

宮崎県で発生した台風に伴う竜巻の発生環境場

櫻井溪太*・向川均

* 京都大学大学院理学研究科

要旨

2006年9月17日宮崎県延岡市で台風に伴う顕著な竜巻(F2)が発生したときの環境場について、気象庁メソ数値予報モデルGPV(Grid Point Value)データを用いて求められた環境パラメータ及び複合パラメータを、他の3つの弱い竜巻事例と16個の非竜巻事例と比較した。その結果、延岡竜巻事例での宮崎地域の環境場は、他の事例に比べ、統計的に有意に大きな対流有効位置エネルギーCAPE(Convective Available Potential Energy)で表現される強い対流不安定性(平均値は391 Jkg⁻¹)と、非常に大きな水平風の鉛直シアに関するパラメータ(ストームに相対的なヘリシティの平均値は339 m²s⁻²)で特徴づけられることがわかった。

キーワード: 竜巻, 台風, 環境パラメータ

1. はじめに

1.1 日本における竜巻発生環境場

竜巻による被害を軽減させるには、竜巻発生ポテンシャルの予報を改善することが重要である。米国では、大気環境場を定量的に表現する環境パラメータを用いて、竜巻発生環境場を特徴づける統計解析がいくつか行われている(Rasmussen, 2003; Thompson et al., 2003)。一方で、日本での竜巻を対象とした同様の手法による発生環境場の調査は少ない(例えば、櫻井・川村, 2008)。特に、複数の事例を用いて、日本の竜巻事例と非竜巻事例の環境場を比較した研究は存在しない。

一方、日本の竜巻は総観状況が様々であり(台風, 温帯低気圧, 寒冷前線, 停滞前線, 冬季季節風, 熱雷など), また、地域についても、北海道から沖縄の各地で発生している(Niino et al., 1997)。一般的に、環境パラメータは、地域や季節に依存して取り得る値の大きさが変化することが知られている(Chuda and Niino, 2005)。また、McCaul(1991)によると、ハリケーンに伴う竜巻の発生環境場での対流有効位置エネルギーCAPE(Convective Available Potential Energy)の値(253 Jkg⁻¹)は、米国中西部における典型的スーパーセルの発生環境場での値(2000 Jkg⁻¹以上)に比べ、一桁ほど小さいことを示している。すなわち、環境パラメータ(特に、大気の安定度に関するパラメータ)は総観状況にも依存する。したがって、日本の全ての

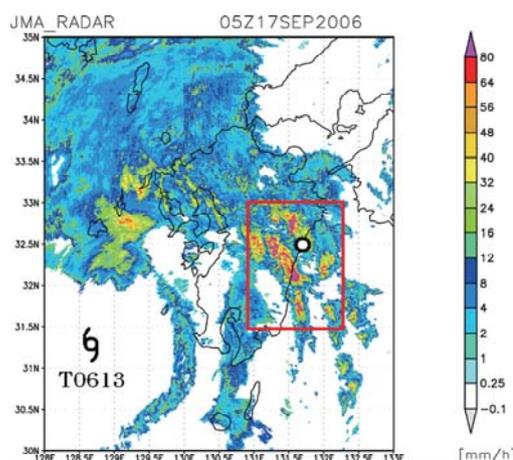


Fig. 1 JMA-Rader echo image at 05UTC on 17 Sep. 2006, corresponding to the closest time for the outbreak of tornado (F2) in Nobeoka of Miyazaki prefecture (shown by circle). The target area in which various parameters are computed shown by the red rectangle. Typhoon T0613 is moving northeastward over the East China Sea, west of Kyusyu.

竜巻事例に共通するような、一般的な竜巻の発生環境場での環境パラメータについて特徴的な値を得るのは非常に困難であると考えられる。そこで、本研究では、ある特定の状況(総観状況, 地域)に着目して解析を行うことにした。

1.2 本研究の目的

2006年9月17日、宮崎県では、台風 (T0613) に伴って少なくとも3つの竜巻が発生した。そのうちの1つは延岡市において甚大な被害 (F2-scale) をもたらし、3名が亡くなった (宮崎地方気象台, 2006) (Fig. 1)。Mashiko (2007)は、この延岡市の竜巻事例 (延岡竜巻事例) について、気象庁非静力学モデルによる高解像度シミュレーションにより、竜巻やその親雲となるスーパーセルを再現している他、その竜巻を伴うスーパーセルの周辺におけるいくつかの環境パラメータの水平分布を示している。しかしながら、示されている環境パラメータの値が他の (竜巻, 非竜巻) 事例と比べて、どのような特徴を持つのかは示されていない。そこで、本研究では、延岡竜巻事例に焦点を当て、宮崎県で他の台風に伴って発生した3つの弱い竜巻事例 (F0-2) や台風が接近したにもかかわらず宮崎県で竜巻が発生しなかった16個の台風接近事例 (非竜巻事例) と比較することにより、延岡竜巻事例に特徴的な環境パラメータの値を抽出することを試みた。このように、総観状況 (台風) と地域 (宮崎県) を限定すれば、(延岡竜巻事例の) 竜巻発生環境場を環境パラメータにより特徴づけることができると考えられる。また、延岡竜巻事例の環境場を環境パラメータの値で特徴づけることができれば、そのような他の事例と比較して顕著に異なる環境場が形成された要因についても考察できる。本研究では、延岡竜巻事例の環境場形成に寄与した総観場についても議論する。

本稿の構成は以下の通りである。第2章は使用データ・解析手法について説明する。第3章は延岡竜巻事例と他の事例との比較解析の結果について示す。第4章では、延岡竜巻事例の環境場形成に寄与した総観場について考察する。第5章はまとめを述べる。

