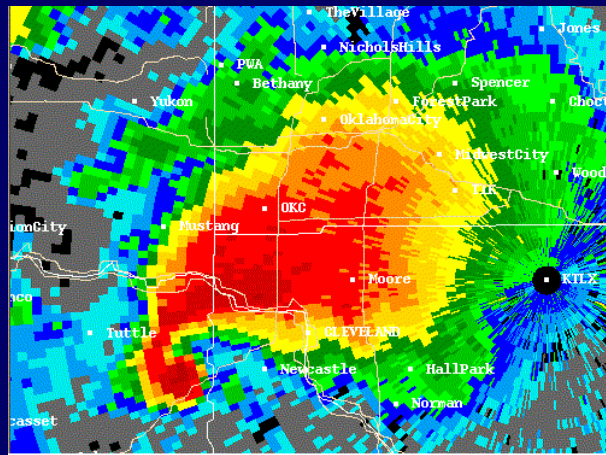


わが国における竜巻の発生状況と これまでの研究の取り組みについて



東京大学海洋研究所 海洋大気力学分野

新野 宏

2006年9月17日延岡市の竜巻

死者3名、負傷者143名

1957年11月10日長崎県厳原市の
竜巻(死者6名)以来最多の死者

災害救助法適用



2006年11月7日佐呂間町の竜巻

死者9名、負傷者26名
(11月8日現在)

1941年11月28日愛知県豊橋市の
竜巻(死者12名)以来最多の死者

災害救助法適用



本日の講演内容

1. 竜巻の定義
2. わが国の竜巻の発生状況
3. 竜巻に関する理解の現状
 - 1) 渦の特性・構造
 - 2) 発生機構
4. まとめ

1. 竜巻の定義

積雲または積乱雲から垂れ下がる柱状または漏斗状の雲を伴う激しい鉛直軸の渦（気象庁観測指針）



1964年2月1日伊豆大島近海に発生した海上の竜巻(宮内・宮内,2002)

塵旋風

- ・晴天日の日中、裸地や砂漠で発生する激しい渦
- ・しばしば巻き上げた砂塵で可視化される
- ・校庭で発生し運動会などのテントを飛ばす



<http://www.inflowimages.com/Photogallery/dustdevil/photogallerydd.asp?rec=90>



(タクラマカン砂漠で長島茂樹氏撮影)

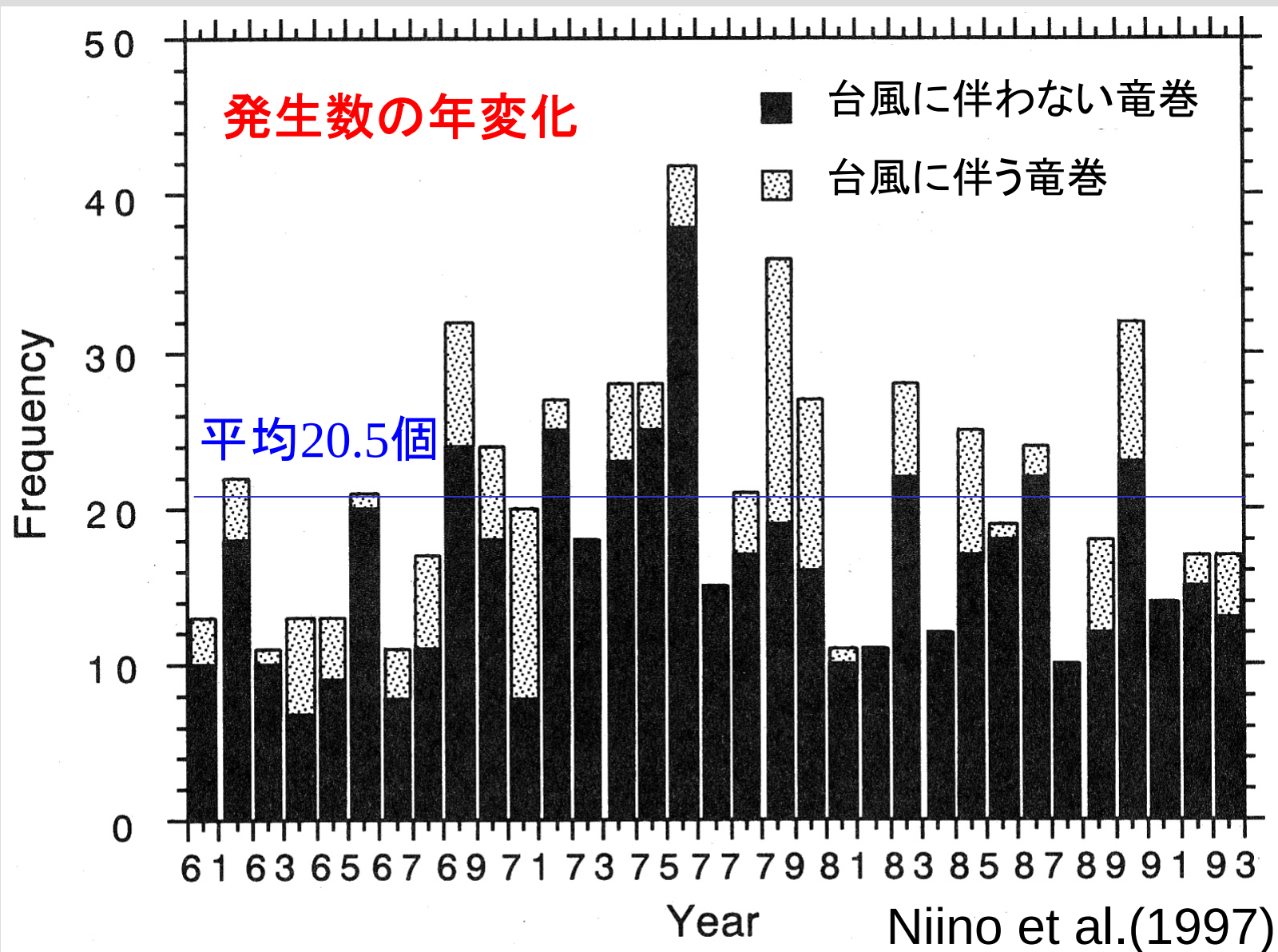
竜巻の代表的な値

- ・最大風速 $\leq 142\text{m/s}$ (Wurman, 2003)
- ・最低気圧 $\approx 100\text{hPa}$ (Samaras, 2003)
- ・平均直径 $\approx 98\text{m}$ (Niino et al., 1997)
- ・平均被害長さ $\approx 3.2\text{km}$ (Niino et al., 1997)
- ・平均寿命 $\approx 12\text{分}$ (Niino et al., 1997)

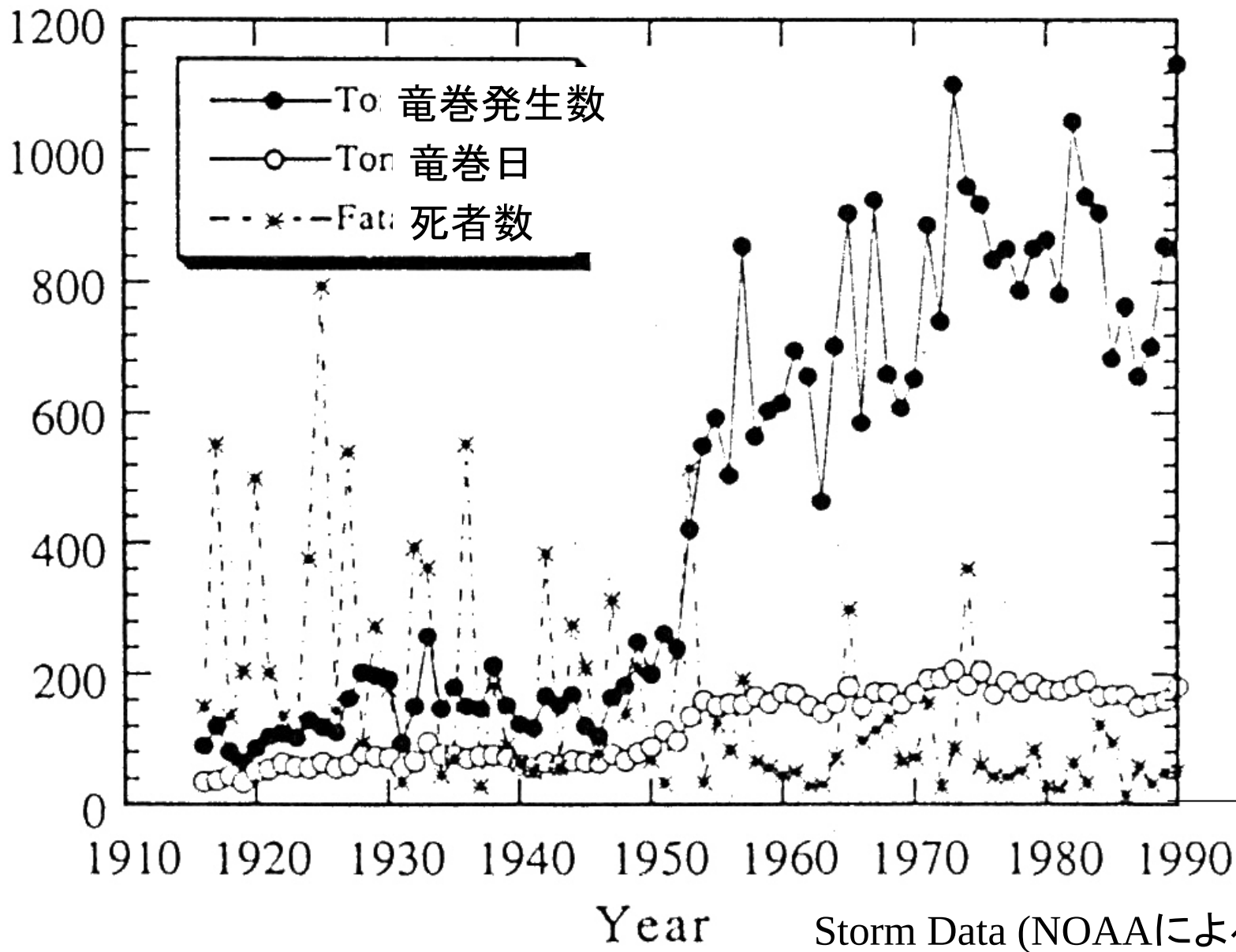
小規模で短寿命なため、観測が困難→研究の難しさ

2. わが国の竜巻の発生状況

1961-1993年の677個の陸上竜巻の統計(Niino et al., 1997)による



アメリカの竜巻発生数の年変化(1915-1990年)



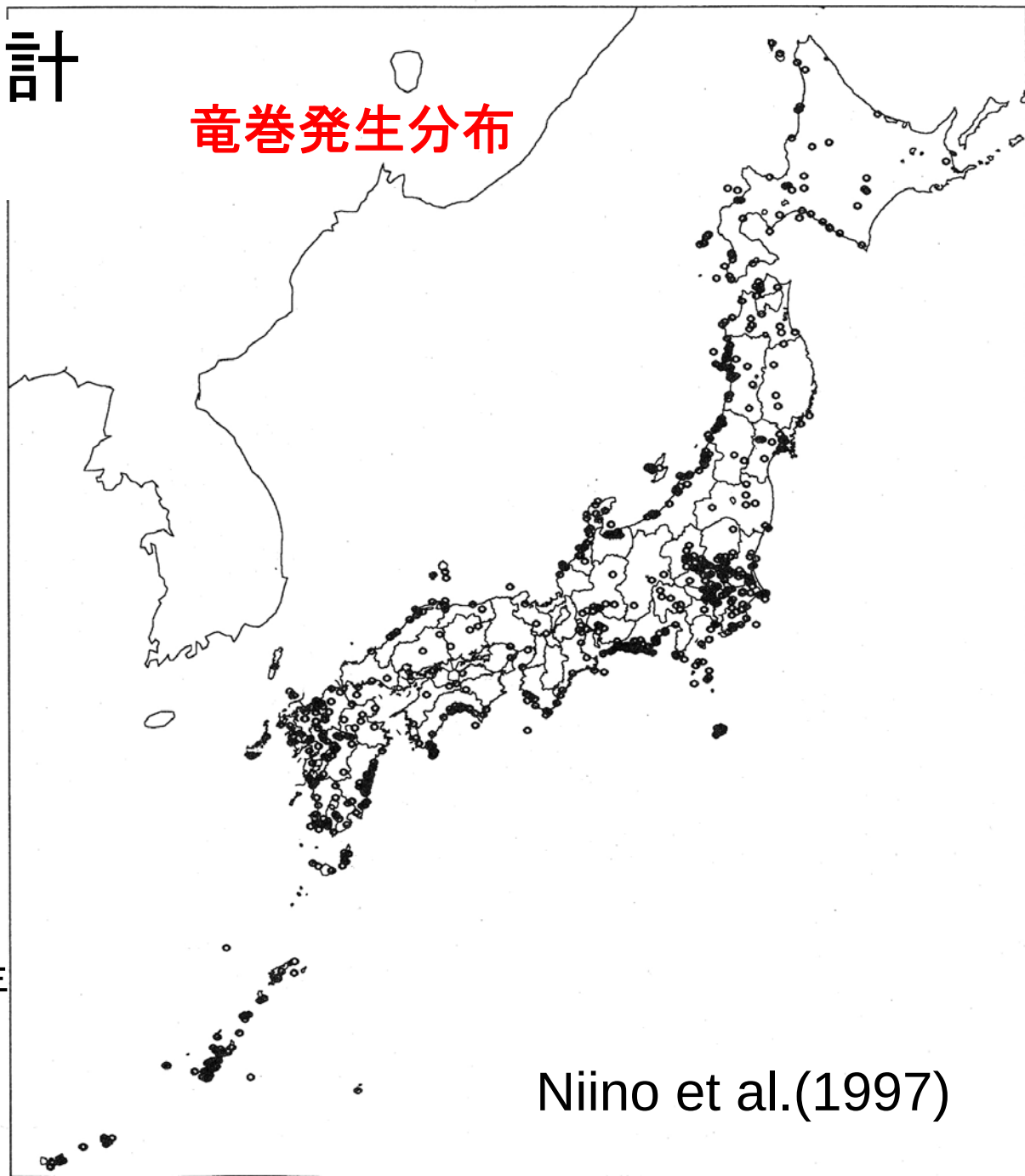
2006 1333

2005 1264

2004 1819

日本の竜巻の統計 (1961-1993年)

竜巻発生分布



Niino et al.(1997)

日本

1年当たり 20.5個

発生密度: 0.5個/10000km²/年

アメリカ

1年当たり 約1000個

発生密度: ~1個/10000km²/年

FIG. 3. Geographical distribution of tornadoes and waterspouts in Japan from 1961 to 1993. The points where tornadoes

単位面積当たりの竜巻発生数

(個/10000km²/年)

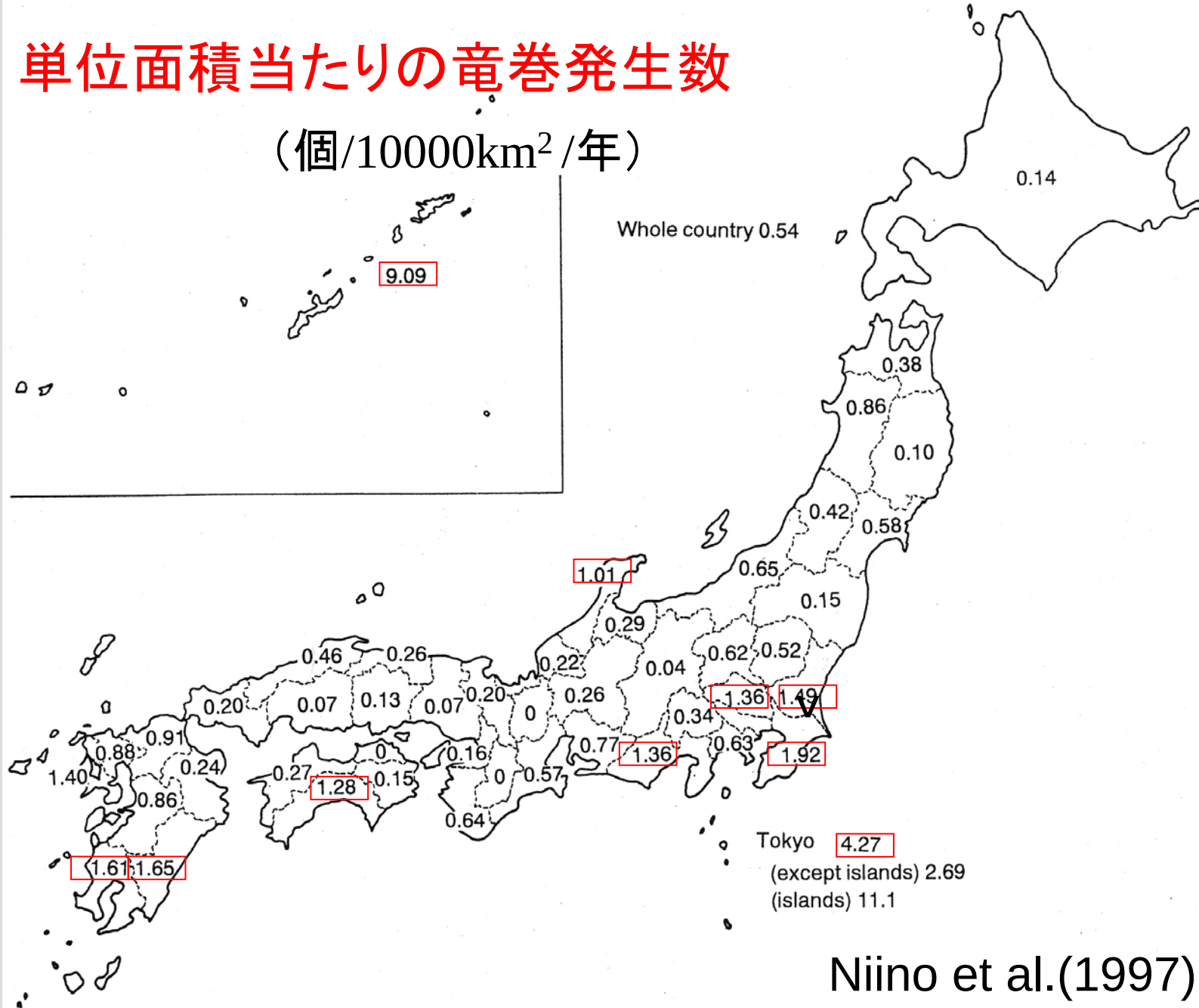
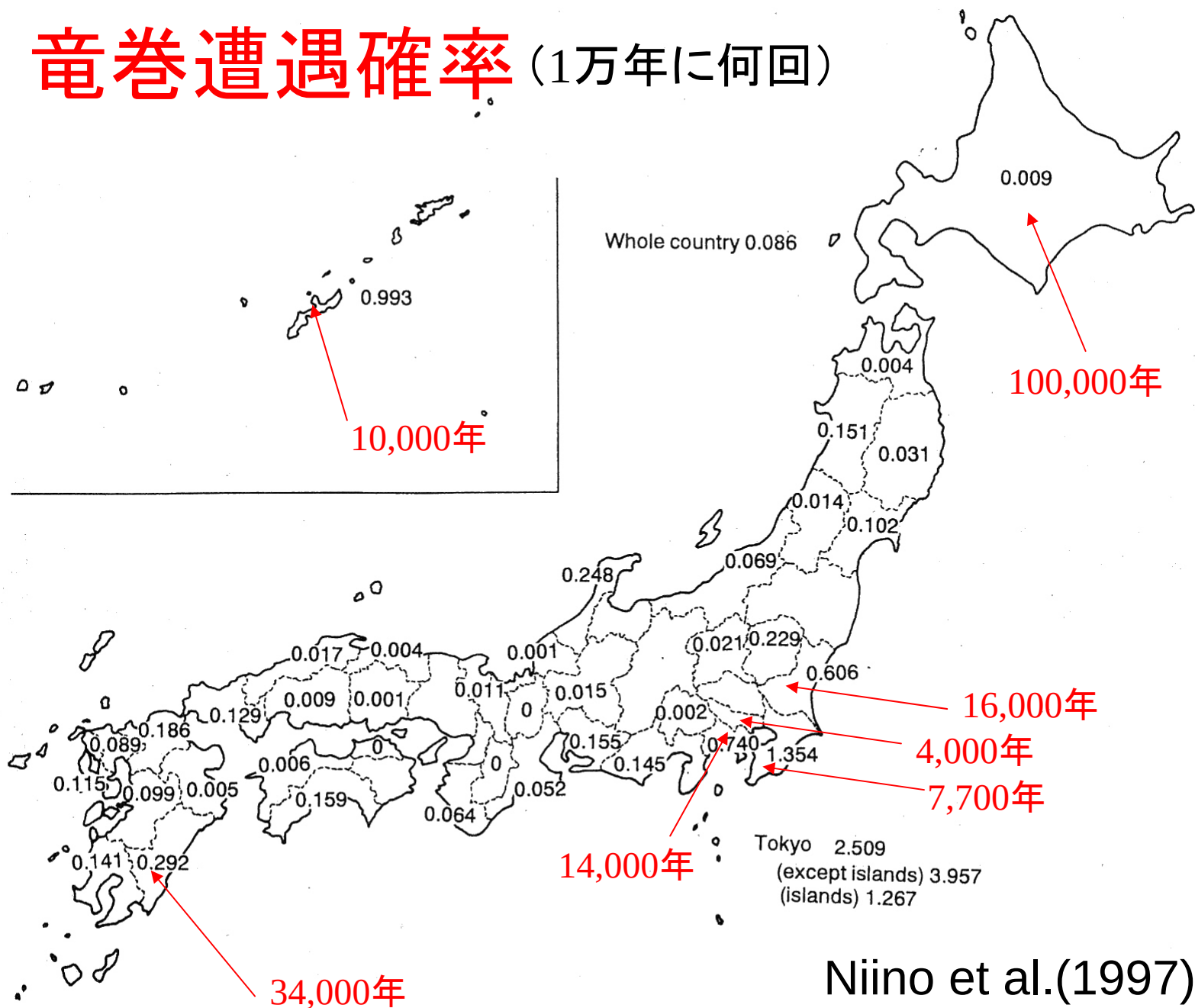


FIG. 4. Annual number of tornadoes per unit area (10⁴ km²) during 1961-93.

