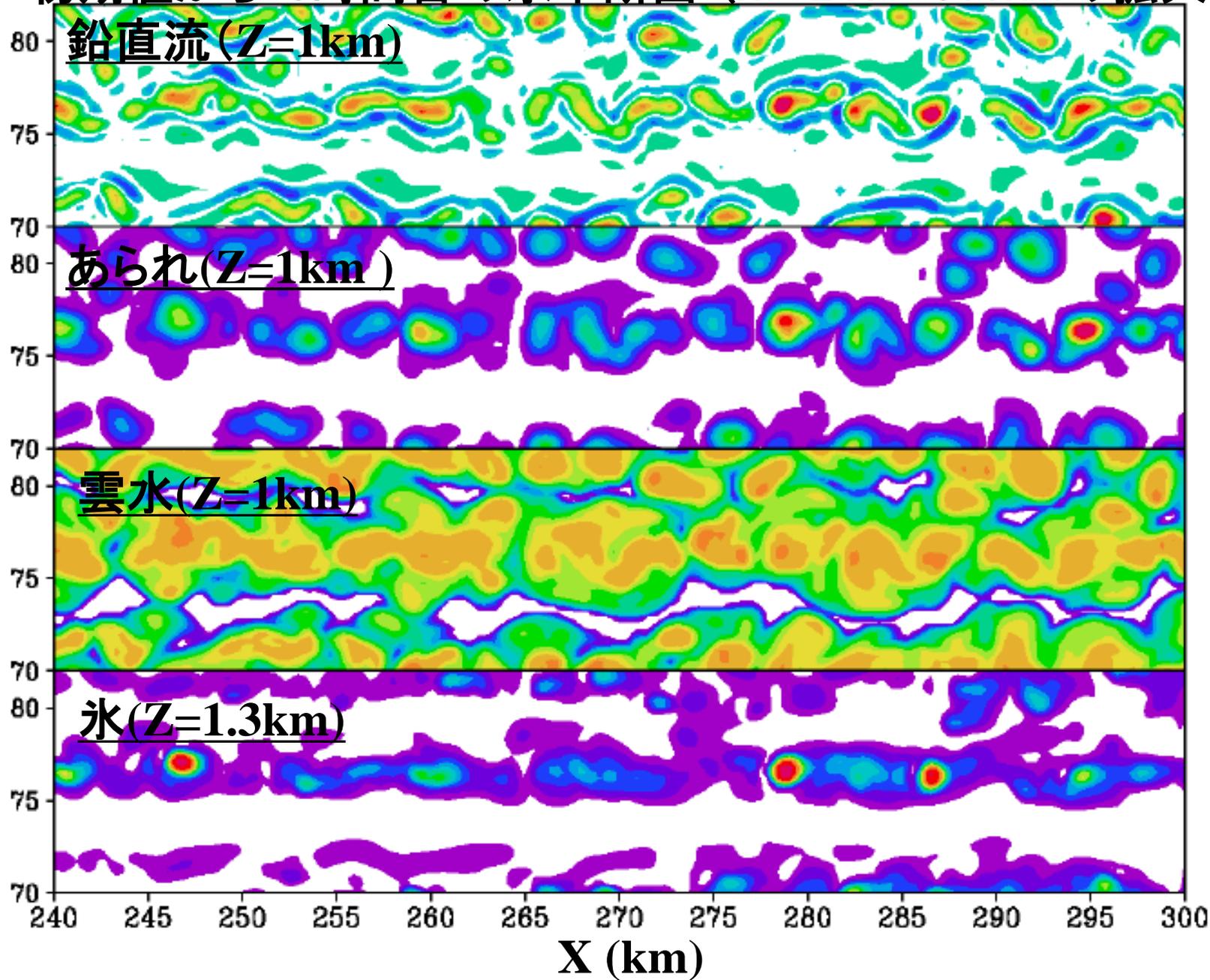
初期値から18時間目の水平断面 (x=100~160kmの拡大)



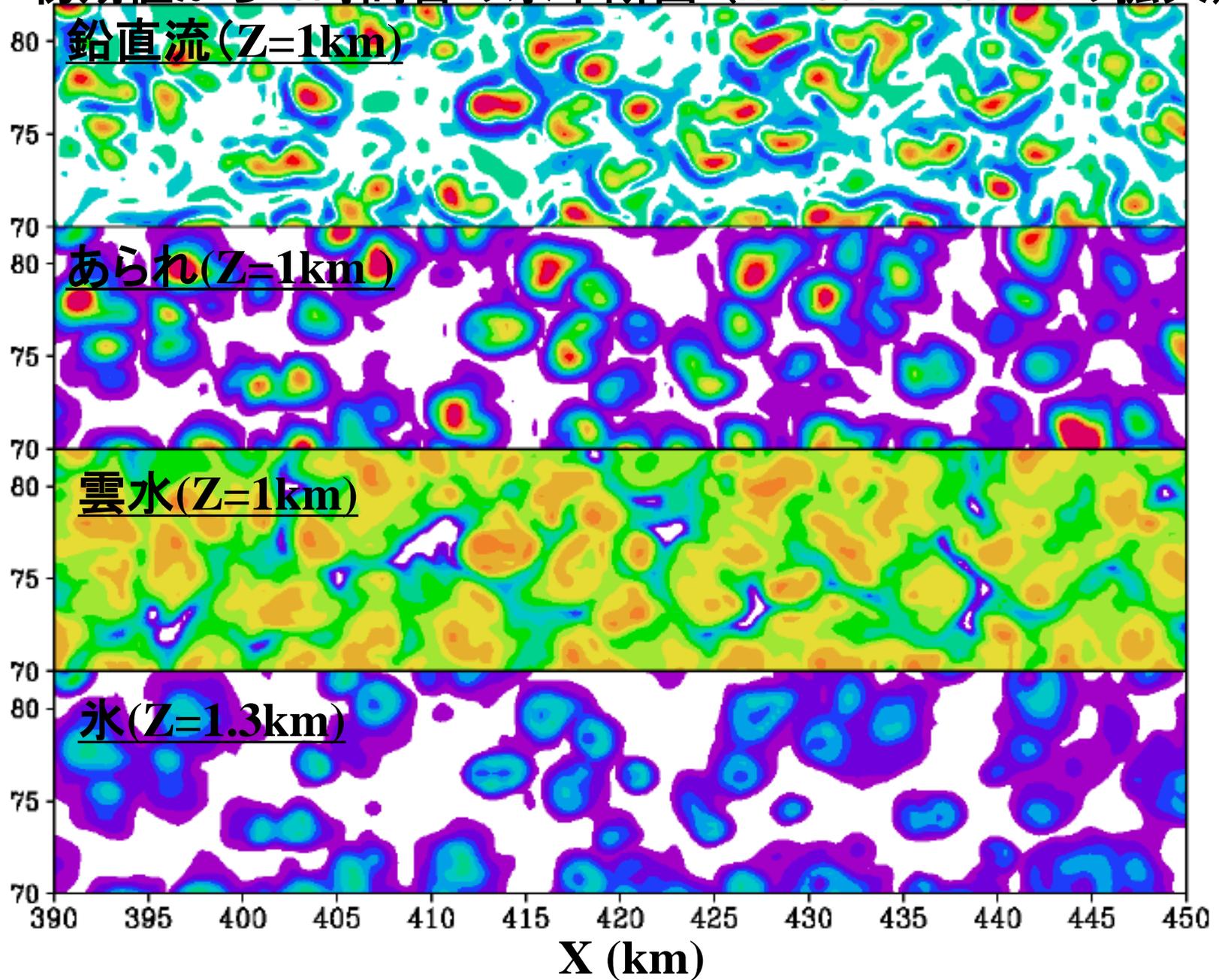
初期値から18時間目の水平断面 (x=160~220kmの拡大)



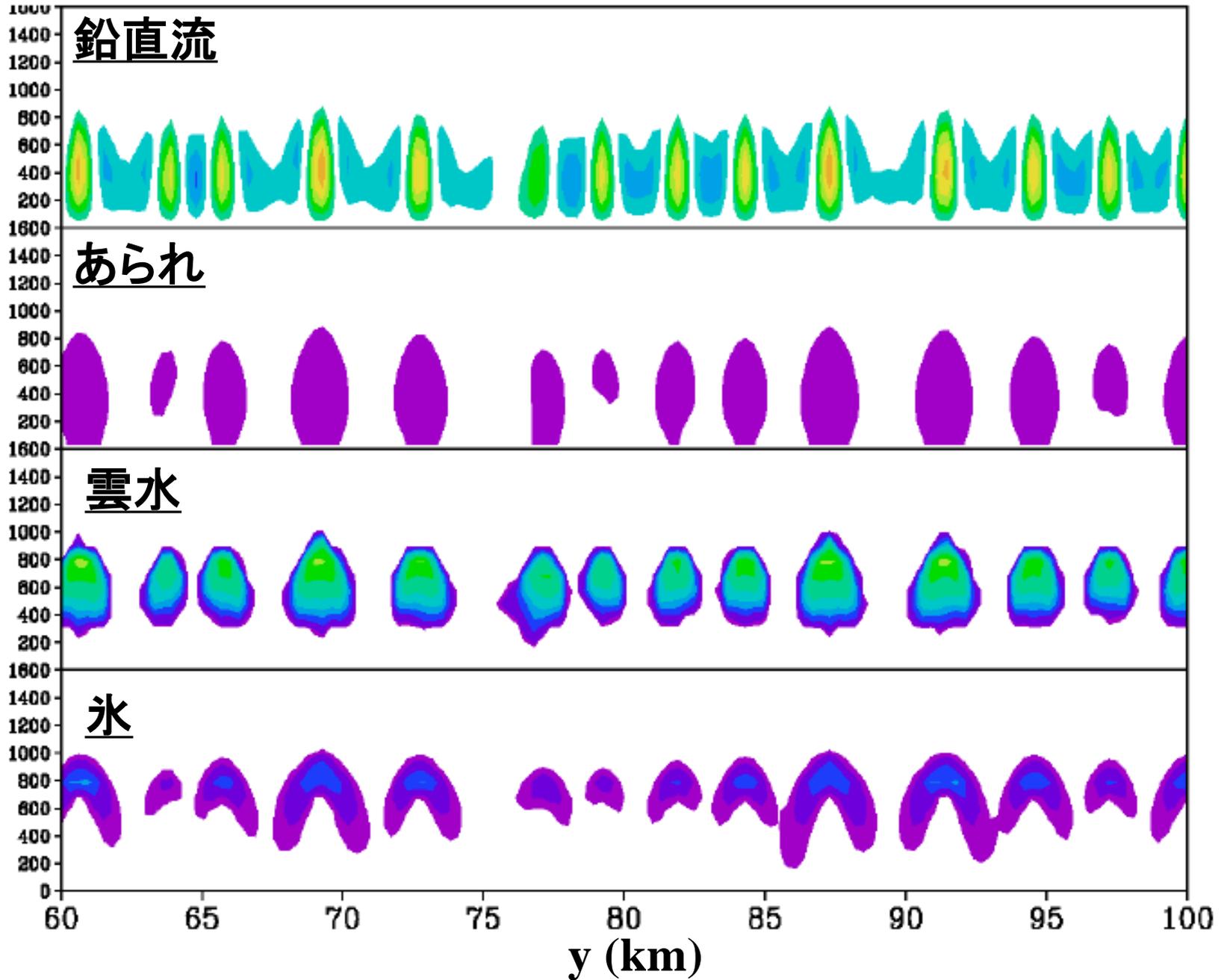
初期値から18時間目の水平断面 (x=240~300kmの拡大)