2. 使用データ・解析手法

2.1 気象庁メソ数値予報モデルGPVデータ

本研究では、2002年5月から2006年までの気象庁メソ数値予報モデル (JMA-MSM; Saito et al. 2006) GPV (Grid Point Value) データ (以下、MSM-GPVデータ) を用いて、環境パラメータを計算した。JMA-MSMは気象庁で現業に使用されているメソ数値予報モデルである。本研究で使用したMSM-GPVデータは、MSMの出力結果をもとに、地上データ及び指定気圧面データとして格納されて、気象業務支援センターから提供されているものである。MSM-GPVデータは、JMA-MSMの更新に伴ってデータ仕様の変更がなされている。主な変更点は、2006年3月より、水平解像度が 10 km 格子から 5 km 格子になったことが挙げられる。また、2002年5月

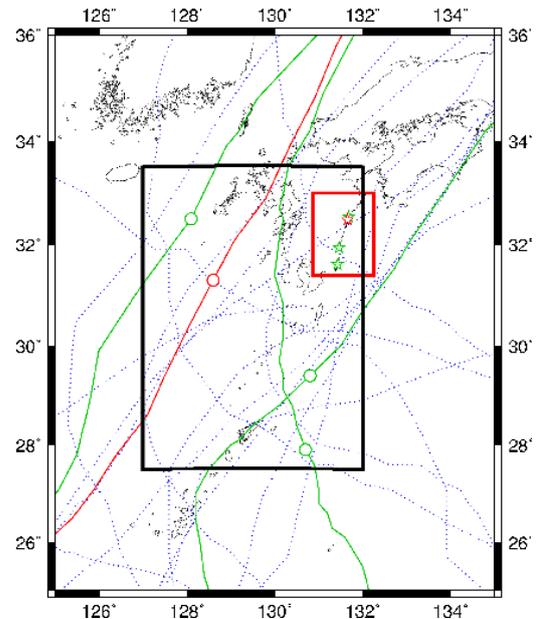


Fig. 2 The tracks of typhoons passing through the key area (black rectangle). The red line is the typhoon (T0613) track of the Nobeoka-Tor event. The green (blue dotted) lines are the weakTor (nonTor) events. The stars show the tornado outbreak points and the circles correspond to the typhoon's centers at the outbreak time of the tornadoes. The red rectangle is the same as that in Fig. 1.

から2006年2月までは6時間毎に、初期値から18時間後までの予報値が提供されていたが、2006年3月以降では3時間毎に、初期値から15時間後までの予報値が提供されている。さらに、MSM-GPVの気圧面データは、2006年2月以前が 20 km 格子、2006年3月以降が 10 km 格子点上で提供されている。また、提供された指定気圧面の層数は、前半期では14層 (975~100 hPa)、後半期では16層 (1000~100 hPa) である。

2.2 事例の抽出

解析期間では、延岡竜巻 (Nobeoka-Tor) 事例の他に3つの台風に伴い宮崎県で弱い (Fスケールが小さい) 竜巻 (weakTor) が発生した。Fig. 2 に、気象庁ベストトラックを用いて、各台風の経路を示した。4つの竜巻事例では、いずれも竜巻は台風の東及び北の象限で発生しており、McCaul (1991) が示した台風に伴って竜巻が発生しやすい領域と一致している。そこで、これらの竜巻事例と総観状況がよく似ている非竜巻 (nonTor) 事例を抽出するために、Fig. 2 に示した黒の太線で囲んだ領域 (127° -132° E, 27.5° -33.5° N; 以下key areaと呼ぶ) を台風が通過している時のMSM-GPVデータを全て抽出した。これにより、抽出された非竜巻の台風は16事例である。本研究で使用した竜巻事例 (延岡竜巻事例, 弱い竜巻事例) と非竜巻

Table 1 The tornadic events in Miyazaki prefecture from May 2002 to Dec. 2006. The data time closest to the tornado outbreak is shown in the first column. The events from the first to third row are classified into weak tornadic (weakTor) events in this paper. The details of these events are referred to the severe storm database of the JMA (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html> 2009/02/20) and the survey report on the natural disaster (Miyazaki District Meteorological Observatory, 2006)

Data time	Tornado outbreak	F-scale
2003/06/19/00UTC	00:00UTC Kadokawa-cho	F1
2003/08/07/18UTC	16:40UTC Nichinan-city	F0-F2
2005/09/05/00UTC	01:30UTC Miyazaki-city	F1-F2
2006/09/17/06UTC	05:03UTC Nobeoka-city	F2

Table 2 The nontornadic (nonTor) events extracted in this study. Period and the number of data show those during which a typhoon passes through the key area shown by Fig. 2.

Thphoon number	Period	# of data
T0207	2002/07/ 14/18UTC-15/06UTC	3
T0209	2002/07/ 25/12UTC-26/00UTC	3
T0211	2002/07/ 26/18UTC-27/06UTC	3
T0215	2002/08/ 29/00UTC-31/00UTC	9
T0302	2003/04/ 25/00UTC-25/06UTC	2
T0304	2003/05/ 30/06UTC-30/12UTC	2
T0315	2003/09/ 19/18UTC-20/12UTC	4
T0319	2003/11/ 05/12UTC-06/00UTC	3
T0404	2004/06/ 10/12UTC-10/18UTC	2
T0406	2004/06/ 20/06UTC-20/12UTC	2
T0415	2004/08/ 18/18UTC	1
T0416	2004/08/ 29/00UTC-30/06UTC	6
T0418	2004/09/ 05/18UTC-07/00UTC	6
T0421	2004/09/ 28/06UTC-29/00UTC	4
T0423	2004/10/ 19/18UTC	1
T0610	2006/08/ 17/12UTC-18/15UTC	10

事例を、それぞれ Table 1 と Table 2 に示した。ここで、Table 1 に示すように、弱い事例にはF1-2スケールの1事例（2005/09/05/01:30UTC：宮崎市の竜巻）が存在するが、この事例はF1とF2の中間のFスケールとして扱う。

