竜巻シンポジウム
－わが国の竜巻研究の今後の課題と方向性－

2007年1月23日
気象庁講堂

積乱雲と竜巻のシミュレーション実験

坪木和久
（名古屋大学　地球水循環研究センター・
地球環境フロンティア研究センター）

竜巻とは何か

- 定義：「竜巻は積雲、積乱雲などの対流雲に伴って発生する鉛直軸まわりの激しい渦で、しばしば漏斗状や柱状の雲を伴う。」（気象庁、1988）
- もう少し厳密に定義：シミュレーション結果において竜巻を判定する基準。竜巻とは「遠心力と気圧傾度力のバランス、すなわち旋衡風バランスが極めて高い精度で成立している大気の渦」。
- シミュレーションの結果を渦度でみると、これが成り立っているものを竜巻と判定する。
- 渦度は0.1～1/s程度になる。(スーパーセルは 0.01/s、温帯低気圧は0.00001/s程度)

竜巻予測の問題点

- 竜巻は**観測できないほど小規模**であるが、その破壊力は大気擾乱の中でも最強。
- 竜巻は**忽然と発生**する（台風のように遠くからやってくるものではない）。
- 日本国内およびその周辺地域では、**どこにでも、どの季節にも発生する**（多い少ないはある）。
- 研究が少ない（観測できないので、データが少ない。研究者も少ない。予算も少ない。）
- 観測もシミュレーションも困難。そもそも実体がわかっていない（ミステリーが多い）。

竜巻の予測として期待される方法

- 竜巻そのものは予測も観測もほとんどできないと考えてよい。竜巻は積乱雲によってもたらされるので、その予測は親となる積乱雲を捉える。

- ドップラーレーダーで特徴的積乱雲（スーパーセル）を観測する方法。ただし、すべての竜巻がスーパーセルによるわけではない。未知の積乱雲があるかも。予測は数10分前程度。

- 雲解像モデルによる積乱雲のシミュレーション。数時間前から「竜巻ポテンシャル」を予測することができる（？）。計算機コストが大きい。

- いずれの方法においても竜巻と積乱雲の関係には、未解明な点が多い。

雲解像数値気象モデル

Cloud Resolving Storm Simulator “CReSS”

雲スケールからストームスケールの現象のシミュレーションを地球シミュレーターなどの大規模並列計算機で行うことを目的とした、非静力学･圧縮方程式系の雲解像モデル。

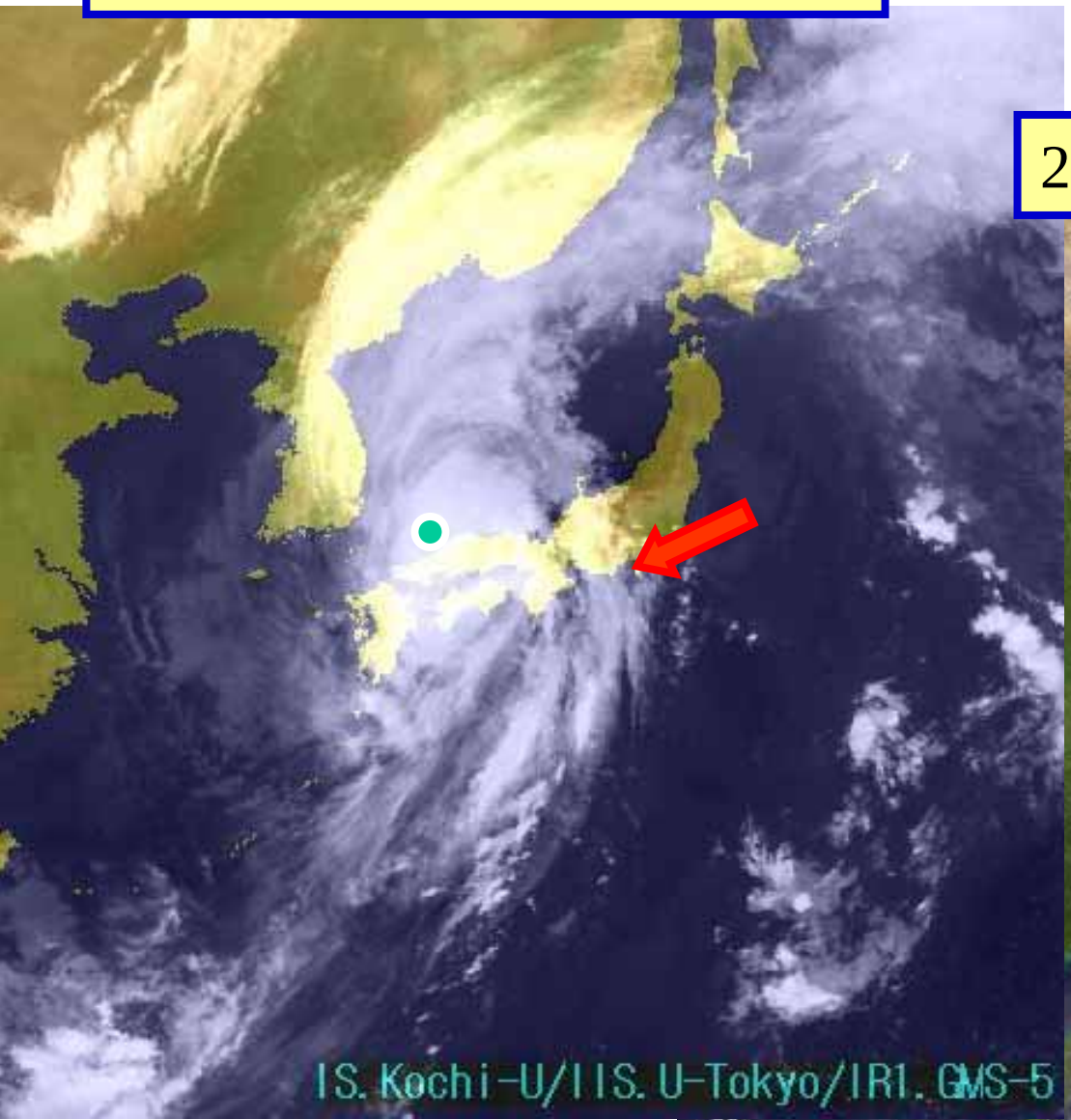
大規模並列計算機に最適な純国産の雲解像領域モデルを開発することを目標として、1998年よりCReSSの開発を行なってきた。

台風に伴う降雨帯と竜巻

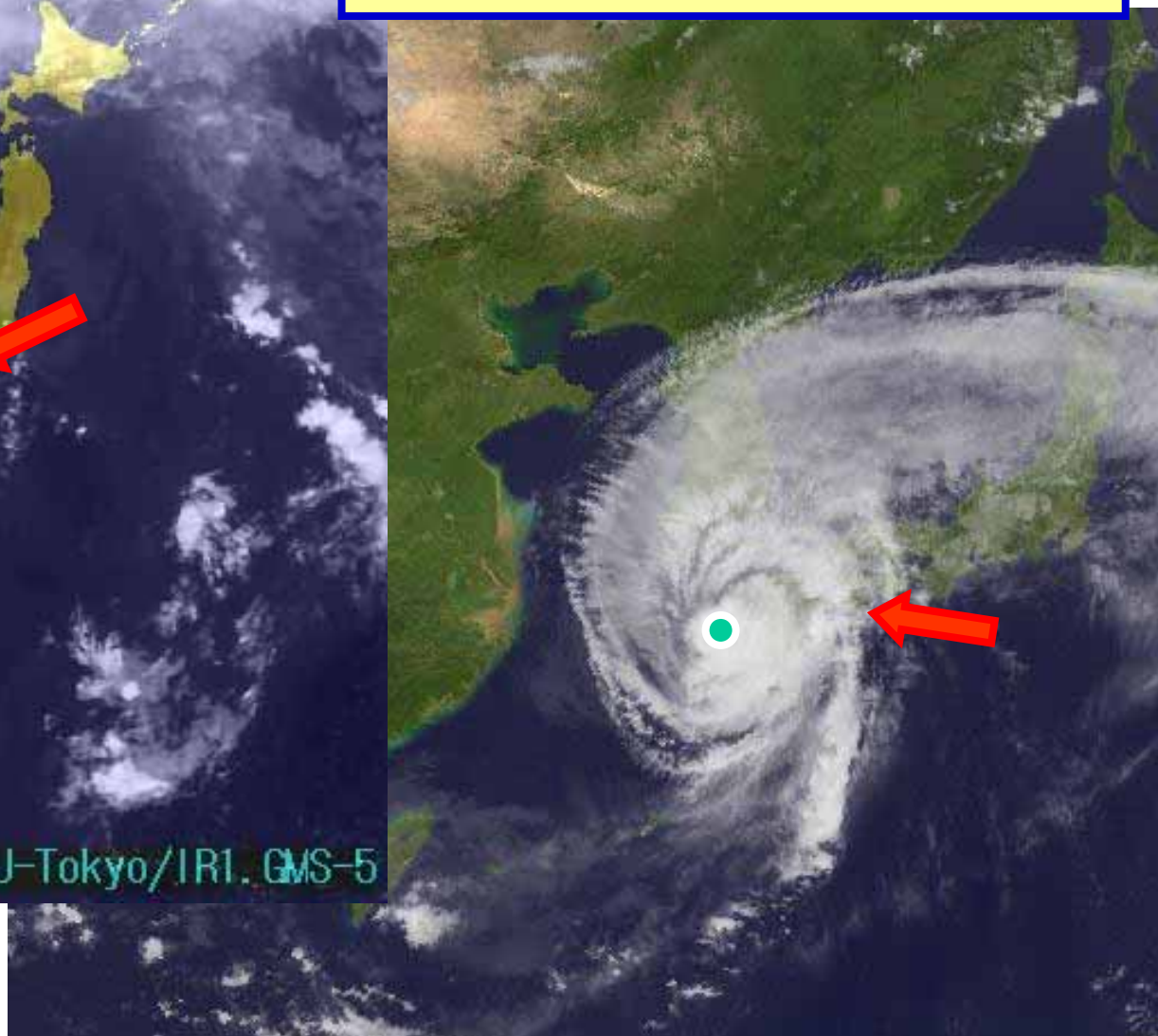
ー1999年9月24日, 愛知県豊橋市の竜巻ー
ー2006年9月17日, 宮崎県延岡市の竜巻ー