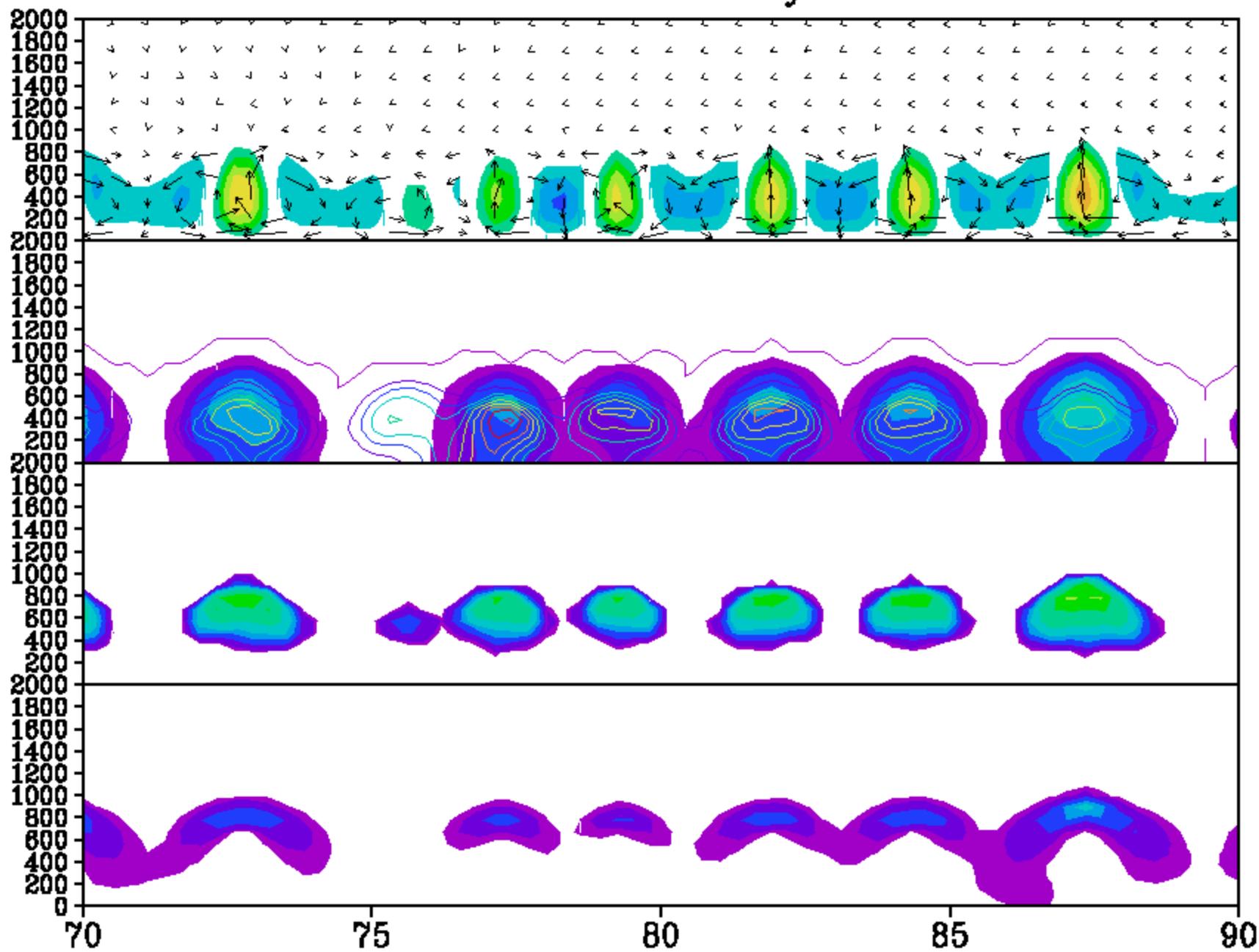
初期値から18時間目の水平断面 (x=390~450kmの拡大)



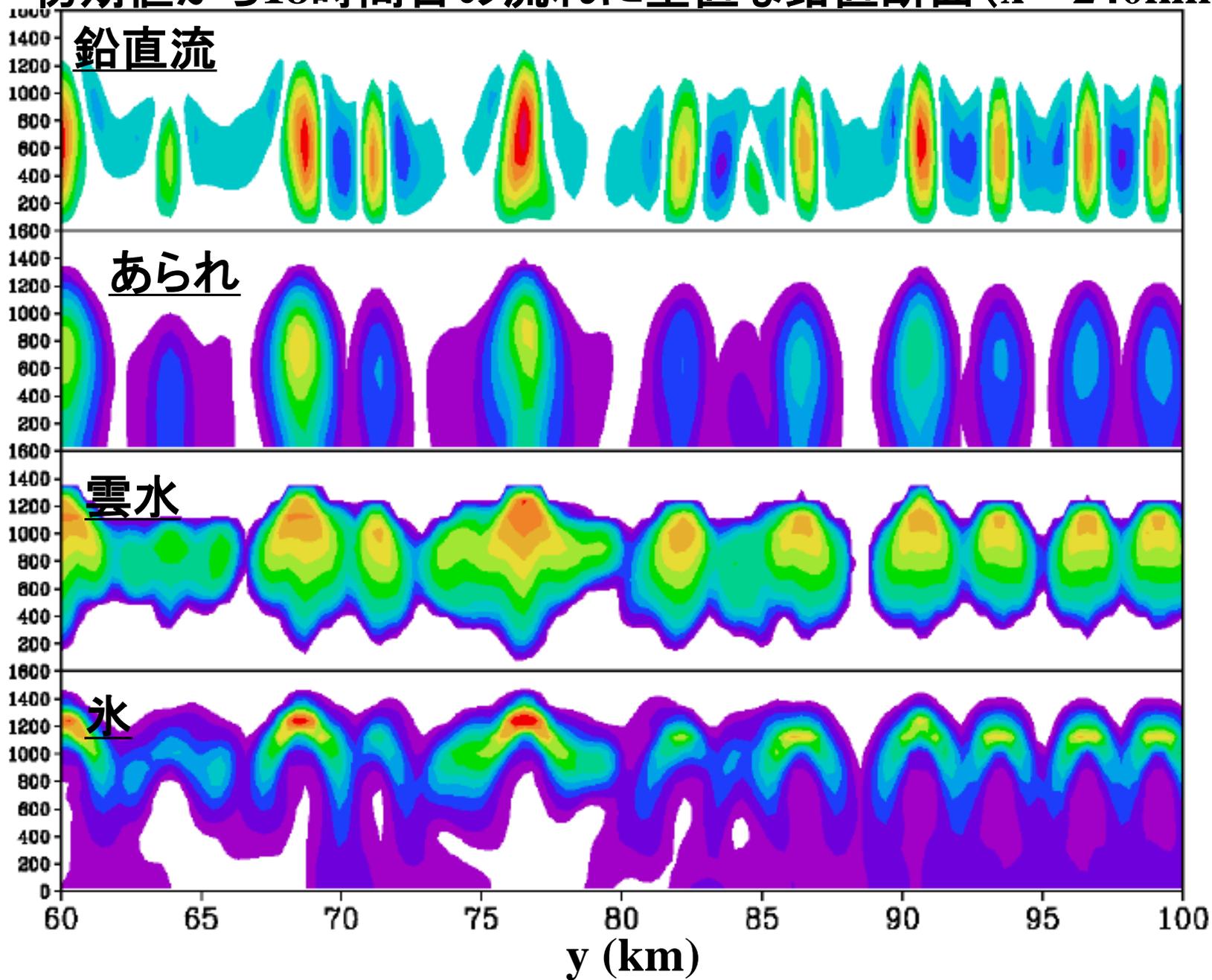
# 初期値から18時間目の流れに垂直な鉛直断面 (x=140km)



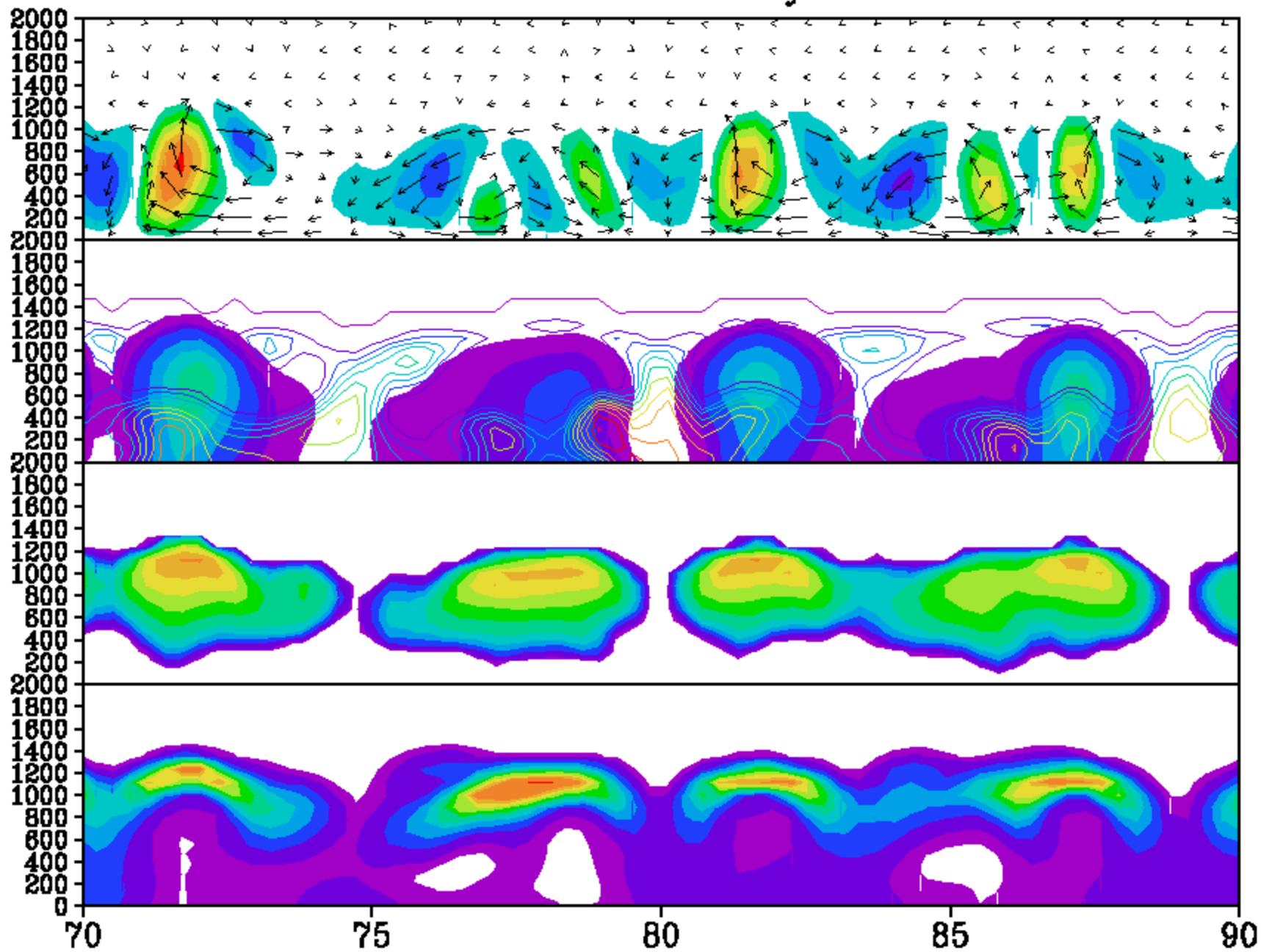
vertical cross section:  $y=140$   $t=18$