これらの事例について、竜巻発生地点近傍の環境場を解析対象領域として定義し、領域内のMSM-GPVデータを抽出する。本研究では、Fig. 1 と Fig. 2 に示す赤線で囲んだ領域（130.875° -132.25° E, 31.4° -33.0° N）を解析対象領域とした。この解析対象領域は、延岡竜巻事例での竜巻発生時のレーダーエコー合成図（Fig. 1）から、竜巻を発生させた親雲を含むメソ対流系（台風に伴うレインバンド）を十分含むことができ、かつ、宮崎地域の地域性が失われない大きさを持つ領域として設定した。また、この領域の大きさは、先行研究（Thompson et al., 2003など）で使用している近傍

基準と同程度の水平スケール（20～200 km）であるため、領域内の環境パラメータを、先行研究と比較できると考える。

本研究では、MSM-GPVデータは6時間予報値と12時間予報値を主に使用した。竜巻事例では竜巻発生時刻に最も近い時刻（Table 1 の1列目；Data time）、非竜巻事例ではkey areaに台風が存在しているときの時刻（Table 2 の2列目；Period）の各予報データを用いて、各環境パラメータを計算した。解析対象領域内のMSM-GPVデータの格子点数は、2006年2月以前が48個、2006年3月以降が204である。ただし、第3章で示す比較解析では、同じ解像度になるように後半期のデータを間引いて解析を行った。解析対象領域内の合計格子点数は、延岡竜巻事例が48個、弱い竜巻事例が144個、非竜巻事例が2928個である。ここで、6時間予報を用いて得られた同様の結論が12時間予報値でも得られたので、

本論文では、降水の予報精度が良かった6時間予報値を用いた結果のみを示す。

2.3 環境パラメータ及び複合パラメータ

環境パラメータは、主に、シビアストーム発生環境場もしくは熱雷発生環境場の解析などに用いられている一般的なパラメータを用いた。以下に使用した大気の安定度に関するパラメータ及び水平風の鉛直シアに関するパラメータを挙げる。具体的な計算式については大野 (2001) や櫻井・川村 (2008) が詳しい。

大気の安定度に関するパラメータについては、対流有効位置エネルギー (Convective Available Potential Energy; CAPE), ショワルターの安定指数 (Showalter Stability Index; SSI), リフティド指数 (Lifted index; Li), K指数 (K index; Ki), トータル・トータルズ指数 (Total Totals index; TT) 等を使用した。このうち、CAPE及びそれと同時に計算される対流抑制 (Convective INhibition ; CIN) や持ち上げ凝結高度 (Lifted Condensation Level; LCL), 自由対流高度 (Level of Free Convection; LFC), そして中立浮力高度 (Level of Neutral Buoyancy; LNB) については、持ち上げる空気塊の仮定を、下層 500 m AGL (Above Ground Level) で平均した気温と露点温度を持つ空気塊 (mCAPE, mCIN, mLCL, mLFC, mLNBと表記する) と、下層で最大相当温位を持つ空気塊 (muCAPE, muCIN, muLCL, muLFC, muLNBと表記する) の2種類について計算した。また、安定度の指標に良く用いられる 0-3km AGL 層の気温減率 (0-3km lapse rateと呼ぶ) も使用した。さらに、対流不安定性の指標として、対流圏下層での最大相当温位と中層での最小相当温位の差で表される相当温位差 ($\max \theta_e - \min \theta_e$) を使用した。

水平風の鉛直シアに関するパラメータについては、バルク・シア (Bulk Shear; BS), 平均鉛直シア (Mean Shear; MS), ストームに相対的なヘリシティ (Storm Relative Helicity; SRH), Bulk Richardson Number Shear (BRNS) を計算した。MSとSRHは、0-1km AGL と 0-3km AGL の各鉛直層について計算した。BSは、0-1km AGL, 0-3km AGL, さらに 0-6km AGL の各鉛直層について計算した。SRHの計算に必要なストーム移動ベクトルはBunkers et al. (2000) の方法を採用した。

本研究では、環境パラメータに加えて、環境パラメータを複合させたパラメータについても計算した。これについても、シビアストーム発生環境場の統計解析などを行った先行研究により提案されているパラメータを使用した。CAPEとBRNSの比で表されるBulk Richardson Number (BRN) (Weisman and Klemp, 1982), MSとCAPEの積からなるVorticity Generation Parameter (VGP) (Rasmussen and Wilhelmson, 1983), CAPEとSRH

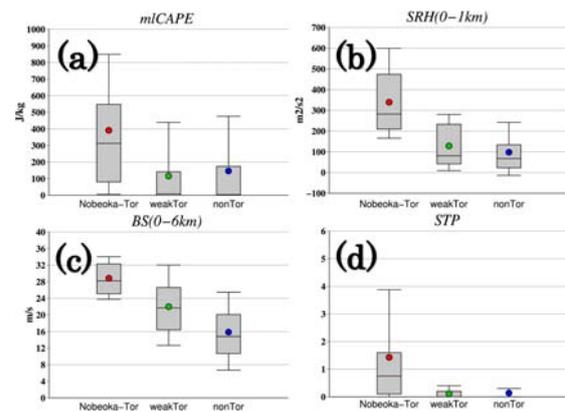


Fig. 3 Box and whiskers plots of some parameters for the Nobeoka-Tor event, weakTor and nonTor groups. (a) mCAPE (Jkg^{-1}), (b) 0-1km SRH (m^2s^{-2}), (c) 0-6km BS (ms^{-1}), (d) STP. The shaded boxes represent the 25th-75th percentiles, the whiskers extend to the 10th-90th percentiles, and the circles represent the median values.

