

1053：1071：401：407（スーパーセル；温帯低気圧；熱帯低気圧；アンサンブル予報）

5. 竜巻—その環境場の理解と予測可能性に向けて—

新 野 宏*

1. はじめに

大気現象には様々な階層構造が存在するが、竜巻も一連の階層構造の中の1つの現象として起きることが少なくない。すなわち、強い竜巻（水平スケール L が数10～数100 m）の多くはスーパーセル(Browning 1964)と呼ばれる特殊な積乱雲 (L ～数10 km) の中でメソサイクロン (L ～数 km) と呼ばれる回転する上昇気流に伴って生ずる。そして、スーパーセルの多くは、温帯低気圧 (L ～数1000 km) の暖域や熱帯低気

圧 (L ～1000 km) の北東象限ないしは進行方向前方右象限で発生する。また、竜巻の中には、竜巻渦より一回り小さい吸込渦 (suction vortex; Fujita 1971) という副次的な渦を持つものも存在する。

竜巻の予報可能性を考えるためには、これらの階層構造の中で、どのような環境が与えられれば竜巻が発生する、あるいは発生する可能性が高いか、を理解していくことが必要である。これまでの研究で、スーパーセルの発生しやすい環境場や、スーパーセルの中でメソサイクロンが作られる機構については理解が進んできた (Klemp 1987)。しかし、スーパーセルの中で竜巻が作られる機構の理解は現在も十分ではなく、活発に研究が行われている (例えば、Markow-

* 東京大学大気海洋研究所。
niino@aori.u-tokyo.ac.jp
© 2016 日本気象学会

ski and Richardson 2009; 益子 2016など)。一方、温帯低気圧や熱帯低気圧の中には、竜巻を生じるものと生じないものがあるが、両者で低気圧の構造や環境場がどう異なるかについては十分理解されていない。本講演の前半ではこの課題に関する最近の我々の研究について紹介する。

一方、このような階層構造の末端近くに位置する竜巻の予測は、将来、数値モデルやデータ同化手法・観測手法が進んでも、確率的な表現にならざるを得ないと思われる。そこで講演の後半では、2012年5月のつくば竜巻の事例について、気象研究所のグループを中心に研究が進みつつある竜巻のアンサンブル予報の可能性について紹介したい。

2. 竜巻を生ずる低気圧の構造と環境場

スーパーセルは 10^{-2}s^{-1} 以上の鉛直渦度で回転する上昇気流（メソサイクロン）を持つ積乱雲と定義されるが、中層のメソサイクロンの鉛直渦度は環境場の水平風の鉛直シアに伴う水平渦度を自らの上昇気流で立ち上げて生成される。従って、スーパーセルは鉛直シアの強い環境場で発生する。環境場の風の鉛直分布から、鉛直渦度生成のポテンシャルを評価するパラメータとしてストームに相対的な環境場のヘリシティ（以下SREH: Storm-Relative Environmental Helicity; Davies-Jones *et al.* 1990）が良く使われる。一方、強い鉛直シアの下で積乱雲が発達するためには、環境場が強い上昇流を発生させるだけの十分な不安定性を持っていることが必要である。潜在的な上昇流の目安としては対流有効位置エネルギー（以下CAPE: Convective Available Potential Energy）が良く用いられる。

2.1 竜巻大発生を伴う温帯低気圧の構造と環境場

米国では時折、温帯低気圧の暖域の広い範囲に多数の竜巻が発生し、大きな被害をもたらすことがある。このようなイベントを竜巻大発生（tornado outbreak）と呼ぶ。例えば2011年4月27日には207個の竜巻が発生し、319人が亡くなった。