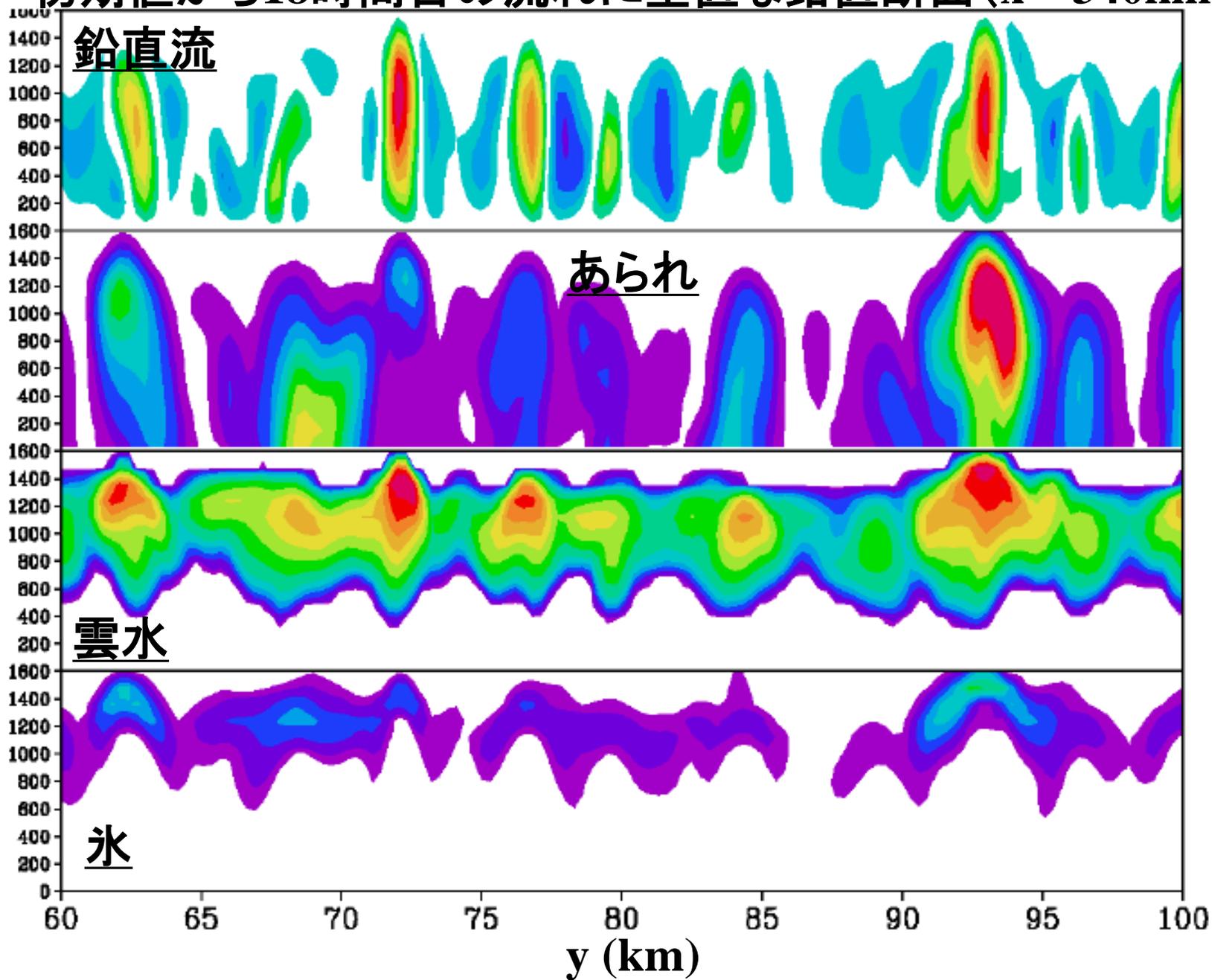
# 初期値から18時間目の流れに垂直な鉛直断面 ( $x=240\text{km}$ )



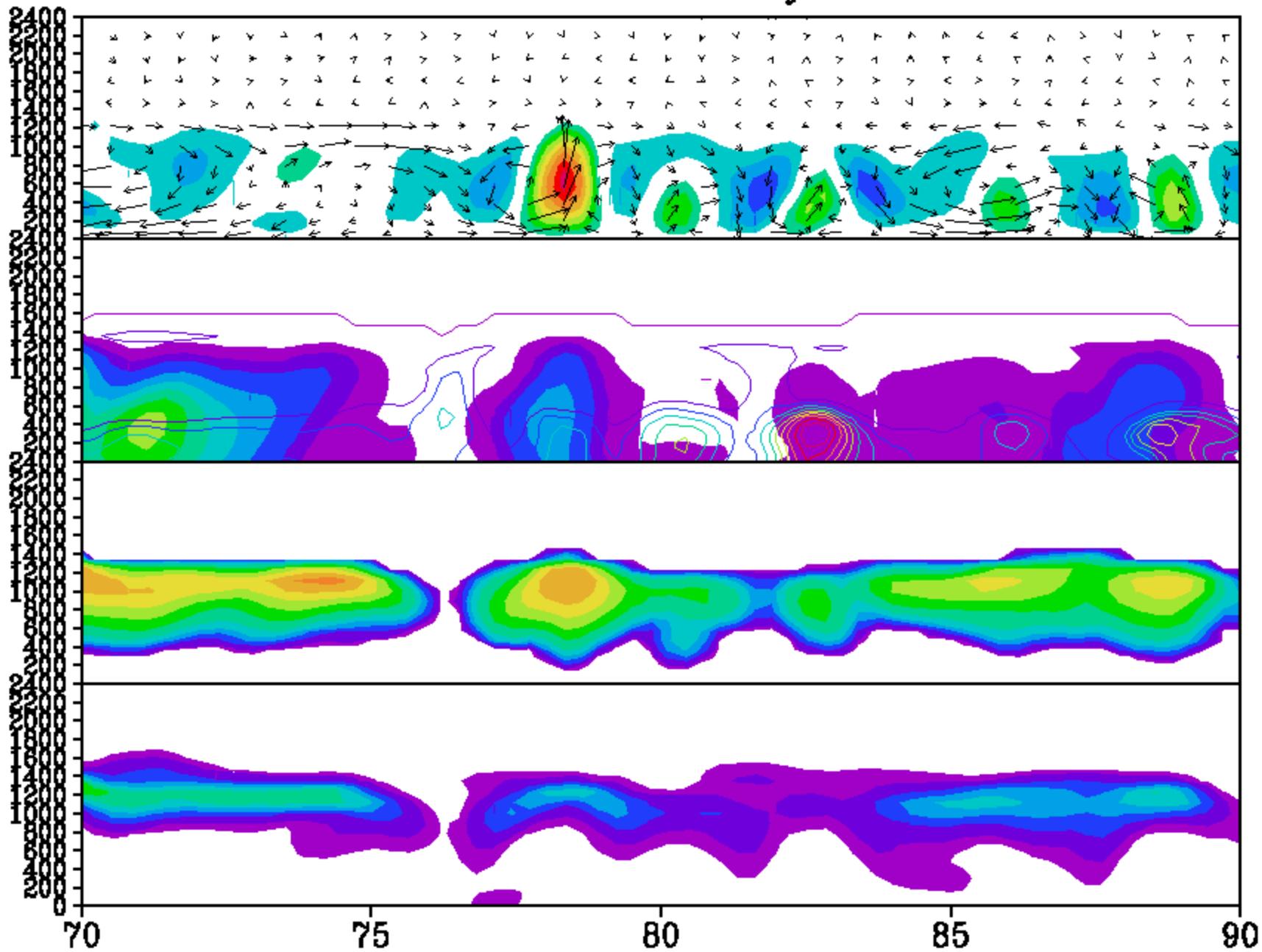
vertical cross section:  $y=240$   $t=18$