Suzuki et al. (2000);台風9019に伴うミニスーパーセルと竜巻

1999年9月24日11JST; T9918

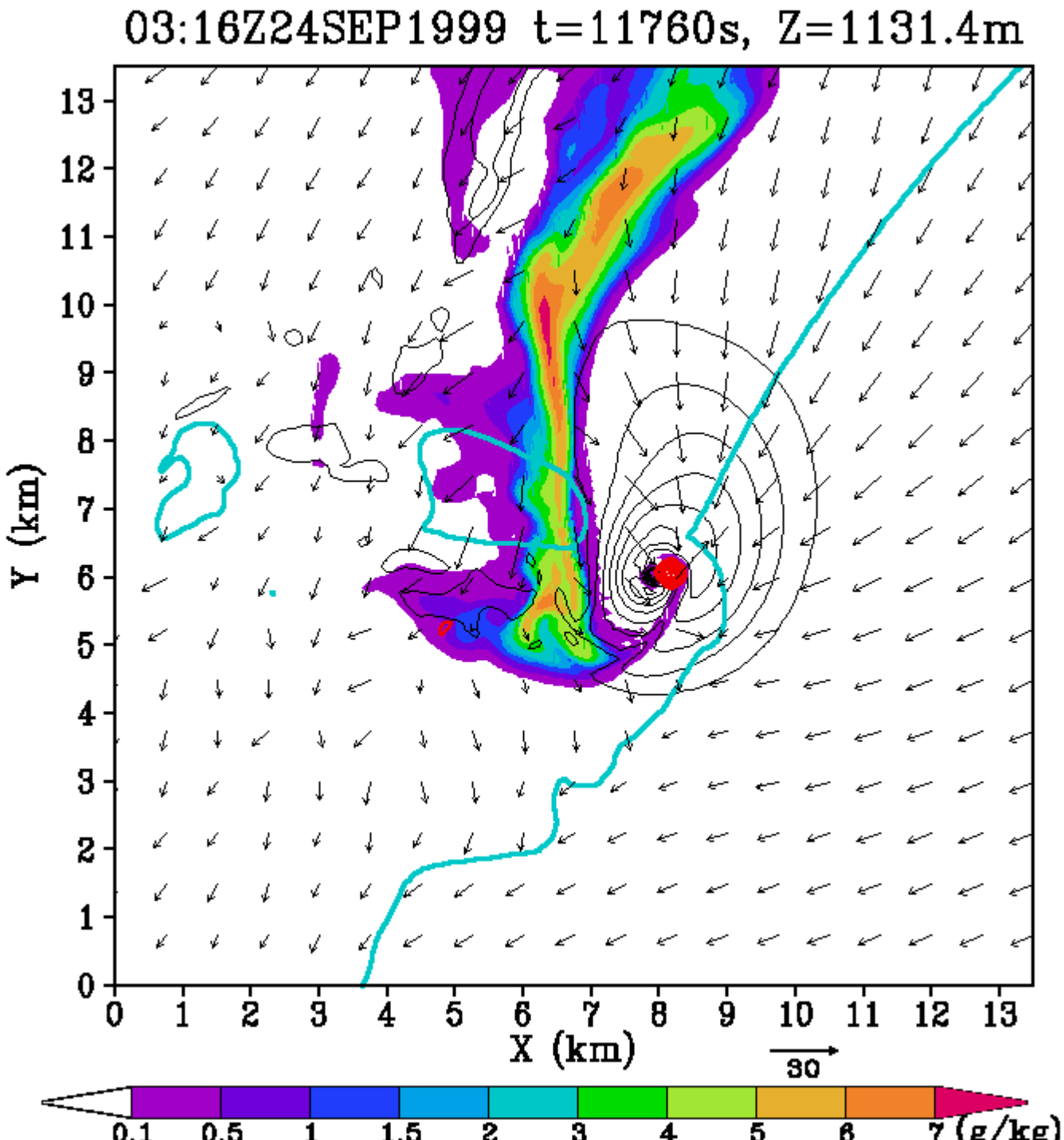


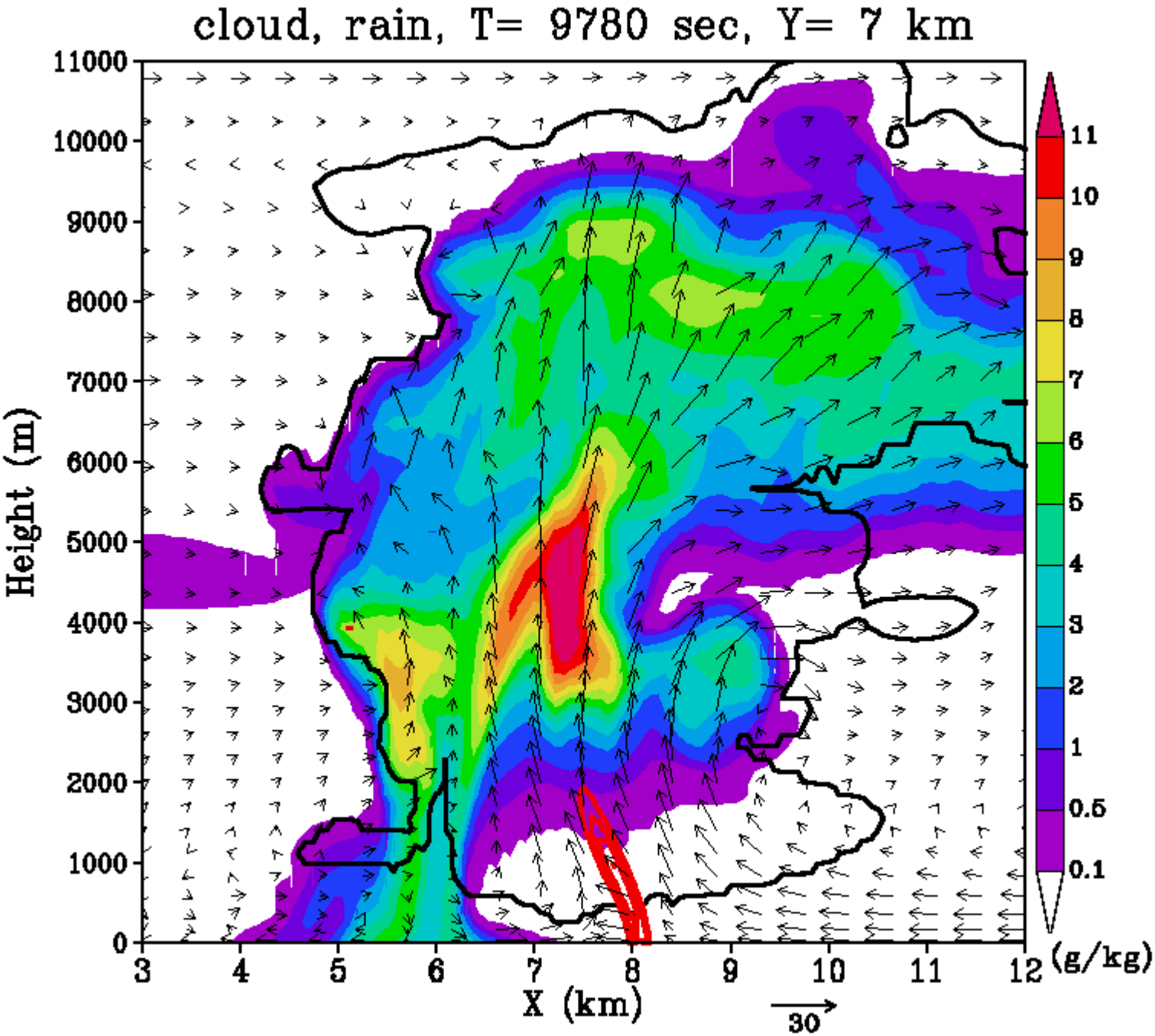
2006年9月17日14JST; T0613

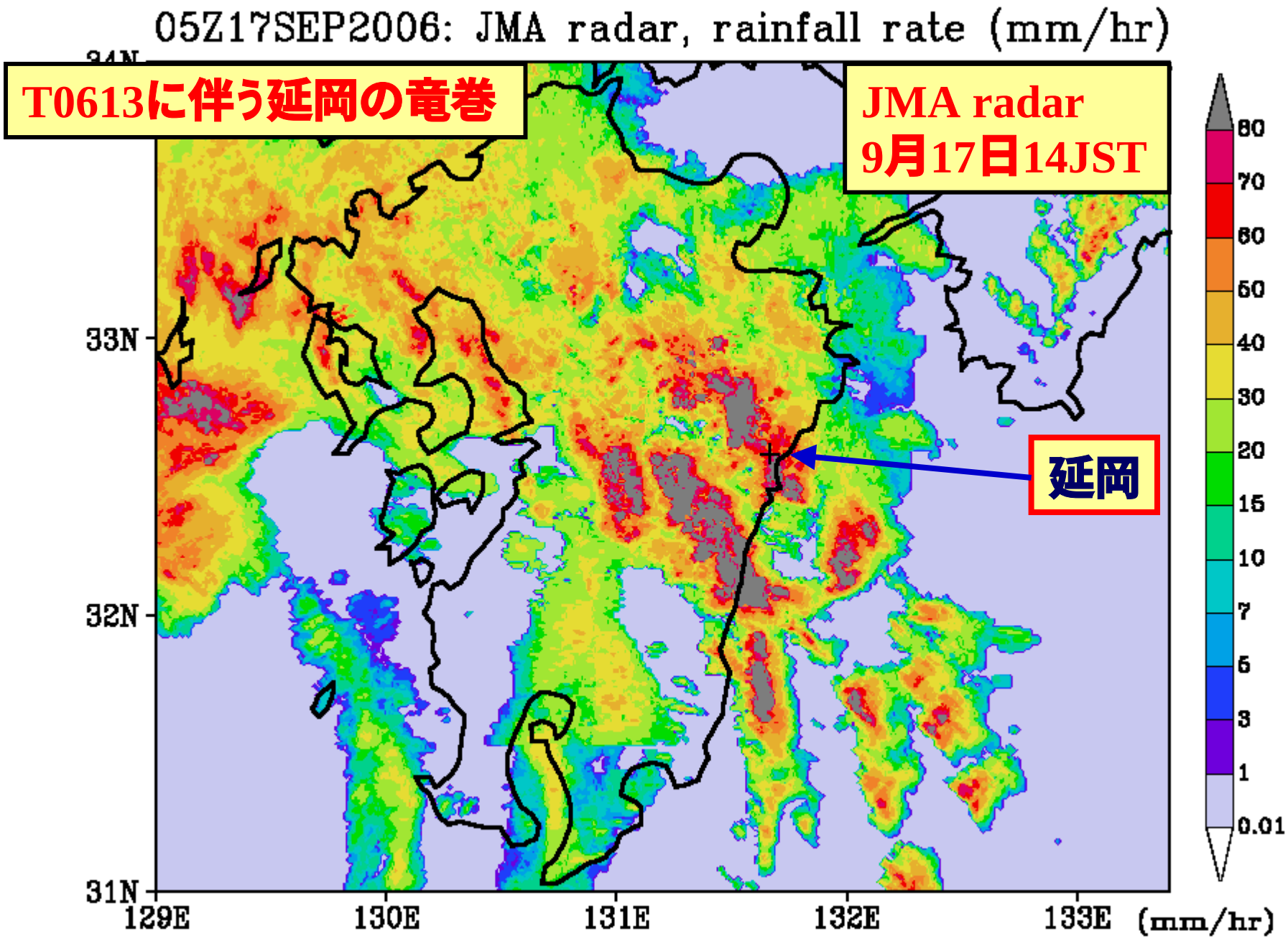


シミュレーションの設定：豊橋の竜巻

domain	48km × 48km × 12km
horizontal grid size	75m
vertical grid size	25 ～ 200m
grid numbers	603 × 603 × 63
integration time	4 hours
time increment	large: 0.5s, small: 0.1s
microphysics	the bulk cold rain type
initial condition	Shionomisaki sounding data at 09JST, 24 September 1999.
initial disturbance	warm bubble
boundary condition	the wave-radiating type
platform	HITACH SR8000, 8nodes

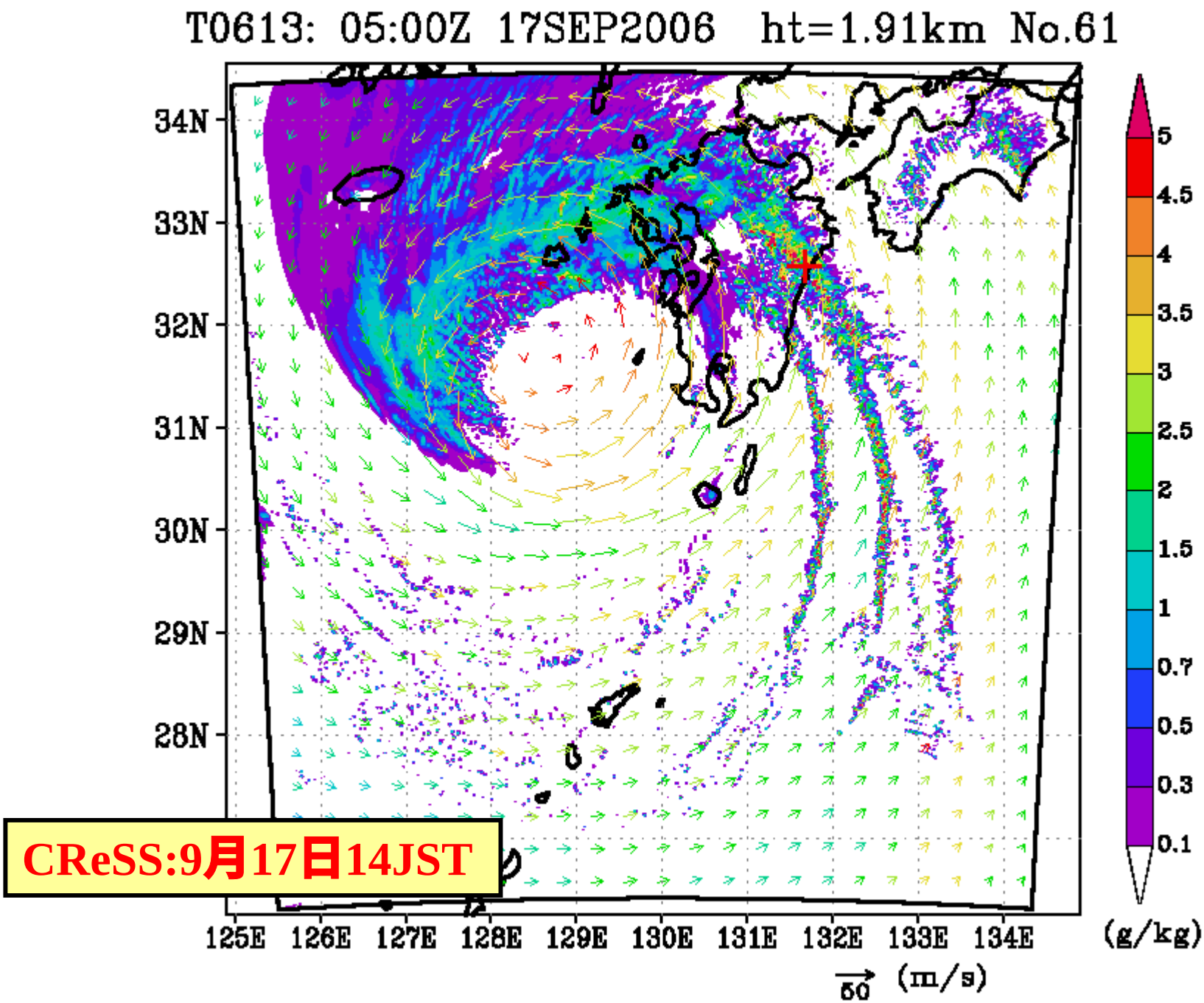

03:16Z24SEP1999 t=11760s, Z=1131.4m
Y (km)
X (km)
30
0.1
0.5
1
1.5
2
3
4
5
6
7 (g/kg)

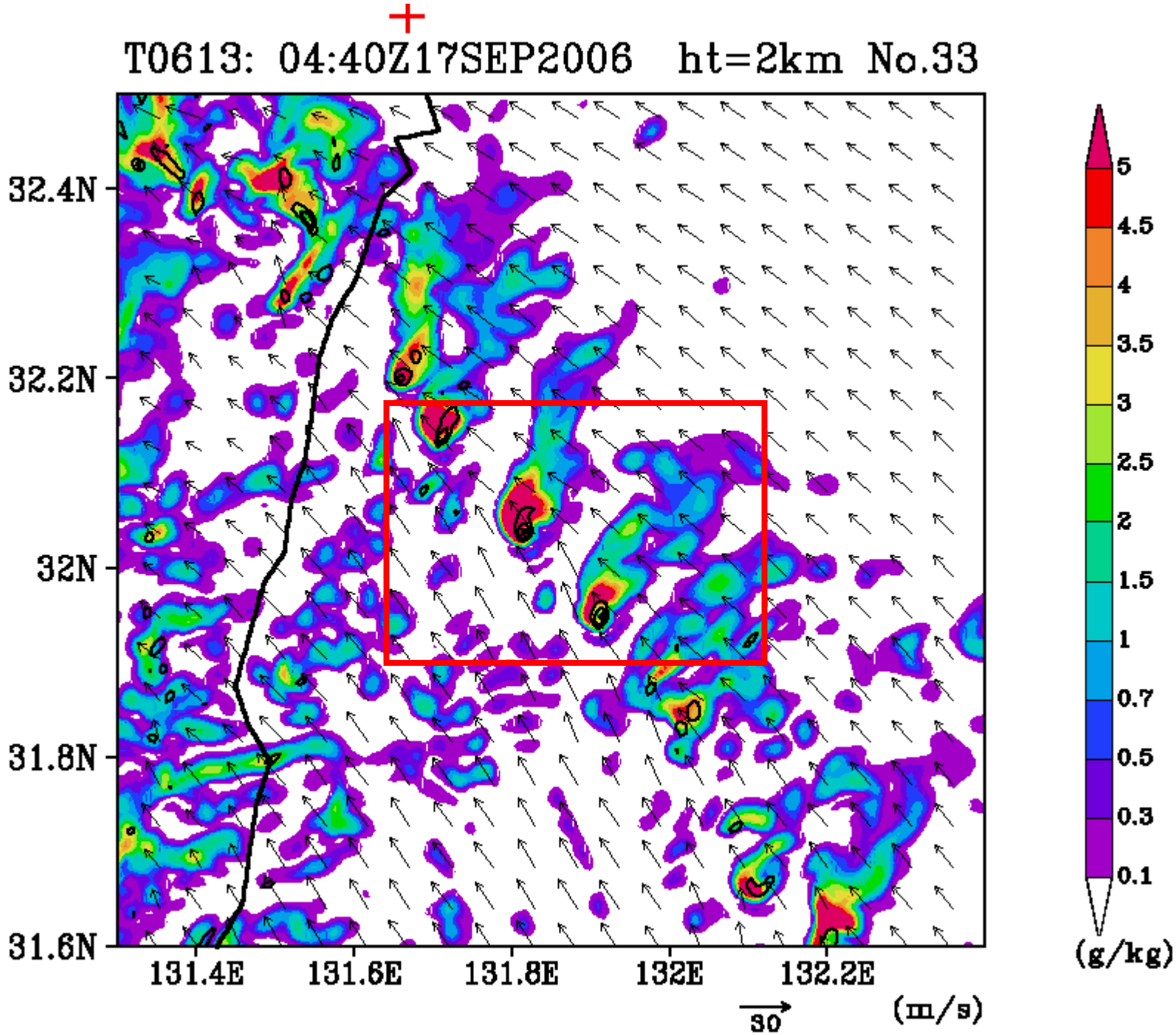

cloud, rain, T= 9780 sec, Y= 7 km
Height (m)
11000
10000
9000
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
X (km)
30
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0.5
0.1
(g/kg)