竜巻遭遇確率 (1万年に何回)



Niino et al.(1997)

FIG.18. Risk of a tornado encounter, Pe_1 , for each prefecture. The unit is 10^{-4} yr^{-1} .

竜巻の被害(1961-1993)

	1年当たり	1個当たり最大
死者(人)	0.6	*1 2
負傷者(人)	30	*2 107
全壊(棟)	17	82
半壊(棟)	39	168
一部損壊(棟)	290	1504

*1 1881年9月26日宮崎市16名

1903年9月23日東京都豊玉郡淀橋町10名

1941年11月28日愛知県豊橋市12名

1957年11月10日長崎県厳原市6名

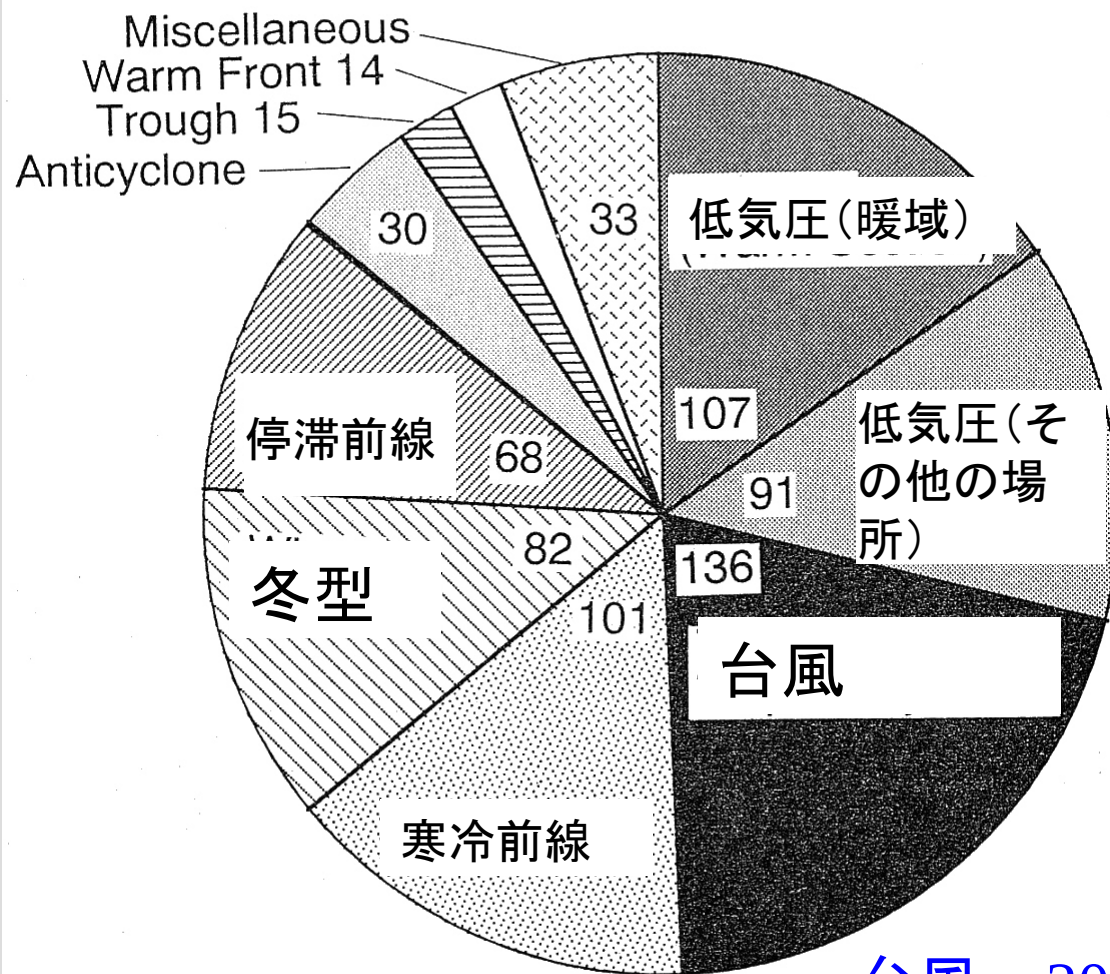
2006年11月7日北海道佐呂間町9名

*2 1999年9月24日愛知県豊橋市405名

2006年9月17日宮崎県延岡市143名

強い竜巻が市街地を襲うと大きな被害が起きる。

竜巻の発生する環境場



台風～20%

FIG. 17. Frequency distribution of the synoptic situations when tornadoes occurred.

Niino et al.(1997)

3. 竜巻に関する理解の現状

1) 渦の特性と構造

竜巻の風速分布 昔は16mm映画の飛散物から (Hoecker, 1960)

トラック搭載型ドップラーレーダー (DOW: Doppler on Wheels)



Wurman et al. (1996)

DOWが測った竜巻 のドップラー速度の 水平分布

Dimmitt, Texas
3 June 1995

Wurman et al. (1996)

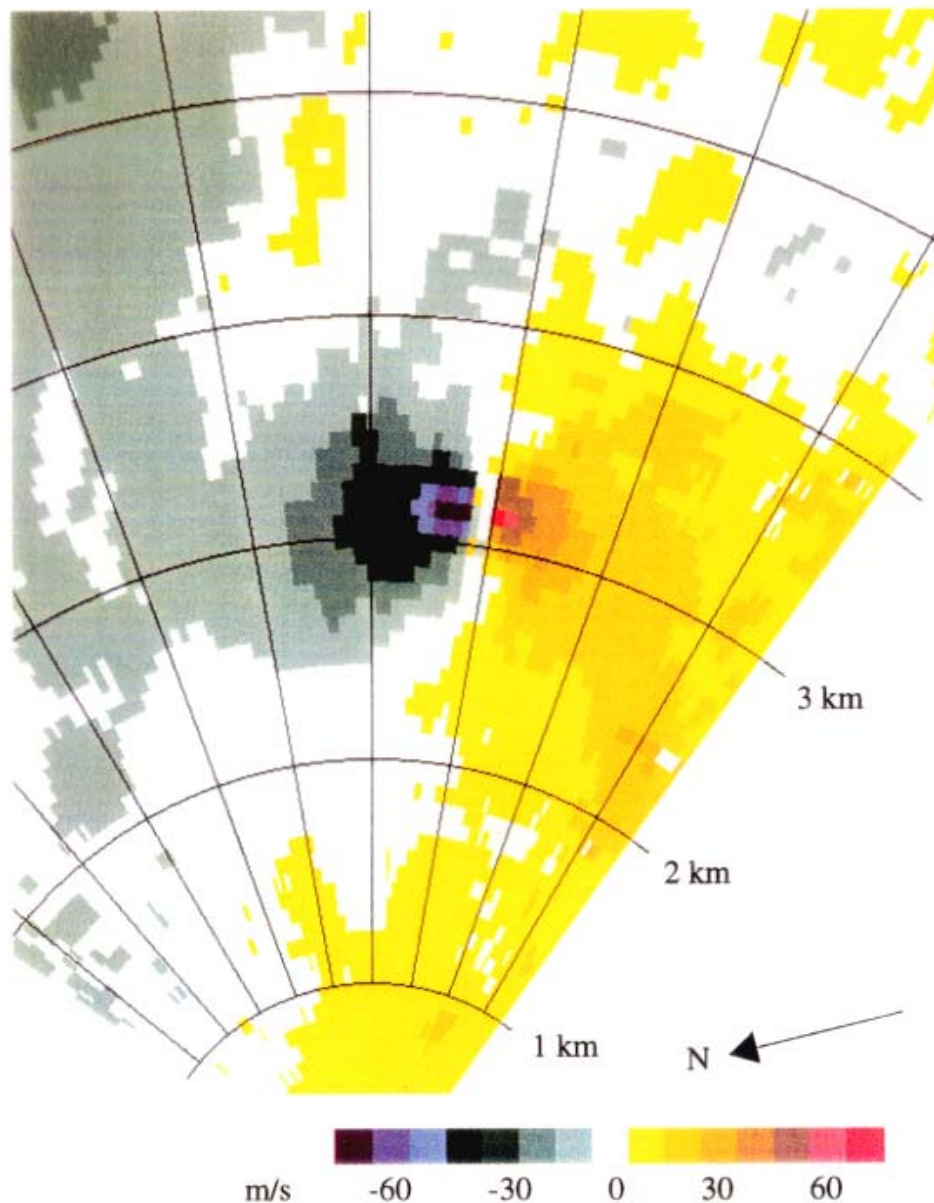
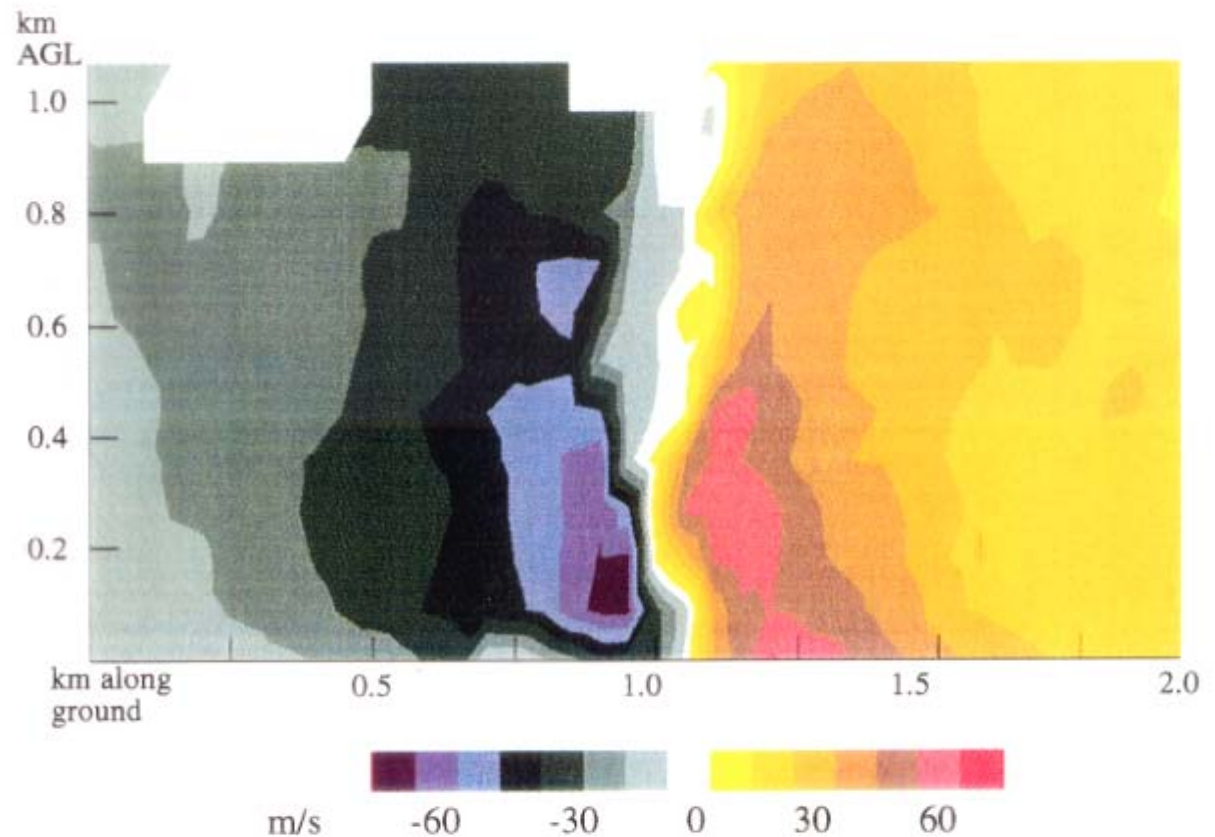


Fig. 3. (b) Doppler velocity field of the tornado and near tornado environment in Dimmitt, Texas, at 01:03:45 UTC 03 June 1995 as measured by mobile Doppler radar from 3 km range. This data was taken with a scan at 2° elevation or 110 m AGL at the center of the tornado. Each displayed sample is approximately 64 m x 17 m at the center of the tornado. A strong cyclonic (anti-clockwise) shear region is indicated by the adjacent away (positive) and towards (negative) Doppler radial velocities in the tornado. Maximum winds are estimated to be $> 70 \text{ ms}^{-1}$.

DOWによる竜巻の鉛直断面のドップラー速度

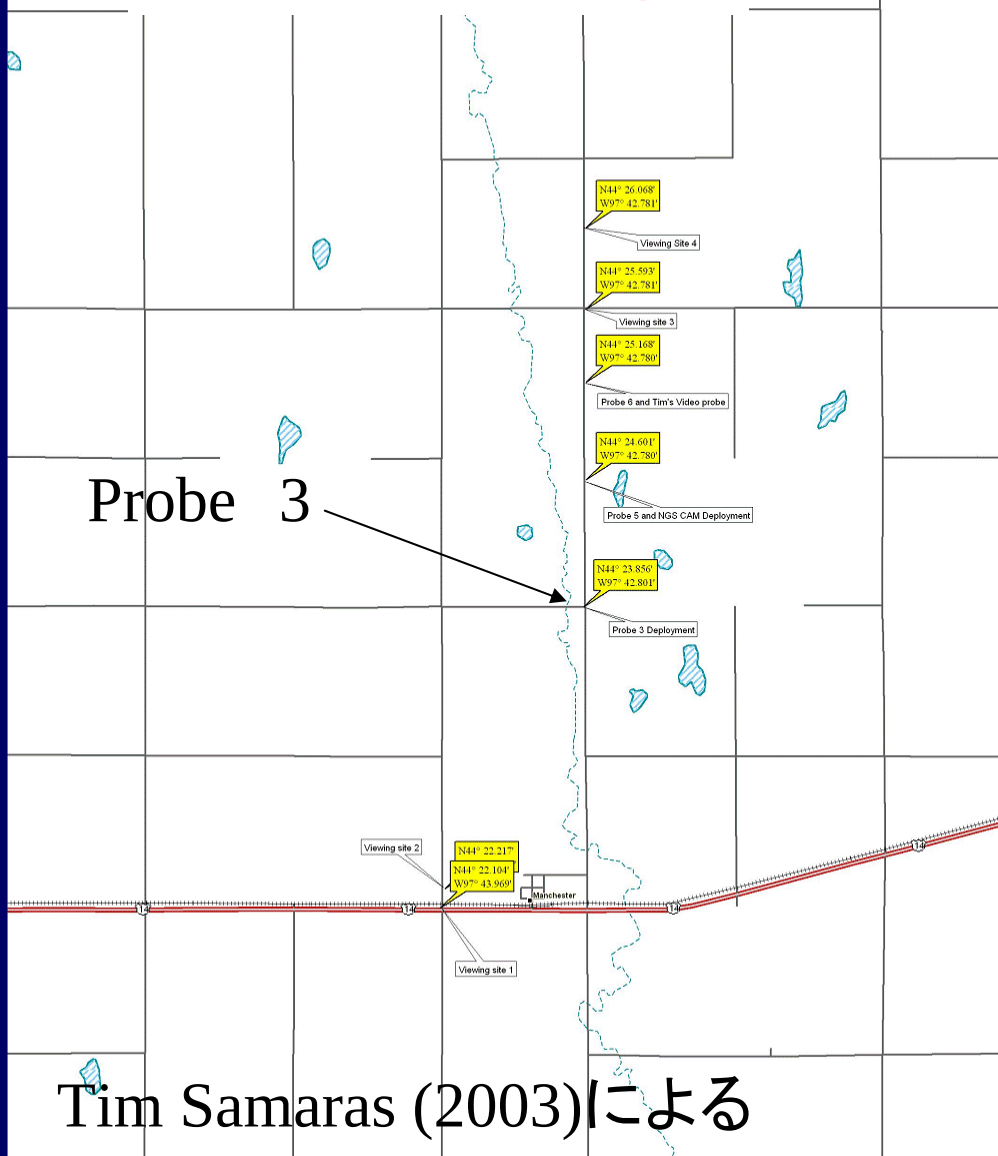


Dimmitt, Texas
3 June 1995

Wurman et al. (1996)

Fig. 5. (b) Vertical structure of the Doppler radial velocity field of a tornado and near tornado environment at 01:03:26 to 01:05:01 UTC 03 June 1995 as measured by mobile Doppler radar from 3 km range. This field was reconstructed from several inclined slices through the storm measured during a 95 s period. Strong tangential flow near the tornado core peaked at $> 70 \text{ ms}^{-1}$ at 100 m agl. The relatively broad region of motion of $6 \text{ to } 9 \text{ ms}^{-1}$ toward the radar in the eye above 500 m agl provides evidence of downward motion.