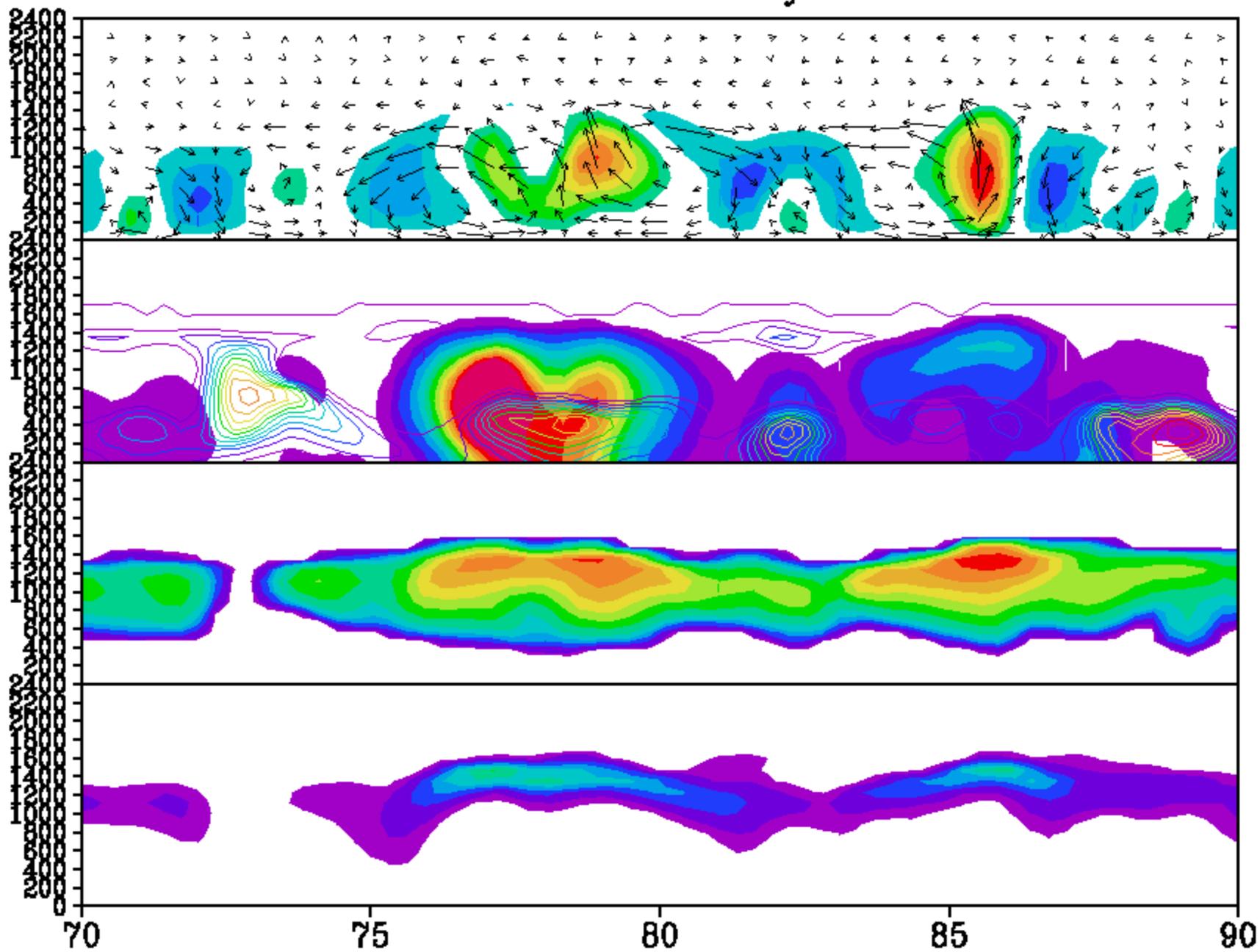
# 初期値から18時間目の流れに垂直な鉛直断面 ( $x=340\text{km}$ )



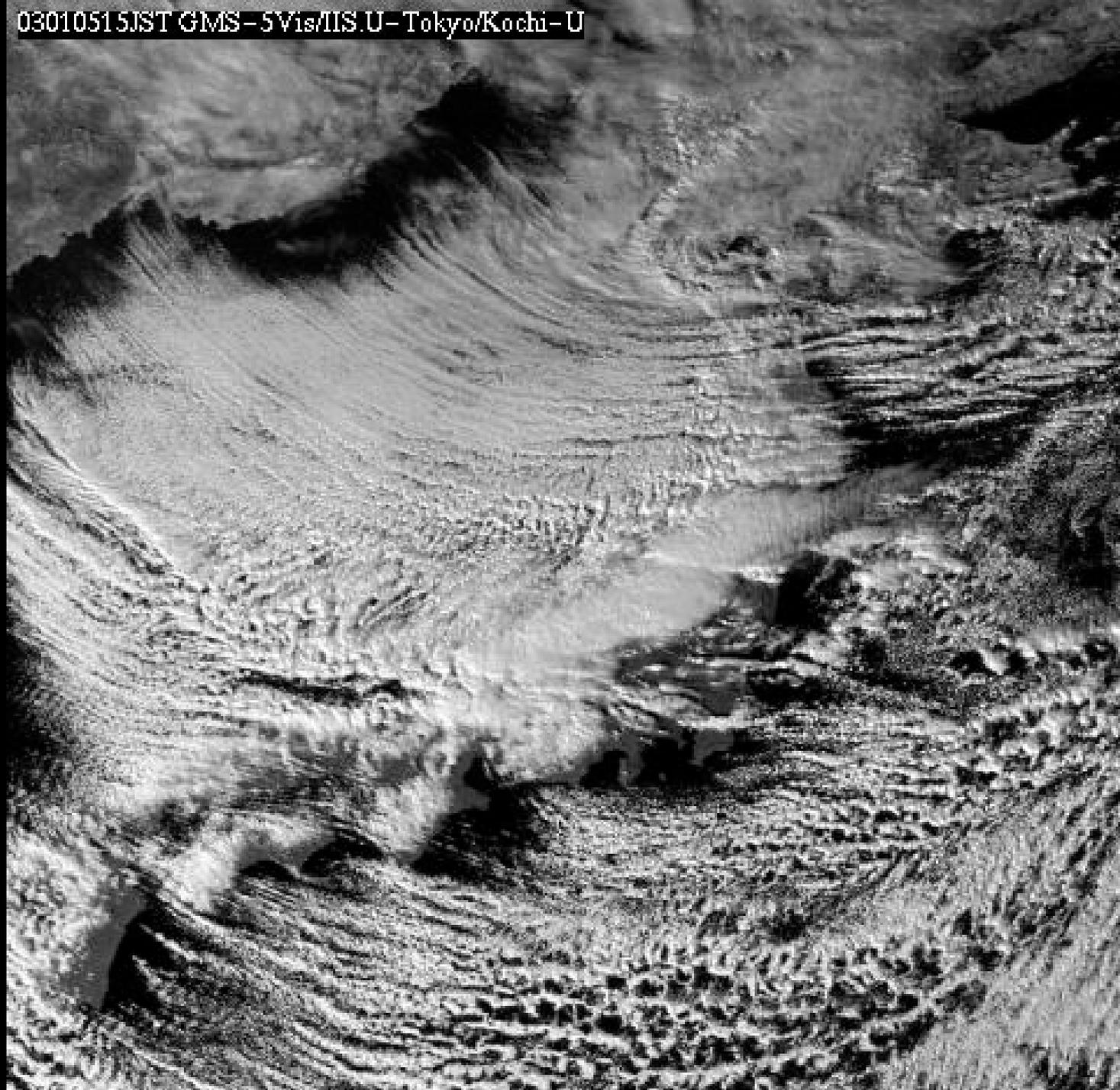
vertical cross section:  $y=340$   $t=18$



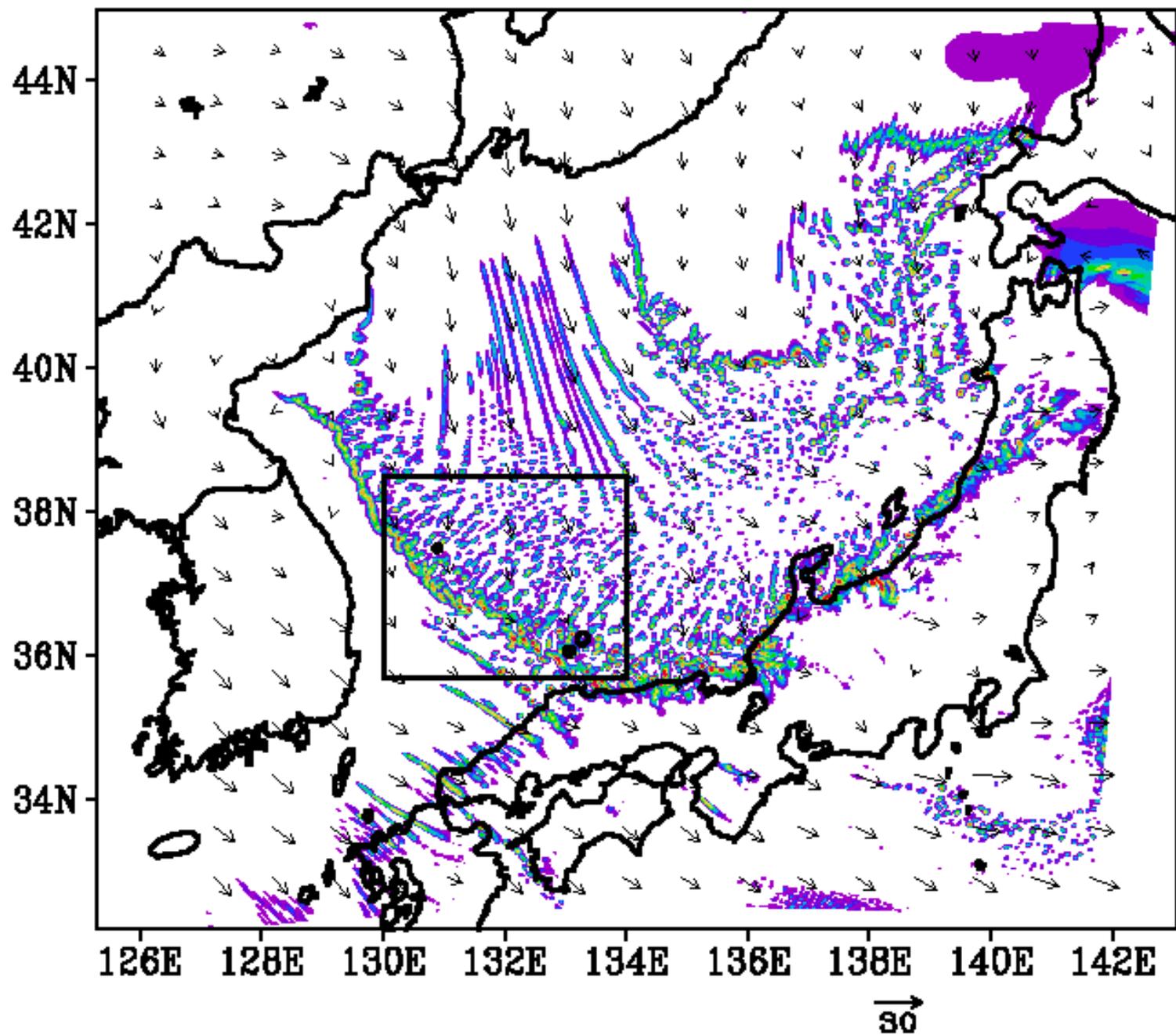
vertical cross section:  $y=440$   $t=18$