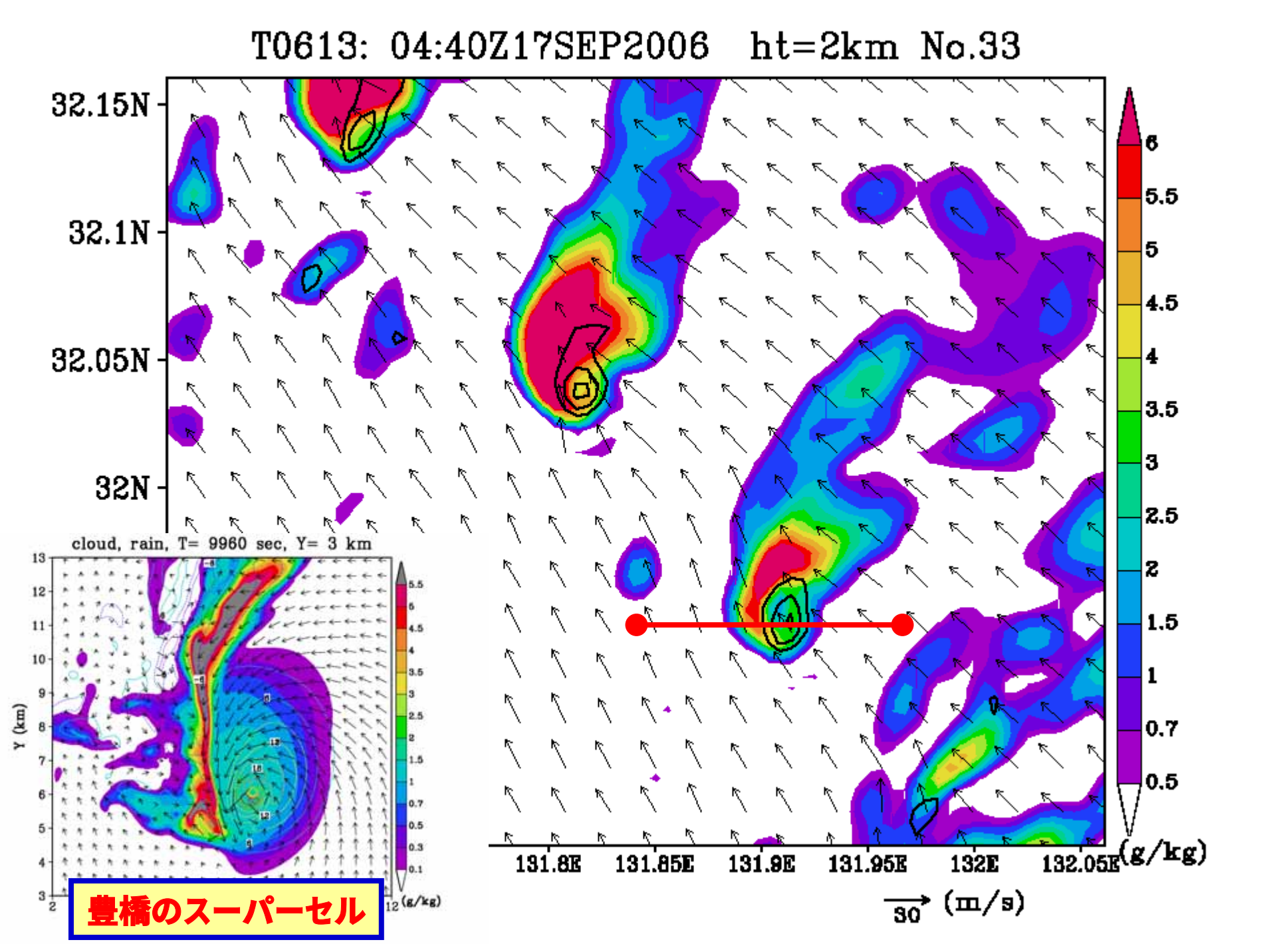

05Z17SEP2006: JMA radar, rainfall rate (mm/hr)
T0613に伴う延岡の竜巻
JMA radar
9月17日14JST
延岡
33N
32N
31N
129E
130E
131E
132E
133E
80
70
60
50
40
30
20
15
10
7
5
3
1
0.01
(mm/hr)

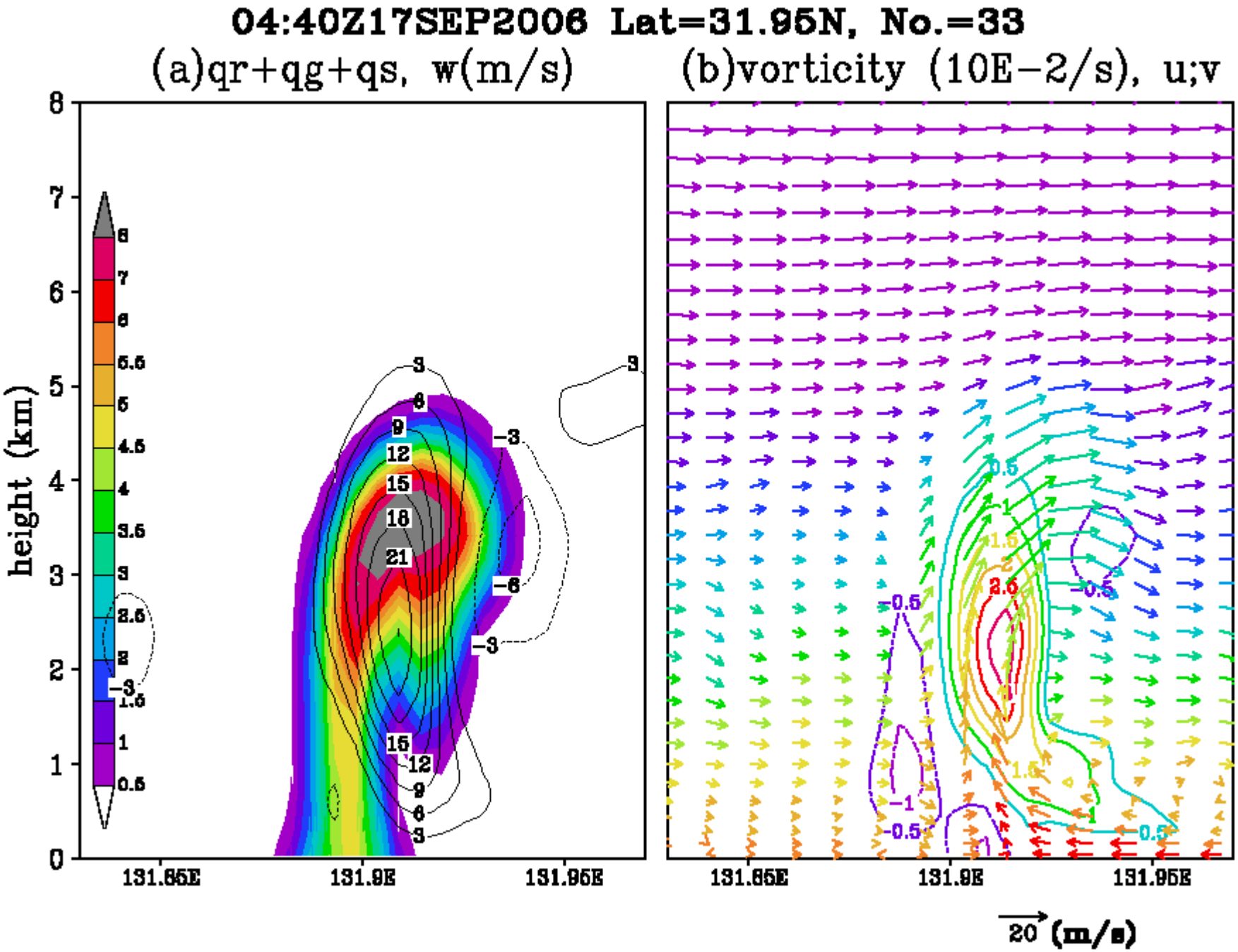
Experimental Design of Typhoon T0613

Domain	H: 896 km × 896 km × V: 20 km
H-gird size	500 m
V-grid size	100 ~ 320 m (stretched)
Grid numbers	H: 1795 × 1795× V: 67
Integration time	6 hours
Time increment	large: 2 sec, small: 0.5 sec
Micro-physics	the bulk cold rain type
Initial condition	JMA Regional Spectral model (40km)
Boundary	JMA Regional Spectral model (40km)
Surface	real topography and observed SST
ES node number	128 nodes (1024 CPU)


T0613: 05:00Z 17SEP2006 ht=1.91km No.61
34N
33N
32N
31N
30N
29N
28N
125E
126E
127E
128E
129E
130E
131E
132E
133E
134E
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.7
0.5
0.3
0.1
(g/kg)
60
(m/s)
CReSS:9月17日14JST

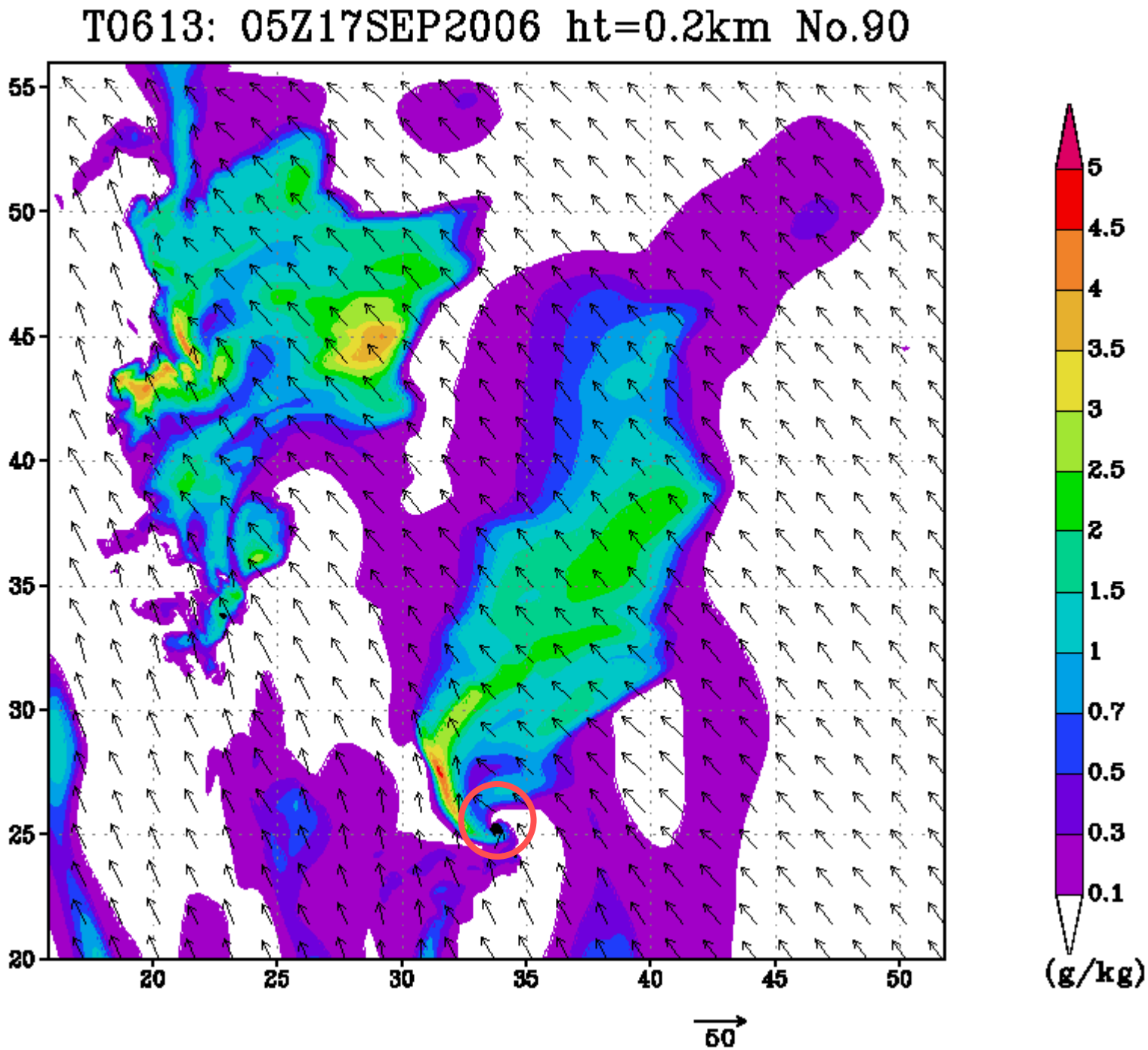

T0613: 04:40Z17SEP2006 ht=2km No.33
32.4N
32.2N
32N
31.8N
31.6N
131.4E
131.6E
131.8E
132E
132.2E
30
(m/s)
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.7
0.5
0.3
0.1
(g/kg)