の積で表されるEnergy Helicity Index (EHI) (Davies, 1993)などを計算した。また、Thompson et al. (2003)により提案された, Supercell Composite Parameter (SCP)及び Significant Tornado Parameter (STP)も使用した。SCPは、muCAPE と 0-3km SRH, BRNSからなり、米国におけるスーパーセルの発生環境場を診断するのに有効な閾値によって規格化されている。STPは、mCAPE, 0-6km BS, 0-1km SRH, LCL からなり、米国の強い (F2以上の) 竜巻を伴うスーパーセルの発生環境場を診断するのに有効なパラメータであると示されている。

3. 延岡竜巻事例と他の事例との環境場の比較

この節では、解析対象領域 (Fig. 2 : target area) におけるMSM-GPV6時間予報データで計算した様々な環境パラメータ及び複合パラメータについて、延岡竜巻事例と他の事例 (弱い竜巻事例, 非竜巻事例) との比較を行う。解析対象領域での分布の比較には箱ひげ図 (Fig. 3) を示す。また、平均値の比較には片側のStudentのt検定 (one-sided Student's t-test) を用いて、統計的に有意な差が得られるかどうかを確かめた (Table 3)。

Fig. 3a に示したように、延岡竜巻事例の宮崎地域では、弱い竜巻事例や非竜巻事例に比べ、大きなmCAPE値をもつMSM-GPVデータ格子点が多いことがわかる。Table 3 の3行目より、延岡竜巻事例でのmCAPEの平均値 (399 Jkg^{-1}) は、他の事例に比べ統計的に有意に大きいことがわかる。延岡竜巻事例でのmuCAPEの平均値 (374 Jkg^{-1}) についても、同様に、他の事例に比べ統計的に有意に大きい (Table 3には省略)。しかし

Table 3 Mean parameter values in the target area for the Nobeoka-Tor event, weakTor and nonTor groups. Boldfaced numbers indicate that the mean value for the Nobeoka-Tor event is different from the other two groups at 95 % confidence level. Italicized numbers mean that the value is significantly different from the nonTor group.

	Nobeoka-Tor	weakTor	nonTor
Thermodynamic parameters			
mlCAPE (Jkg ⁻¹)	391	116	146
mlCIN (Jkg ⁻¹)	51	39	62
max $\theta_e - \min \theta_e$ (K)	19.3	6.0	10.8
SSI (K)	<i>0.9</i>	2.0	2.1
Li (K)	-1.5	0.8	1.3
TT (°C)	41.3	38.5	38.5
0-3km lapse rate (°Ckm ⁻¹)	5.7	4.8	4.9
Ki (°C)	31.2	33.2	29.4
Shear parameters			
0-1km SRH (m ² s ⁻²)	339	<i>128</i>	98
0-3km SRH (m ² s ⁻²)	512	<i>318</i>	189
0-1km MS (s ⁻¹ × 10 ⁻³)	24.7	<i>17.9</i>	16.1
0-3km MS (s ⁻¹ × 10 ⁻³)	14.9	<i>11.7</i>	9.9
0-1km BS (ms ⁻¹)	14.6	<i>10.6</i>	9.2
0-3km BS (ms ⁻¹)	22.4	<i>17.9</i>	13.7
0-6km BS (ms ⁻¹)	28.9	22.0	15.9
BRNS (m ² s ⁻²)	112	48	38
Composite parameters			
mlBRN	4.2	5.5	31.3
0-3km mlEHI	1.3	0.2	0.2
0-3km mlVGP (ms ⁻²)	0.25	0.07	0.07
0-1km KHI	2.1	1.5	1.1
SCP	6.9	0.2	0.4
STP	1.4	0.1	0.1

ながら、延岡竜巻事例でのmlCAPEの平均値(399 Jkg⁻¹, Table 3 の3行目)は、米国における強い竜巻(F2以上)を伴うスーパーセルの環境場(Thompson et al., 2003)での平均値(2303 Jkg⁻¹)よりも一桁ほど小さい。一方、ハリケーンに伴う竜巻の発生環境場(McCaul, 1991)での平均値(253 Jkg⁻¹)と比べるとほぼ同じ値であり、McCaul(1991)が指摘した小さなCAPEで特徴づけられるハリケーンに伴う竜巻発生環境場の特徴は、台風にも共通すると考えられる。

一方、CAPEと同様に、延岡竜巻事例の環境場では他の事例に比べ大気が非常に不安定であることは、Li, TT, 0-3km lapse rate, max $\theta_e - \min \theta_e$ の値に有意な差があることから示される。Li(Table 3 の7行目)の平均値は延岡竜巻事例でのみ負の値(-1.5 K)を示している。延岡竜巻事例でのTT(Table 3 の8行目)の平均値は41.3 Kであるのに対して、弱い竜巻事例と非竜巻事例はともに38.5 Kである。0-3km lapse rate(Table 3 の9行目)の平均値は、延岡竜巻事例では他の事例より

も0.9~0.8 °Ckm⁻¹ほど大きい。そして、延岡竜巻事例でのmax $\theta_e - \min \theta_e$ (Table 3 の5行目)の平均値は19.3 Kで他の事例よりも約9 K以上も大きい。したがって、これらの大気の安定度に関するパラメータから、延岡竜巻事例の環境場は他の事例よりも顕著に対流不安定性であったことがわかる。

その他の大気の安定度に関するパラメータでは、SSI(Table 3 の6行目)とKiの平均値(Table 3 の10行目)は、各事例の間にあまり有意な差が見られなかった。その理由は、850 hPa から500 hPaの気圧面高度間での気温減率の平均値の差(0.5 °Ckm⁻¹; Table 3 には省略)が下層の気温減率(0-3km lapse rate)の平均値の差(0.9~0.8 °Ckm⁻¹)よりも小さく、下層の不安定を表現できていないためと考えられる。また、mlCINの平均値(Table 3 の4行目)についても、各事例では有意な差は得られなかった。これは、下層500 m平均空気塊の湿度の平均値が各事例とも約90%であったことから、台風によって運ばれた湿潤な空気により、どの事例も