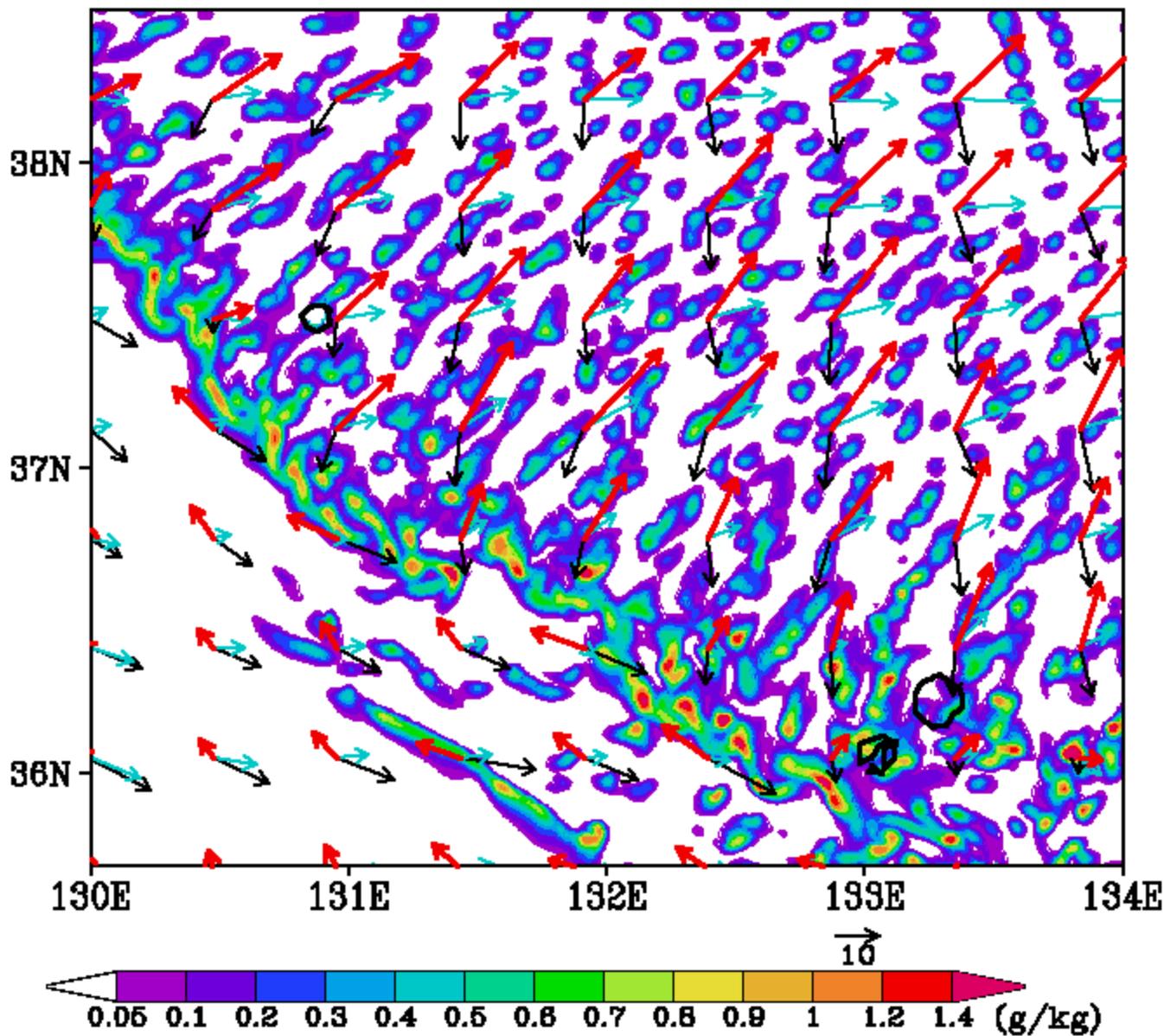
0301051 SJST GMS-5 Vis/IS.U-Tokyo/Kochi-U