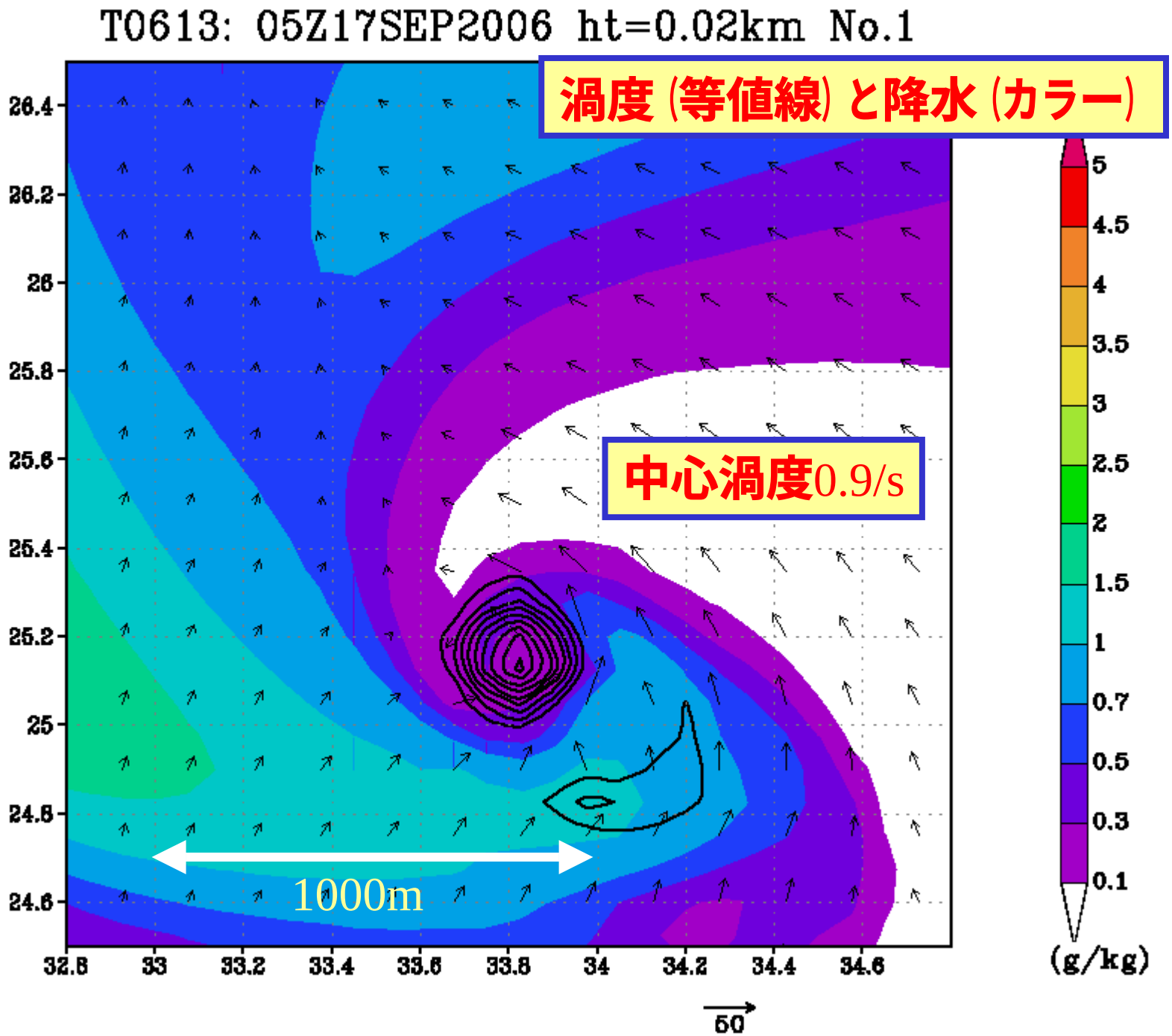

T0613: 04:40Z17SEP2006 ht=2km No.33
32.15N
32.1N
32.05N
32N
131.8E
131.85E
131.9E
131.95E
132E
132.05E
6
5.5
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.7
0.5
(g/kg)
30 (m/s)
cloud, rain, T= 9960 sec, Y= 3 km
Y (km)
(g/kg)
豊橋のスーパーセル

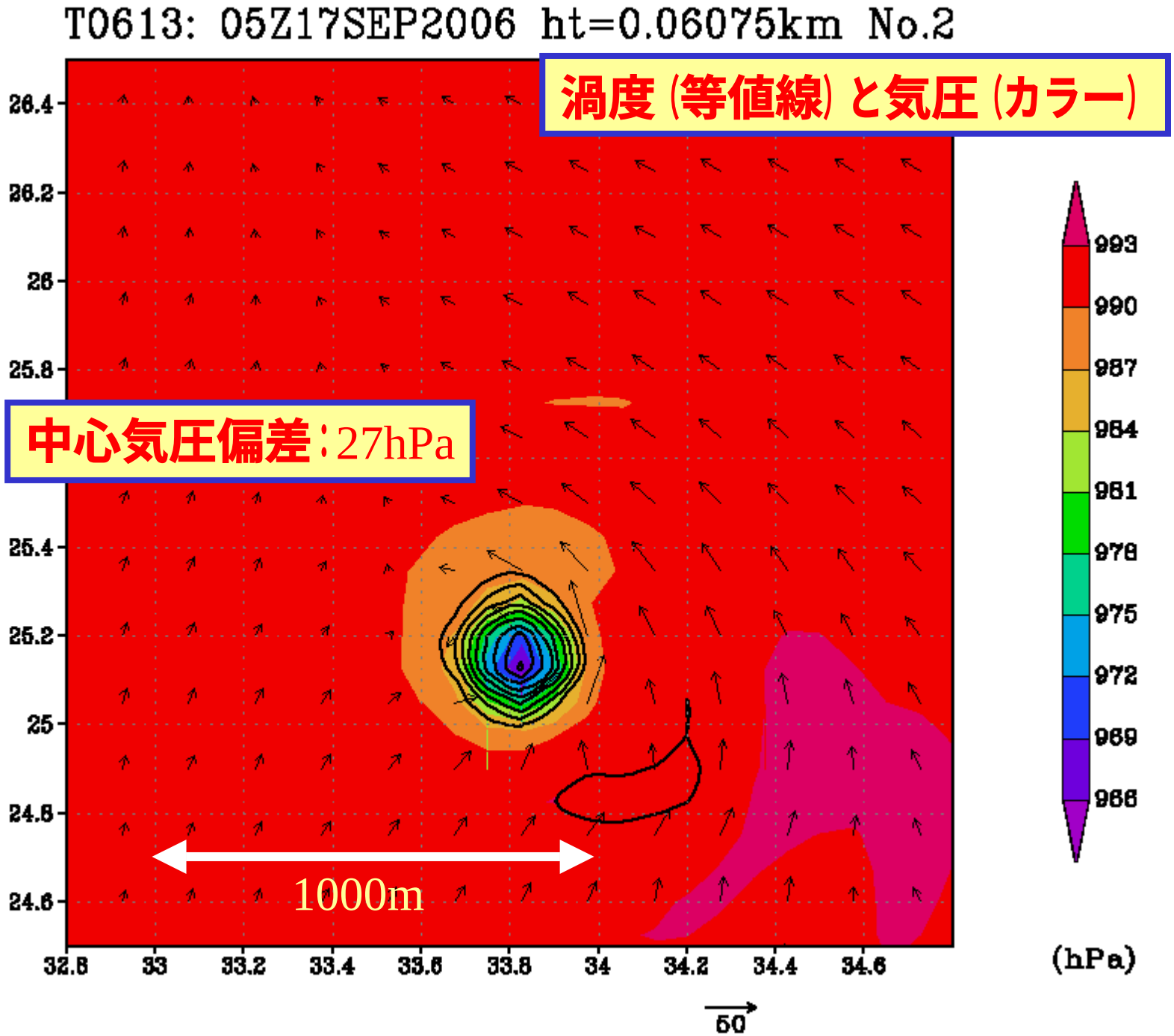

04:40Z17SEP2006 Lat=31.95N, No.=33
(a)qr+qg+qs, w(m/s)
(b)vorticity (10E−2/s), u;v
height (km)
131.85E
131.9E
131.95E
20 (m/s)

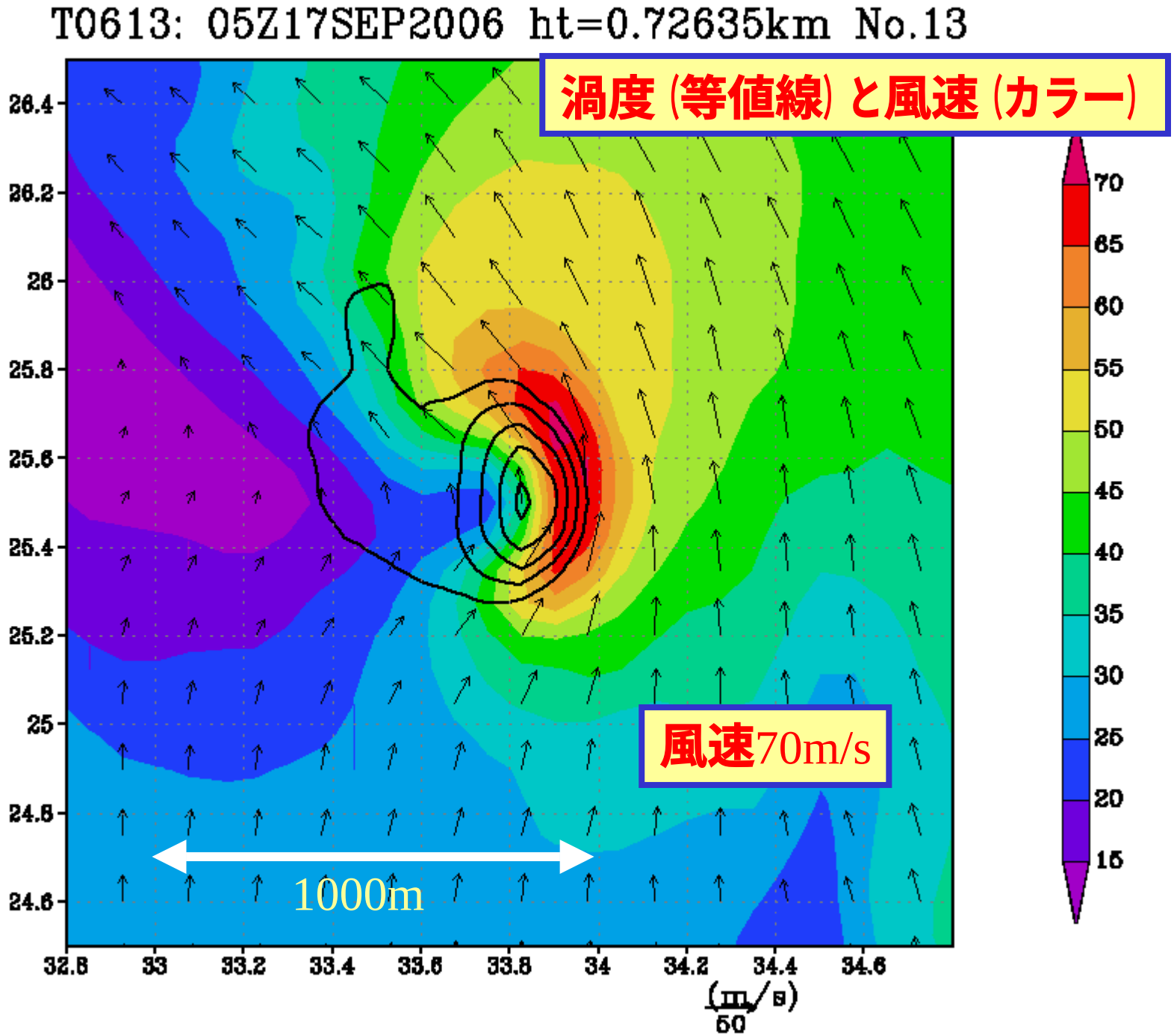
Supercell and tatsumaki in T0613

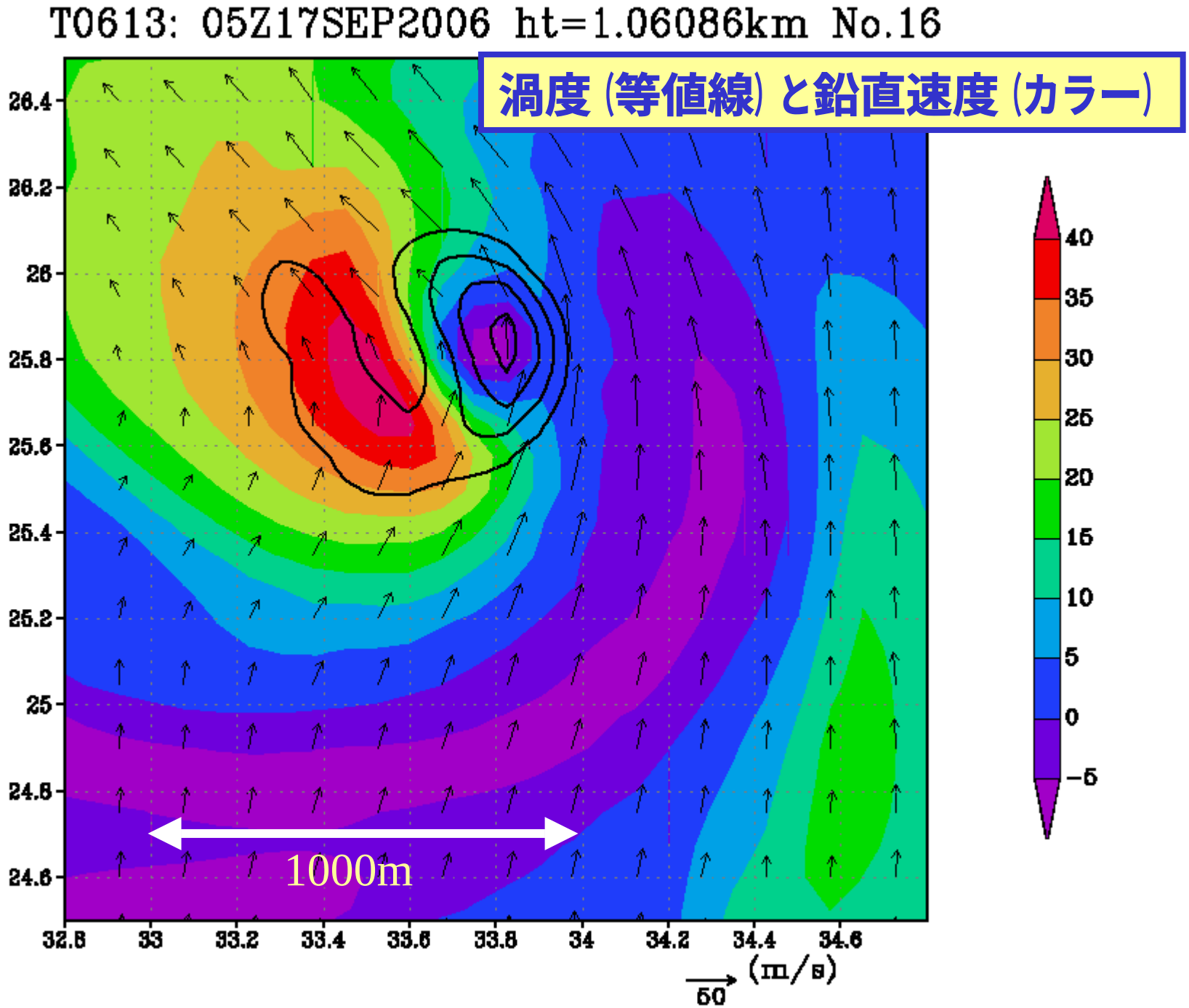
Domain	H: 896 km × 896 km × V: 20 km
H-gird size	75 m
V-grid size	40 ~ 300 m (stretched)
Grid numbers	H: 803 × 803× V: 67
Integration time	6 hours
Time increment	large: 0.5 sec, small: 0.1 sec
Micro-physics	the bulk cold rain type
Initial condition	CReSS 500m simulation output
Boundary	CReSS 500m simulation output
Surface	real topography and observed SST
Computer	HITACHI SR11000 (4nodes)