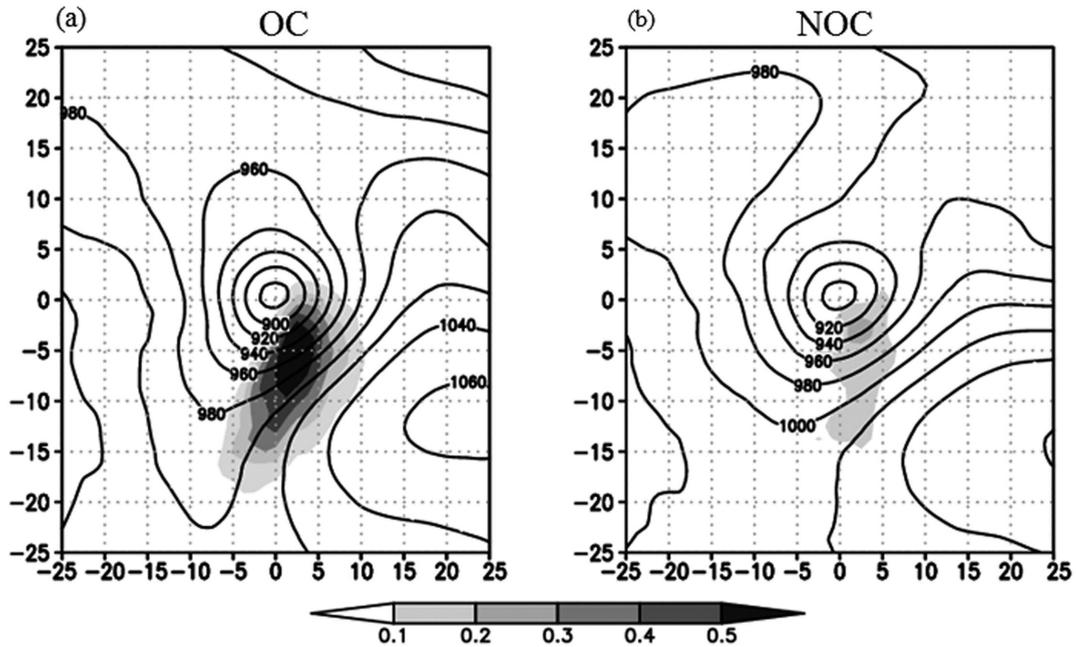
竜巻大発生を伴う温帯低気圧の構造や環境場は、大発生を伴わない温帯低気圧のそれとどう異なるのか、米国を対象に全球客観解析（JRA-55; Kobayashi *et al.* 2015）を用いたコンポジット解析で調べてみた（詳細はTochimoto and Niino 2016aを参照）。解析期間は、NOAAのSevere Weather Databaseで竜巻の登載基準が一定している1995-2012年とした。鉛直

渦度に基づき、客観的に温帯低気圧の中心経路を抽出・追跡する手法（Hodges 1994ほか）を用いて、6時間ごとの温帯低気圧の中心を求め、±3時間のうちに中心から1500 km以内に竜巻が発生した温帯低気圧を抽出した。これらの温帯低気圧のうち、09UTCからの24時間に15個以上の竜巻を伴ったものをOC（Outbreak Cyclone）、5個以下しか伴わなかったものをNOC（Non-Outbreak Cyclone）と呼び、OCとNOCの構造と環境場の違いを調べた。なお、両者の強度にはなるべく差が無いように留意した。選ばれたOCは55個、NOCは41個である。

第1図は、コンポジットしたOCとNOCに対する900 hPaのジオポテンシャル高度とEnergy Helicity Index（ $\text{EHI} = \text{SREH} \times \text{CAPE} / (1.6 \times 10^5)$ ）でスーパーセルの発生し易さを表す指標）を示したものである。OCはNOCに比べて、南西に伸びた構造をしているため、強い南風による大きな鉛直シア（従って大きなSREH）と、暖湿な空気の移流による大きなCAPEを持ち、EHIが暖域の広い範囲で大きくなっていることがわかる。温帯低気圧の環境場の偏西風ジェット構造を見ると、OCではNOCに比べてジェット軸の南側の高気圧性の水平シアが大きくなっている。このような水平シアは北東-南西方向の引き伸ばしを伴う変形場を与えるため、南西方向に伸びた温帯低気圧の構造が作られると考えられる（Wernli *et al.* 1998）。実際、コンポジット解析で得られたOCの環境場の偏西風ジェットが、上述のような温帯低気圧の特徴を作り出すことは、理想化した数値実験でも確認されている（Tochimoto and Niino 2016b）。