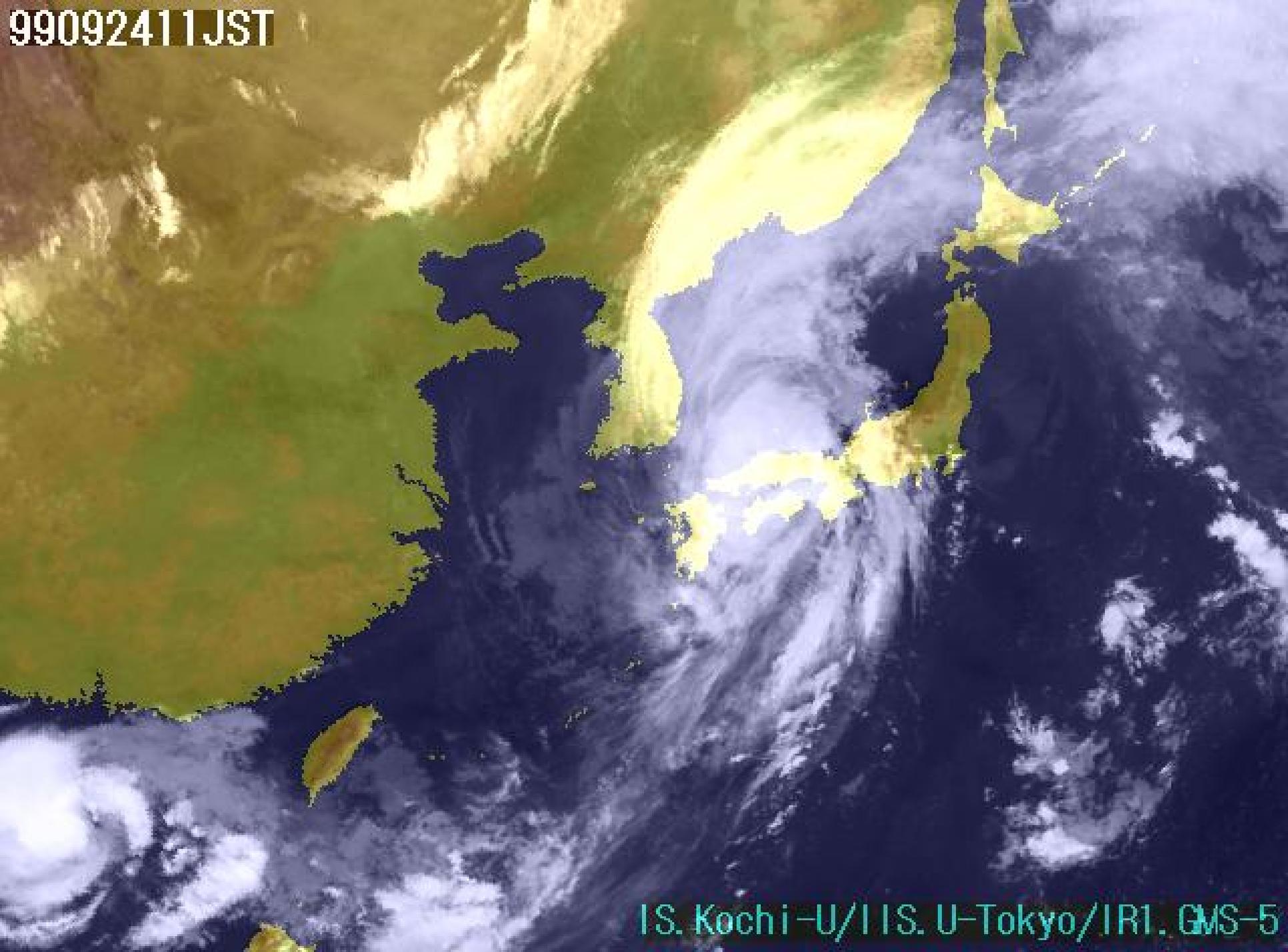
00:00Z 15JAN2001 ht=1112.25m t=18 hr



00:00Z 15JAN2001 ht=557.51m t=18 hr

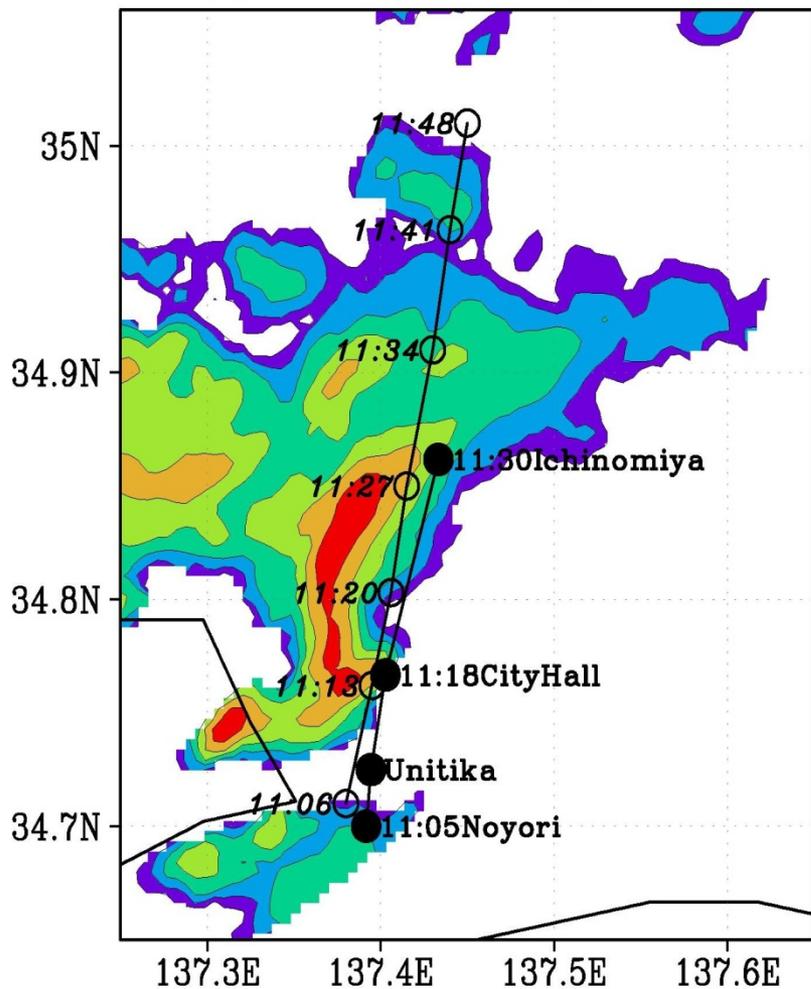


99092411JST

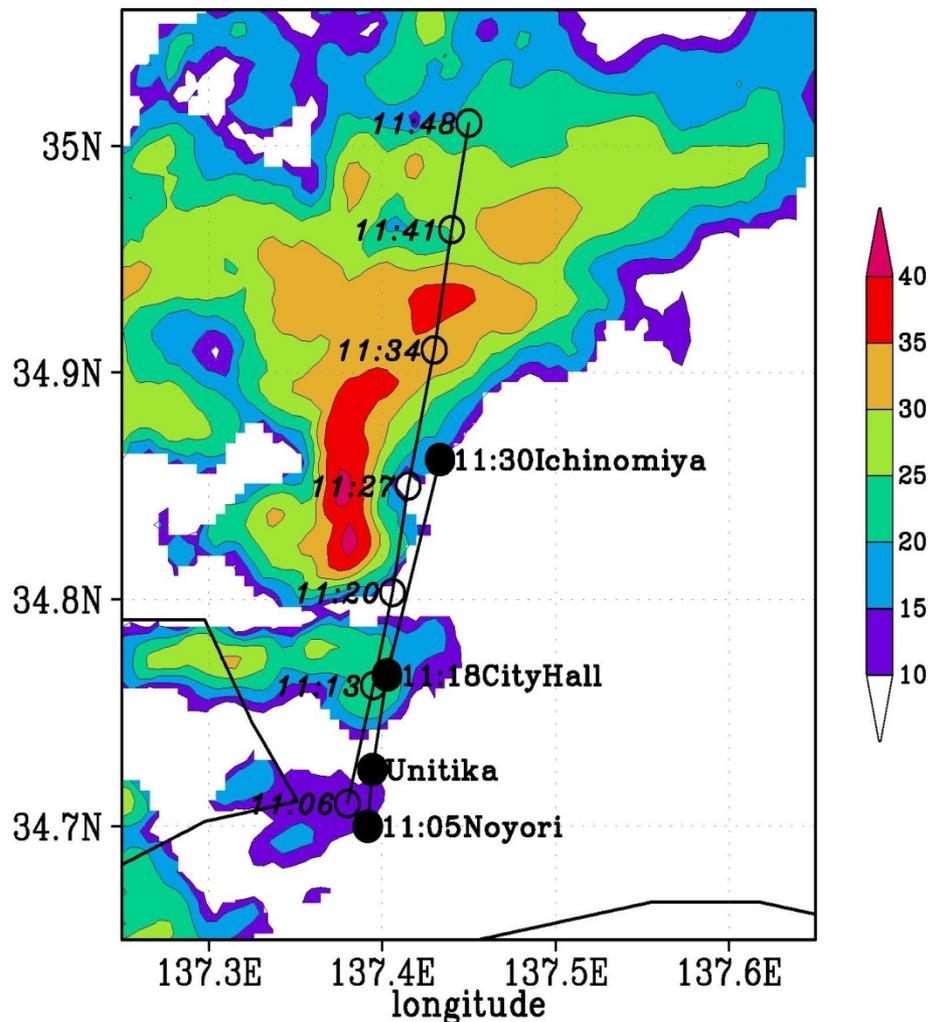


IS. Kochi-U/IIS. U-Tokyo/IRI. GMS-5

(a) 11:19JST 24 Sept 1999

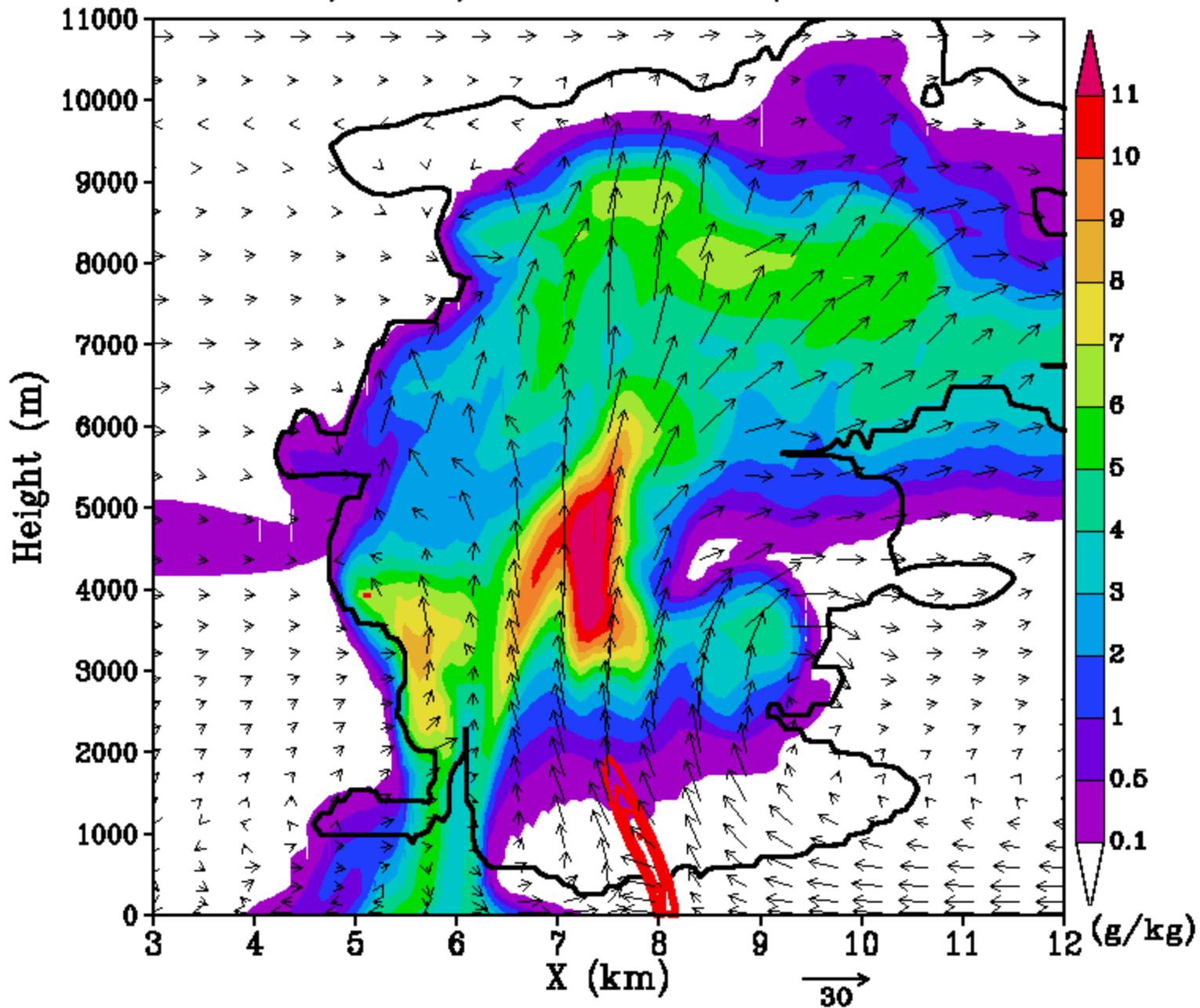