竜巻の気圧記録



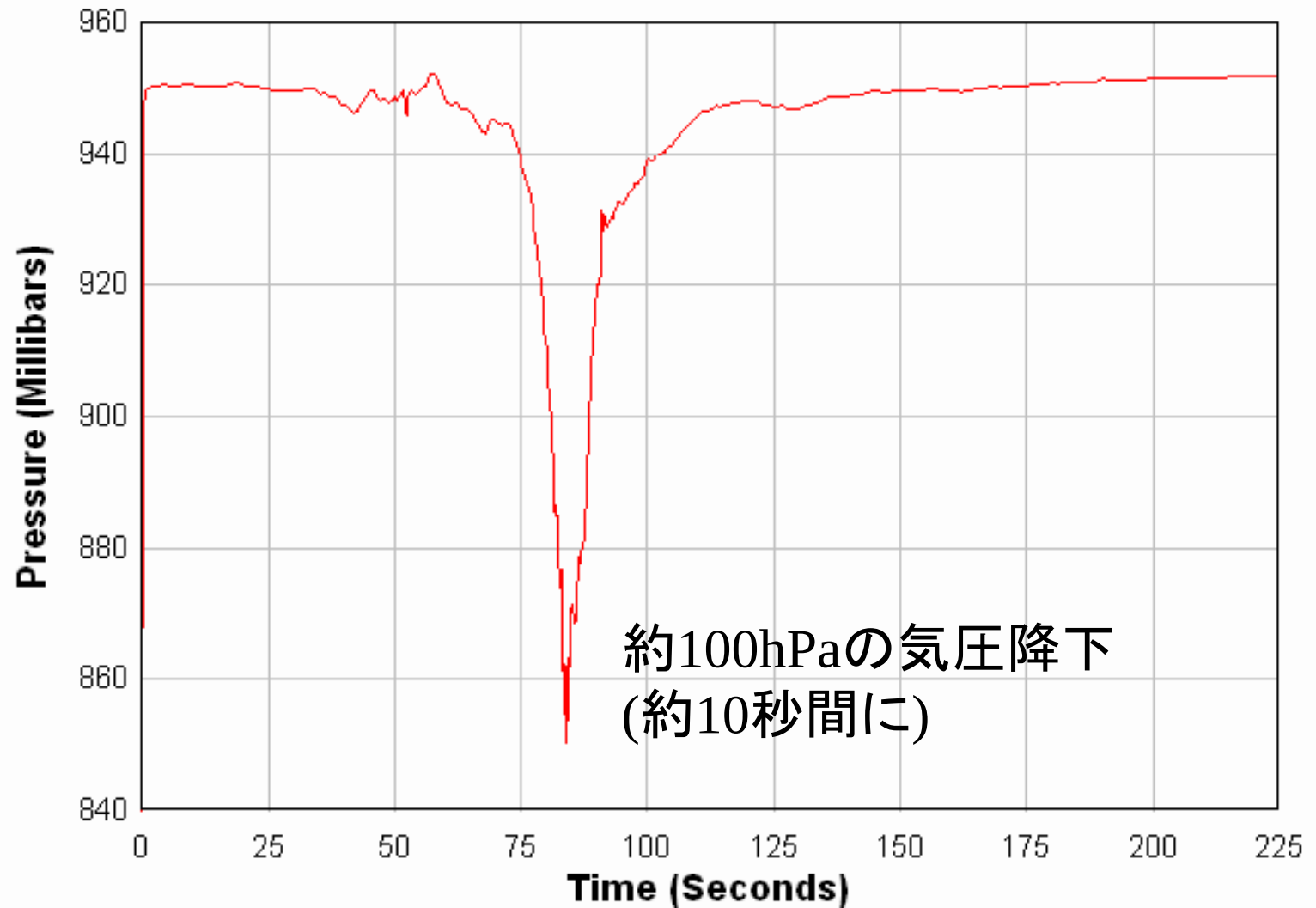
2003年6月24日 South
DakotaのManchester
竜巻(F4)





Looking South

Probe 3 Pressure drop



(<http://www.crh.noaa.gov/fsd/soo/tor062403/samaras/samaras.htm>)

多重渦構造の竜巻



Whipple(1982)より

Wichita Falls, Texas (April 10, 1979)
from Whipple (1982)

吸い込み渦の跡



Whipple(1982)より

3. 竜巻の発生機構

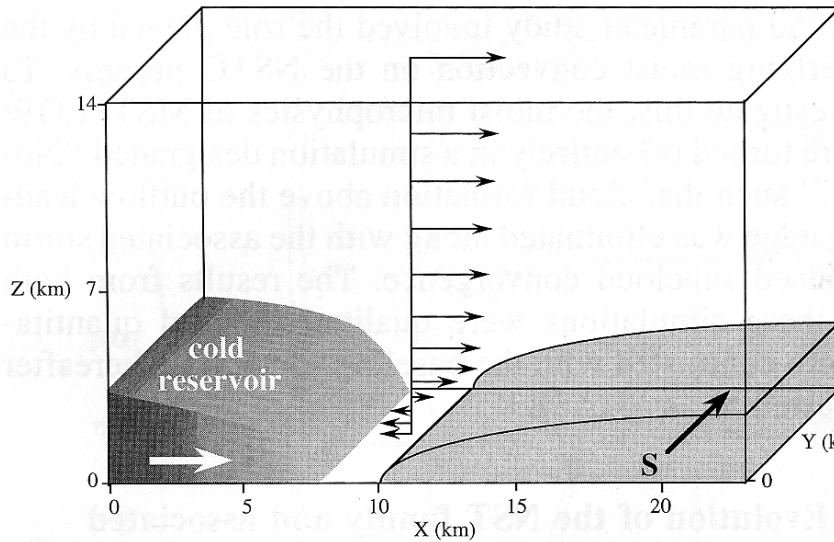
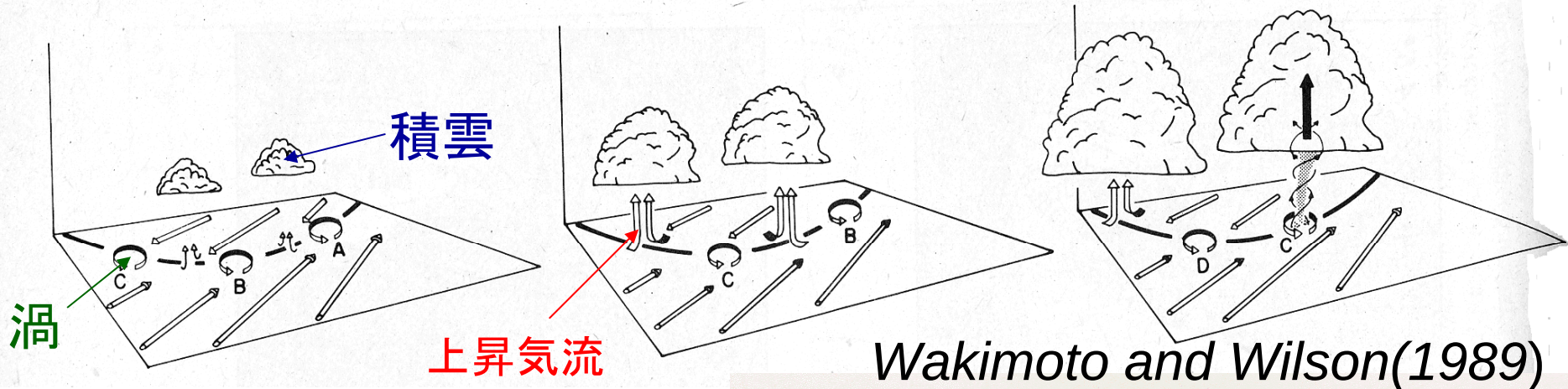


1) 局地前線に伴うもの

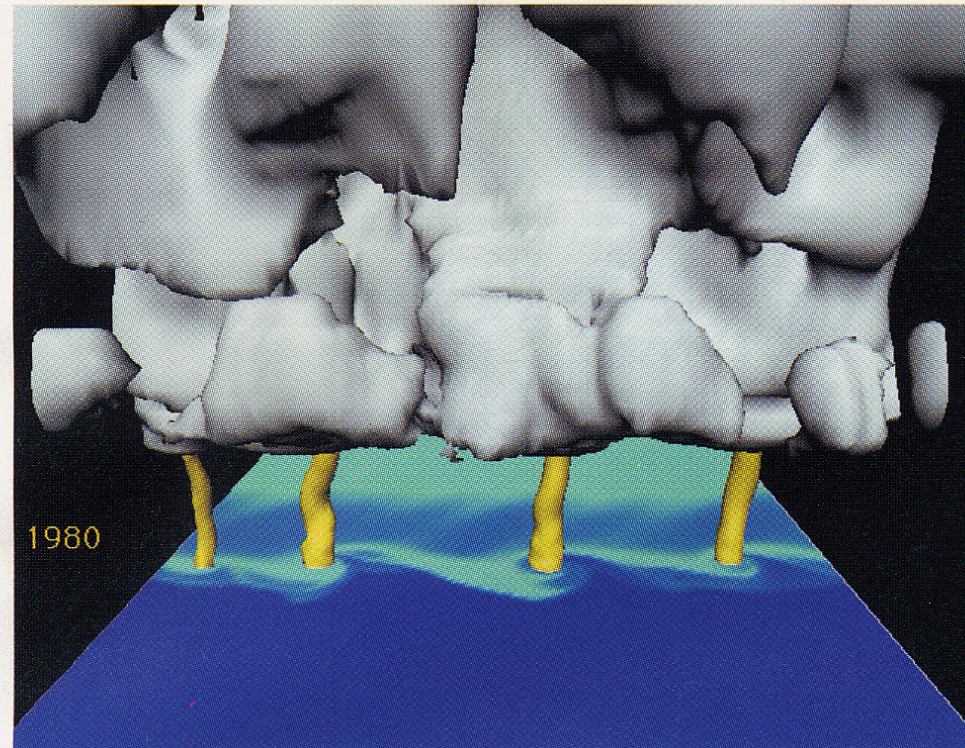
2) 特殊な積乱雲(スーパーセル)に伴うもの

1) 局地前線に伴う竜巻

局地前線がシア不安定を起こして生じた渦を積雲の上昇流が引き伸ばす



Lee and Wilhelmson(1997)



1964年2月1日伊豆大島近海に発生した海上の竜巻(宮内・宮内,2002)



他にも1994年10月4日の土佐湾の竜巻(小林ほか, 1997) 5個の竜巻

イタリアの海上竜巻(1999年)



<http://www.astrogeo.va.it/immagini/cielo/giudici.htm>

2) スーパーセル(supercell)による竜巻

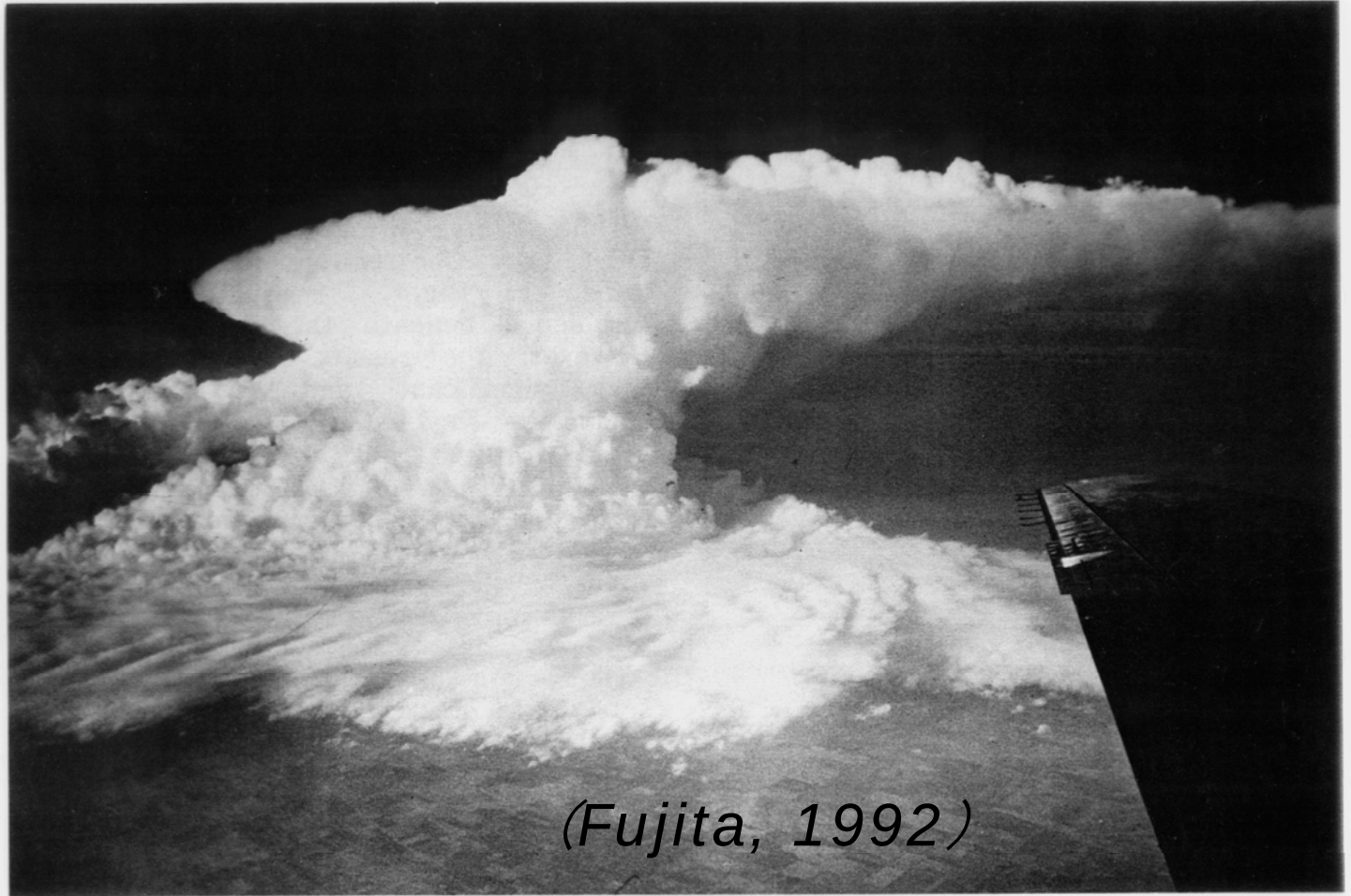
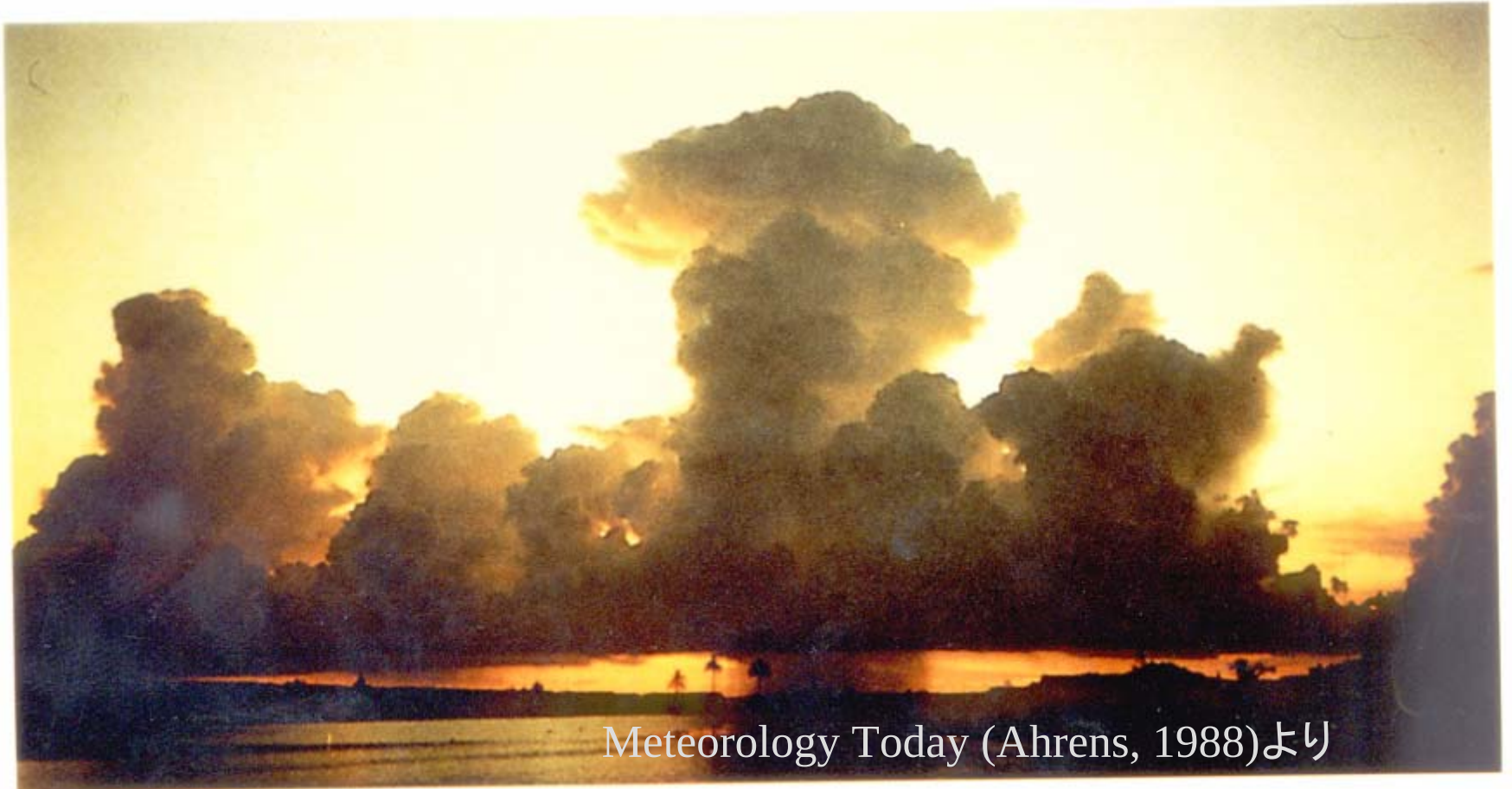


Fig. 3.2-18 The total view of the mesocyclone (rotating) thunderstorm of 21 April 1961 photographed by Fujita from DC-6 at 1749 58s CDT, looking toward the 312° azimuth.