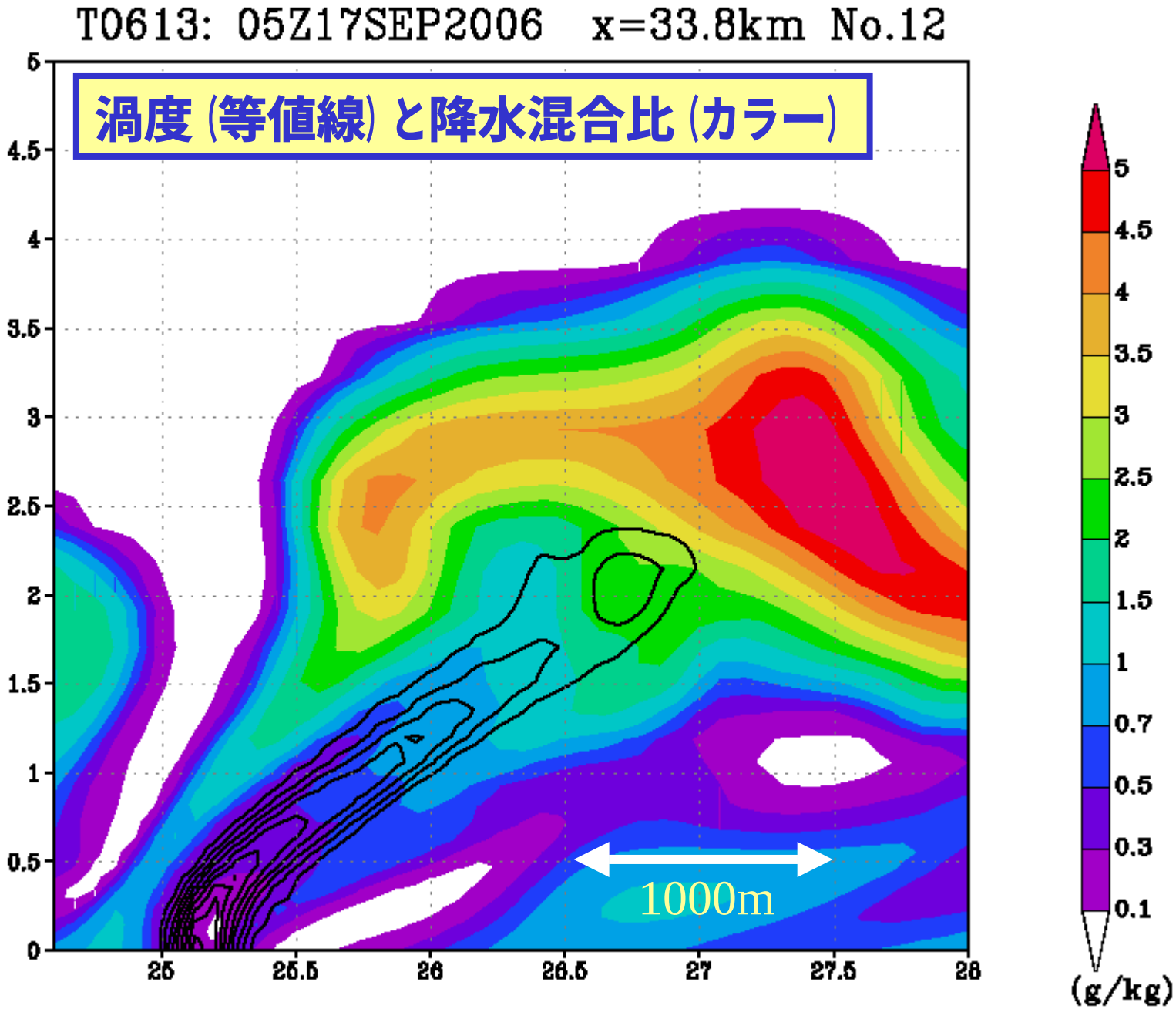

T0613: 05Z17SEP2006 ht=0.2km No.90
55
50
45
40
35
30
25
20
20
25
30
35
40
45
50
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.7
0.5
0.3
0.1
(g/kg)
50

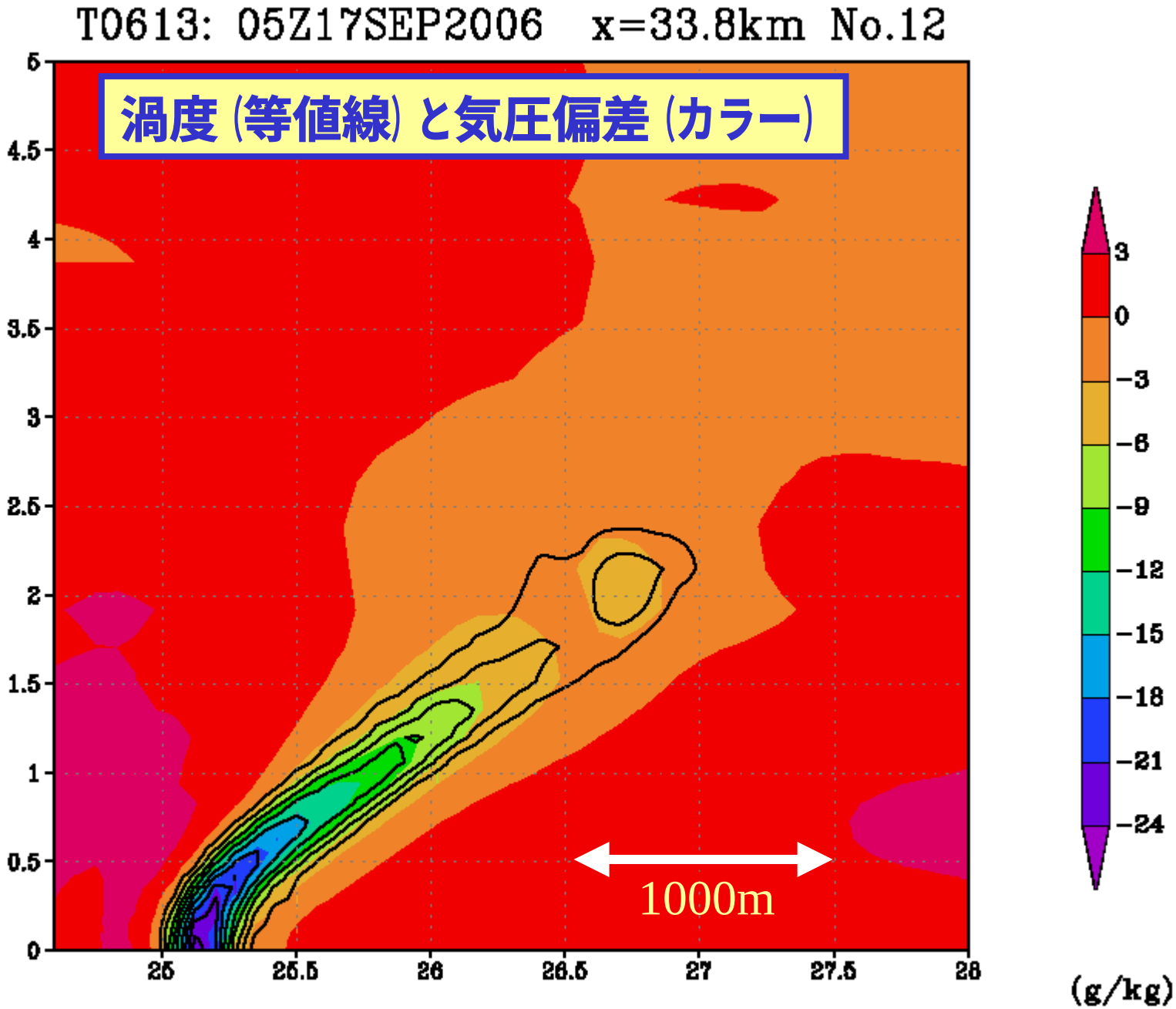

T0613: 05Z17SEP2006 ht=0.02km No.1
渦度（等値線）と降水（カラー）
中心渦度0.9/s
1000m
26.4
26.2
26
25.8
25.6
25.4
25.2
25
24.8
24.6
32.8
33
33.2
33.4
33.6
33.8
34
34.2
34.4
34.6
50
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.7
0.5
0.3
0.1
(g/kg)

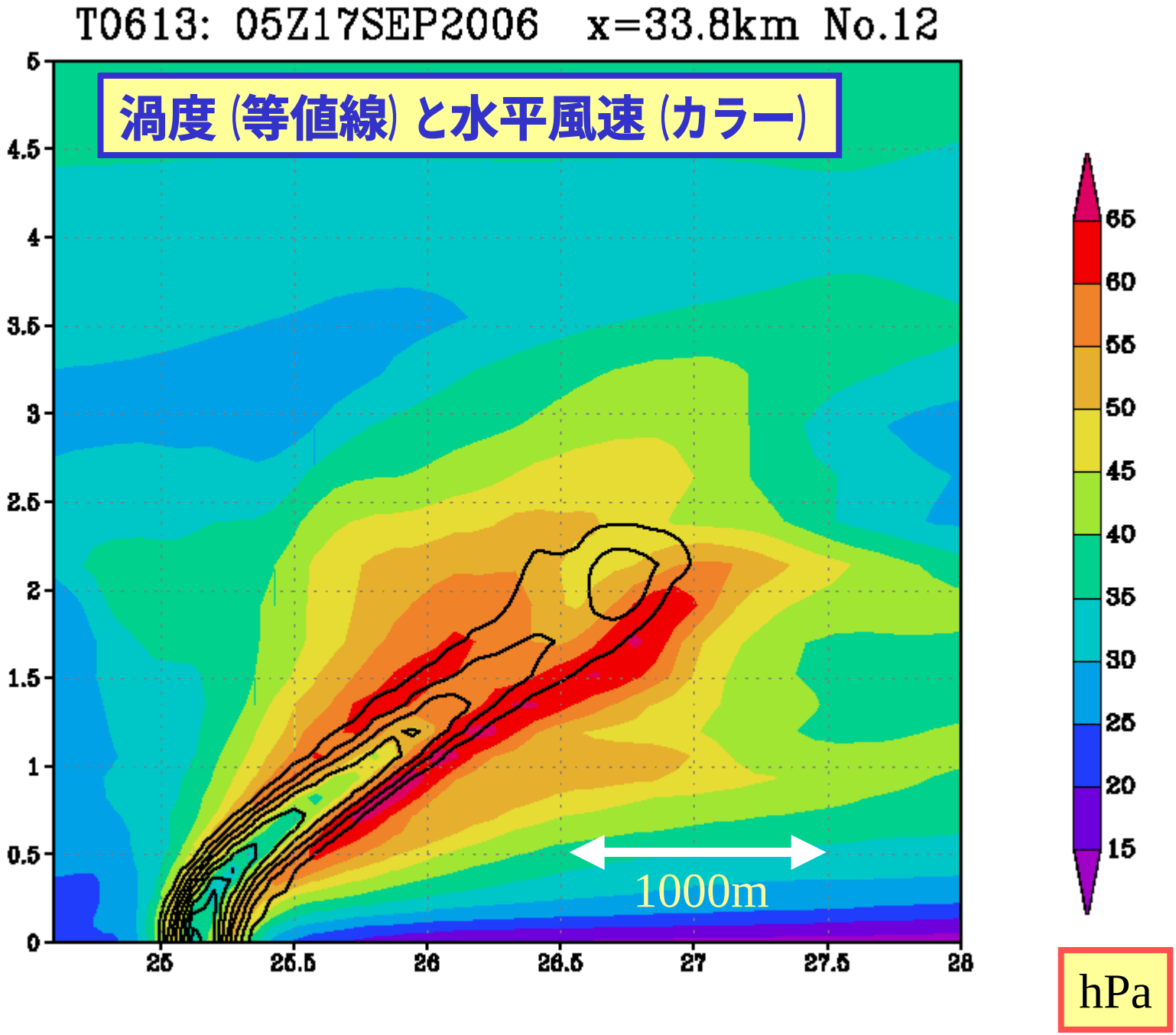

T0613: 05Z17SEP2006 ht=0.06075km No.2
渦度（等値線）と気圧（カラー）
中心気圧偏差：27hPa
1000m
26.4
26.2
26
25.8
25.4
25.2
25
24.8
24.6
32.8
33
33.2
33.4
33.6
33.8
34
34.2
34.4
34.6
993
990
987
984
981
978
975
972
969
966
(hPa)
50