2.2 竜巻を伴う熱帯低気圧の構造と環境場

日本の竜巻の約20%は台風に伴って発生する（Niino *et al.* 1997）。竜巻が熱帯低気圧に伴って発生することは1960年代から知られており、特に熱帯低気圧の北東象限あるいは進行方向右前方象限で竜巻が発生しやすい傾向にあること（Fujita *et al.* 1972; Novlan and Gray 1974）、その原因がこれらの象限におけるSREHの大きさにあることが指摘されている（McCaul 1991）。総観規模の風の鉛直シアのダウンシア側で、SREHが大きいという観測結果もある（Molinari and Vollaro 2009）。竜巻を伴う熱帯低気圧は、伴わない熱帯低気圧に比べて鉛直シアが大きいことも知られている（Novlan and Gray 1974）が、両者の3次元的な構造や環境場の違いは十分理解されていない。



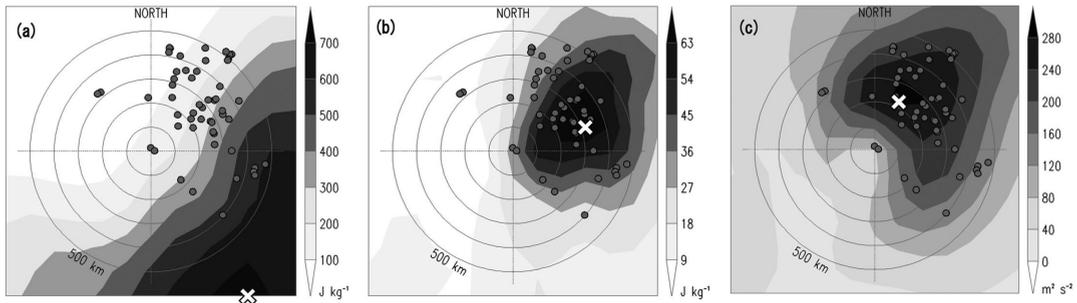
第1図 竜巻が最も多く発生した時刻の Energy Helicity Index (陰影) と900 hPa のジオポテンシャル高度 (20 m 毎の等値線). (a)コンポジットしたOC, (b)NOC に対するもの (Tochimoto and Niino 2016a).

Sueki and Niino (2016) は、竜巻を伴う台風の環境場と構造の特徴を、SREH と CAPE に注目して調べた。解析の対象としたのは、気象庁の「竜巻等の突風データベース」 (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>) で竜巻の収録基準が均質な1991-2012年に九州・四国・本州で発生した竜巻である。JRA-55にもとづき、中心から半径550 km 以内に竜巻を伴った台風 (TT: Tornadic Typhoon), 及び TT と同様の位置・強度であって竜巻を伴わなかった台風 (Non-tornadic Typhoon: 以下 NT) の平均的な構造を台風中心を揃えたコンポジットで調べた。第2図は、コンポジットで得られたTTの構造を示したものである。CAPEは台風の南東側で大きくなっており、竜巻の発生が北東象限に多いことは対応しない (第2図a)。一方、エントレインメントを Romps and Kuang (2010) の手法で考慮したCAPE (以下、E-CAPE: Entraining CAPE (Molinari *et al.* 2012) ; エントレインメント率20% km^{-1} を仮定) は中心の東北東にピークを持つ (第2図b)。また、SREHは北北東にピークを持つ (第2図c)。従って、竜巻の発生ポテンシャルを表すにはE-CAPEとSREHを組み合わせたEHIのような指