雲内に回転気流を作り出す長寿命の積乱雲

積乱雲



Meteorology Today (Ahrens, 1988)より

普通の積乱雲の寿命は1時間程度

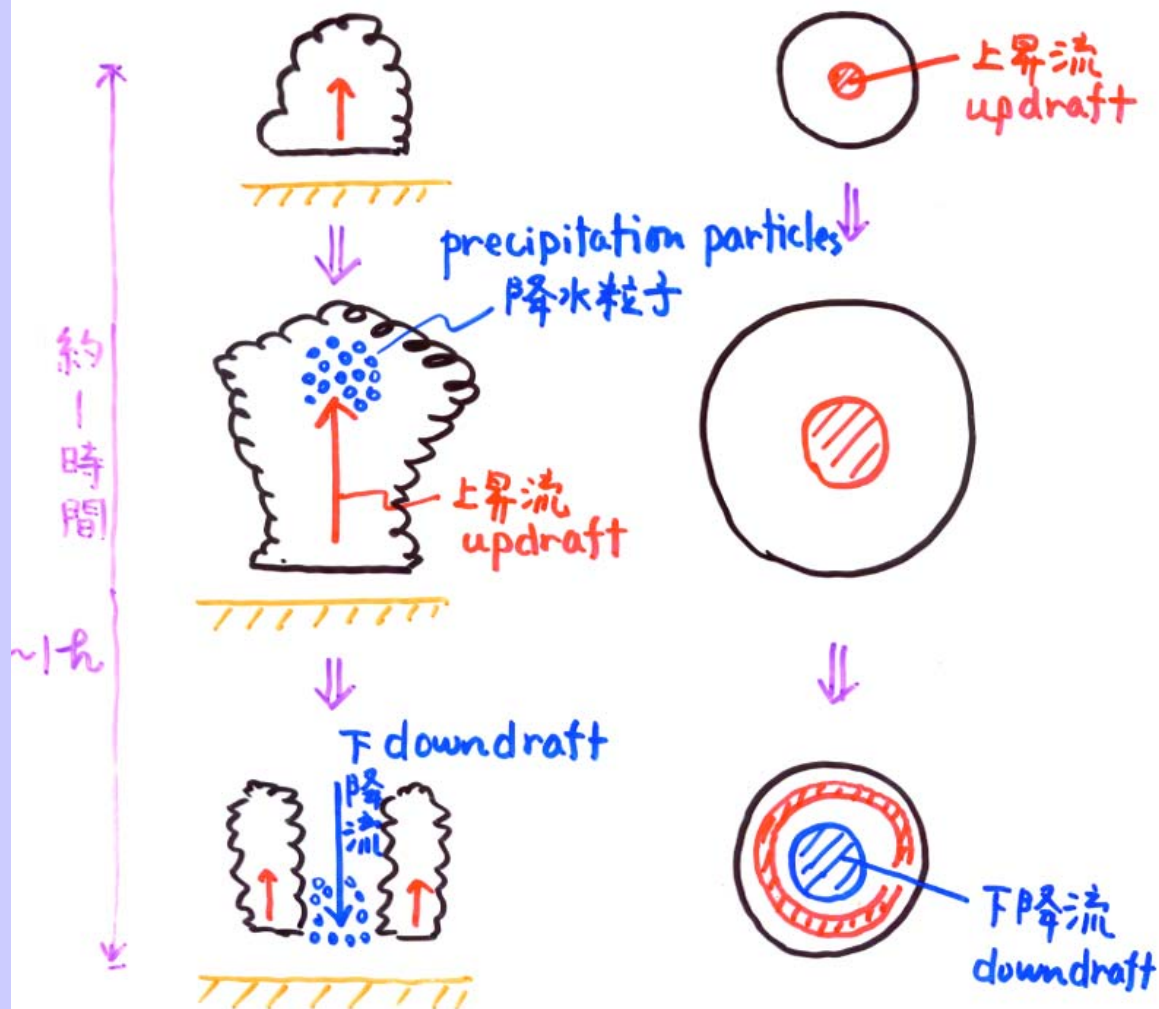
普通の積乱雲は 自己破滅型*

*小倉義光による

Ordinary cumulonimbus 風の鉛直
通常の積乱雲 (Shearのない場) no wind shear

vertical section
鉛直断面

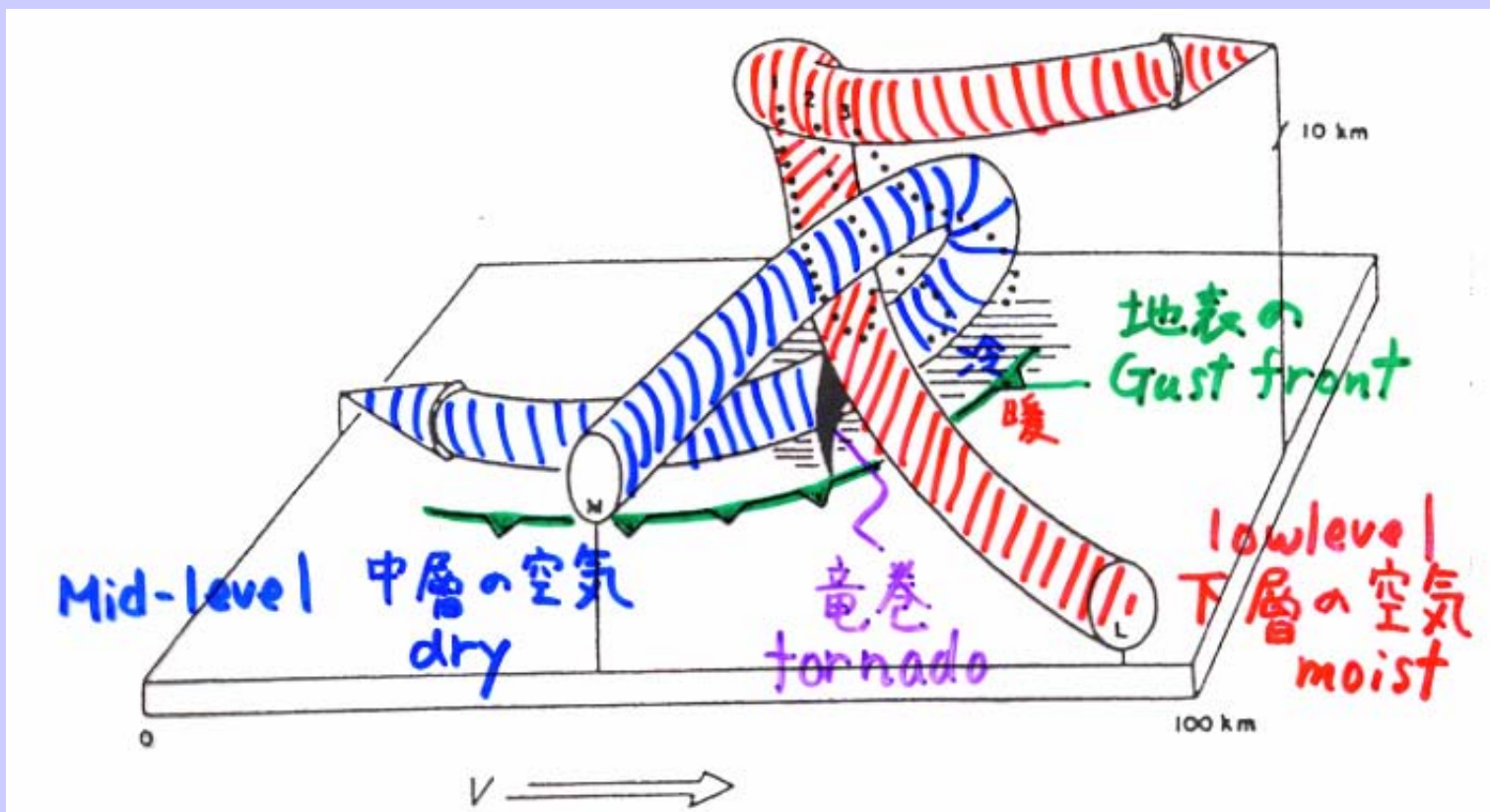
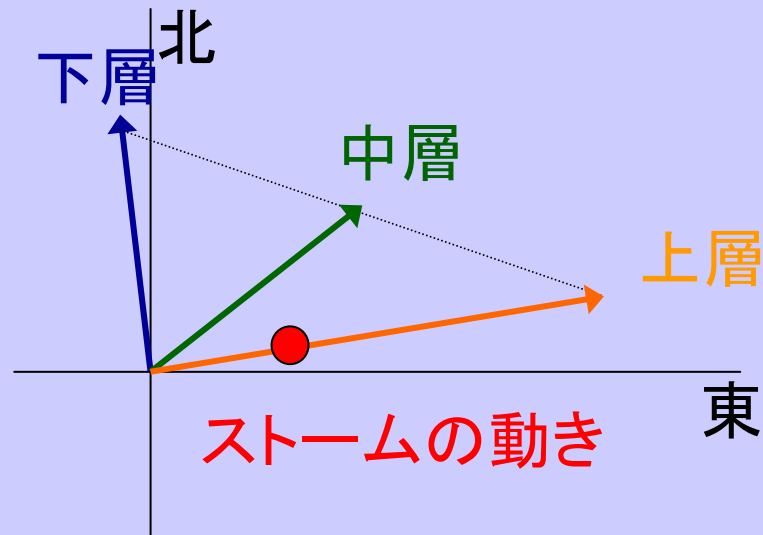
horizontal section
水平断面



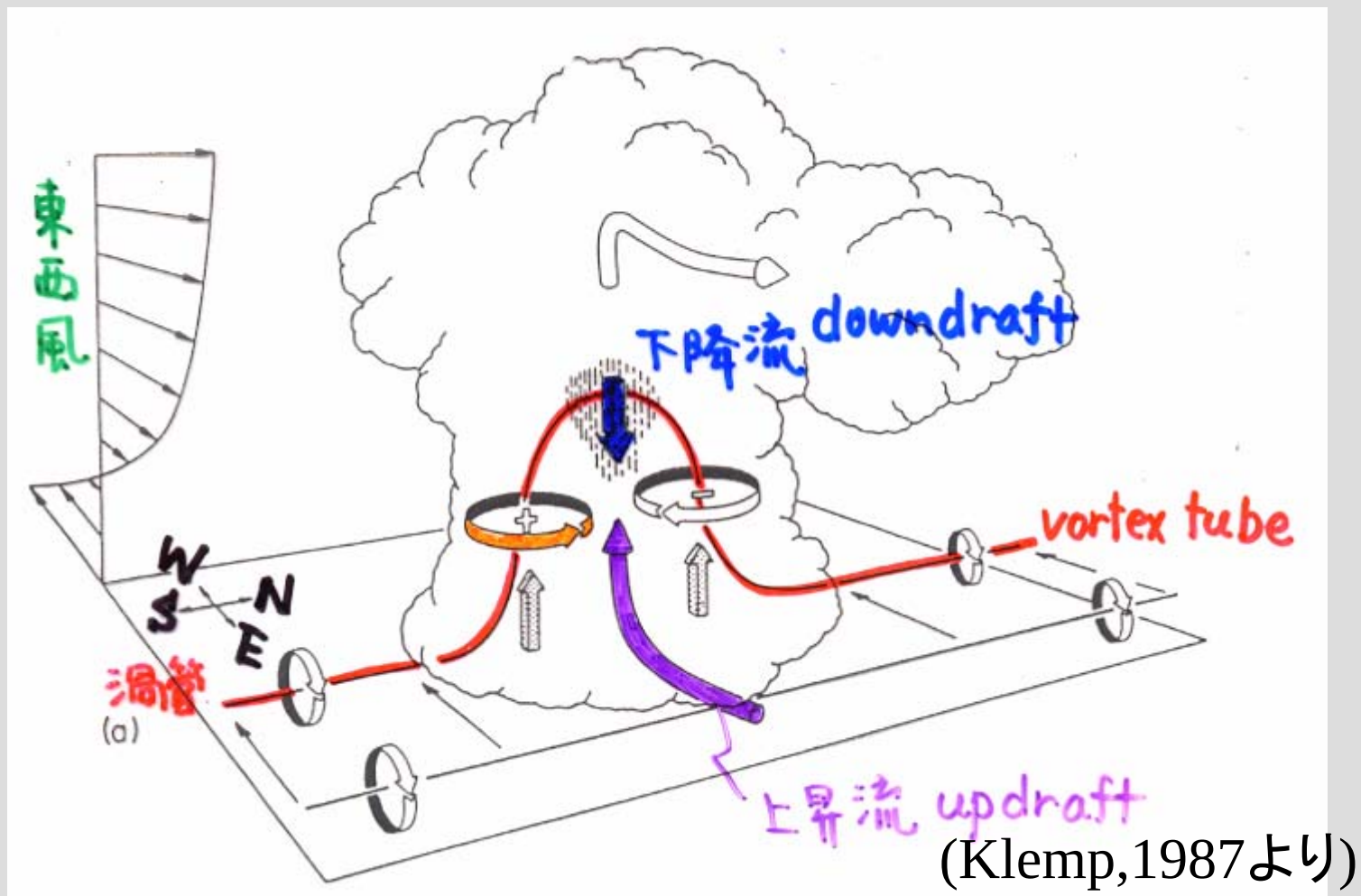
スーパーセルの概念モデル

Browning(1964)

- ・長続きする強い積乱雲
- ・雲内に回転する上昇気流を作り出す

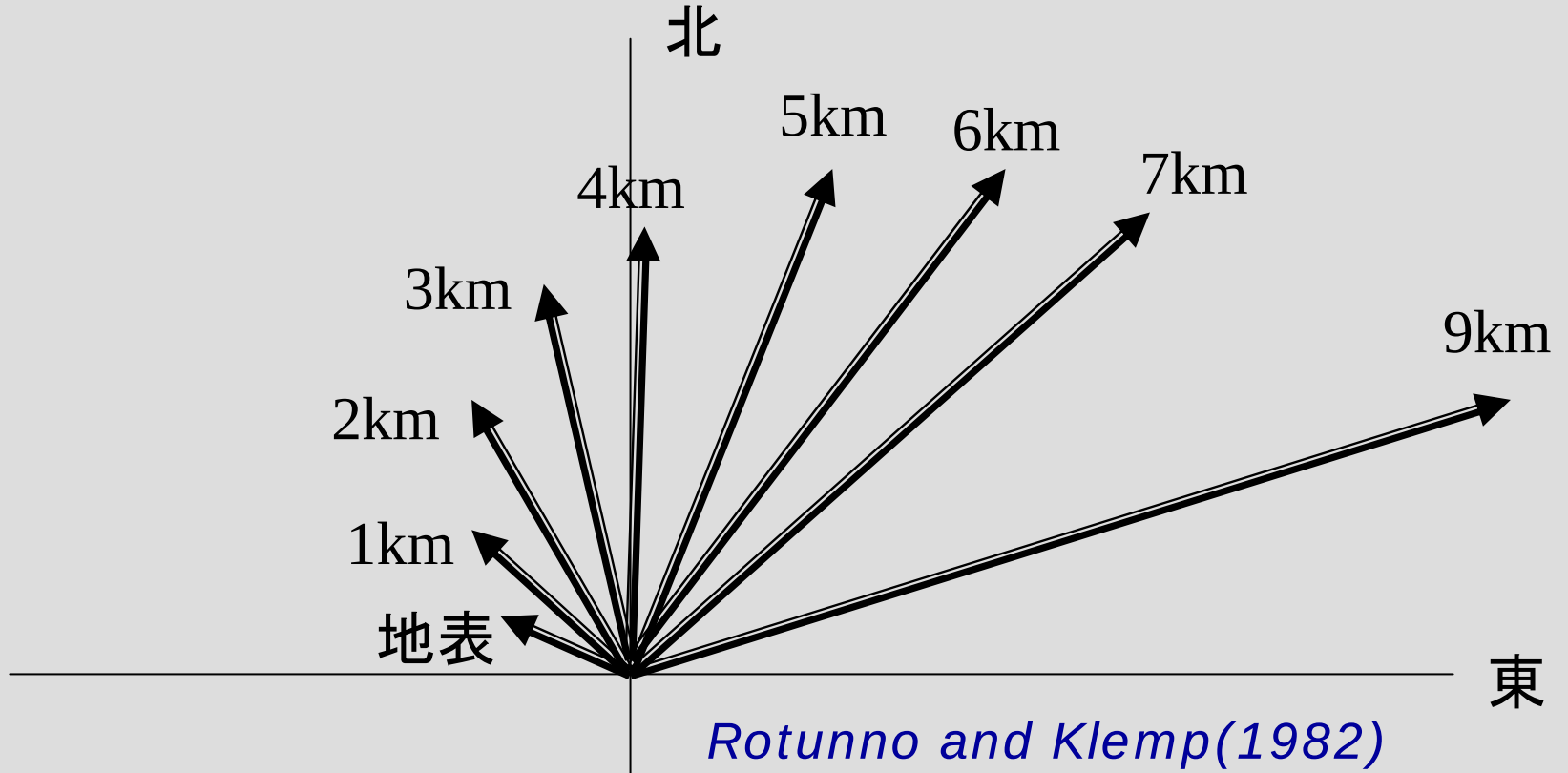


スーパーセルが回転を作り出す仕組み



強い対流が起きやすい＋鉛直シアのある環境場

反時計回りの回転を持った雲が発達する環境風の分布



Energy Helicity Index(EHI; *Hart and Korotky, 1991; Davies, 1993*):

ポテンシャル予報(アメリカでは竜巻注意報:数時間前に数100km四方程度の範囲を対象)に有望→統計的検証が必要

低気圧の暖域

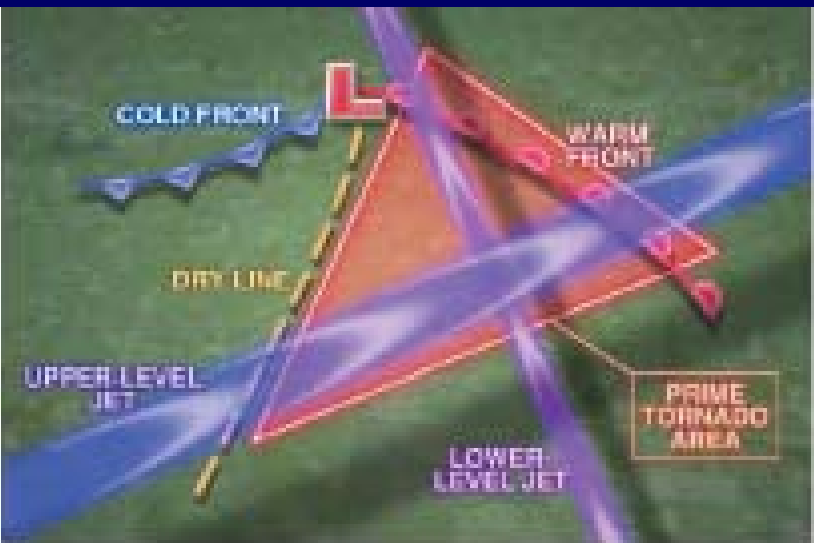
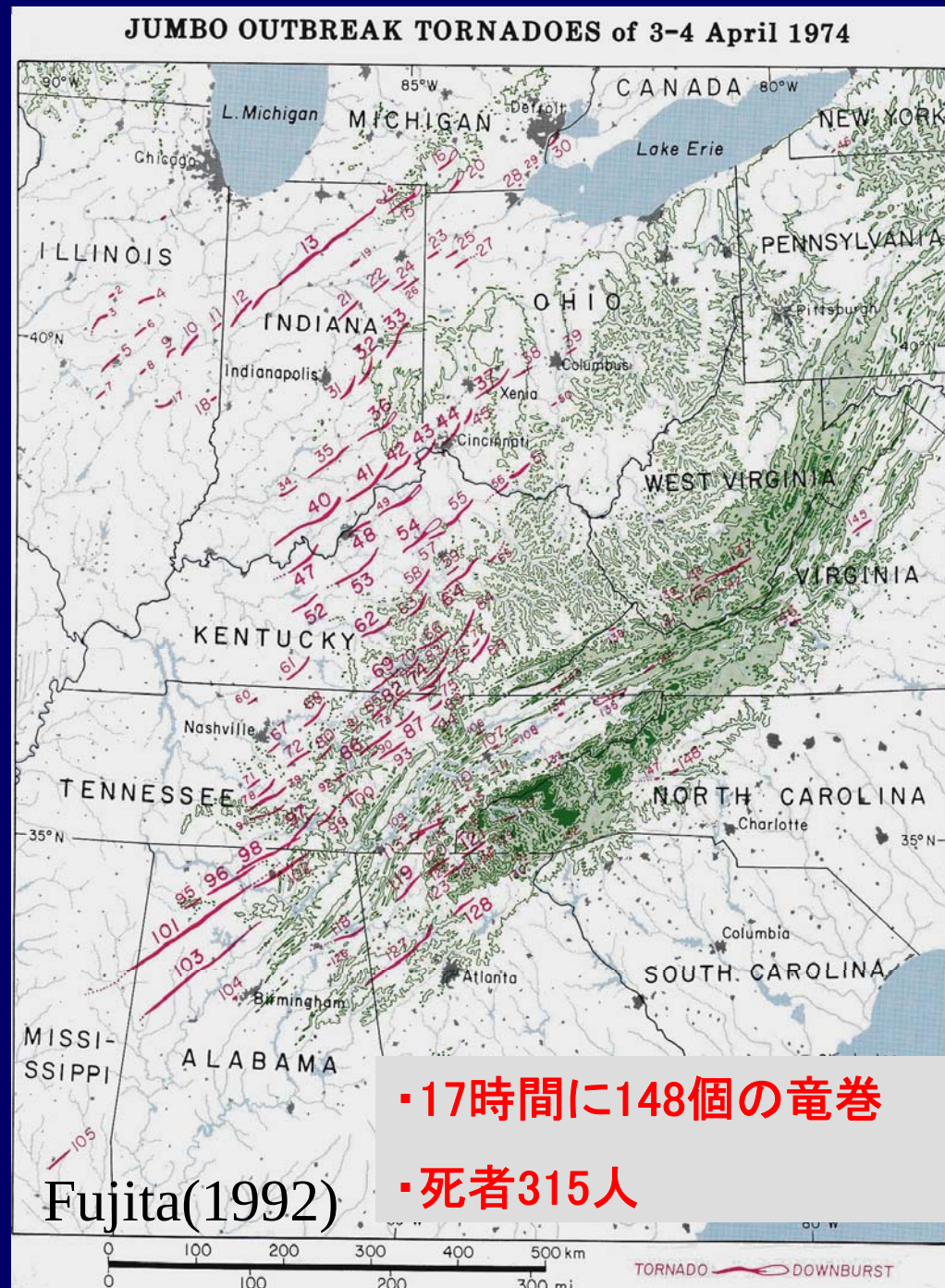


FIG. 3. Conceptual model of synoptic conditions typically associated with a large tornado outbreak. Red area indicates region of expected tornadoes. [Courtesy of AccuWeather, Inc.] Hamil et al.(2005)

環境場が雲の性質を
決める！

佐呂間竜巻もこのタイプ？



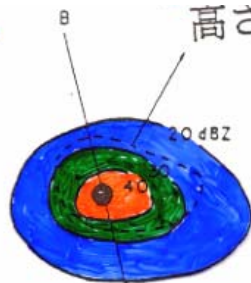
スーパーセルの構造の時間変化

Evolution of
a supercell

20dBZ
30
40
50

北
N

10 km



高さ 8 km の反射強度 > 20dB

(レーダー観測)