(b) 11:26JST 24 Sept 1999

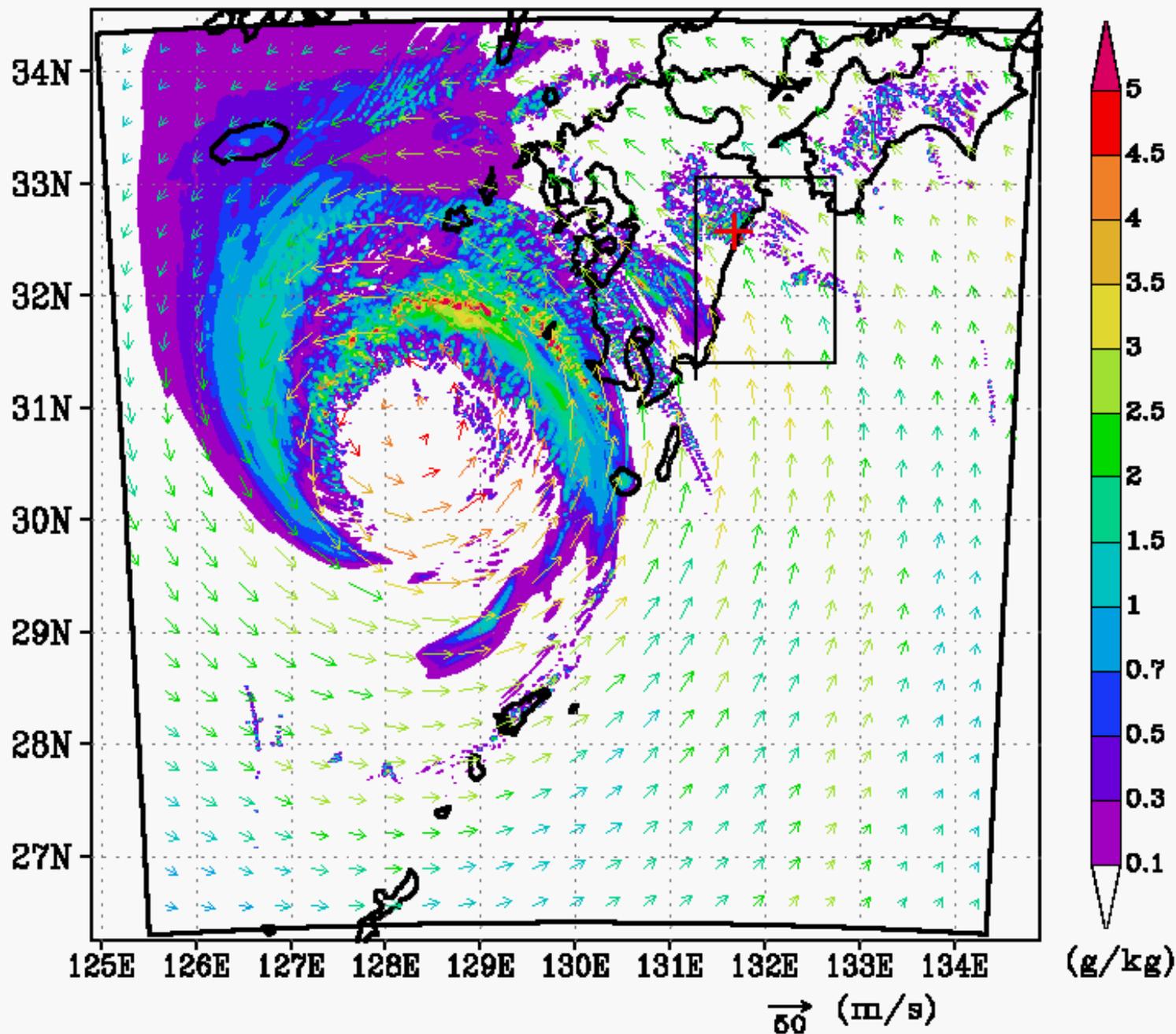


名古屋大学レーダーによる観測

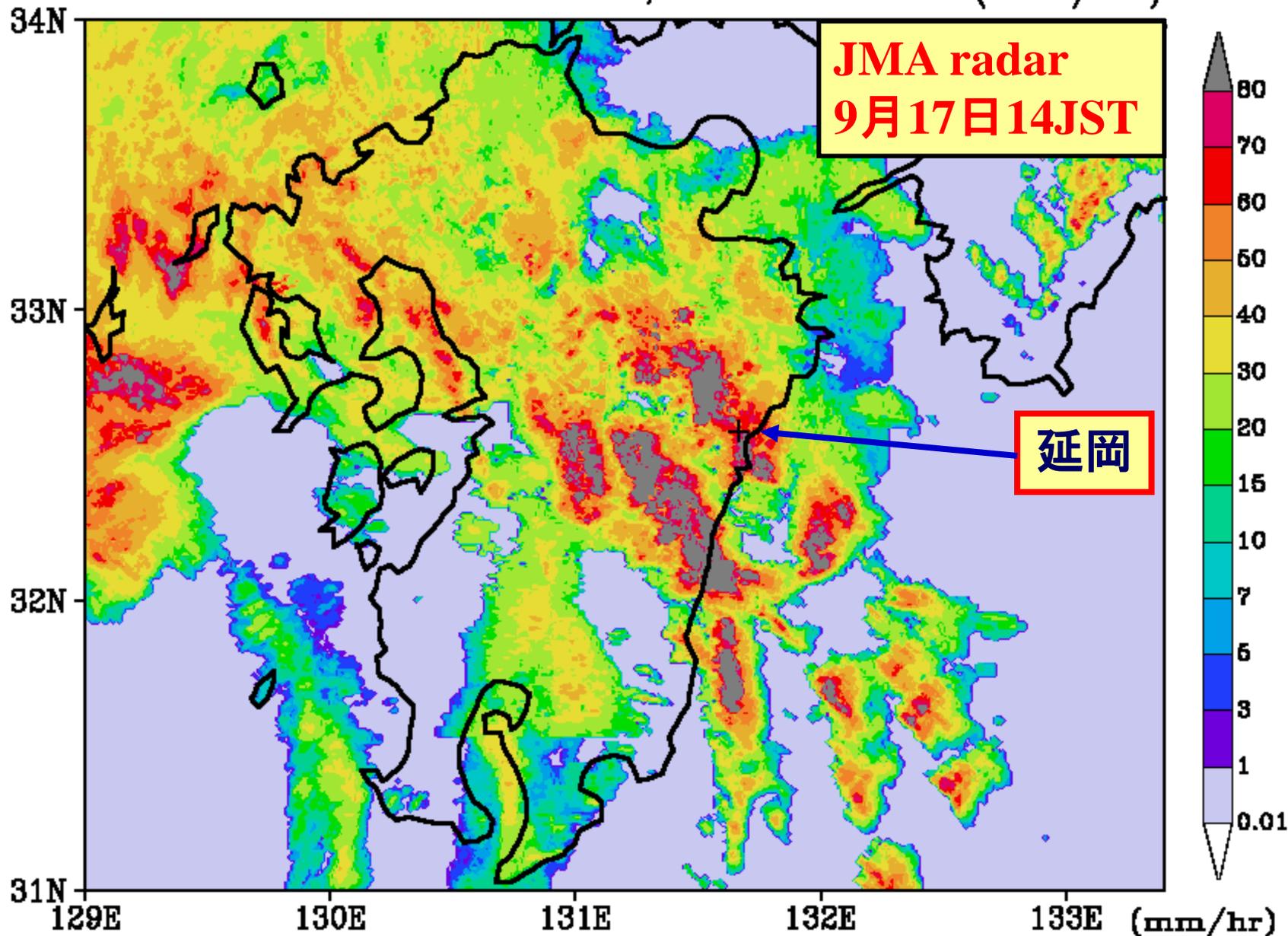
cloud, rain, T= 9780 sec, Y= 7 km



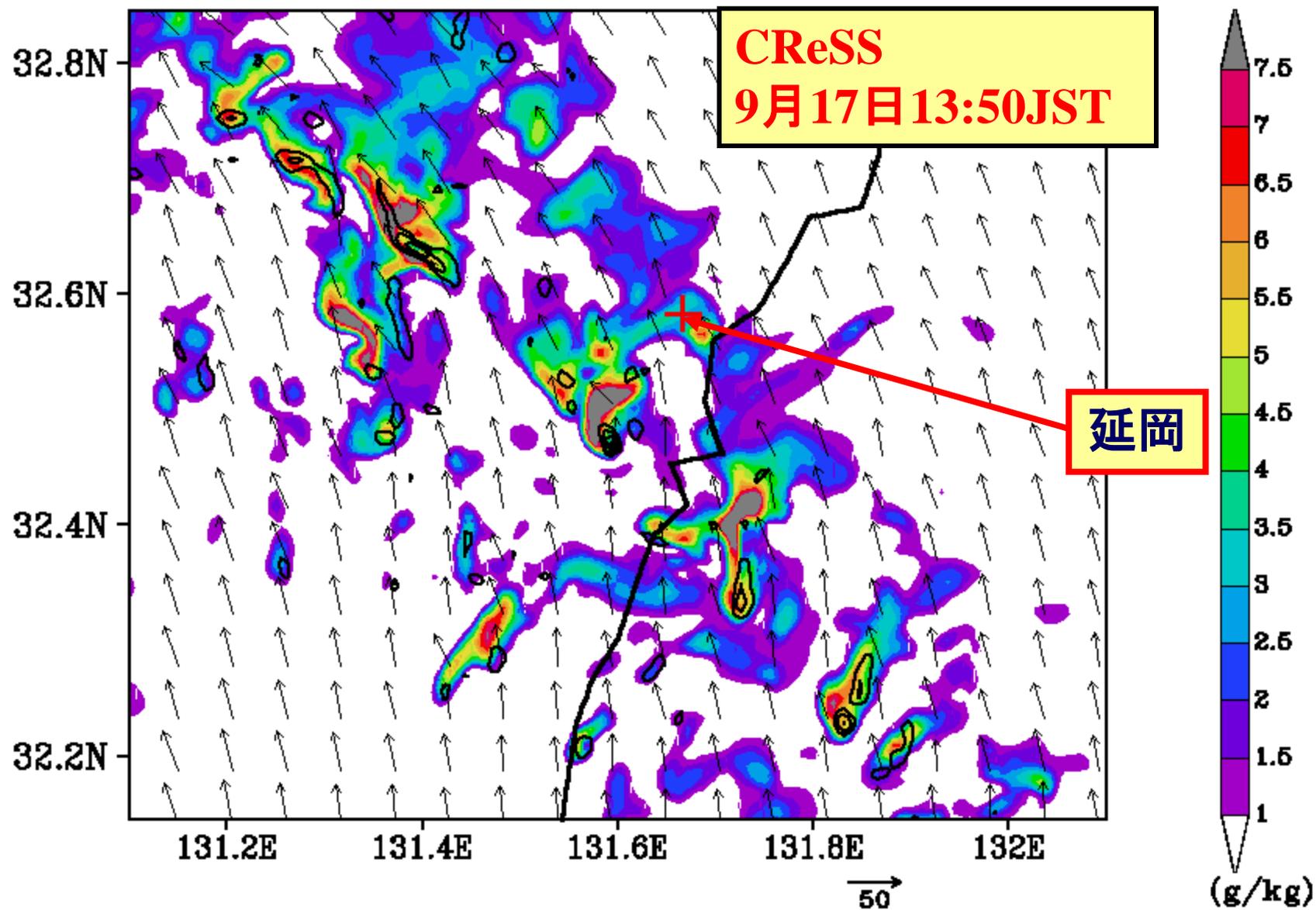
T0613: 02:00Z 17SEP2006 ht=1.91km No.25



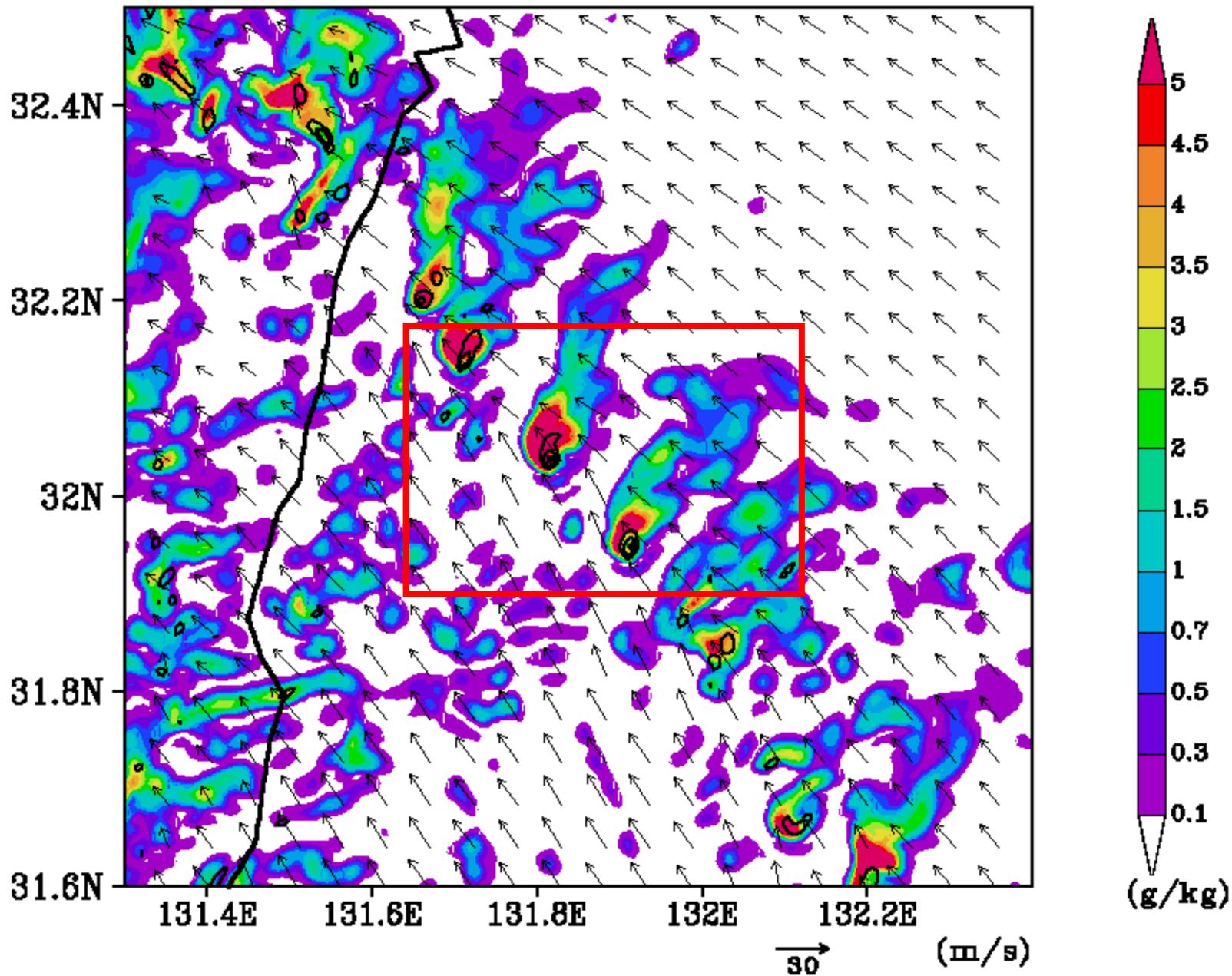
05Z17SEP2006: JMA radar, rainfall rate (mm/hr)



