

## 4. 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

益 子 涉\*

### 1. はじめに

竜巻にはスーパーセルと呼ばれる特殊な積乱雲に伴って発生するものがある。スーパーセルには、台風に伴って発生することが多いミニスーパーセル (Suzuki *et al.* 2000 ; Mashiko *et al.* 2009) なども含まれるが、クラシックスーパーセルと呼ばれるものは特に強い竜巻をもたらすことがある。2011年米国ジョプリンを襲ったクラシックスーパーセル竜巻の強さは、改良型藤田スケールで最強クラスの5と推定され、158名もの死者が出ている。日本でこれまでに発生した竜巻については、国内最強クラスの被害 (F3) をもたらした1991年茂原竜巻 (Niino *et al.* 1993) や2012年つくば竜巻 (Mashiko 2016a) がクラシックスーパーセルに伴うものであると考えられている。本稿では、このクラシックスーパーセル (以後スーパーセル) に伴う竜巻の発生機構について、数値シミュレーションによるこれまでの研究をレビューするとともに、最新の研究成果について紹介する。

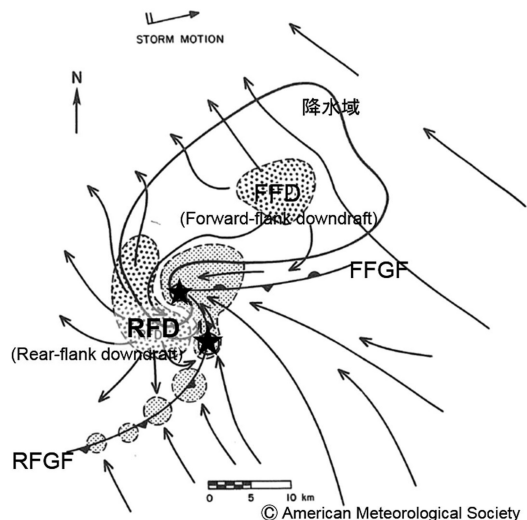
### 2. スーパーセル竜巻

スーパーセルとは上空にメソサイクロンと呼ばれる持続的に回転する強い上昇流域を伴った積乱雲を指す。地表付近にはガストフロントが存在し、ストーム自身が作り出す下降流に伴う冷気外出流とストームに流入する環境場の暖気との境界をなす。ストーム前方のものを Forward-flank gust front (FFGF)、後方のものを Rear-flank gust front (RFGF) と呼び、竜巻はこの FFGF と RFGF の交点近傍の RFGF 上で発生することが多く、フック状の降水物質の分布の先端付近に位置している (第1図)。しかし、すべて

のスーパーセルにおいて竜巻が発生する訳ではなく、Trapp *et al.* (2005) によるとメソサイクロンが観測されたストームの中で竜巻が発生した割合は26%であった。これはメソサイクロンに伴う強い上昇流と下層のガストフロントの存在は、竜巻発生の必要条件に過ぎず、他に何か竜巻の発生のトリガーとなるものが存在することを示唆している。竜巻発生のトリガーや竜巻渦の起源は未だ十分に理解されておらず、現在もおスーパーセル竜巻研究の最大のテーマとなっている。