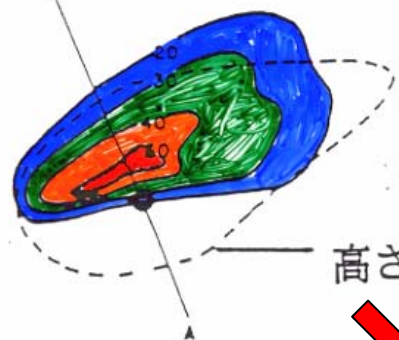
radar
observation

Storm
motion
積乱雲の進行方向

積乱雲の進行方向

Storm motion

北
N



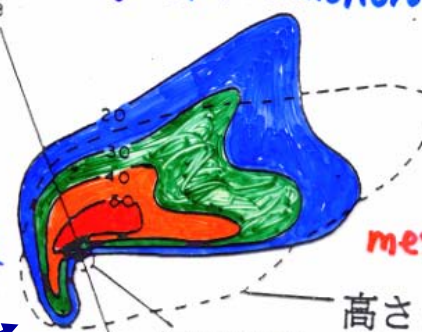
高さ 8 km の反射強度

1時間半後

フック(状)エコー

積乱雲の進行方向
Storm motion

北
N

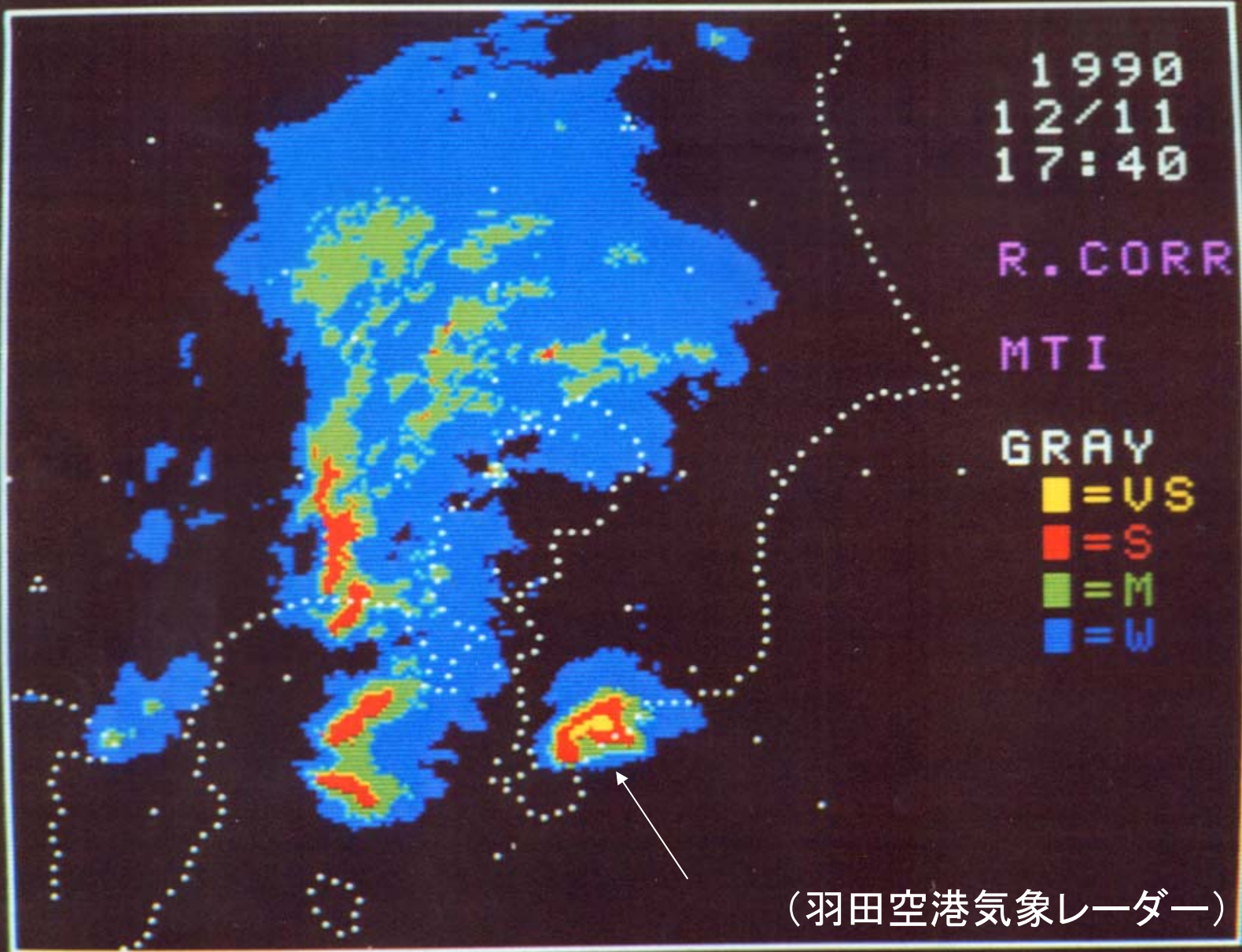


高さ 8 km の反射強度
反射強度の弱い領域

mesocyclone
メソサイクロン

(Lemon, 1980)

10 km



BEGIN

1990
12/11
15:30

END

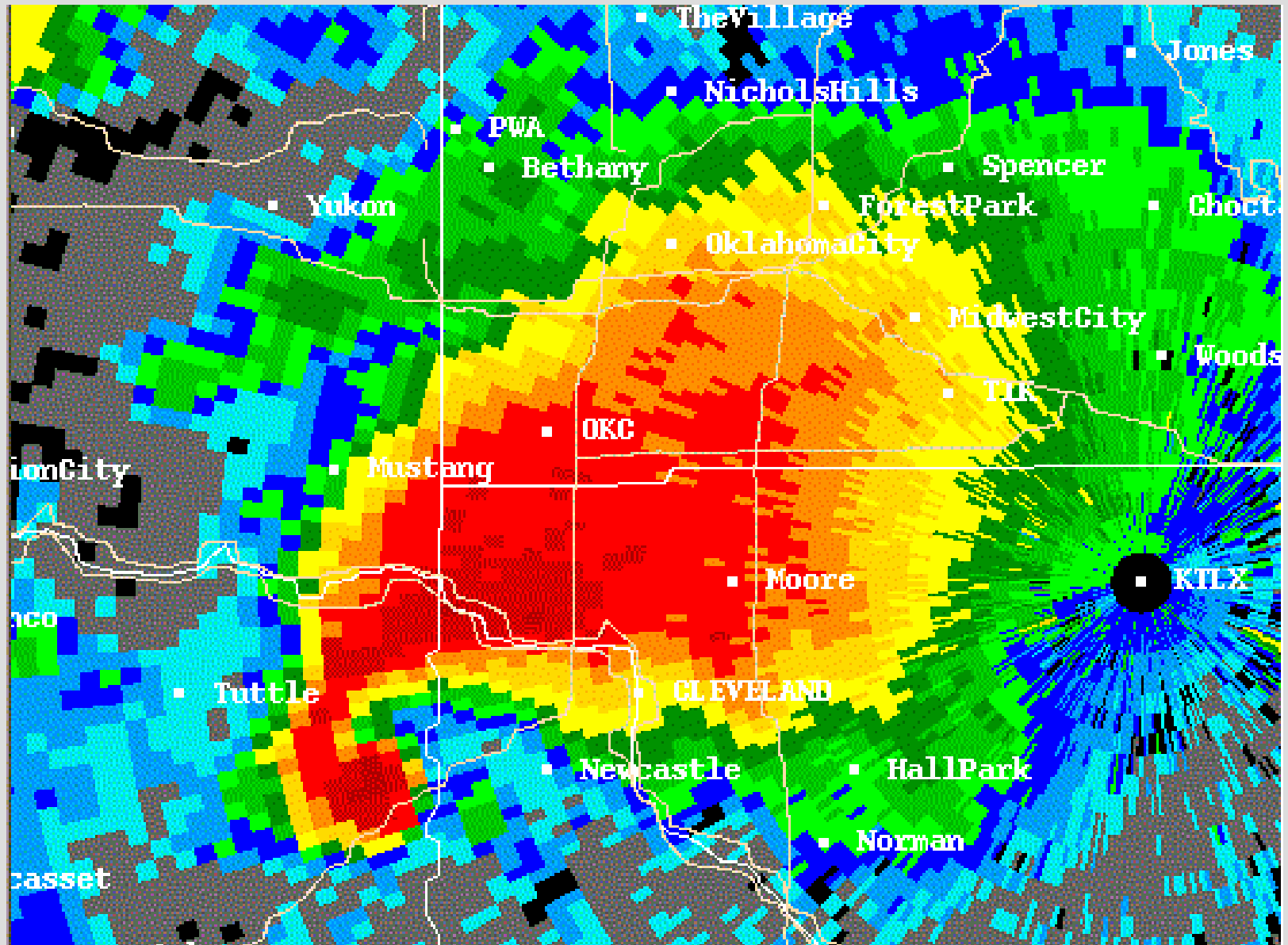
1990
12/12
04:30

POINTER

1990
12/11
17:40

1990年12月11日千葉県鴨川市に竜巻を生み出したストーム
(鈴木・新野, 1991)

1999年5月3日 オクラホマ州ムーアの竜巻(F5)を生じたストーム



1999年5月3日のF5 竜巻による被害



A Bad Wind Blows down Tornado Alley

They call it Tornado Alley, the belt of the Midwest from Texas, across Oklahoma and Kansas to Missouri. Last week it lived up to its name as, in a few hours, dozens of tornados seared through the region, killing at least 41 people in Oklahoma and five others in Kansas, injuring hundreds, flattening up to 10,000 homes and damaging shops, hotels, schools and

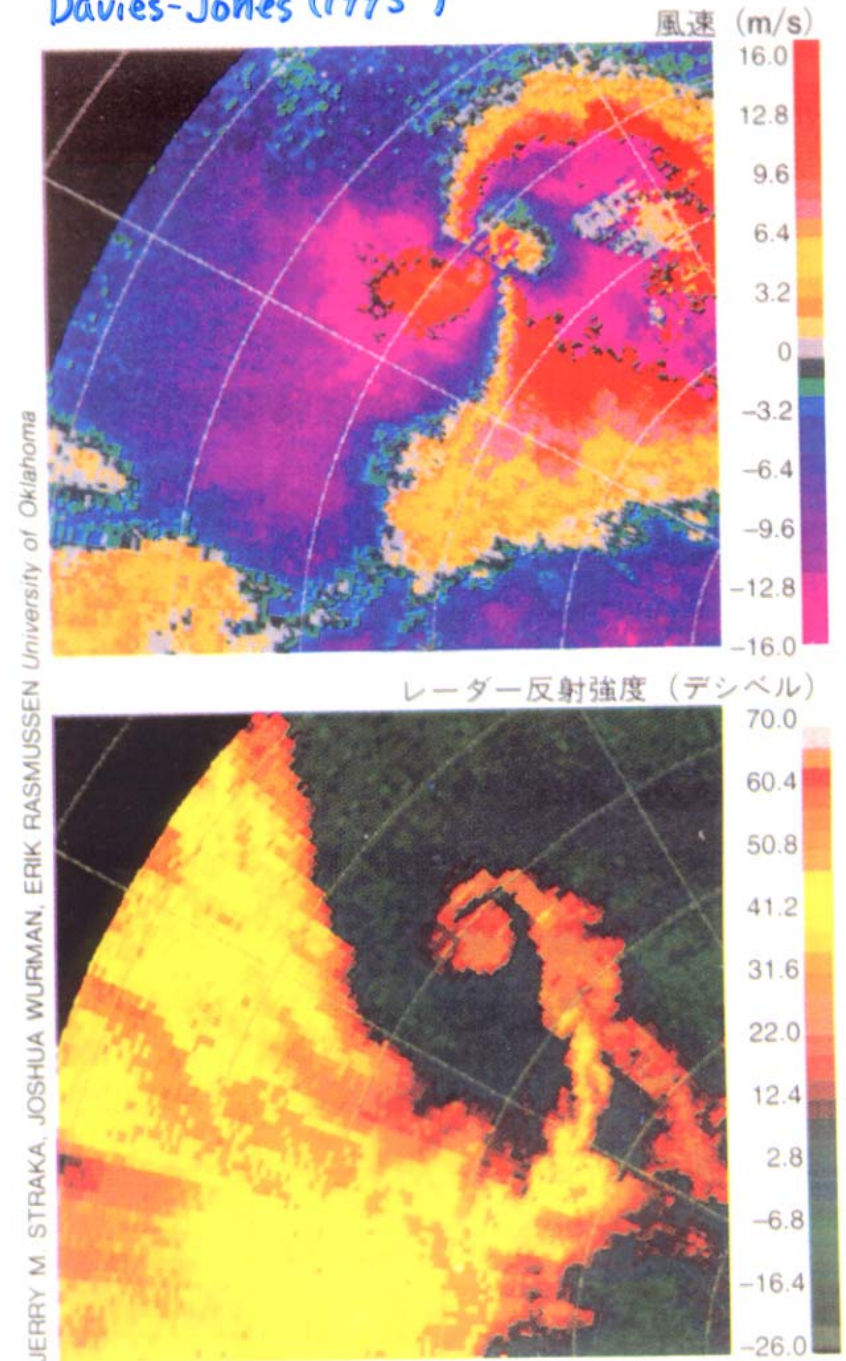
churches. A path over 1 km wide was etched by the strongest of the twisters, estimated at force F5, more than 480 km/h, a wind that storm experts believe might occur once in a million years. As the Federal Government declared 11 Oklahoma counties disaster areas, the governor Frank Keating said, "We have whole communities that simply aren't there any more."

(Time, 17 May 1999)

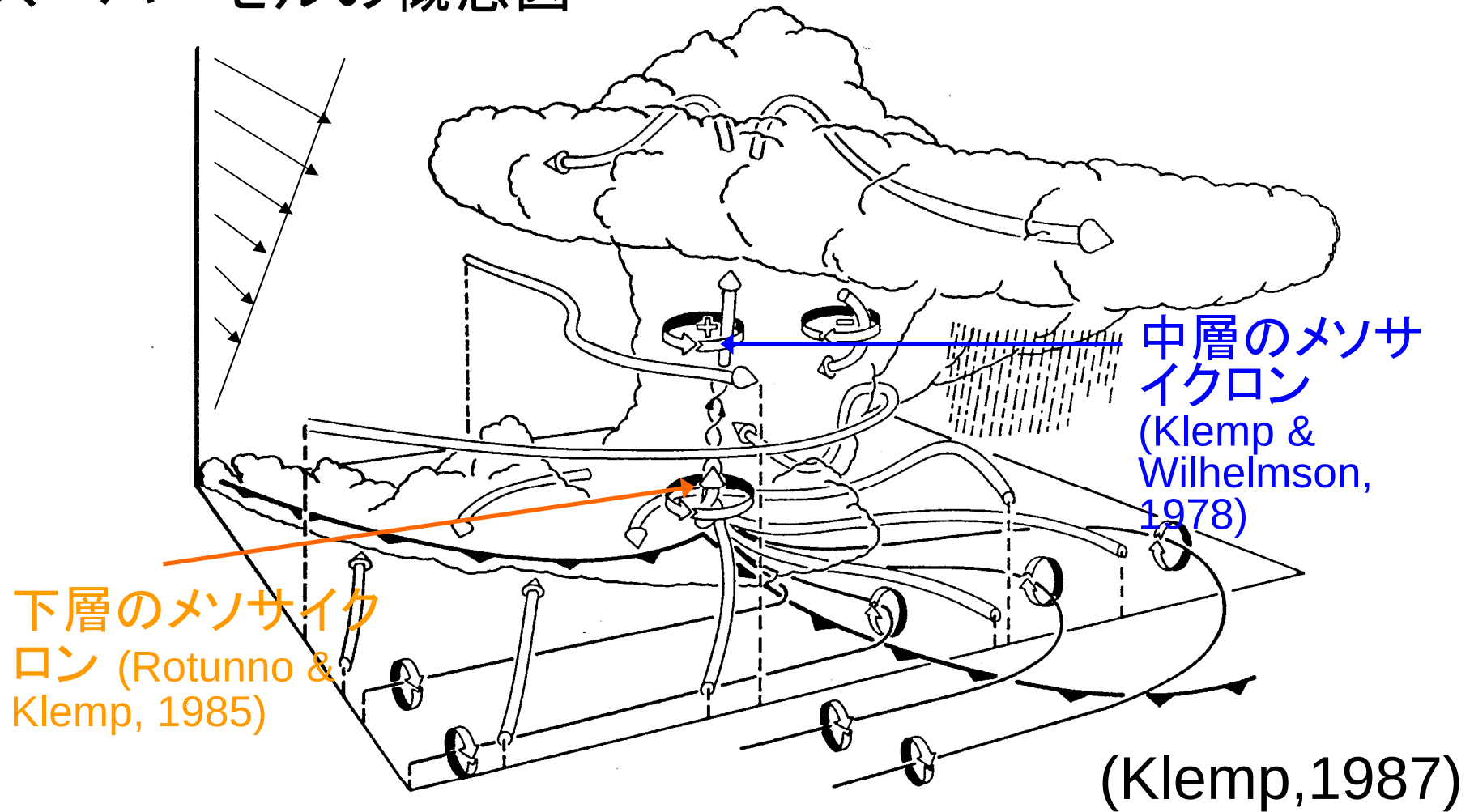
メソサイクロンと竜巻のドップラーレーダー画像

1995年5月16日カンザス州
ジェットモアで車載レーダーに
よって観測されたスーパーセル
反射強度(下)、ドップラー速度(上)

Davies-Jones (1995)



スーパーセルの概念図

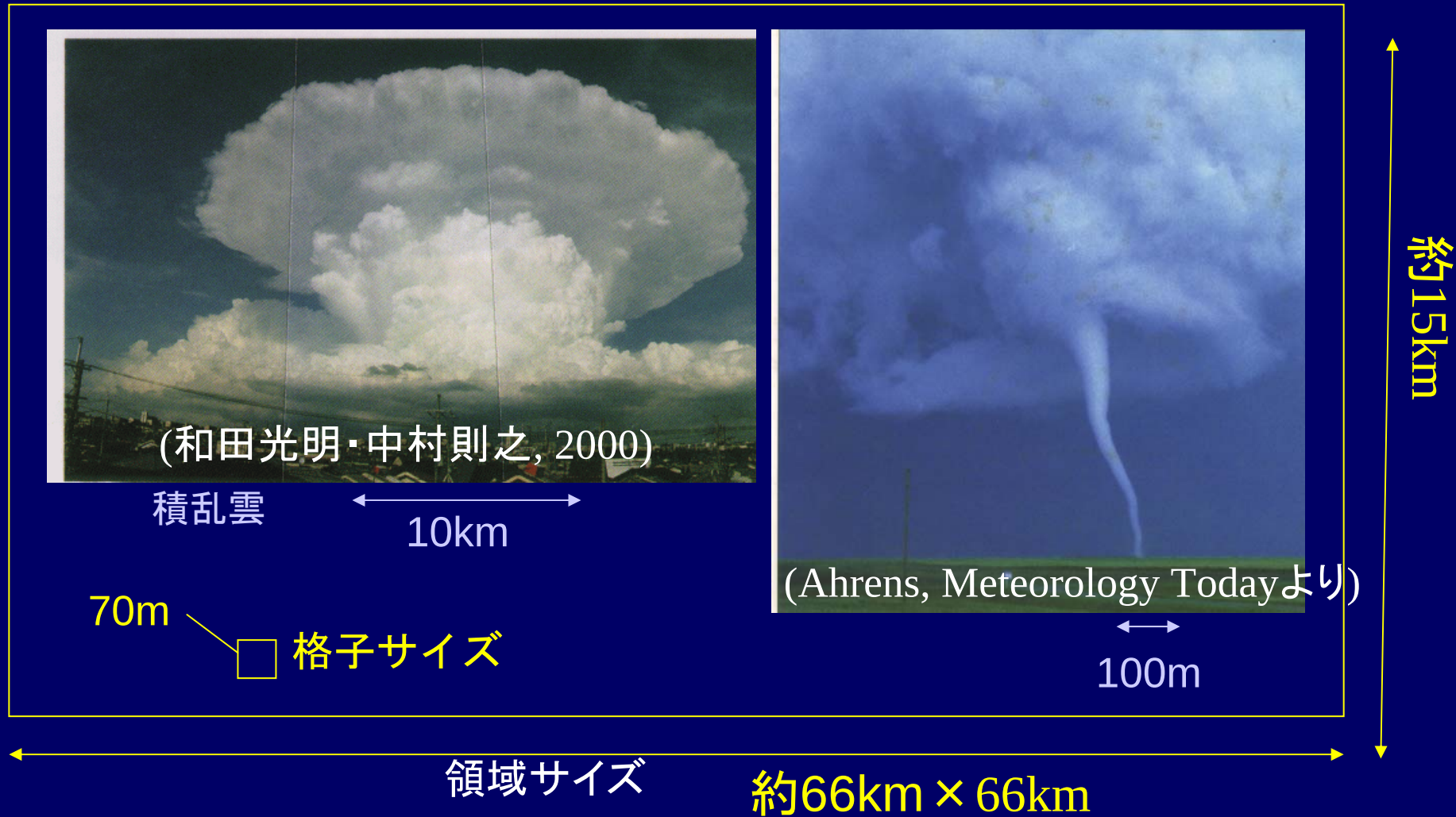


- ・メソサイクロンが検出されても 20% 程度しか竜巻を起こさない (Burgess, 1997)。
- ・メソサイクロン周辺の構造が似ていても竜巻を起こす場合と起こさない場合がある (Wakimoto and Cai, 2000)。

数値実験による竜巻の発生機構の研究

(Noda & Niino, 2005)