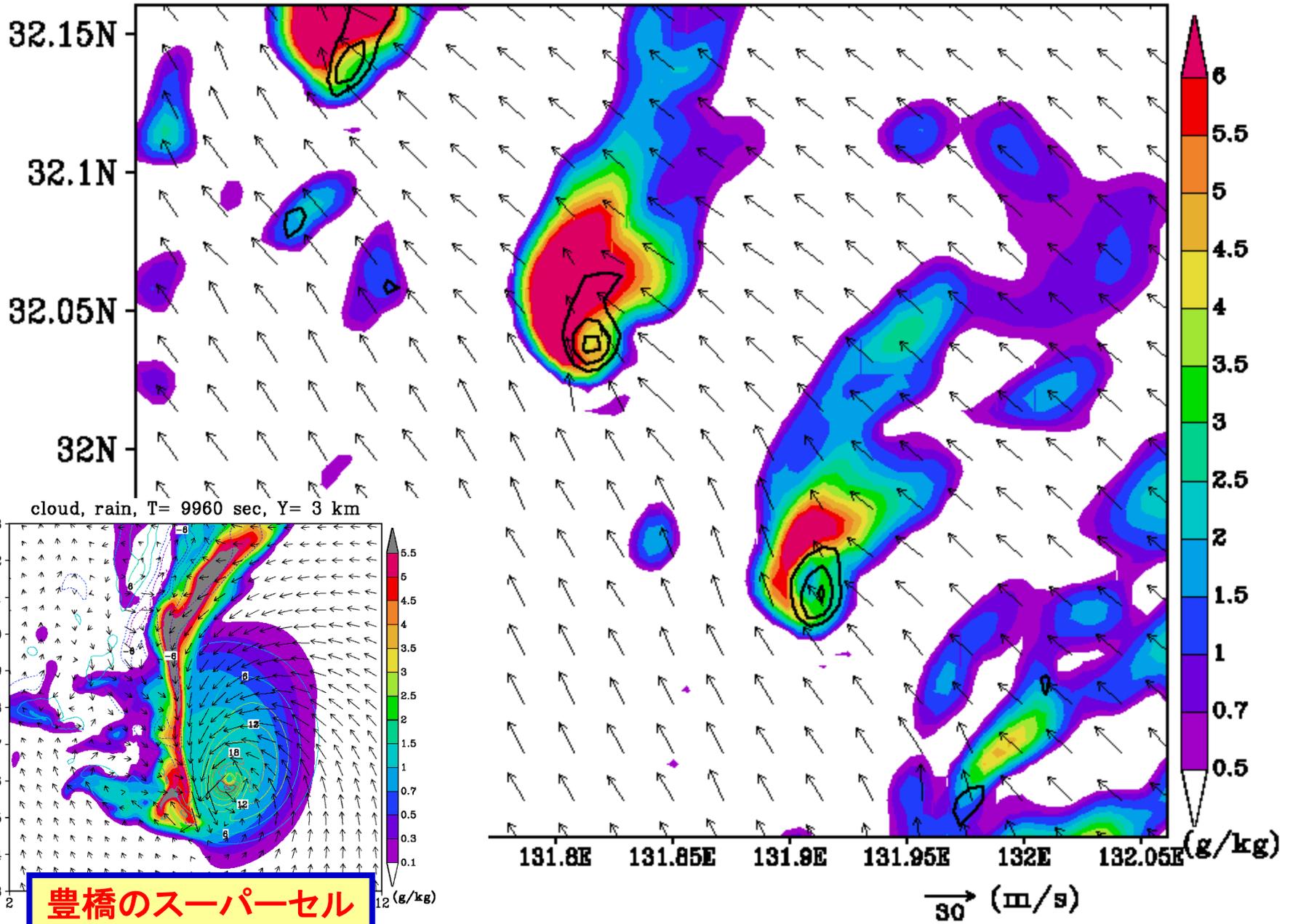
T0613: 04:50Z17SEP2006 ht=1.91km No.5



T0613: 04:40Z17SEP2006 ht=2km No.33



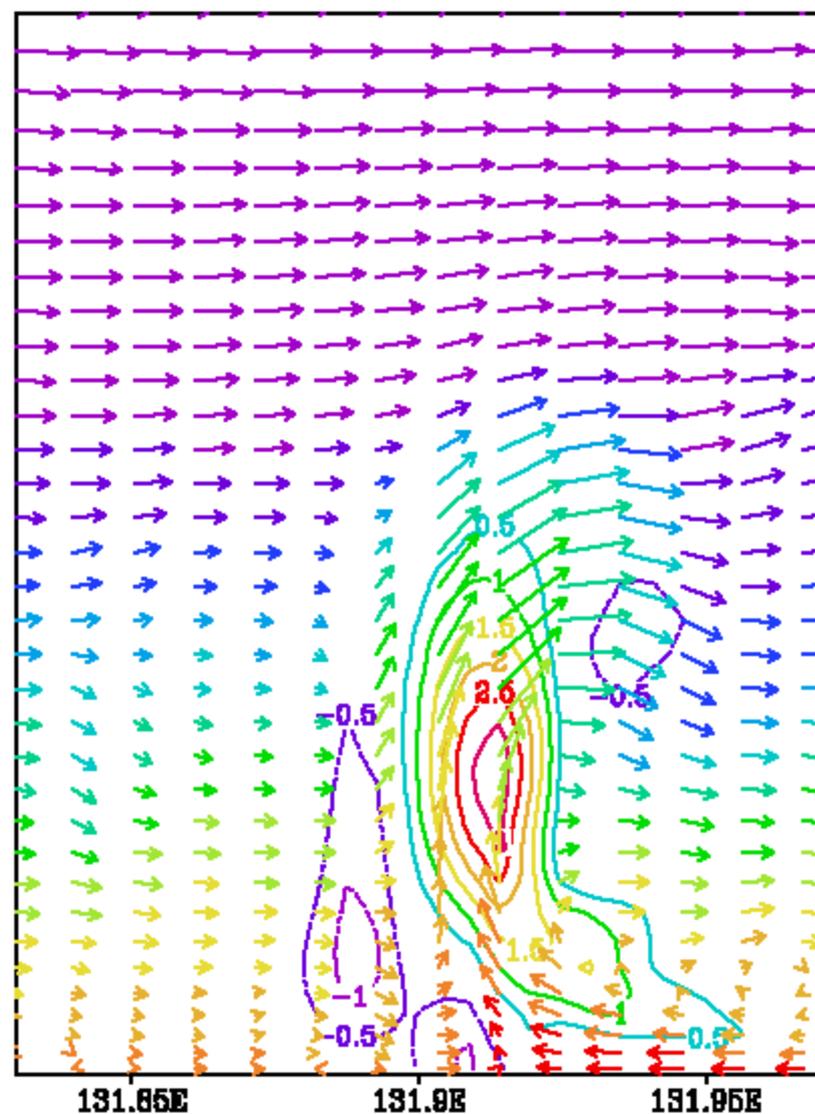
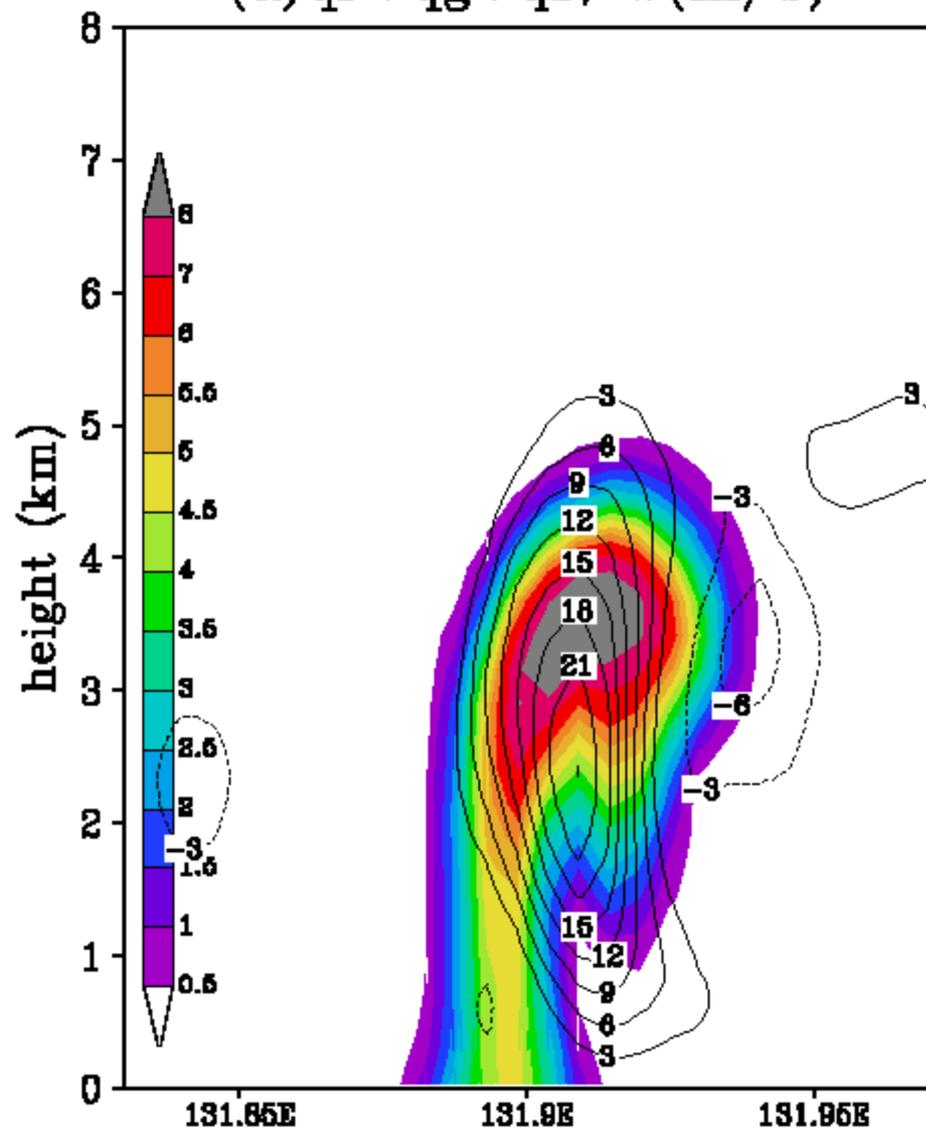
T0613: 04:40Z17SEP2006 ht=2km No.33



04:40Z17SEP2006 Lat=31.95N, No.=33

(a) qr+qg+qs, w(m/s)

(b) vorticity ( $10E-2/s$ ), u;v



$\vec{20}$  (m/s)

## 地球の対流：まとめ

- ◆地球大気の特徴：湿潤対流と雲の形成
- ◆湿潤対流の対流セルのスケール：数100mから10km
- ◆多様なタイプの対流
- ◆対流セルは組織化する
- ◆雲解像モデルを用いたシミュレーションでは、解像度を上げるほど細かい構造が見えてくる
- ◆雲を詳細に表現するシミュレーション：大規模数値計算が必要