大気下層が非常に湿っているためと考えられる。

次に、Fig. 3b, c に示したように、延岡竜巻事例の環境場での 0-1km SRH と 0-6km BS は、mlCAPEよりも明瞭に、他の事例に比べ大きな値に分布が集中していることがわかる。約 $200 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ よりも大きな 0-1km SRH や、約 25 ms^{-1} よりも大きな 0-6km BS は、延岡竜巻事例では全体の75%以上を占めているに対し、他の事例ではおよそ25%以下でしかない。Table 3 の12行目と19行目より、それらのパラメータの平均値の差は、延岡竜巻事例と他の事例との間で統計的に有意であることが示されている。Table 3 の12行目から18行目に示した全ての鉛直シアーに関するパラメータの平均値でも、延岡竜巻事例と他の事例との間に有意な差が得られている。特に、0-1km SRH と 0-6km BS ではその違いが明瞭である。さらに、延岡竜巻事例での 0-1km SRH の平均値 ($339 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$) は、Thompson et al. (2003)が示した米国の強い竜巻を伴うスーパーセルの発生環境場での平均値 ($185 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$) よりも、2倍ほども大きいことがわかった。したがって、延岡竜巻事例の環境場は、非常に大きな水平風の鉛直シアーで特徴づけられる。

最後に、複合パラメータについては、Fig. 3d に示したように、mlCAPE, 0-1km SRH, 0-6km BS を含むSTP は、延岡竜巻事例で平均値が、Thompson et al. (2003)により提案された閾値 (1.0) を超える。大きな値に数多く分布していることがわかる。Table 3 の26行目から、延岡竜巻事例と他の事例とでは、STPの平均値に有意な差が得られている。STPと同様に、mlCAPEと 0-3km SRH を含むEHIやVGP (0-3km mlEHI, 0-3km mlVGP : それぞれTable 3 の22行目, 23行目) も、延岡竜巻事例と他の事例との間に有意な差が存在する。また、muCAPE, 0-3km SRH, BRNSを含むSCP (Table 3 の25行目) についても、その平均値の差は有意である。ただし、延岡竜巻事例でのSTPやEHIなどのCAPEを含む複合パラメータの平均値は、Thompson et al. (2003)が示した米国の強い竜巻を伴うスーパーセルの発生環境場での平均値よりも小さい。これは、先述したように、CAPEの値が小さく、Thompson et al. (2003)が示した閾値 (1000 Jkg^{-1}) を超えないためと考えられる。しかし、STPやSCPは、EHIやVGPよりも、鉛直シアーに関するパラメータを一つ多く含んでいるため、延岡竜巻事例と他の事例とをより明瞭に区別している。

一方、 K_i と 0-1km SRH を含む KHI (0-1km KHI : Table 3 の24行目) の平均値では、延岡竜巻事例と他の事例との間の差は有意である。しかしながら、 K_i が各事例でほとんど同じ値であるために、その有意な差は 0-1km SRH のみの差によって生じている。

以上の様々な環境パラメータ及び複合パラメータの

統計的解析から、延岡竜巻事例の環境場は、総観状況がよく似た他の弱い竜巻事例や非竜巻事例に比べ、比較的大きなCAPEなどで表される強い対流不安定性と、非常に大きなSRHやBSで表される非常に大きな鉛直シアーで特徴づけられ、スーパーセルの発生に適した大気状態を示していたことが、MSM-GPV6時間予報値 (及び12時間予報値) で確認された。特に、延岡竜巻事例の環境場における水平風の鉛直シアーは、米国の強い竜巻を伴うスーパーセルの発生環境場に対する閾値 (Thompson et al., 2003) よりも非常に大きいことも示された。

4. 延岡竜巻事例の環境場形成要因に関する考察

前章の結果から、延岡竜巻事例の環境場は、総観場が比較的良好に似た他の事例 (弱い竜巻事例, 非竜巻事例) とは異なる顕著な特徴を有することが明らかになった。本章では、その顕著な環境場の形成要因について、総観場から考察を行う。

Fig. 4 に示したのは、延岡竜巻事例の竜巻発生時刻に最も近い MSM-GPV6 時間予報データ (2006/09/17/00UTC 初期値+6時間) で描いた、975 hPa 気圧面 (Fig. 4a) と 500 hPa 気圧面 (Fig. 4b) での相当温位 (カラー) と風 (ベクトル) の分布図である。Fig. 4a を見ると、下層 (975 hPa 気圧面) では、台風 (T0613 : 相当温位 360 K 以上の暖気核が九州の西に確認できる) の南東に、相当温位 345 K 以上の高相当温位の領域がバンド状に南北に伸びており、ちょうど九州東部に侵入していることがわかる。この高温多湿の空気は南から台風に伴う南東風によって移流されてきている。さらに、Fig. 4b を見ると、上層 (500 hPa 気圧面) では、台風の南側を周り九州の南東側にまで伸びる336 K 以下の低相当温位領域 (緑色の領域) が、下層の暖湿域の上空に位置していることがわかる。このように上層での明瞭な寒気移流は延岡竜巻事例のみに見られ、他の弱い竜巻事例や非竜巻事例では顕著ではなかった (図省略)。Fig. 5a に延岡竜巻事例におけるmlCAPEの空間分布を示した。このmlCAPEの分布図と $\max \theta_e - \min \theta_e$ の分布 (図省略) は良く一致している。したがって、延岡竜巻事例の環境場でのmlCAPE (399 Jkg^{-1} : Table 3 の3行目) が他の事例に比べ非常に大きかったのは、台風に伴う下層の高相当温位領域の上層に、低相当温位の空気が流入したことで、台風の南東側において対流不安定が強化されたためと考えられる。