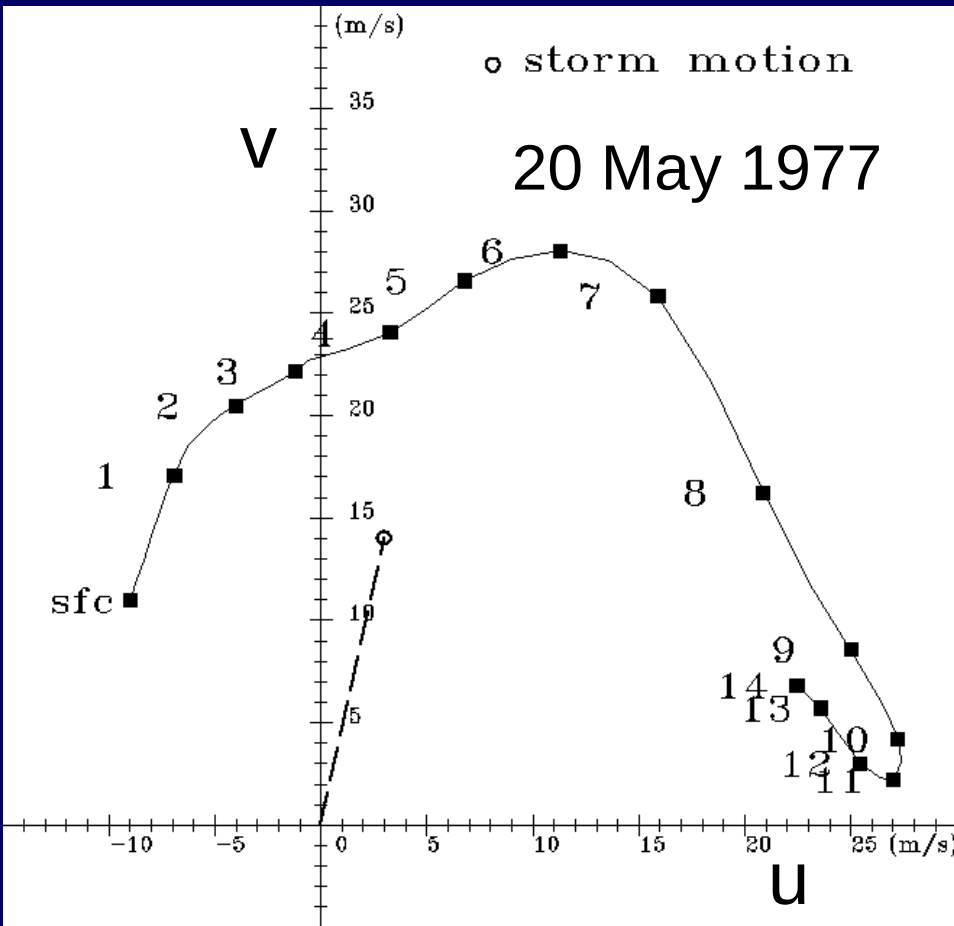
難しさ: 竜巻と積乱雲のスケールが2桁違う



ARPS (Advanced Regional Prediction Model) Ver. 4.2.1 (Xue et al., 1995)

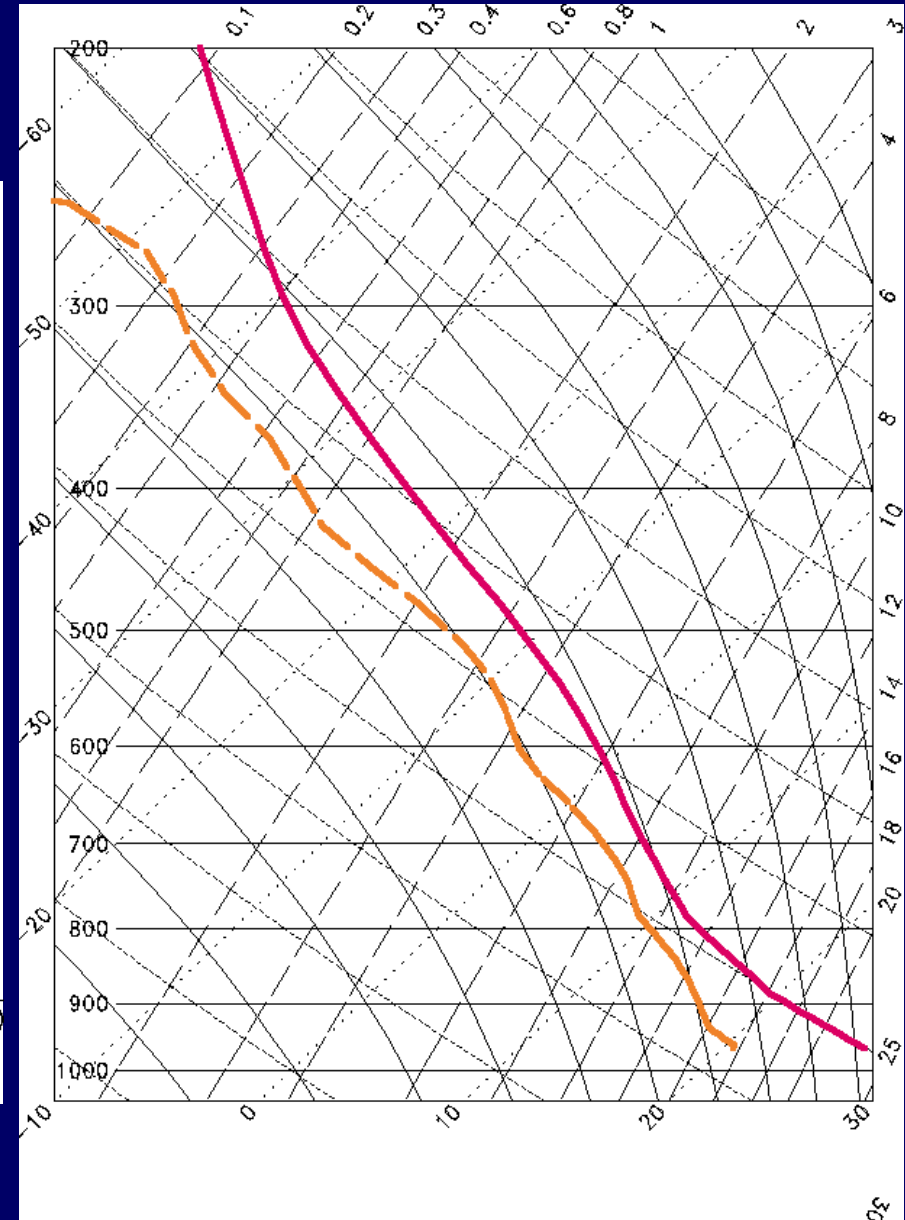
Del City Storm

風のホドグラフ

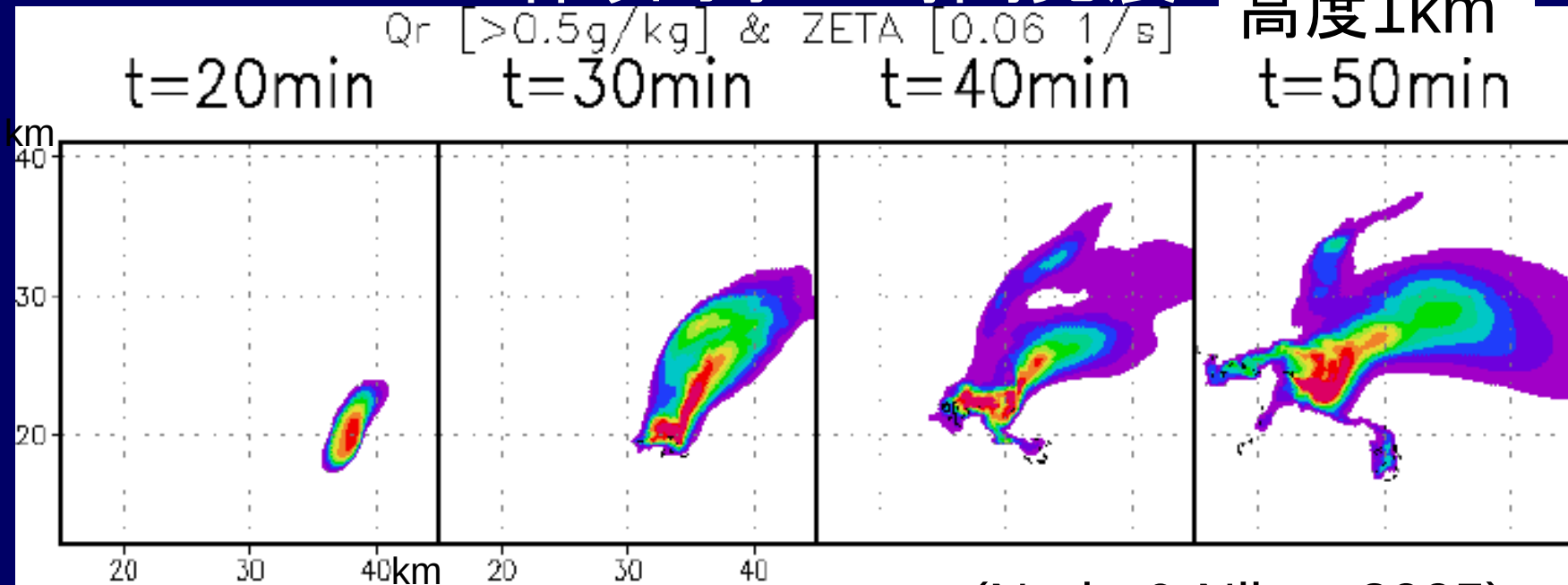


Composite of 1500 CST at Ft. Sill
and 1620 CST at Elmore City

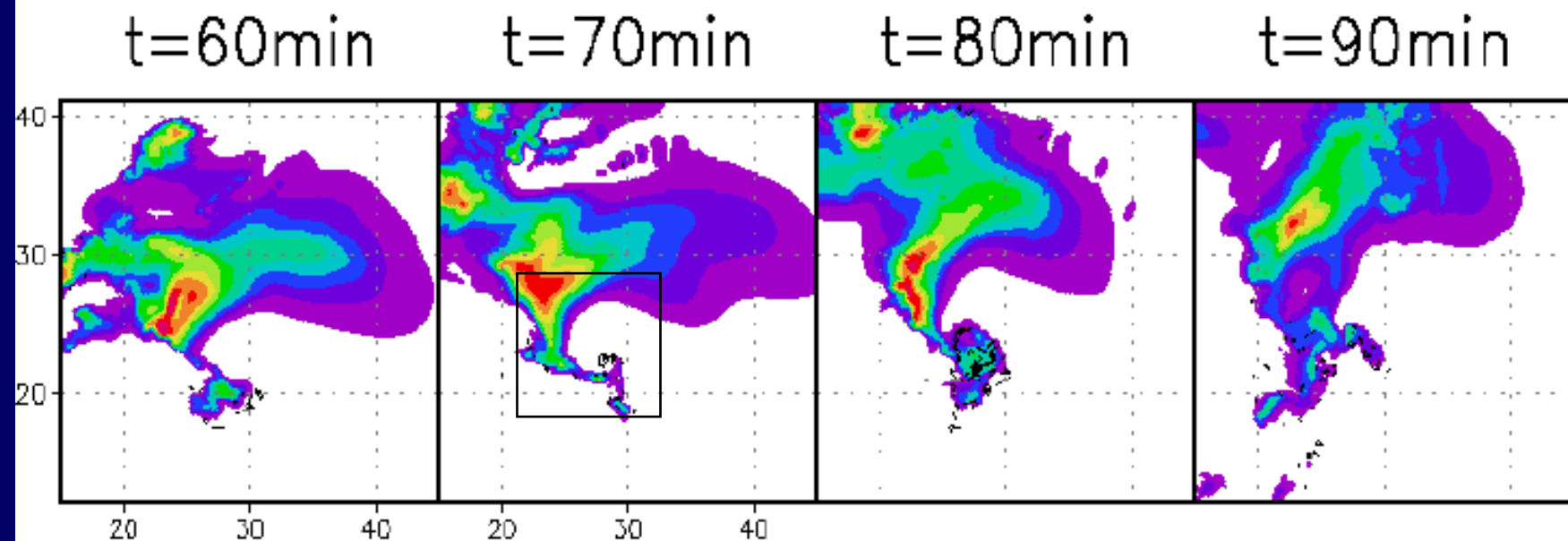
温度・水蒸気の混合比



スーパーセルに伴う雨水の時間発展

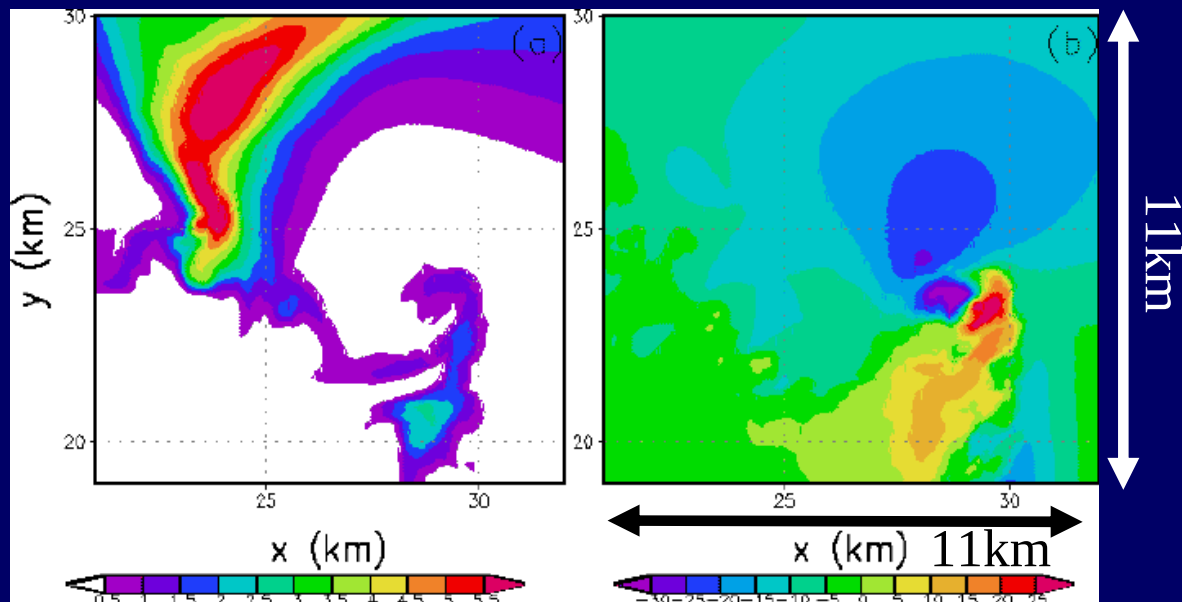


(Noda & Niino, 2005)



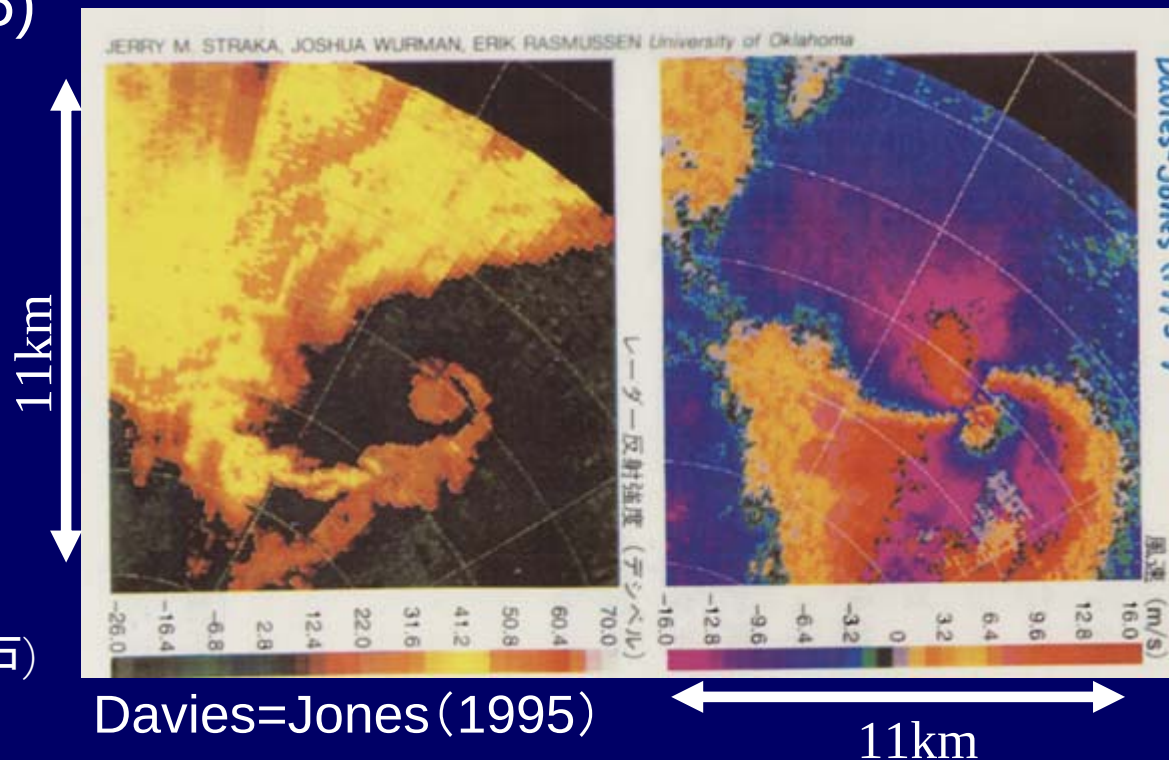
シミュレーション結果と 観測との比較

シミュレーション結果
雨水(左)、風速(右)
高度1km t=4500s
(Noda & Niino, 2005)



観測結果

1995年5月16日カンザス州
ジェットモアで車載レーダーに
よって観測されたスーパーセル
反射強度(左)、ドップラー速度(右)



竜巻と漏斗雲の時間変化 (東から見た)

=4406—4550s
(dt=2.88s x 51 フレーム)

灰色: 雲水混合比
>0.3g/kg

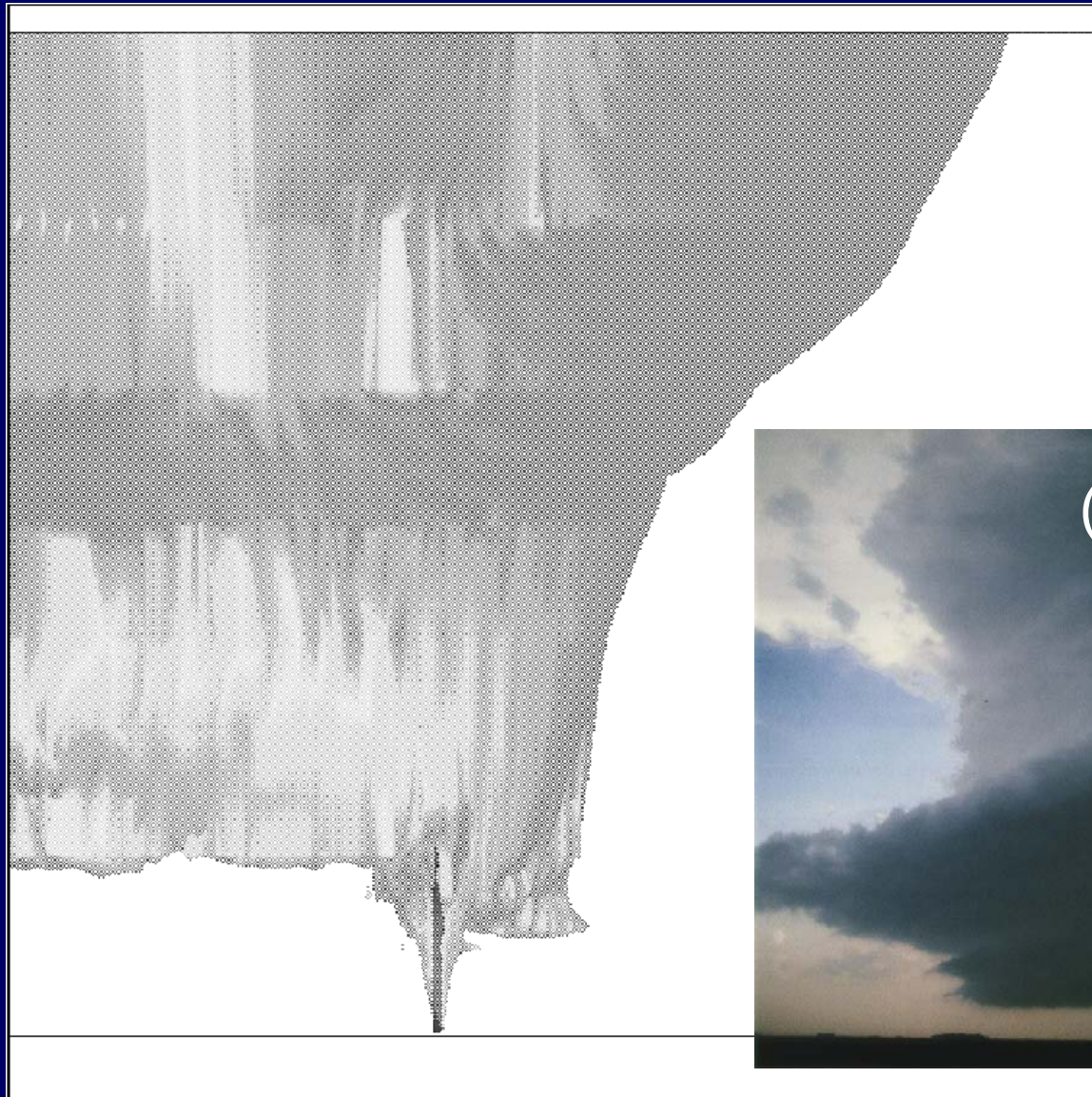
赤: 鉛直渦度 > 0.7s^{-1}

← 地面

(Noda & Niino, 2005)