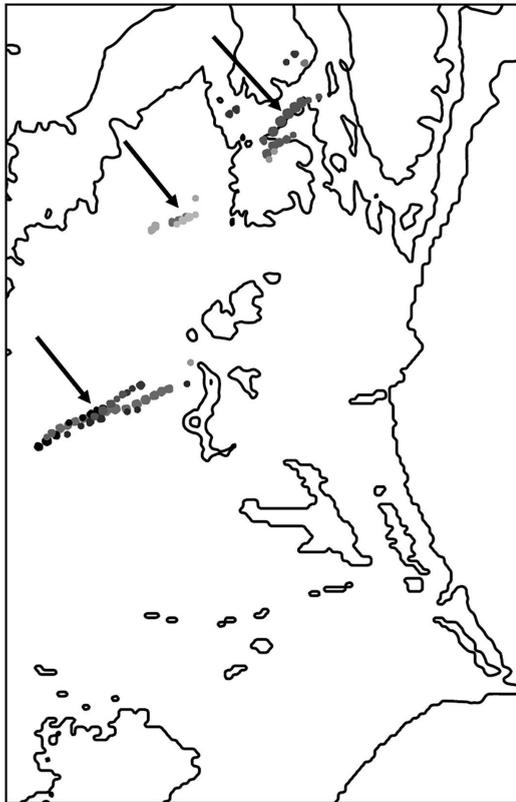
標が適切と思われる。櫻井・川村 (2008) は、日本の竜巻について中層の空気のエントレインメントを考慮したK指数の有効性を指摘し、これをSREHと組み合わせたKHIという指標を提案している。なお、NTでは、E-CAPEやSREHは共にTTと似た分布をするものの、その絶対値はTTに比べて有意に小さかった。TTでSREHが大きい要因の1つは台風の環境場の傾圧性に伴う鉛直シアの存在である。実際、Cyclone Phase Space (Hart 2003) のパラメータ B を調べたところ、TTでは22 m, NTでは9 mであり、TTは温帯低気圧化の過程にあって非対称性を持つものが多いと考えられる (Evans and Hart (2003) による温帯低気圧化の開始の基準は $B=10$ m)。

3. 竜巻の予測可能性

現状では、数日前からの竜巻のポテンシャルの予測には、数値予報結果に基づくCAPEやSREHなどのパラメータの値、1時間から数分前までの予知には、これらに加えてドップラーレーダーによるメソサイクロンの検出やレーダーエコーの強度などが用いられている (気象庁の竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストについては瀧下 (2009, 2010) や中里 (2016) を



第2図 中心から550 km以内で竜巻を生じた台風 (TT) のコンポジットによる (a)CAPE, (b)E-CAPE, (c)SREH の分布. 灰色の丸は竜巻の発生位置, ×印はプロットされたパラメータが最大値となる位置を表す (Sueki and Niino 2016).



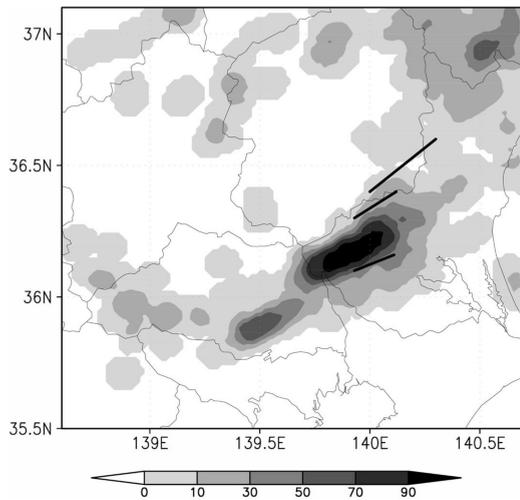
第3図 水平解像度350 mの12メンバーのダウンスケール実験で得られた鉛直渦度の 0.1 s^{-1} 以上の渦度中心 (黒および灰色の丸印). 実線は海岸線と海拔300 m, 600 mの等高線 (Seko *et al.* 2015の Fig. 9を改変).

srud *et al.* 2009) も期待されている.

2012年5月6日の関東地方の竜巻の事例では, Mashiko (2016a,b) が単一の決定論的数値シミュレーションによってつくば竜巻の再現に成功しているが, 実際にはつくば竜巻以外にも茨城県筑西市から桜川市にかけてと, 栃木県真岡市から茨城県常陸大宮市にかけてほぼ同時刻に竜巻が発生しており, 決定論的実験では後者は再現されていない. Seko *et al.* (2015) は nested LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter: 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ) というデータ同化手法を用いて, 高層観測, 航空機, ウィンドプロファイラ, 地上官署の気圧を同化し, 現象の再現を試みた. 詳細は省くが, 水平解像度15 kmで1200 km四方の外側領域と水平解像度1.875 kmで約300 km四方の内側領域においてそれぞれ12のアンサンブルメンバーを用いた LETKF によるデータ同化を行って初期値を作成し, 竜巻発生約2時間前から内側領域の各アンサンブルメンバーで初期値・境界値を与えて, 水平解像度350 m, 計算領域210 km四方のダウンスケール実験を行った. 第3図はその結果得られた, 鉛直渦度が 0.1 s^{-1} 以上の下層のメソサイクロン (Low-level mesocyclone: LMC) の位置である. 一番南側の矢印で示された, つくば竜巻に対応すると思われる LMC は12メンバー中10メンバーで再現され, いくつかのメンバーでは北側の2か所でも LMC が再現されている. このようにアンサンブル実験を行うことにより, 単一予報では難しい, 3か所での竜巻発生の可能性が示されことは大変興味深い¹⁾.