さらに、延岡竜巻事例における非常に大きな鉛直シアーの環境場について、水平風の鉛直分布を考察するために、Fig. 6 に解析対象領域で領域平均した水平風

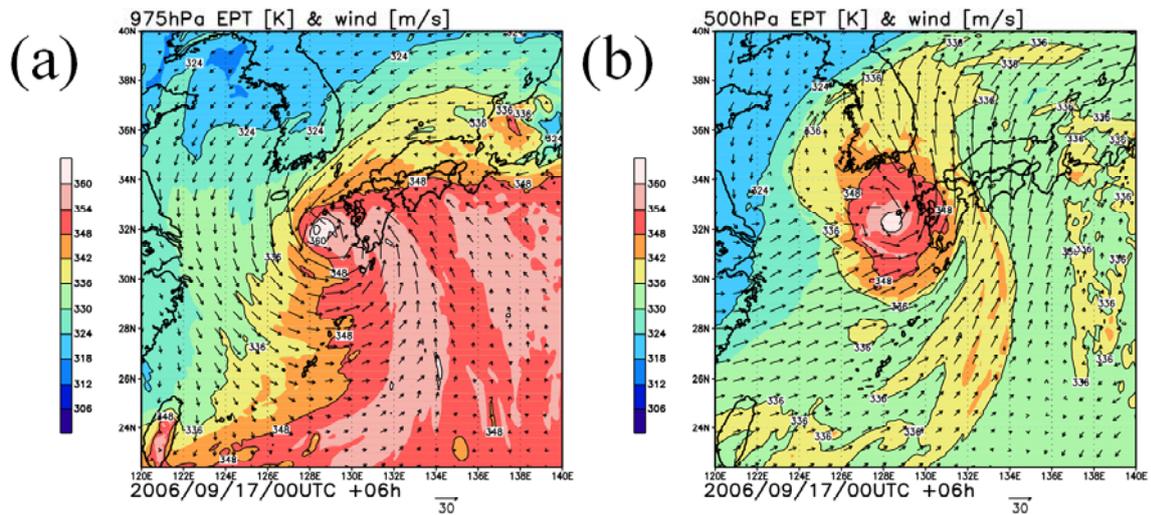


Fig. 4 The distributions of equivalent potential temperature (K) (color) and wind (vector) on (a) 975 hPa and (b) 500 hPa at 06UTC on 17 Sep. 2006, which is closest to the Nobeoka-Tor outbreak. The reference vector at the bottom of each figure indicates $30 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$.

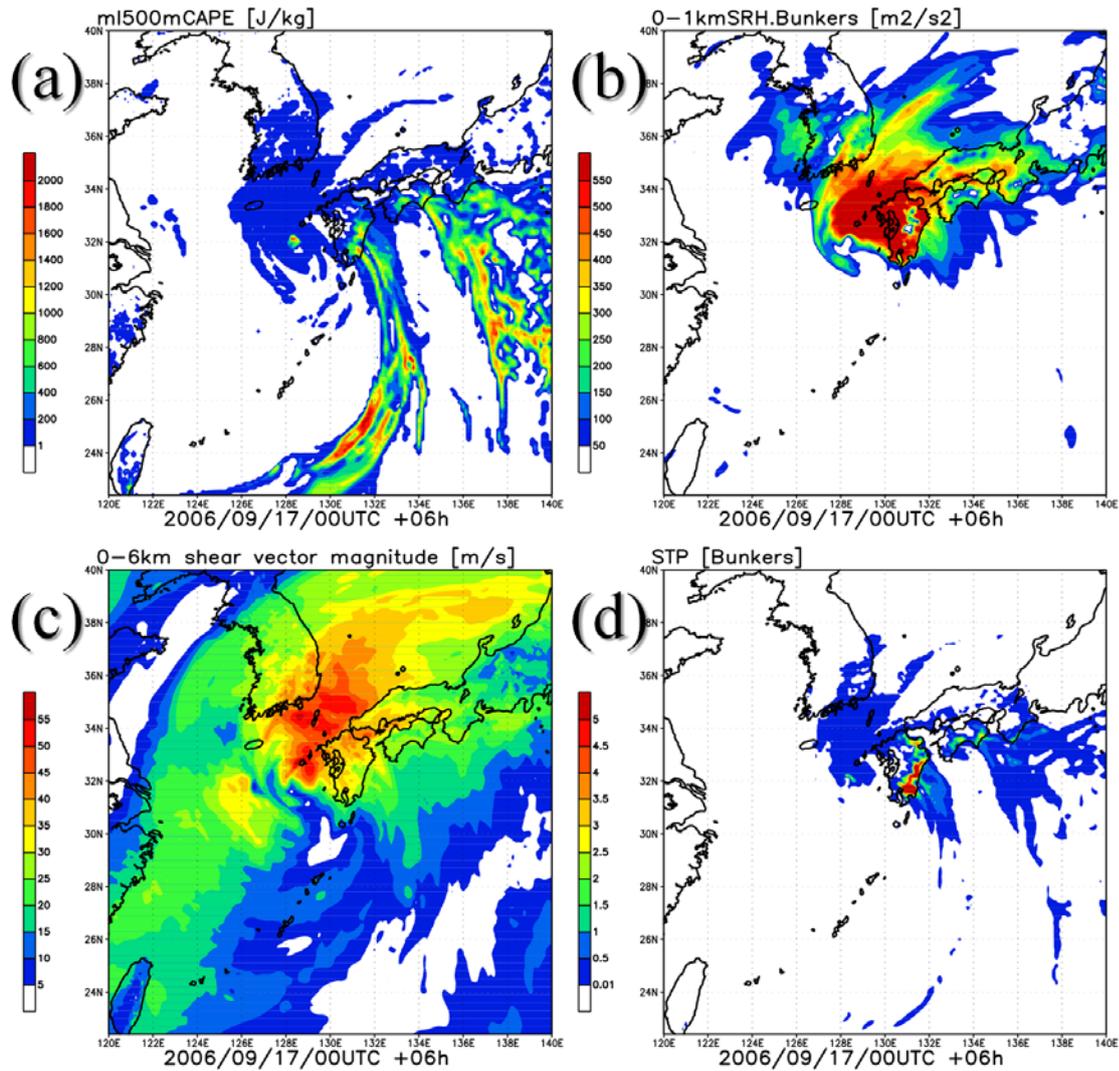


Fig. 5 The spatial distributions of (a) mCAPE (Jkg^{-1}), (b) 0-1km SRH (m^2s^{-2}), (c) 0-6km BS (ms^{-1}) and (d) STP calculated using the 6-hr forecast data of MSM-GPV at 06UTC on 17 Sep. 2006, which is closest to the Nobeoka-Tor outbreak.