8.4km

シミュレートされた竜巻と漏斗雲



(Noda & Niino, 2005)

現実大気の現象の写真



(Bluestein, 1999)



時間一高度断面 ($t=3000-5000\text{s}$)

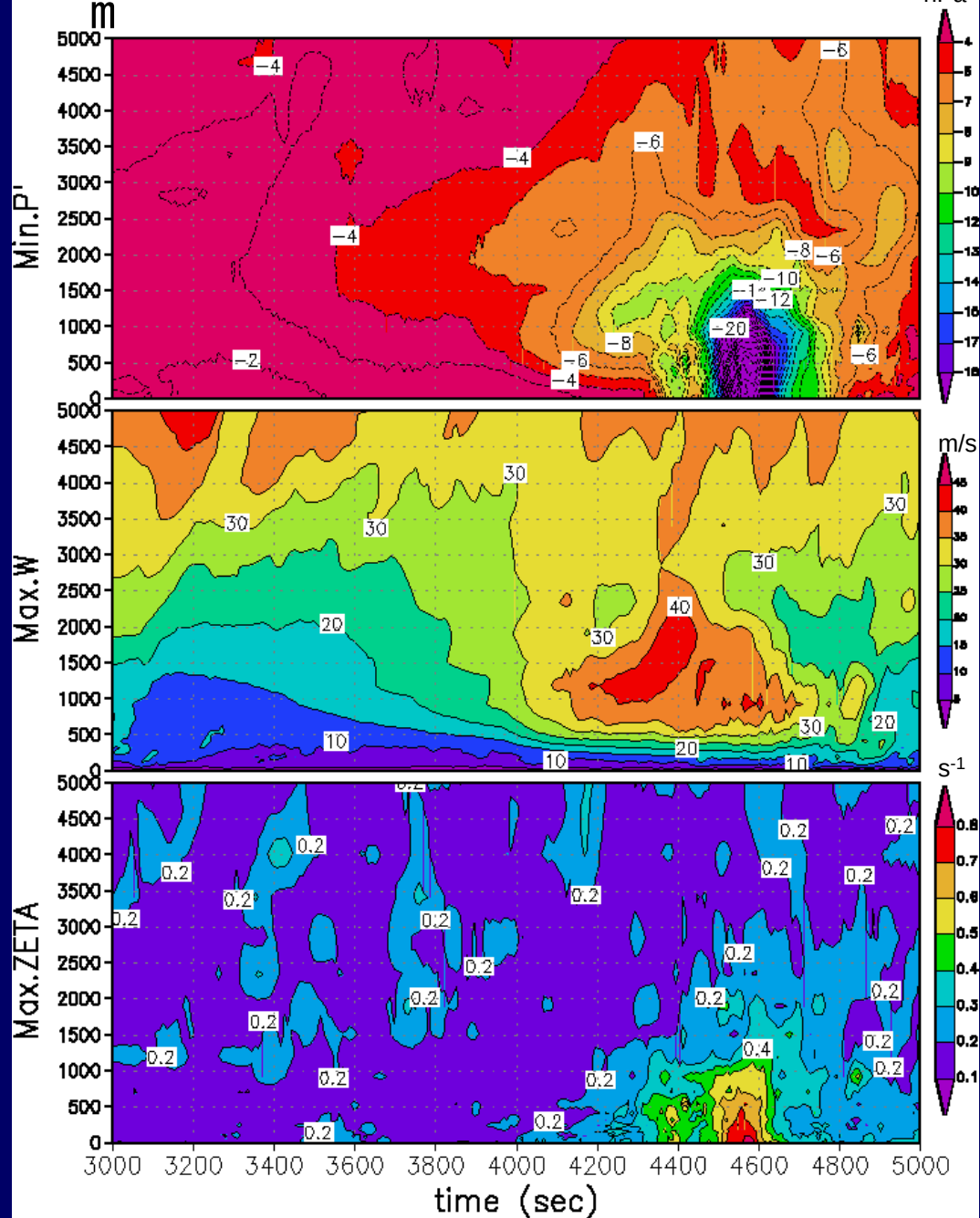
気圧偏差の最小値

上昇流の最大値

(Noda & Niino, 2005)

鉛直渦度の最大値

竜巻発生前には下層のメソサイクロンの発達に伴い
40m/sを越える上昇流が高度1km以下に発達。



Stages I

II

III

IV

鉛直渦度の時間変化

($t=3900-4587\text{s}$)

高度1km

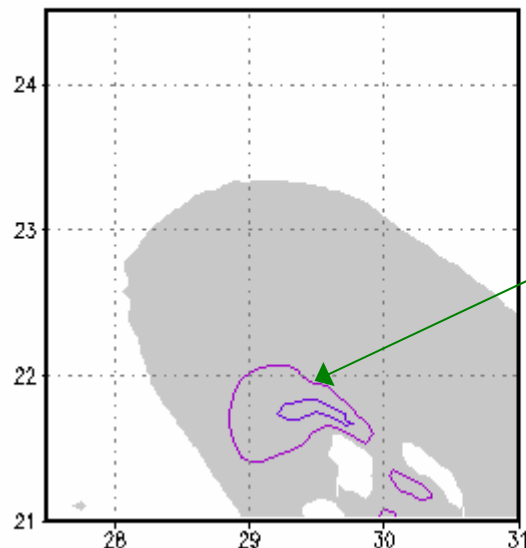
高度5m

(Noda & Niino, 2005)

等値線間隔 : 0.05s^{-1}
影 : 鉛直渦度 $>0.01\text{s}^{-1}$

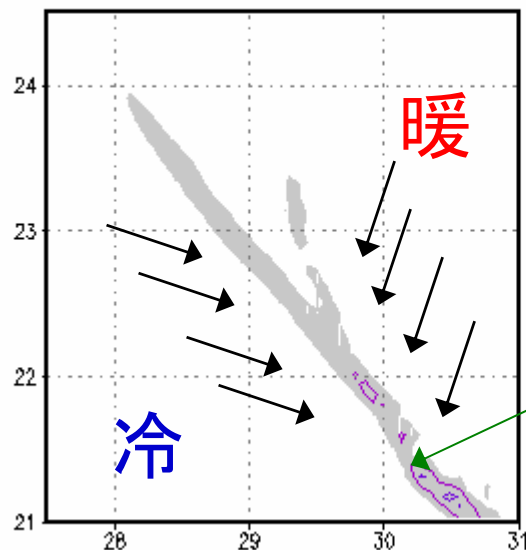
ZETA (shaded >0.01 ; cint = 0.05 s^{-1})
 $t=3900\text{s}$

$z=1000\text{m}$



メソサイクロン

$z=5\text{m}$



ガストフロント

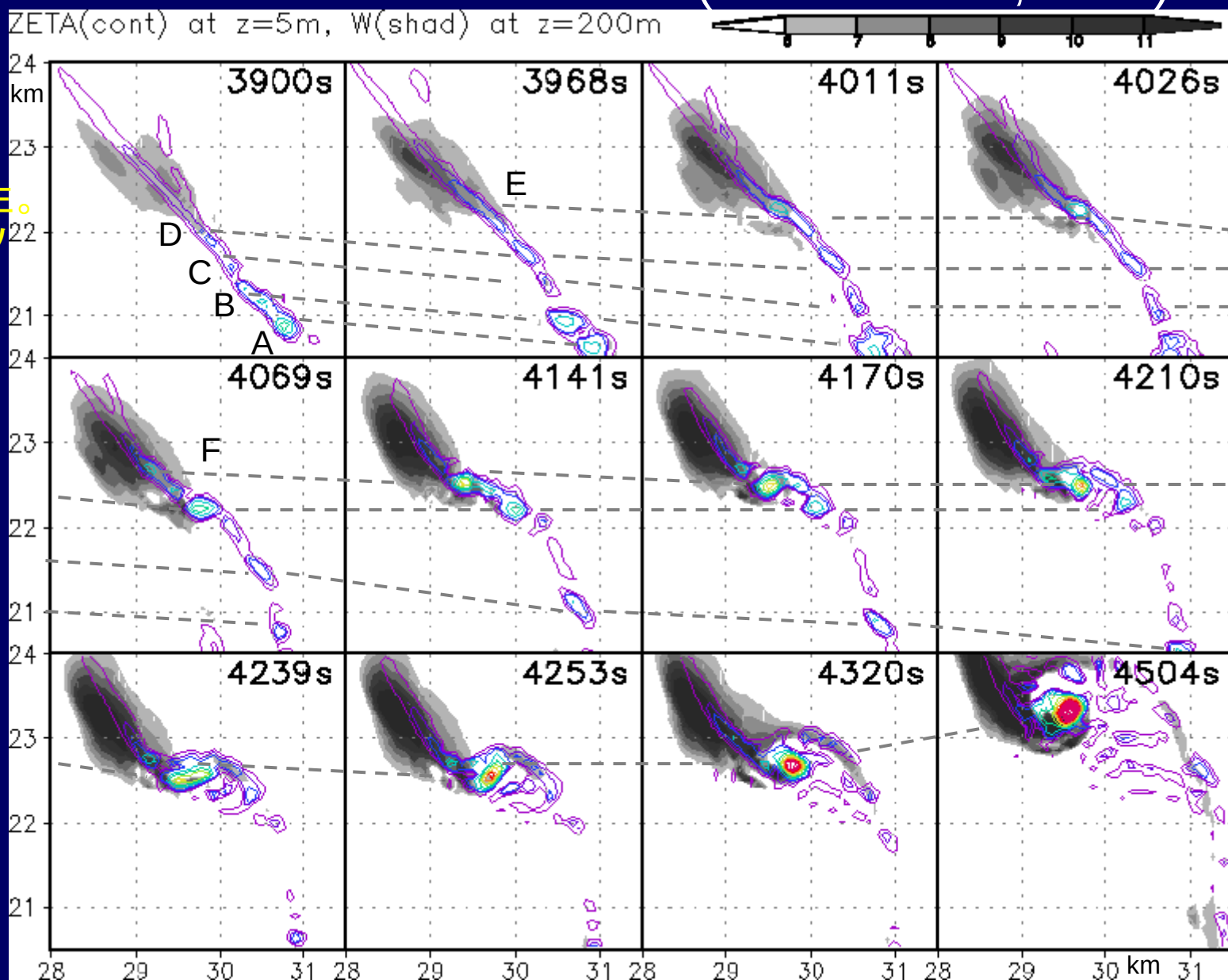
竜巻渦と上昇流との関係の時間発展

(Noda & Niino, 2005)

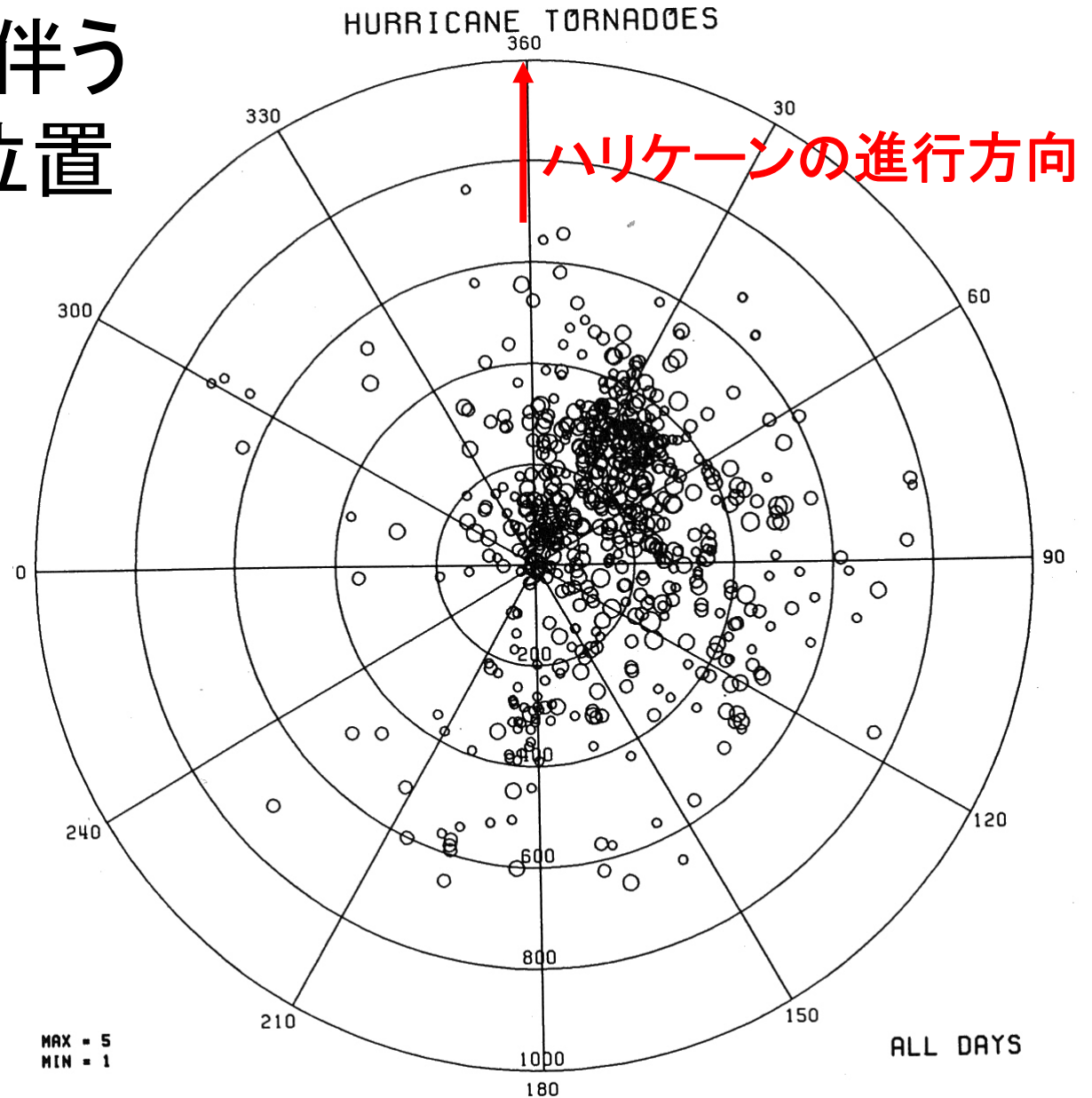
上昇流とガストフロント上の渦がカップリングすることで竜巻が発生。→なぜ20%のメソサイクロンしか竜巻を発生させないかを説明。

等値線：
z=5mの鉛直渦度

陰影：
z=200mの上昇流



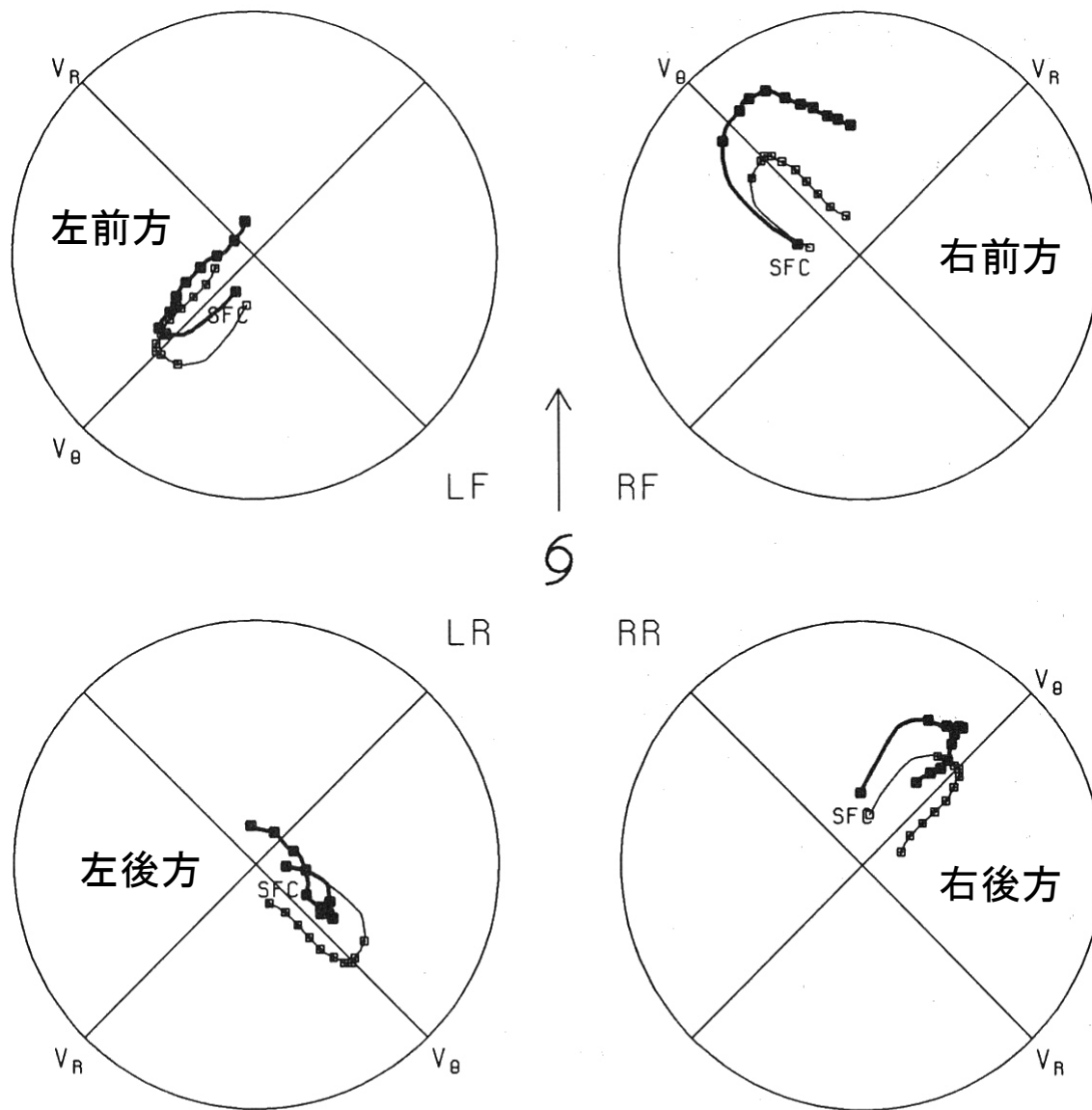
ハリケーンに伴う 竜巻の発生位置



McCaul(1993)

Fig. 3. Locations of all reported hurricane tornadoes in the United States, 1948–1986. Tornadoes are plotted at azimuths taken relative