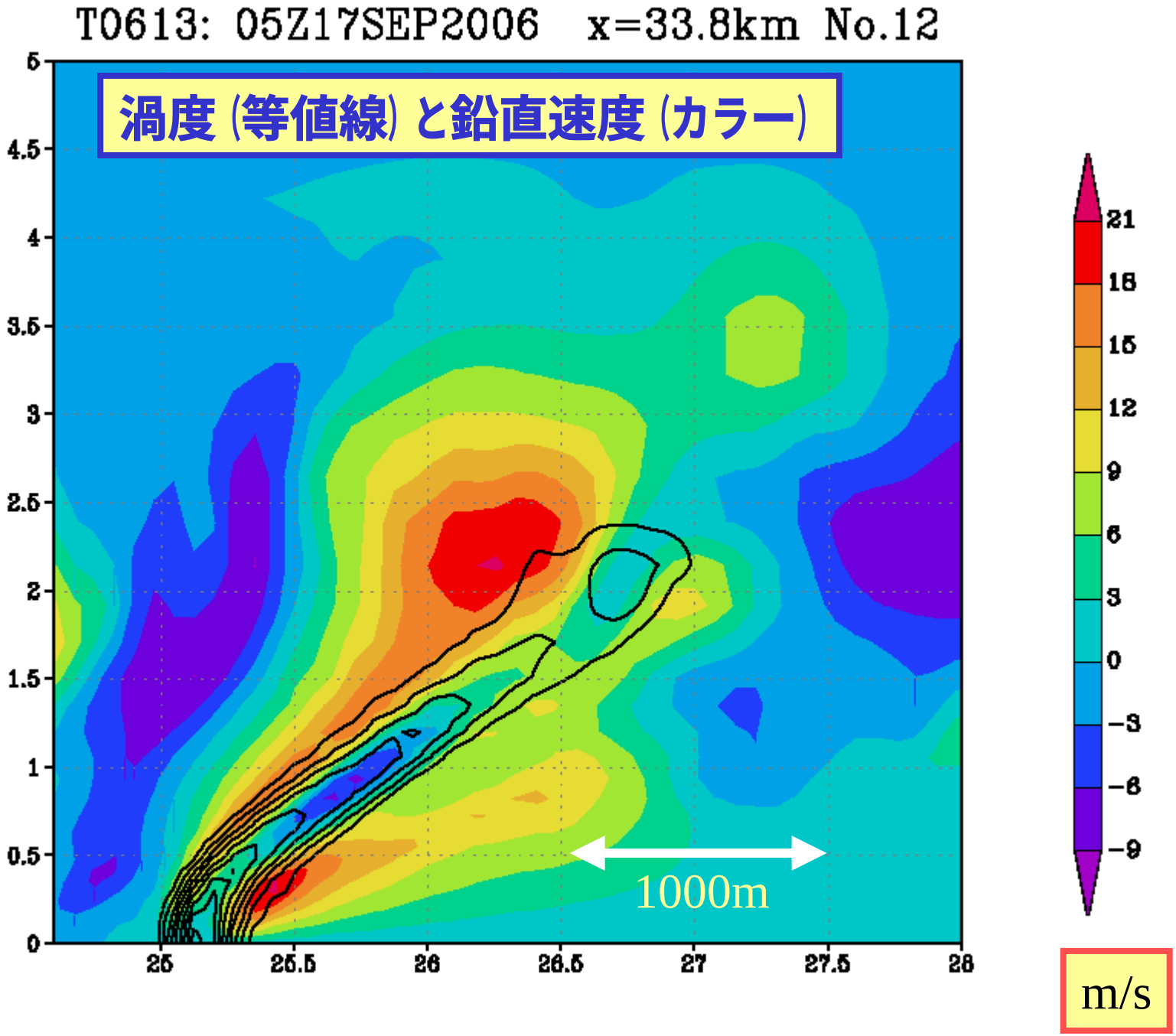

T0613: 05Z17SEP2006 ht=0.72635km No.13
渦度（等値線）と風速（カラー）
風速70m/s
1000m
26.4
26.2
26
25.8
25.6
25.4
25.2
25
24.8
24.6
32.8
33
33.2
33.4
33.6
33.8
34
34.2
34.4
34.6
(m/s)
50
70
65
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15

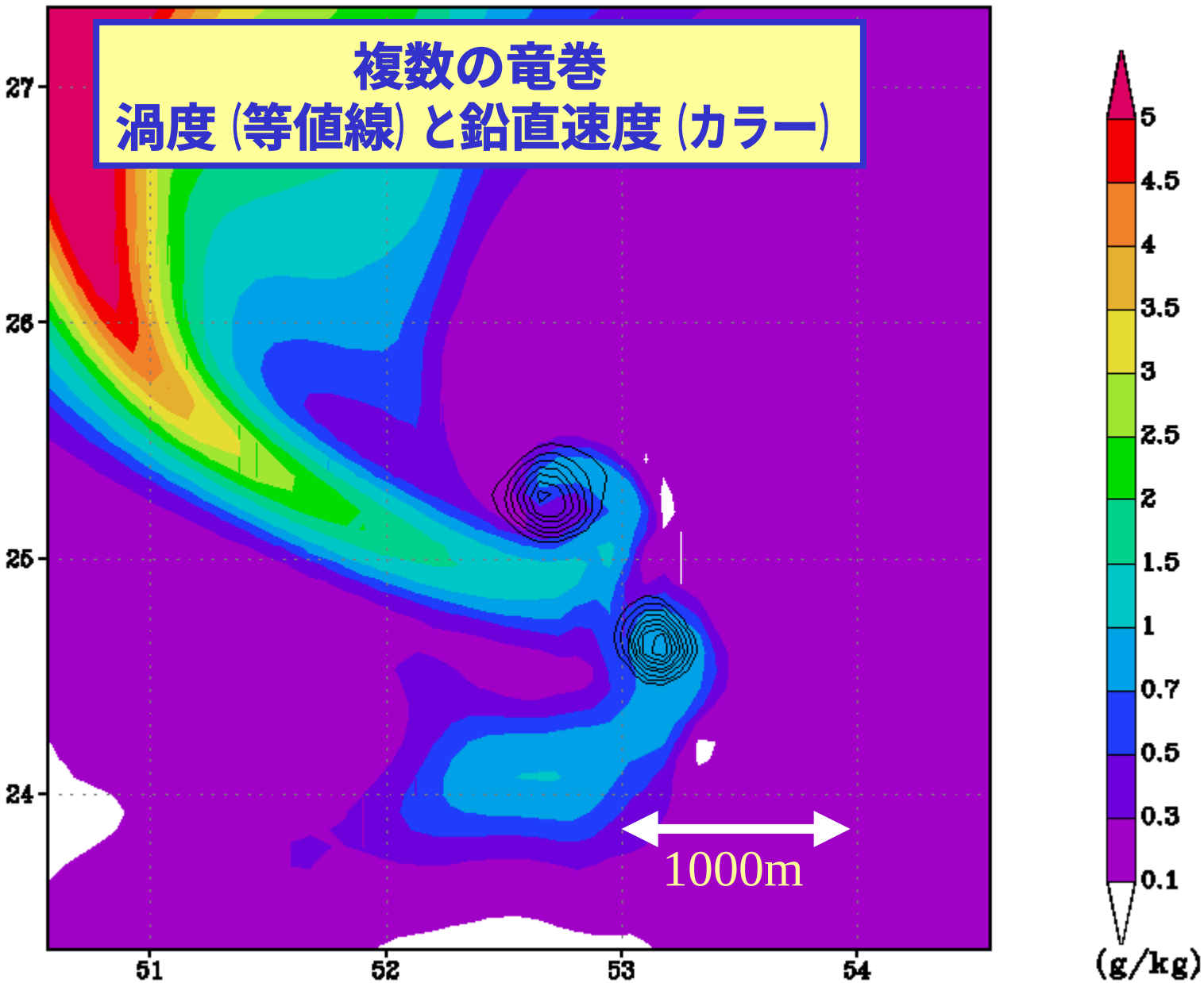

T0613: 05Z17SEP2006 ht=1.06086km No.16
渦度 (等値線) と鉛直速度 (カラー)
26.4
26.2
26
25.8
25.6
25.4
25.2
25
24.8
24.6
32.8
33
33.2
33.4
33.6
33.8
34
34.2
34.4
34.6
1000m
50
(m/s)
40
35
30
25
20
15
10
5
0
−5


T0613: 05Z17SEP2006 x=33.8km No.12
渦度 (等値線) と降水混合比 (カラー)
1000m
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
25
25.5
26
26.5
27
27.5
28
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.7
0.5
0.3
0.1
(g/kg)


T0613: 05Z17SEP2006 x=33.8km No.12
渦度 (等値線) と気圧偏差 (カラー)
1000m
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
25
25.5
26
26.5
27
27.5
28
3
0
−3
−6
−9
−12
−15
−18
−21
−24
(g/kg)

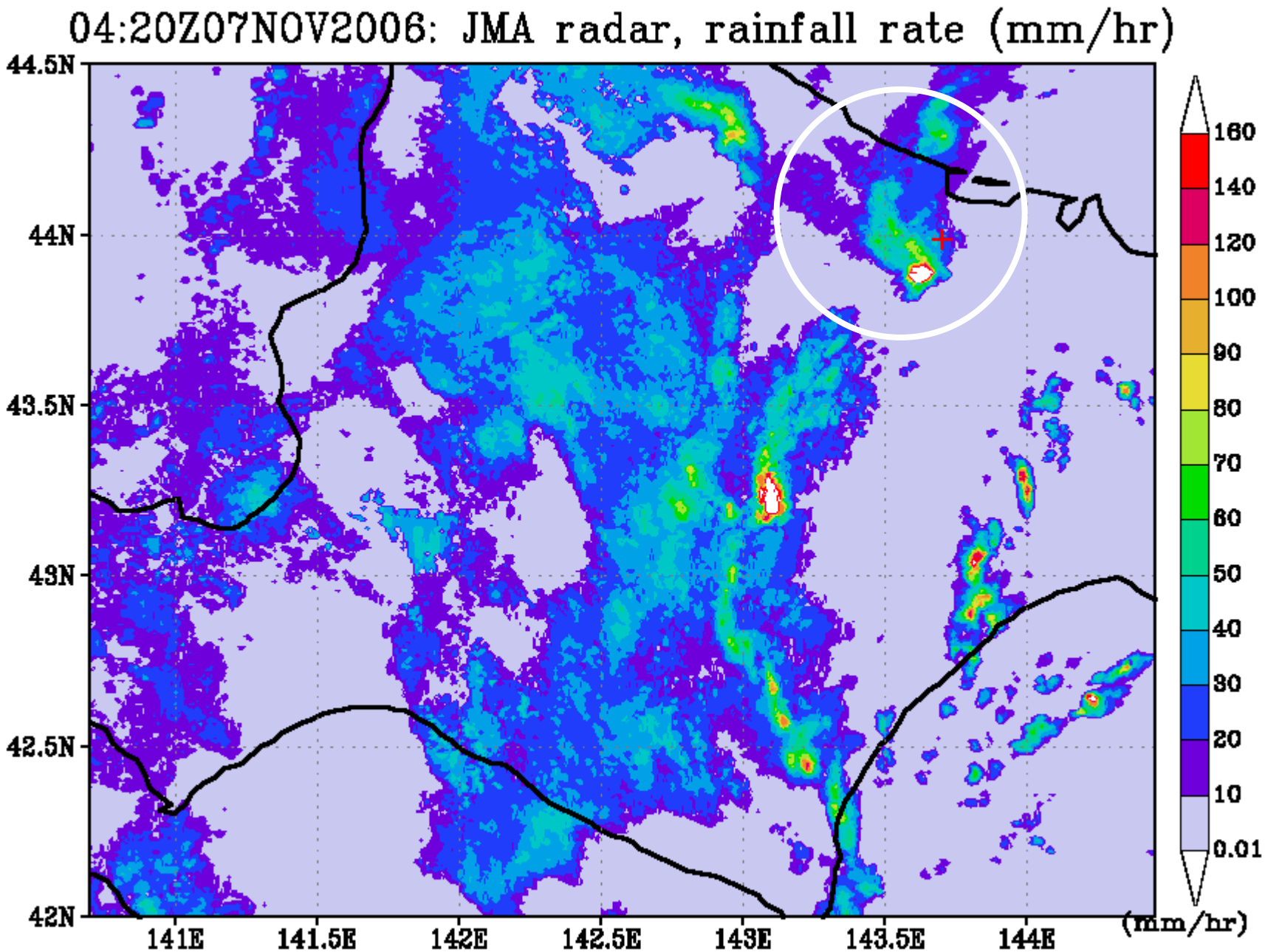

T0613: 05Z17SEP2006 x=33.8km No.12
渦度 (等値線) と水平風速 (カラー)
1000m
hPa
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
25
25.5
26
26.5
27
27.5
28
65
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15