の hodograph を各事例について示した。この hodograph を見ると、延岡竜巻事例 (実線) は他の事例に比べ、明らかに地上付近から高度 6 km 付近までにかけて大きく時計回りに回転しており、鉛直シアが非常に大きいことがわかる。この特徴的な hodograph は各鉛直シアに関するパラメータが非常に大きいことと対応している。さらに、下層 1 km で鉛直シアベクトルの向きが大きく変化しており、スーパーセルの発生・発達に適した環境場 (Klemp 1987) であることがわかる。また、延岡竜巻事例の 0-6km の鉛直層における hodograph は、McCaul (1991) が示したハリケーンに伴う竜巻の発生環境場に比べても大きく時計回りに回転している。すなわち、延岡竜巻事例の環境場での鉛直シアに関するパラメータは、ハリケーンに伴う竜巻の発生環境場と比べても大きな値であることが推察される。

このような延岡竜巻事例の環境場における水平風の鉛直分布の形成要因について、総観場から考察を行う。まず、Fig. 4a に示した下層風の分布に着目すると、台風の東に位置する九州東部では、台風中心に吹き込む強い南東風が吹いていることがわかる。このような下層風は、台風が九州に接近しても勢力を維持しているためにもたらされる。図は省略するが、台風中心に吹き込む風は、下層ほど台風中心に向う成分が大きく、850 hPa 気圧面より上層では風はほぼ等高線に平行に吹いていた。したがって、延岡竜巻事例の環境場での水平風は、下層で高度とともに時計回りに風向が変化しやすいと考えられる。Fig. 5b に示したように、0-1km SRH の値は、台風の北東象限の広い範囲で $500 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 以上になっている。一方で、Fig. 4b に示した上層風は、九州東部では強い南風となっている。この強い南風は、台風の西側で強い西風ジェットとつながっている。すなわち、台風はこのとき、亜熱帯ジェット気流の領域を通過しており、強い西風は台風の南側を回り込んで、台風の東側で北向きに向きを変え、台風の北東へと吹き出すような流れを形成している。したがって、台風が北上とともに強い西風ジェット帯に侵入したことで、結果として、台風の東側の南風が強化されたと考えられる。この強い西風による台風東側の南風強化は、700 hPa 気圧面でも見られた。台風北東象限において 25 ms^{-1} 以上の大きな 0-6km BS の値が広く分布している (Fig. 5c)。これらの鉛直シアに関するパラメータは、台風が北上し強い西風ジェット帯に侵入するとともに大きくなっていることが確認された。

以上の考察から、下層での台風中心に吹き込む強い暖湿気流とともに、上層のトラフに伴う強い西風ジェット帯に台風が侵入したことによる、寒気移流や台風東側の南風の強化が原因となって、大きな CAPE や SRH、そ

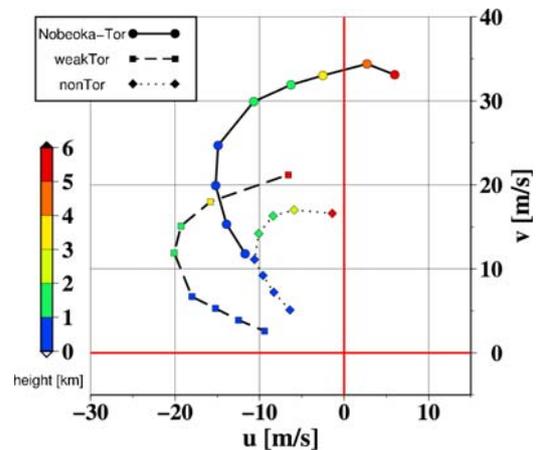


Fig. 6 The hodograph averaged over the target area for the Nobeoka-Tor event (solid line), weakTor (broken line) and nonTor (dotted line) groups. The colors represent the altitudes of each pressure level averaged over the target area.

して STP などの複合パラメータの大きな値で表されるメソ α スケールの竜巻発生環境場が形成されていたことが明らかになった (Fig. 5d)。このような総観場の状況が CAPE や SRH の顕著な増大に寄与していたのは延岡竜巻事例のみであり、他の弱い竜巻事例や非竜巻事例では、このような総観場の特徴は見られない。また、米国におけるハリケーンに伴う竜巻の発生環境場で SRH が比較的小さな値をとることも、以下のような総観場の特徴から説明できる。すなわち、一般に、東アジア域において、上層の西風ジェットは北アメリカ地域よりもより低緯度にあり、また、より強い。このため、ハリケーンは西風ジェット帯に侵入する前に衰退してしまい、延岡竜巻事例のように鉛直シアに関するパラメータは大きくならないと考えられる。

5. おわりに

本研究では、2006年9月17日に宮崎県延岡市で台風 T0613 に伴って発生した強い竜巻 (延岡竜巻) 事例に着目し、気象庁メソ数値予報モデル GPV (MSM-GPV) の予報データを用いて環境パラメータ及び複合パラメータを求めた。また、他の台風に伴って宮崎県で発生した弱い竜巻3事例と、宮崎県では竜巻が発生しなかった16個の台風接近事例の環境場との比較を行い、延岡竜巻事例の環境場について以下のような特徴を明らかにした。