### 3. 1980年代から90年代中頃にかけての数値シミュレーションを用いた研究

1980年代、数値シミュレーションを用いた研究により、スーパーセルの構造や力学に関する理解が飛躍的



第1図 スーパーセルの地表付近の水平断面を示した模式図。★は竜巻の発生しやすい場所を示す。Lemon and Doswell (1979) に加筆。

\* 気象研究所, wmashiko@mri-jma.go.jp

© 2016 日本気象学会

に進んでいる (e.g., Klemp and Rotunno 1983; Rotunno and Klemp 1982). 竜巻に関しても, Wicker and Wilhelmson (1995) は水平解像度120 mの実験を行うことにより, 竜巻スケールの渦まで再現することに成功し, FFGFに伴う傾圧性が竜巻発生に重要であることを示している. しかし, 当時のシミュレーション結果はストームに伴うコールドプールの渦が強く表現され過ぎることなど, 観測結果との矛盾が指摘されている (Davies-Jones 2006). 観測的研究においては, 竜巻発生時にフックエコーの顕在化やクリアスロットと呼ばれるストーム後面からの乾燥空気の流入などが認められることから, RFGFに吹き込むRear-flank downdraft (RFD) (第1図参照)が竜巻発生に重要であることを指摘する報告が古くから数多くある (レビュー論文Markowski 2002を参照). 米国ではVORTEX (Verification of the Origins of Rotation in Tornadoes Experiments; Rasmussen *et al.* 1994) やVORTEX2 (Wurman *et al.* 2012) というプロジェクトのもと, スーパーセルの地表付近の熱力学場や運動場が詳細に調査され, 竜巻近傍のRFD内には局所的に強化された2次的なRFDが観測されている (Kosiba *et al.* 2013).

#### 4. 竜巻発生におけるRFDの重要性

竜巻は地表に接する鉛直方向の渦であり, 竜巻の発生機構を考える上で, 地表付近にどのようにして強い鉛直渦を形成するかというのが問題となる. Davies-Jones and Brooks (1993) は理論的な考察によりRFDの重要性を指摘している. 初期状態として鉛直渦が存在しない場を仮定した時, RFDが存在するような浮力の水平勾配が大きい所では, 傾圧的につくら

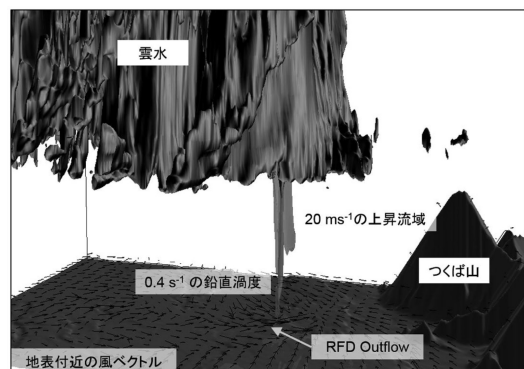


第2図 傾圧渦の生成 (図右向き) により下降流域において地表付近に鉛直渦が形成されることを示す模式図. 上流域 (図左側) において, 渦度ベクトルと風ベクトルの向きが一致している状況を想定したもの.

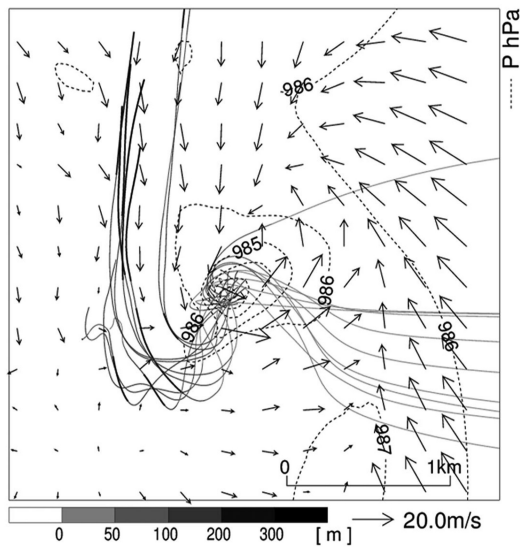
れた水平渦のtiltingにより, 下降流域においても鉛直渦度が生成され, 地表付近で鉛直渦を形成することができることを示している (第2図). 最近では高解像度の数値シミュレーションを用いた理想実験によってRFDがメソサイクロンや竜巻発生に果たす役割が調べられている (Markowski and Richardson 2014; Dahl *et al.* 2014). いずれの研究も地表付近の鉛直渦の生成には, RFDに伴う傾圧性が重要であることを示す結果となっている. しかし, これらの研究は地表摩擦を考慮しない理想化された実験設定を用いており, 竜巻の発生機構をこれだけで論ずるには不十分である.