最近, Yokota *et al.* (2016) は, Seko *et al.* (2015) とほぼ同じ設定ながら, 32メンバーを用いると共に,

参照). しかし, 将来的には, アンサンブル数値予報モデルに基づく確率予報 (Warn-on-forecast; Sten-



第4図 高度800 mで水平5 km以内に鉛直渦度が 0.03 s^{-1} 以上の領域が通る確率(%)を水平解像度350 mの33メンバーのダウンスケール予報から求めたもの。黒の太線は3つの竜巻の経路(Yokota *et al.* 2016)。

内側領域で携帯電話基地局も含む稠密な地上観測データと、気象研究所の偏波ドップラーレーダーも含む複数のドップラーレーダーの動径風・雨水量の観測値を同化し、竜巻発生30分前から予報計算を行うことによって、つくば竜巻に対応するLMCの位置が観測された竜巻の経路に近づくことを示した¹²。第4図は内部領域の32メンバーとその平均を初期値・境界値として水平解像度350 mで行った33メンバーのダウンスケール予報の結果から、高度800 mで 0.03 s^{-1} 以上の鉛直渦度の領域が通過する確率を示したものである。残念ながら、北側の2つの竜巻の発生を明確に示唆する予報は得られていないが、つくば竜巻についてはすぐ北側を数 kmの誤差ながらも高い確率でLMCが通過する可能性が示されており、将来のWarn-on-forecastを期待させる結果となっている。

アンサンブル実験では、強度の異なる渦が発生する多くのメンバーが得られるので、どのような物理要素が渦の強度に影響するかの感度解析も行うことができ

る。つくば竜巻の事例では、各アンサンブル実験において解像度をさらに50 mにまで高めたダウンスケール実験により、多様な竜巻渦も再現できることがわかっている(國井・横田 2016)ため、アンサンブル実験で感度解析を行うことにより、竜巻渦の発生や強度に影響する物理要素の手がかりを得ることも期待される。

4. まとめ

竜巻が、偏西風ジェットなどの低気圧の環境場から、低気圧、スーパーセルへとつながる一連の階層構造の中の一現象として起きている可能性を示唆する最近の研究について紹介した。このような階層構造の末端に位置する現象の予測は一般には容易でないと考えられるが、多様な観測データを取り込むことのできるデータ同化手法やアンサンブル予報の発展により、将来的には数値モデルに基づく確率予報が可能となることを期待させる成果が得られつつある。集中豪雨の予測でも同様の状況にあるが、このような確率的な予測情報をどのように防災に生かすかを考えていくことも今後の重要な課題の1つとなろう。

謝辞

本講演の準備にあたり、東京大学大気海洋研究所の橋本英伍博士と末木健太さん、気象研究所の瀬古弘博士、横田祥さんには素材の提供などでご助力をいただいた。また、JSPS 科研費 24244074の助成を受けた。

参考文献

- Browning, K.A., 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J. Atmos. Sci.*, 21, 634-639.
- Davies-Jones, R.P., D.W. Burgess and M.P. Foster, 1990: Test of helicity as a tornado forecast parameter. Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB, Canada, Amer. Meteor. Soc., 588-592.
- Evans, J.L. and R.E. Hart, 2003: Objective indicators of the life cycle evolution of extratropical transition for Atlantic tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 909-925.
- Fujita, T.T., 1971: Proposed mechanism of suction spots accompanied by tornadoes. Preprint of 7th Conf. on Severe Local Storms, Oct. 1971, Kansas City, 208-212.
- Fujita, T.T., K. Watanabe, K. Tsuchiya and M.