各象限の風の hodograph

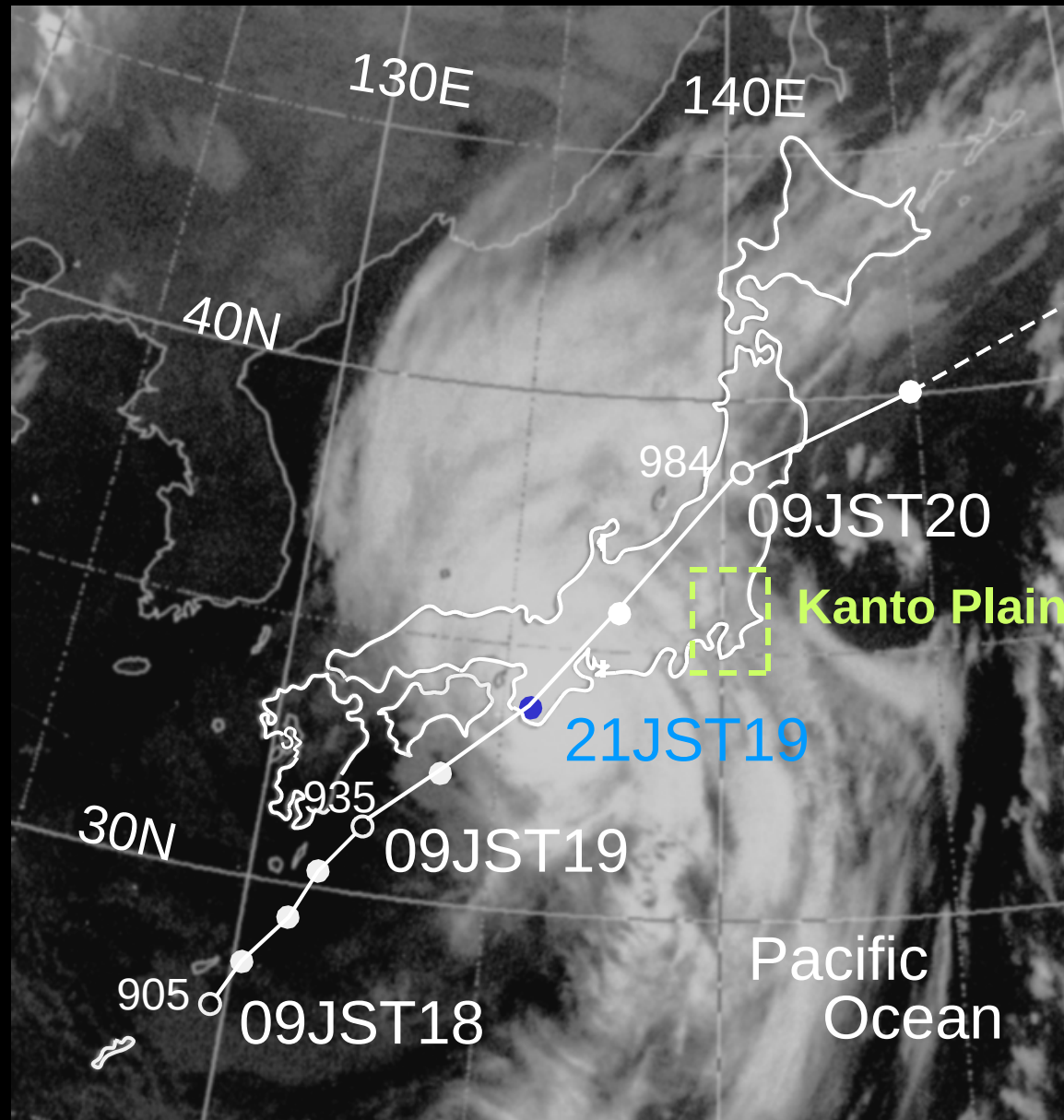


細線は全象限の平均

McCaul(1993)

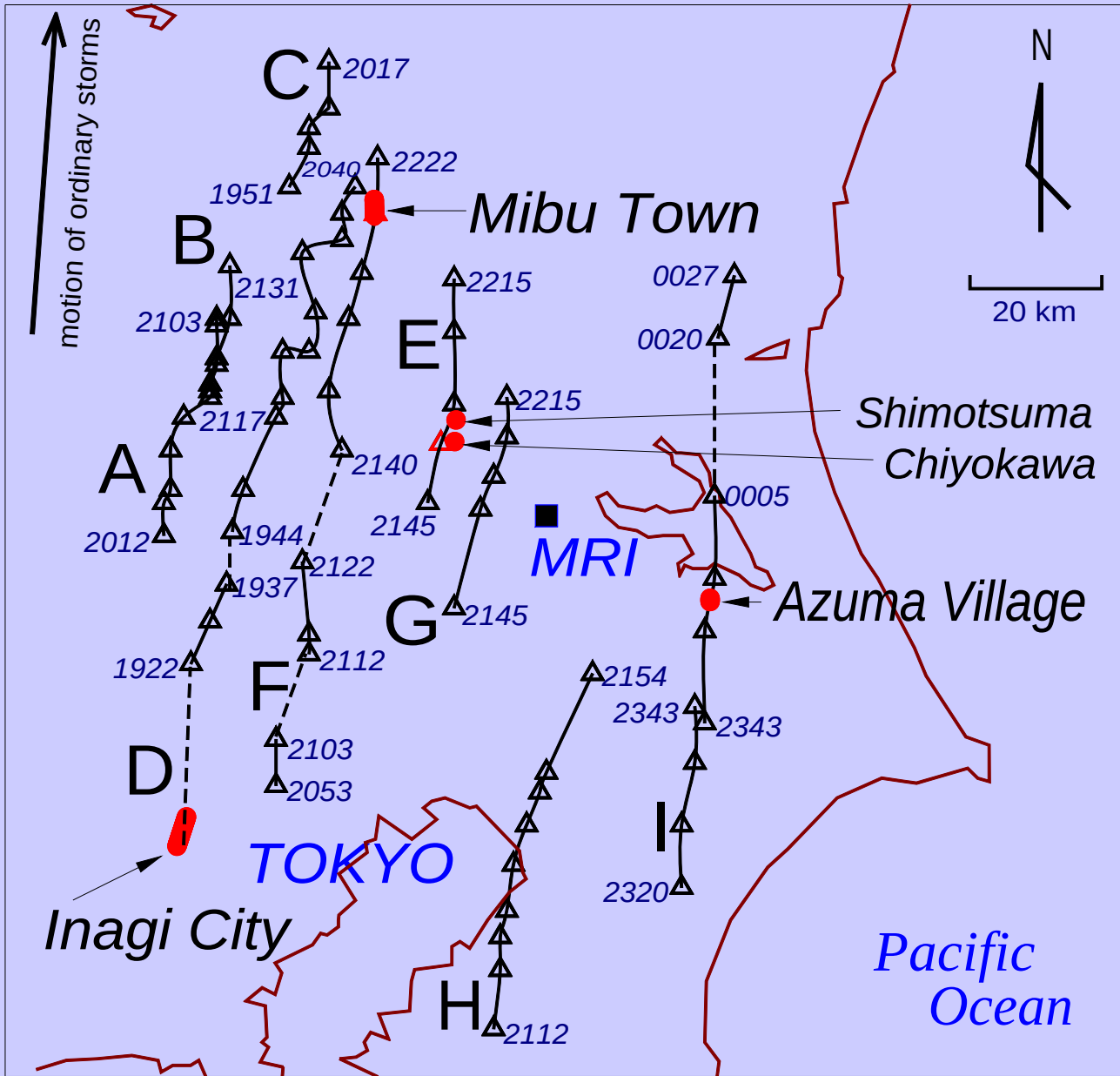
Fig. 12. Quadrant composite hodographs (heavy lines) arranged in their respective quadrants around the composite hurricane, which is assumed to be moving to top of diagram as shown. Mean hodograph of the four quadrants (light lines) is shown in each quadrant for

1990年9月19日栃木県壬生の竜巻



ひまわり4号 赤外画像 (1990年9月19日 21時) (Suzuki et al.,2000)

気象研究所ドップラーレーダーで観測されたメソサイクロン



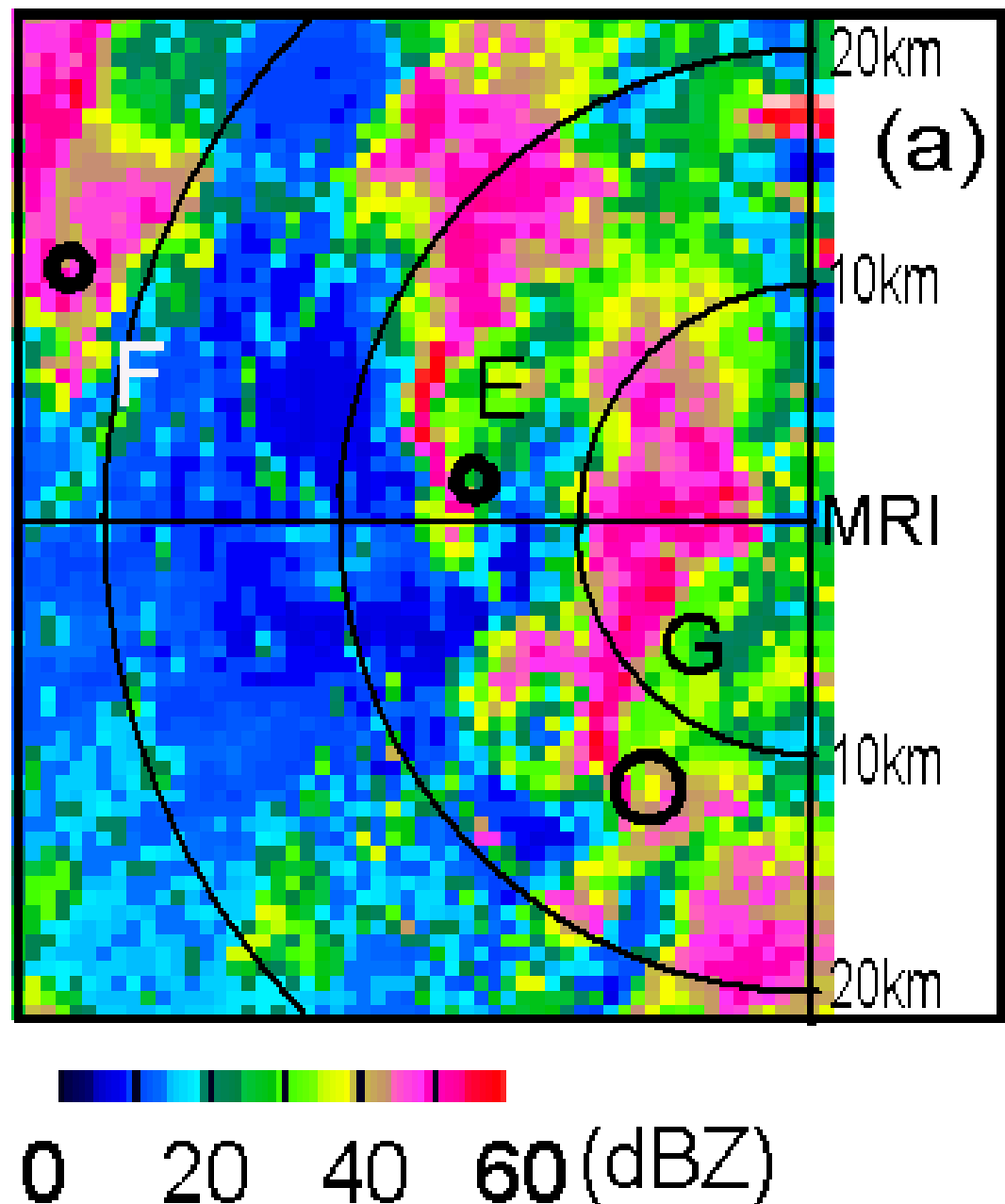
1990年9月19日19時22分～20日 0時27分 (Suzuki et al., 2000)

気象研ドップラー
レーダーの反射強
度のPPI画像とメ
サイクロンの位置

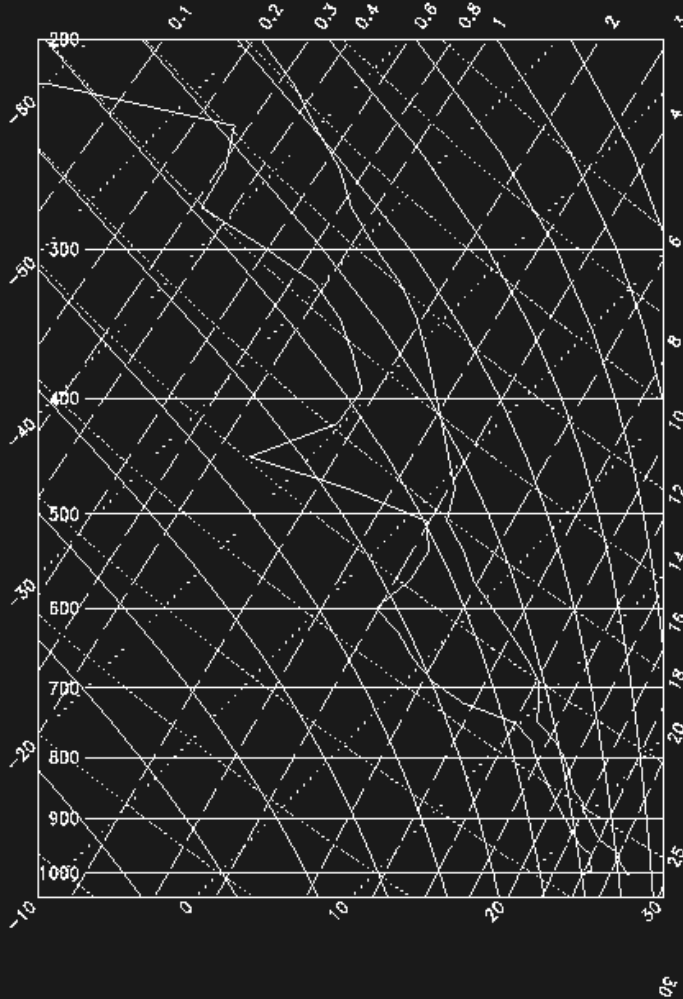
仰角 2.2 度

1990年9月19日21時46 分

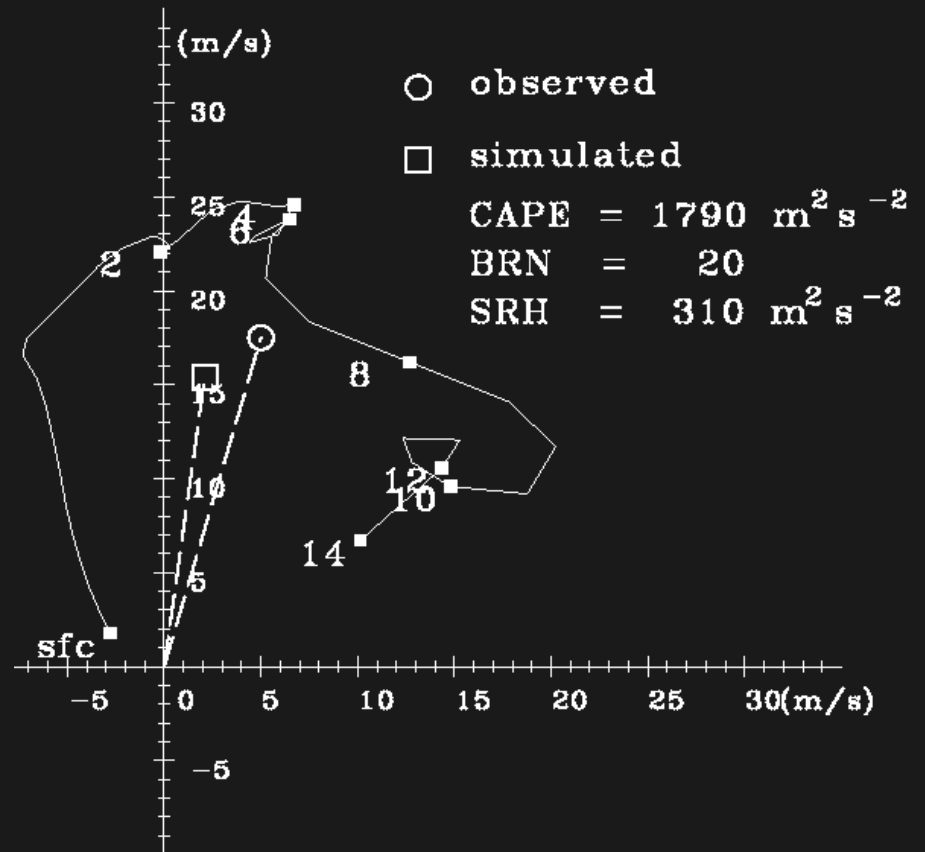
Suzuki et al.(2000)



Tateno (2030-2145JST 19 SEP 1990)



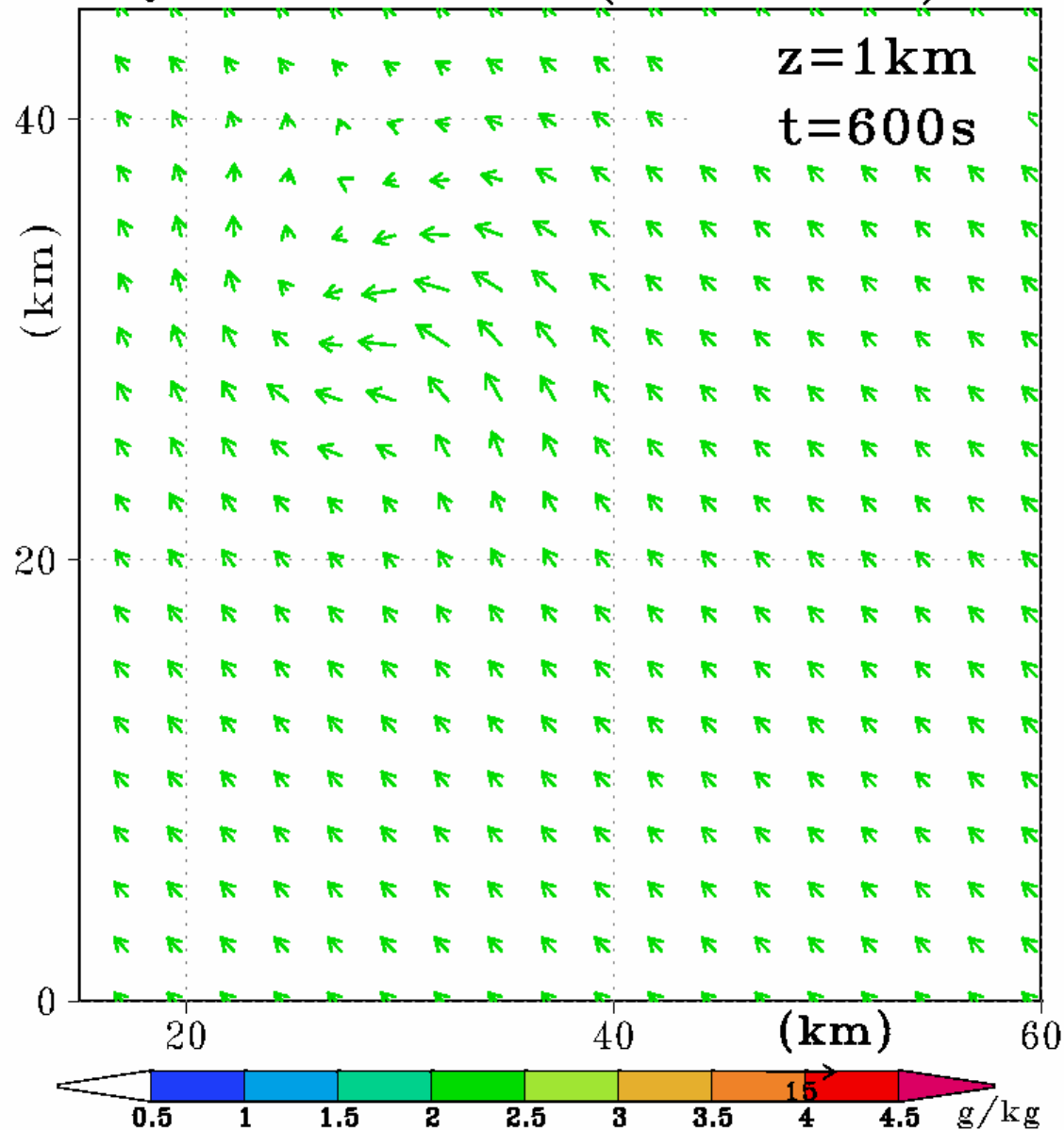
Skew T-log p diagram



Wind hodograph

Niino & Noda(2001)

Qr & Zeta > 0.005 s⁻¹ (CINT 0.01 s⁻¹)



Niino & Noda
(2001)

4. まとめ

- ・日本の竜巻の統計

発生密度はアメリカの約半分 統計の継続が重要

- ・竜巻の構造

新しい測器により説明が進みつつある

- ・竜巻の発生機構

1) 局地前線に伴うもの

2) スーパーセルに伴うもの

スーパーセルの力学は理解が進んでいる

(環境場が支配、メソサイクロン)

竜巻の発生には地表面近くのプロセスが重要？