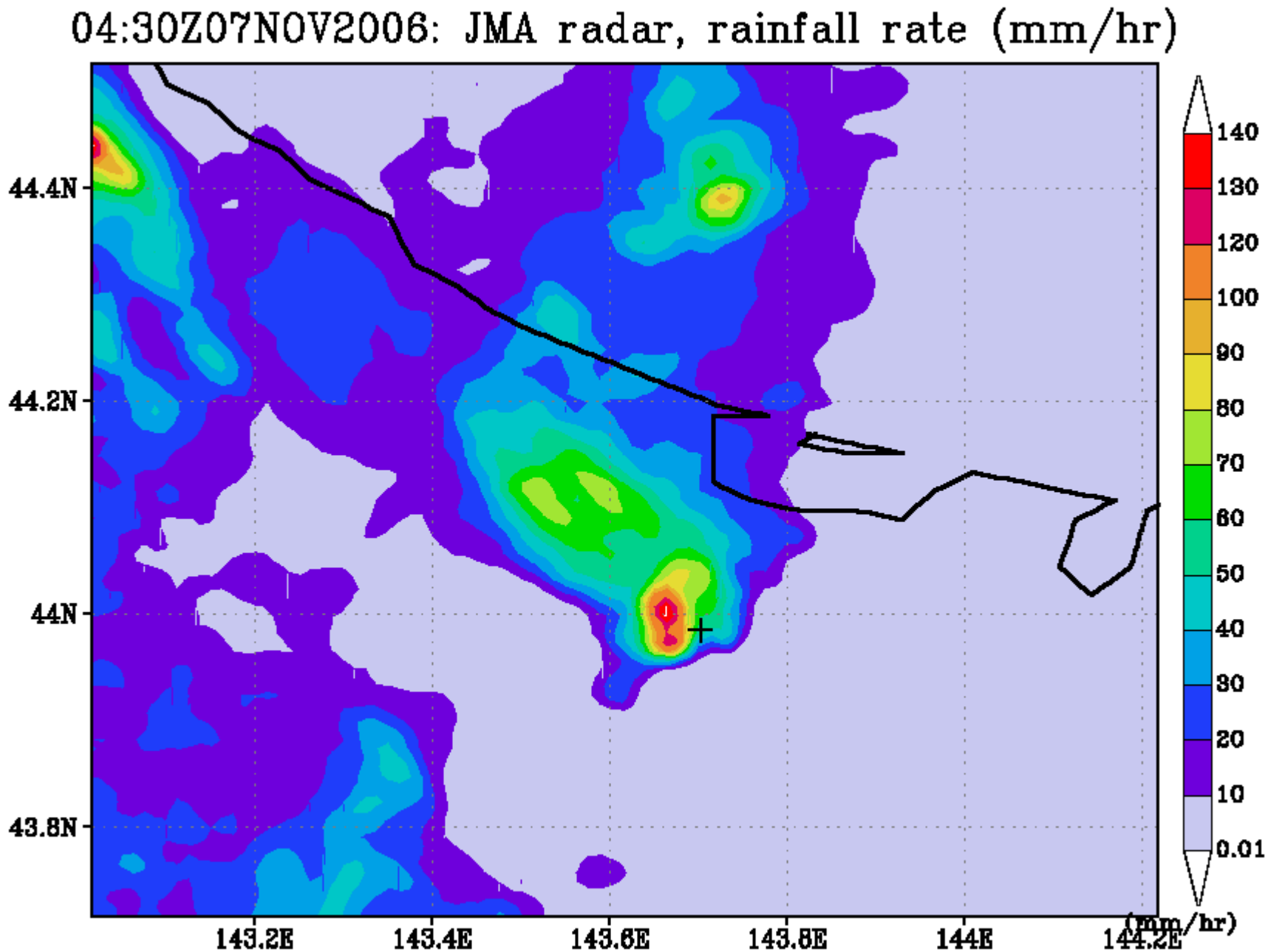

T0613: 05Z17SEP2006 x=33.8km No.12
渦度 (等値線) と鉛直速度 (カラー)
1000m
m/s
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
25
25.5
26
26.5
27
27.5
28
21
18
15
12
9
6
3
0
−3
−6
−9

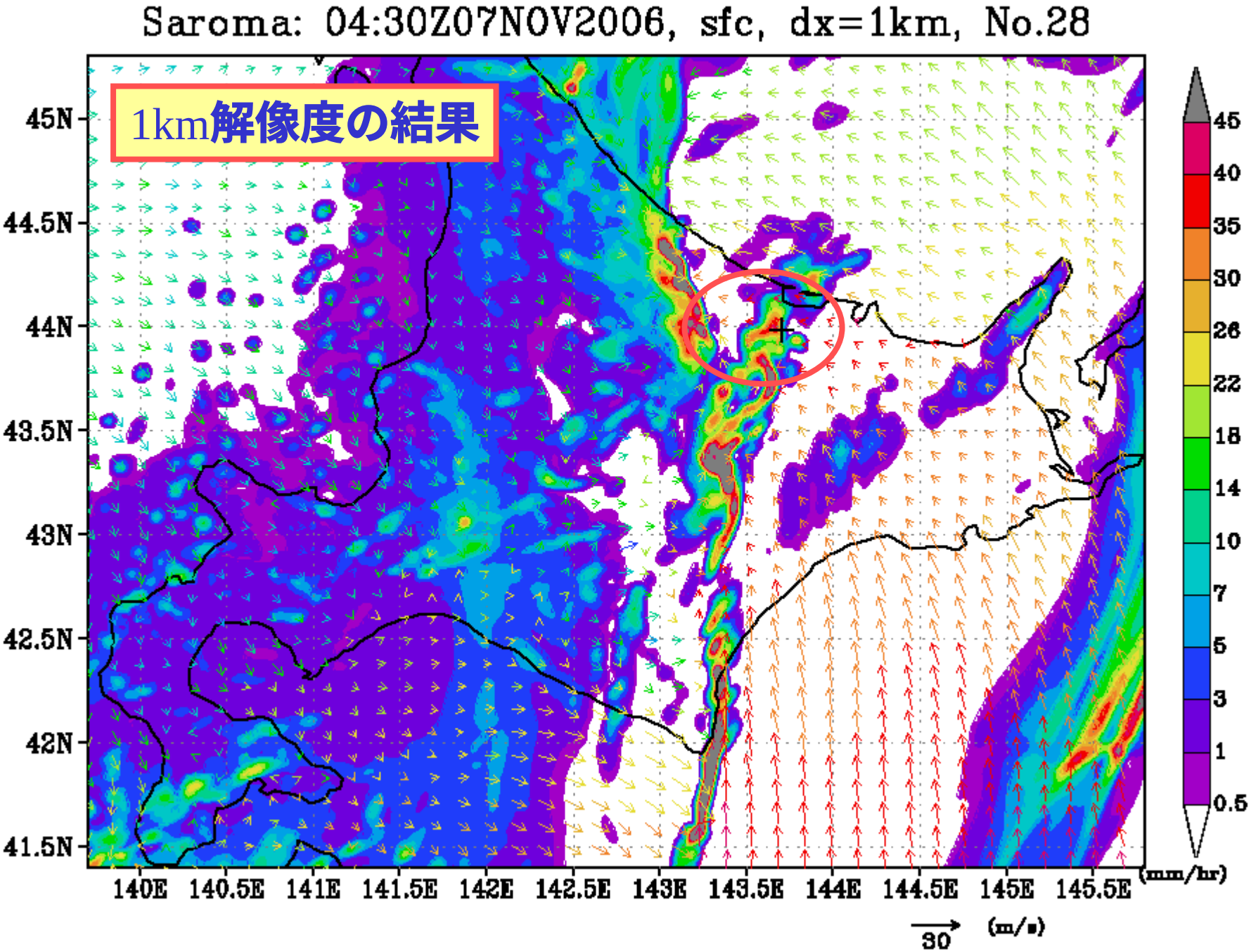

複数の竜巻
渦度 (等値線) と鉛直速度 (カラー)
27
26
25
24
51
52
53
54
1000m
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.7
0.5
0.3
0.1
(g/kg)

寒冷前線の暖域の竜巻

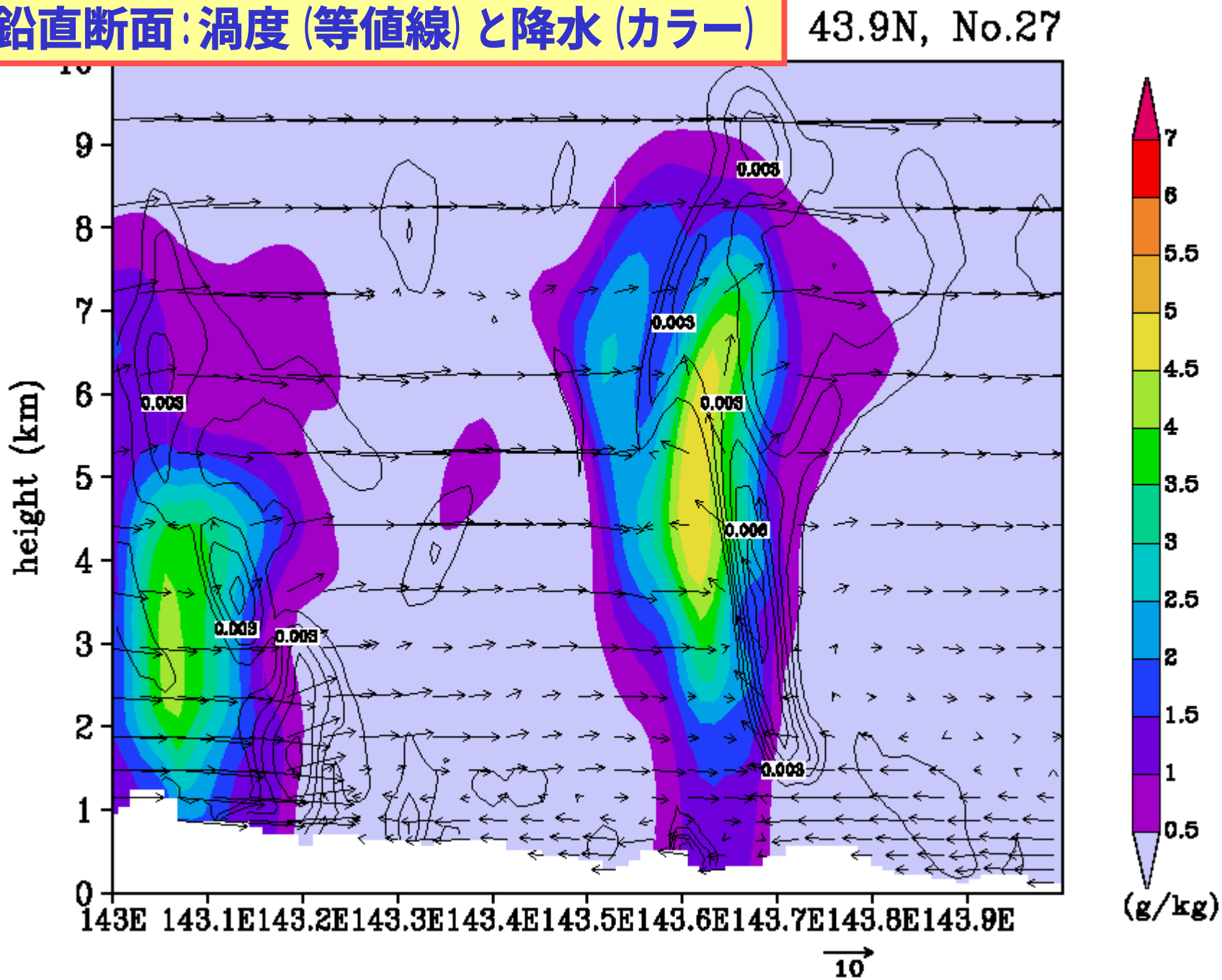
2006年11月7日, 北海道佐呂間町の竜巻


04:20Z07NOV2006: JMA radar, rainfall rate (mm/hr)
44.5N
44N
43.5N
43N
42.5N
42N
141E
141.5E
142E
142.5E
143E
143.5E
144E
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0.01
(mm/hr)


04:30Z07NOV2006: JMA radar, rainfall rate (mm/hr)
44.4N
44.2N
44N
43.8N
143.2E
143.4E
143.6E
143.8E
144E
144.2E
140
130
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0.01
(mm/hr)

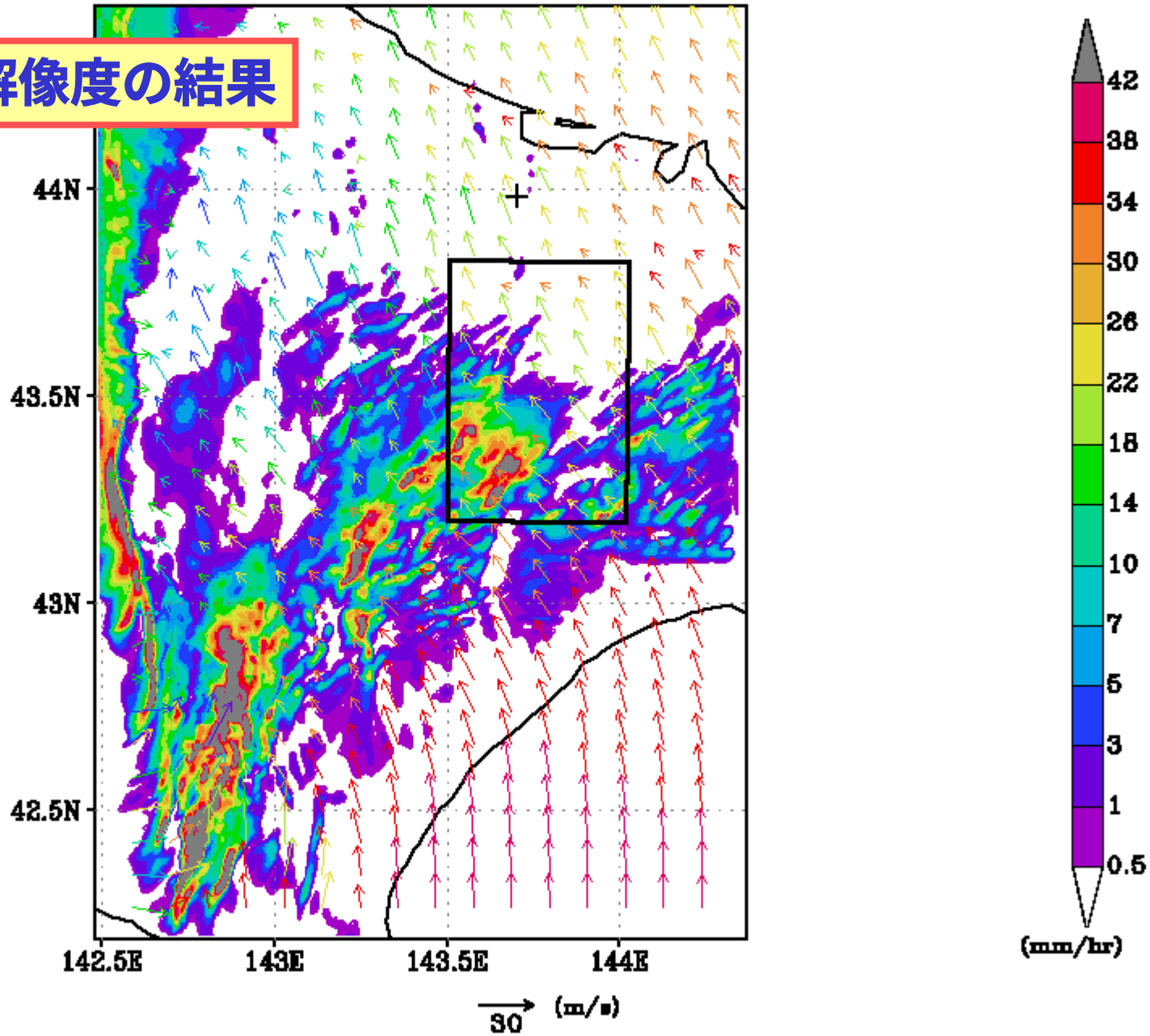

Saroma: 04:30Z07NOV2006, sfc, dx=1km, No.28
1km解像度の結果
45N
44.5N
44N
43.5N
43N
42.5N
42N
41.5N
140E
140.5E
141E
141.5E
142E
142.5E
143E
143.5E
144E
144.5E
145E
145.5E
45
40
35
30
26
22
18
14
10
7
5
3
1
0.5
(mm/hr)
30
(m/s)