¹¹ この実験では、竜巻発生後のメソ解析を境界値に用いており、純粋な予報とは言えないことに注意。

¹² 竜巻発生30分前の観測データを同化した1時間半からの計算のため、実質的には30分の予報である。

- Shimada, 1972: Typhoon-associated tornadoes in Japan and new evidence of suction vortices in a tornado near Tokyo. *J. Meteor. Soc. Japan*, **50**, 431-453.
- Hart, R.E., 2003: A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 585-614.
- Hodges, K.I., 1994: A general method for tracking analysis and its application to meteorological data. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 2573-2586.
- Klemp, J., 1987: Dynamics of tornadic thunderstorms. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **19**, 369-402.
- Kobayashi, S. *et al.*, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- 國井 勝, 横田 祥, 2016: メソアンサンブル予報を利用した顕著現象の解析. 第9回気象庁数値モデル研究会・第44回メソ気象研究会・第2回観測システム予測可能性研究連絡会の報告—アンサンブル予報の発展と展望—. *天気*, **63**, 843-849.
- Markowski, P. M. and Y. P. Richardson, 2009: Tornadogenesis: Our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research. *Atmos. Res.*, **93**, 3-10.
- Mashiko, W., 2016a: A numerical study of the 6 May 2012 Tsukuba City supercell tornado. Part I: Vorticity sources of low-level and midlevel mesocyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 1069-1092.
- Mashiko, W., 2016b: A numerical study of the 6 May 2012 Tsukuba City supercell tornado. Part II: Mechanisms of Tornadogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3077-3098.
- 益子 渉, 2016: 数値シミュレーションを用いた竜巻の発生機構に関する研究. 2016年度春季大会シンポジウム「竜巻の観測・予測の将来と現状」の報告, *天気*, **63**, 970-973.
- McCaul, E. W., Jr., 1991: Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environment. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1954-1978.
- Molinari, J. and D. Vollaro, 2009: Distribution of helicity, CAPE, and shear in tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 274-284.
- Molinari, J., D. M. Romps, D. Vollaro and L. Nguyen, 2012: CAPE in tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 2452-2463.
- 中里真久, 2016: 気象庁における竜巻等突風に関わる業務の内容. 2016年度春季大会シンポジウム「竜巻の観測・予測の将来と現状」の報告, *天気*, **63**, 958-961.
- Niino, H., T. Fujitani and N. Watanabe, 1997: A statistical study of tornadoes and waterspouts in Japan from 1961 to 1993. *J. Climate*, **10**, 1730-1752.
- Novlan, D.J. and W.M. Gray, 1974: Hurricane-spawned tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 476-488.
- Romps, D.M. and Z. Kuang, 2010: Do undiluted convective plumes exist in the upper tropical troposphere? *J. Atmos. Sci.*, **67**, 468-484.
- 櫻井溪太, 川村隆一, 2008: 日本における竜巻発生環境と予測可能性. *天気*, **55**, 7-22.
- Seko, H., M. Kunii, S. Yokota, T. Tsuyuki and T. Miyoshi, 2015: Ensemble experiments using a nested LETKF system to reproduce intense vortices associated with tornadoes of 6 May 2012 in Japan. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **2**, 42, doi:10.1186/s40645-015-0072-3.
- Stensrud, D.J. *et al.*, 2009: Convective-scale warn-on-forecast system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 1487-1499.
- Sueki, K. and H. Niino, 2016: Toward a better assessment of potential for typhoon-associated tornadoes: Necessity of including entrainment effects for CAPE. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2016GL070349.
- 瀧下洋一, 2009: 突風に関する防災気象情報の改善. *天気*, **56**, 167-175.
- 瀧下洋一, 2010: 竜巻発生確度ナウキャストの提供開始. *天気*, **57**, 805-810.
- Tochimoto, E. and H. Niino, 2016a: Structural and environmental characteristics of extratropical cyclones that cause tornado outbreaks in the warm sector: A composite study. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 945-969.
- Tochimoto, E. and H. Niino, 2016b: Structural and environmental characteristics of extratropical cyclones associated with tornado outbreaks in the warm sector: An idealized numerical study. *Mon. Wea. Rev.*, accepted.
- Wernli, H., R. Fehlmann and D. Lüthi, 1998: The effect of barotropic shear on upper-level induced cyclogenesis: Semigeostrophic and primitive equation numerical simulations. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 2080-2094.
- Yokota, S., H. Seko, M. Kunii, H. Yamauchi and H. Niino, 2016: The tornadic supercell on the Kanto Plain on 6 May 2012: Polarimetric radar and surface data assimilation with EnKF and ensemble-based sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3133-3157.