延岡竜巻事例の環境場における CAPE, Li, TT, 0-3km lapse rate, $\max \theta_e - \min \theta_e$ の平均値は、他の事例に比べ、片側95%信頼区間の t-検定で統計的に有意に、より不安定な大気状態の値を示していた。したがって、

延岡竜巻事例の環境場は、強い対流不安定で特徴づけられることがわかった。一方、延岡竜巻事例の環境場での鉛直シアーに関するパラメータの平均値も、他の事例に比べ統計的に有意に大きかった。特に、0-1km SRH, 0-6km BSの分布は、延岡竜巻事例と他の事例とで、有意に異なることが示された。さらに、延岡竜巻事例の環境場でのSRH (鉛直シアーに関するパラメータ)は米国におけるハリケーンに伴う竜巻の発生環境場に比べ大きいことも示唆された。これらの環境パラメータによって表現される延岡竜巻事例の環境場の形成には、勢力を維持した台風が強い上層西風ジェット帯に侵入するという総観場の状況が寄与していた。

上記のような大気の安定度に関するパラメータと鉛直シアーに関するパラメータによって表現される環境場の特徴から、延岡竜巻事例の環境場は、CAPEやSRHからなるEHI, SCP, STPなどの複合パラメータによって、他の事例と明瞭に区別できることがわかった。したがって、これらの複合パラメータにより、延岡竜巻事例での竜巻発生ポテンシャルを事前に予測することは十分可能であったと示唆される。

このような、延岡竜巻事例の環境場について、総観場がよく似た他の複数の竜巻事例や非竜巻事例と比較することにより、特徴的な環境パラメータを示したのは本研究が初めてである。本研究で行った解析手法をより多くの事例に適用することにより、日本で発生する竜巻を伴う雷雨の発生環境場の実態とポテンシャル予報の有効性(環境パラメータの閾値)を調べることが可能になると考えられる。ただし、その場合にも、本研究で指摘したように、日本では様々な総観状況や地域で竜巻が発生するため、総観状況や地域を限定して解析を行う必要がある。また、本研究で定義した解析対象領域の範囲についても、どの程度の広さが最も適切であるかを今後検証する必要がある。現在、このような地域依存性や解析対象領域の範囲についての問題を解決するために、過去に日本に接近した台風に伴う竜巻事例について、全球客観再解析データを用いた解析を進めている。

謝 辞

本研究で使用した気象庁メソ数値予報モデルGPVデータは気象業務支援センターにより提供されたものである。図の作成には、GrADS (The Grid Analysis and Display System) とGMT (The Generic Mapping Tools) を使用した。

参考文献

- 大野久雄 (2001) : 雷雨とメソ気象, 東京堂出版, 309 pp.
- 櫻井溪太・川村隆一 (2008) : 日本における竜巻発生環境場と予測可能性, 天気, 第55巻, pp. 7-22.
- 宮崎地方気象台 (2006) : 平成18年台風第13号に伴い9月17日に宮崎県で発生した竜巻等の突風, 災害時自然現象報告書2006年第1号, 52 pp.
- Bunkers, M. J., B. A. Klimowski, J. W. Zeitler, R. L. Thompson, and M. L. Weisman (2000): Predicting supercell motion using a new hodograph technique, *Wea. Forecasting*, Vol. 15, pp. 61-79.
- Chuda, T., and H. Niino (2005): Climatology of environmental parameters for mesoscale convections in Japan, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 83, pp. 391-408.
- Davies, J. M. (1993): Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. *Proc. of 17th Conf. on Severe Local Storms*, *Amer. Meteor. Soc.*, pp. 107-111.
- Klemp, J. B. (1987): Dynamics of tornadic thunderstorms. *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, Vol. 19, pp. 369-402.
- Mashiko, W. (2007): Numerical simulations of tornado-producing supercell storm and tornado associated with Typhoon Shanshan (2006), *Proc. of 12th Conf. on Mesoscale Processes*, *Amer. Meteor. Soc.*, 13.5.
- McCaul, Jr., E. W. (1991): Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 119, pp. 1954-1978.
- Niino, H., T. Fujitani and N. Watanabe, (1997): A statistical study of tornadoes and waterspouts in Japan from 1961 to 1993, *J. Climate*, Vol. 10, pp. 1730-1752.
- Rasmussen, E. N. (2003): Refined supercell and tornado forecast parameters, *Wea. Forecasting*, Vol. 18, pp. 530-535.
- Rasmussen, E. N. and R. B. Wilhelmson (1983): Relationships between storm characteristics and 1200 GMT hodographs, low-level shear, and stability. *Proc. of 13th Conf. on Severe Local Storms*, *Amer. Meteor. Soc.*, J5-J8.
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki (2006): The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 134, pp. 1266-1298.
- Thompson, R. L., R. Edwards, J. A. Hart, K. L. Elmore and P. Markowski (2003): Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle, *Wea. Forecasting*, Vol. 18, pp. 1243-1261.

Weisman, M. L. and J. B. Klemp (1982): The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 110, pp. 504-520.

**Characteristics of the Meso-scale Environments of Storms
Associated with Typhoon-spawned Tornadoes in Miyazaki, Japan**

Keita SAKURAI* and Hitoshi MUKOUGAWA

* Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

In order to elucidate meso-scale environmental characteristics contributing the generation of a typhoon-spawned significant tornado (F2) occurred in Nobeoka of Miyazaki prefecture, Japan in 2006, environmental and composite parameters in Miyazaki are examined in comparison with typhoon-spawned 3 tornadic events in Miyazaki and 16 nontornadic events using the forecast dataset of the operational nonhydrostatic mesoscale model of the Japan Meteorological Agency (JMA). It is found that the significant tornado in Nobeoka is accompanied by enhanced convectively unstable environment with large vertical wind shear, which is represented by a relatively large convective available potential energy (CAPE) and significantly large shear parameters (e.g. storm relative helicity; SRH) compared with other tornadic and nontornadic events.

Keywords: Tornado, Typhoon, Environmental Parameter