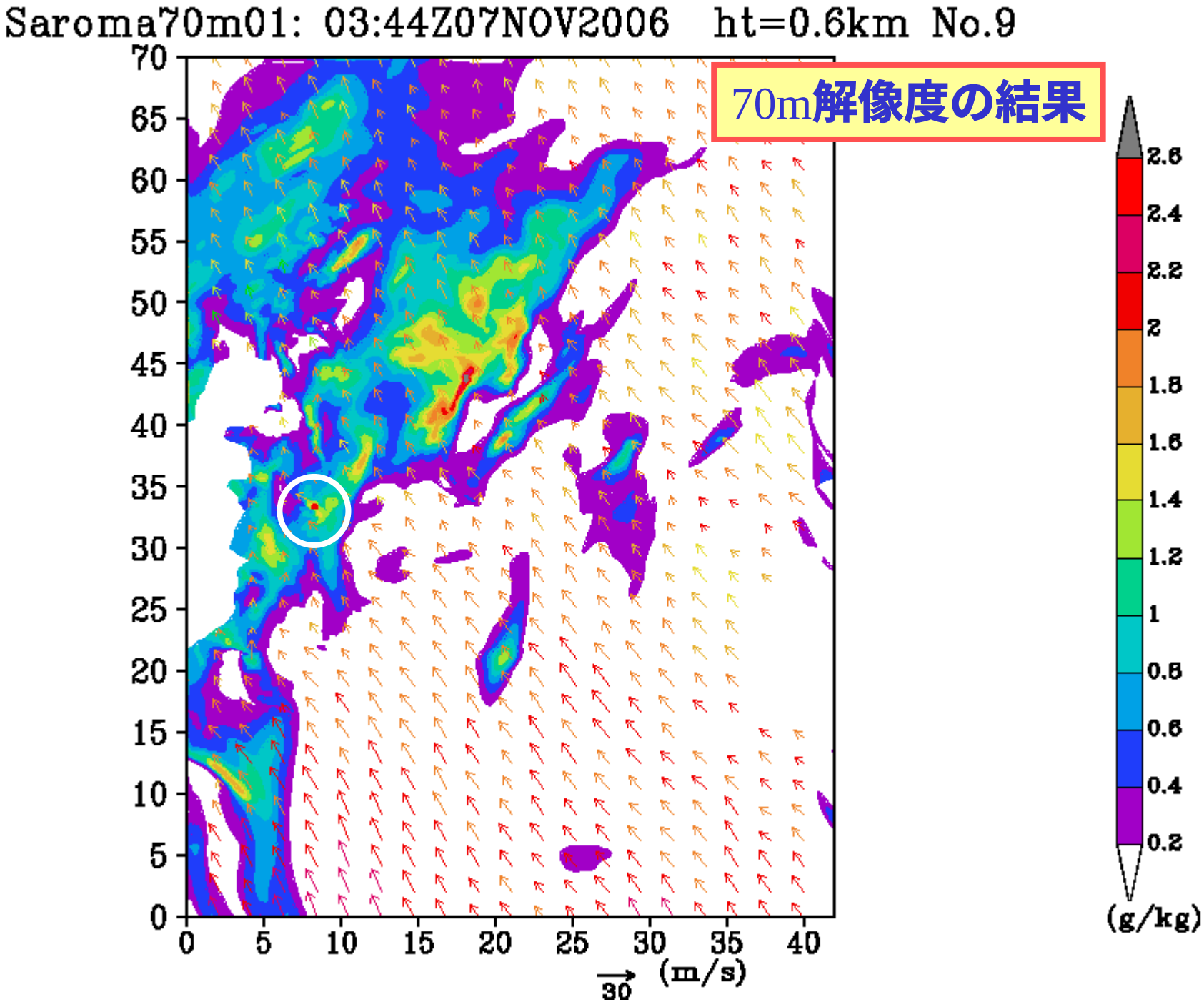
鉛直断面：渦度（等値線）と降水（カラー）



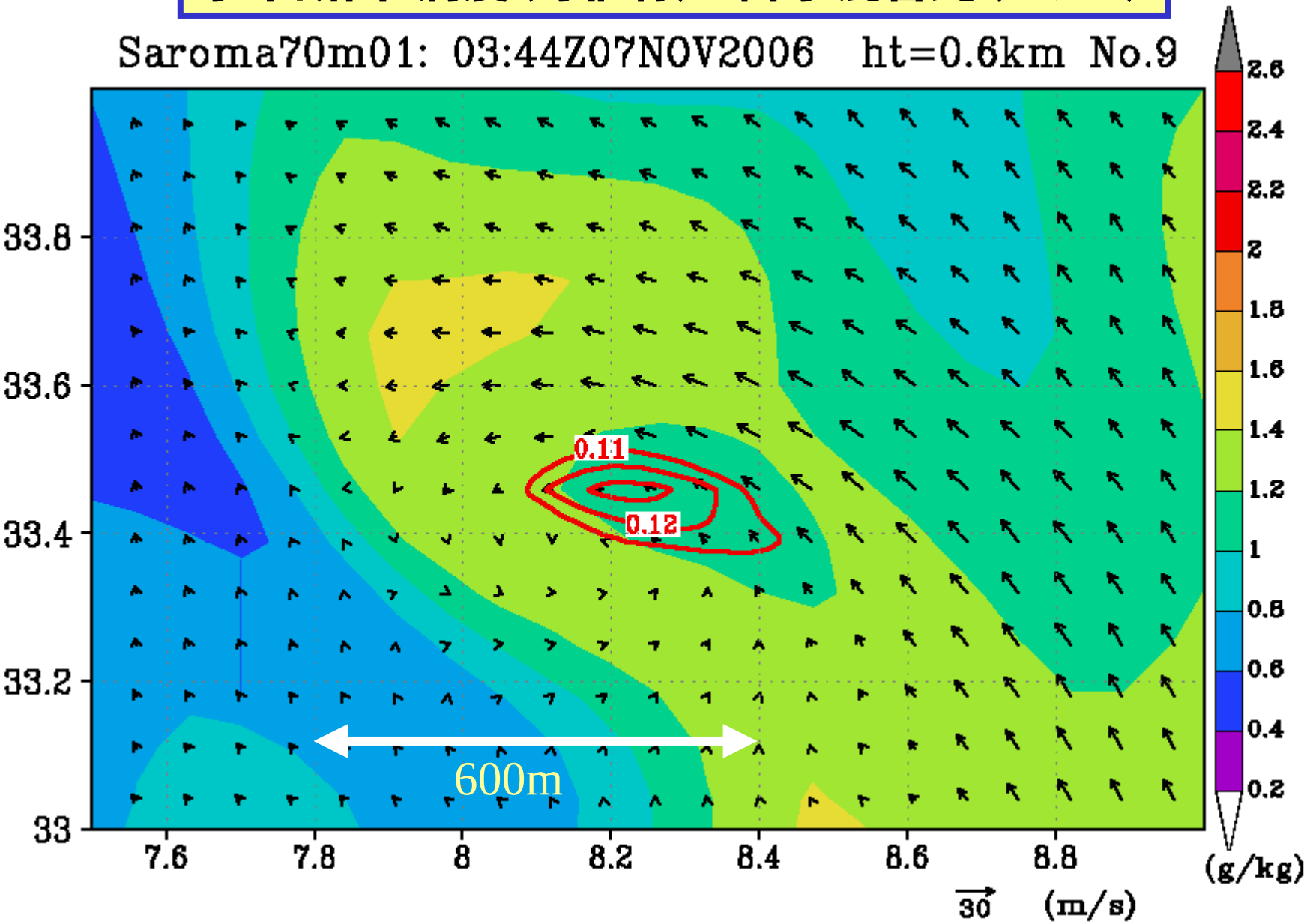
saroma250m02: 03:20Z07NOV2006, sfc, dx=250m, No.21

250m解像度の結果

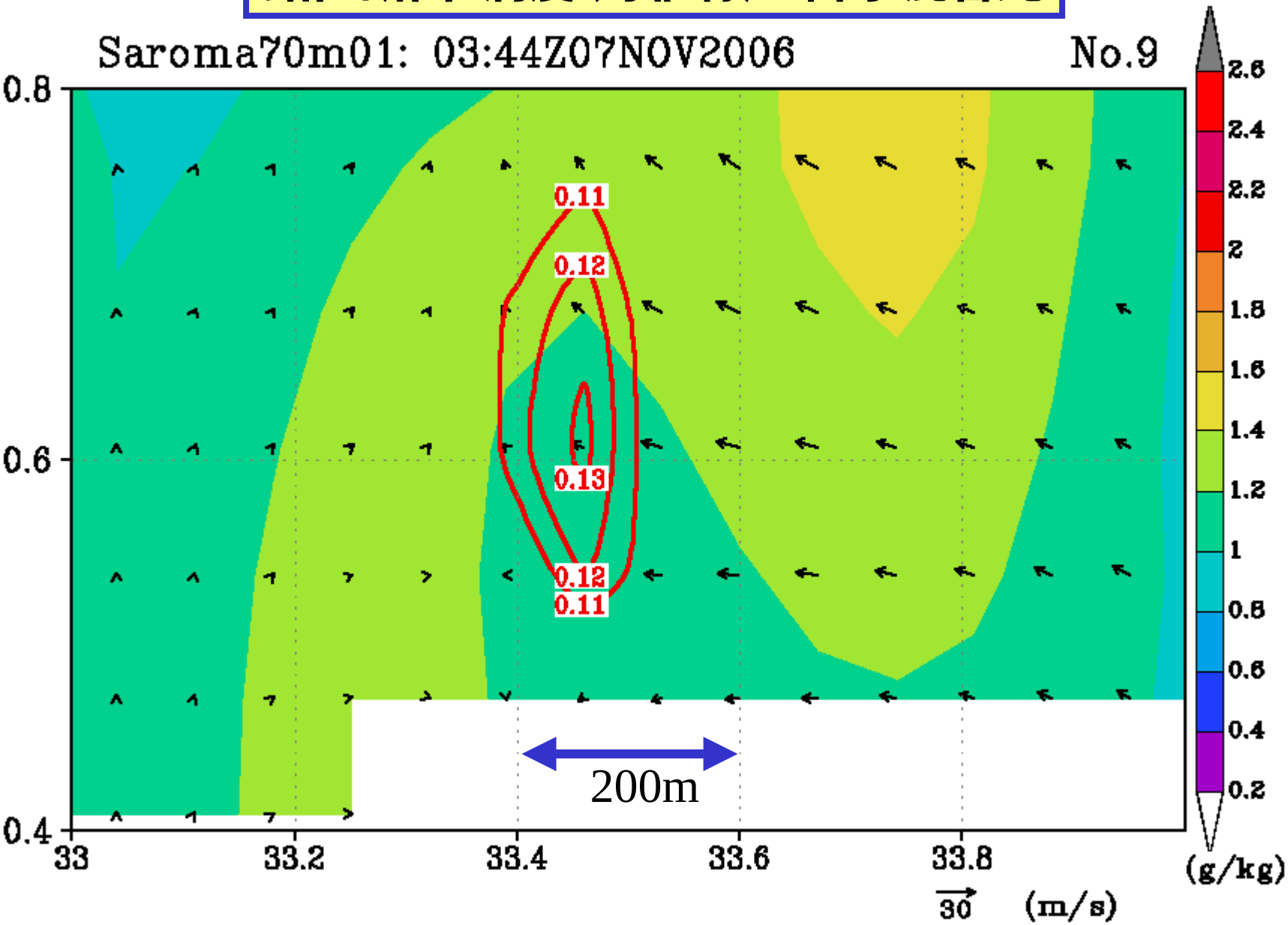



Saroma70m01: 03:44Z07NOV2006 ht=0.6km No.9
70m解像度の結果
70
65
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
0
5
10
15
20
25
30
35
40
30
(m/s)
2.6
2.4
2.2
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
(g/kg)

水平断面：渦度（等値線）と降水混合比（カラー）



鉛直断面：渦度（等値線）と降水混合比



1. 超高解像度気象シミュレーションを行うため、雲解像モデル CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) を開発している。これを用いて台風、スーパーセル、竜巻のシミュレーションを行った。
2. 1999年の豊橋の竜巻と2006年の延岡の竜巻は、ともに台風の東側の外域帯で発生した。前者について、スーパーセルとその南端部で次々と発生する竜巻がシミュレーションされた。
3. T0613のレインバンドがスーパーセルの列で構成され、それらの積乱雲の一つが延岡の竜巻をもたらした親雲（メソサイクロンを含む）となっていることを示した（竜巻予測の可能性）。
4. 75mの解像度で、レインバンドを構成するスーパーセルの一つに「釣り針状構造」がみられ、その付近に竜巻がシミュレーションされた。その直径は300〜400m、渦度は0.9/s、気圧偏差は24hPa 以上であった。
5. 2006年11月の北海道佐呂間町の竜巻についても予報実験を行った。この竜巻をもたらした積乱雲はマルチセル（？）。実験では渦度0.1/sの小規模な渦が再現され、竜巻の再現可能性を示唆した。

竜巻研究の課題と方向性

- 雲解像モデルを用いて、竜巻そのもののシミュレーションが可能になりつつある。
- 地球シミュレータで、より大きな計算領域で、より高解像度の実験を行い、大規模場（前線や台風など）、積乱雲、さらに竜巻をシミュレーションする。＝＞竜巻の発生メカニズム、雲との関係などを解明。
- より多数の事例について実験し、ドップラーレーダー観測との比較・検証が必要。
- 雲と竜巻の関係を明らかにし、雲を予測することで竜巻ポテンシャルを予測する方法を確立する。
- 予測にはモデルとレーダの相補的利用が不可欠。
- 温暖化で竜巻の被害は増加する。＝＞防災対策をする。温暖化対策をする。

この発表内容はＨＰで公開予定(近日)：
URL:http://rain.hyarc.nagoya-u.ac.jp/~tsuboki/

Thank you !!

CReSS2.2公開中。利用目的、国籍、営利･非営利を問わず利用可能。モデルの経験も不問。興味のある方は坪木(名古屋大学地球水循環研究センター)まで。