#### 5. 現実場を用いた最新の数値シミュレーション研究

Davies-Jones (2015) は理論的な考察から竜巻渦の形成に摩擦収束に伴う渦の強化が重要であることを指摘している. しかし, 地表摩擦には竜巻の発生に対して正負両面の効果が考えられ, 結果的にどのように影響しているのか解釈が難しい. 最近では数値予報技術の発展と計算機技術の進歩により, 地表摩擦を考慮した現実場において, 高解像度数値シミュレーションを用いた竜巻の再現が可能になりつつある. Schenckman *et al.* (2014) はARPS (Xue *et al.* 1995) を用いて2003年オクラホマで発生した竜巻を対象に, Mashiko (2016b) は気象庁NHM (Saito *et al.* 2006) を用いて2012年つくば竜巻を対象にして, 現実的な環境場を用いて水平解像度を50 mにした実験を行い, 竜巻の発生機構について調べている (第3図). どの



第3図 水平解像度50 mの気象庁NHMによる2012年つくば竜巻のシミュレーション結果.



第4図 再現されたつくば竜巻を起点として計算した後方トラジェクトリの分布。高度150 mにおける渦度極大域を中心にパーセルを配置している。線の濃淡でパーセルの高度を示す。破線のコンターは、高度150 mの気圧を、ベクトルはストームの動きに相対的な風を示す。

らも、後方トラジェクトリ解析を行うことによって、竜巻発生に対してRFDの重要性を指摘している(第4図)。Schenkman *et al.* (2014)は、RFDの影響を受けたトラジェクトリに沿った渦度収支解析から竜巻渦は地表摩擦が起源であること示している。一方、Mashiko (2016b)ではRFD周辺の傾圧性が竜巻渦の主な起源であることを、竜巻渦を取り囲むリングに沿った循環を計算することによって示している。そして、その傾圧性は、竜巻発生の約10分前に、フック状の降水域の先端付近において降水コアが落下する際、雨滴の蒸発と氷物質の融解による非断熱冷却によって生成されており、降水コアの落下が竜巻発生の前兆現象となっている可能性を指摘している。

## 6. おわりに

スーパーセル竜巻の発生機構は未だ十分に明らかにされていない。竜巻渦の起源でさえ現在もなお議論されている。しかし、最新の数値シミュレーションでは、地表摩擦を考慮した現実的な場において竜巻の再現が可能になりつつあり、観測結果と整合的な結果が得られてきている。竜巻の発生機構の解明と発生予測

につながると期待される。

## 参考文献

- Dahl, J. M. L., M. D. Parker and L. J. Wicker, 2014: Imported and storm-generated near-ground vertical vorticity in a simulated supercell. *J. Atmos. Sci.*, 71, 3027-3051.
- Davies-Jones, R. P., 2006: Tornadogenesis in supercell storms - What we know and what we don't know. Preprints, The 86th AMS Annual meeting, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc., 2.2.
- Davies-Jones, R. P., 2015: A review of supercell and tornado dynamics. *Atmos. Res.*, 158-159, 274-291.
- Davies-Jones, R. P. and H. E. Brooks, 1993: Mesocyclogenesis from a theoretical perspective. C. Church *et al.* eds., *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*, Geophys. Monogr., No.79, Amer. Geophys. Union, 105-114.
- Klemp, J. B. and R. Rotunno, 1983: A study of the tornadic region within a supercell thunderstorm. *J. Atmos. Sci.*, 40, 359-377.
- Kosiba, K., J. Wurman, Y. Richardson, P. Markowski, P. Robinson and J. Marquis, 2013: Genesis of the Goshen County, Wyoming, tornado on 5 June 2009 during VORTEX2. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 1157-1181.
- Lemon, L. R. and C. A. Doswell III, 1979: Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 1184-1197.
- Markowski, P. M., 2002: Hook echoes and rear-flank downdrafts: A review. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 852-876.
- Markowski, P. M., and Y. P. Richardson, 2014: The influence of environmental low-level shear and cold pools on tornadogenesis: Insights from idealized simulations. *J. Atmos. Sci.*, 71, 243-275.
- 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.
- Mashiko, W., H. Niino and T. Kato, 2009: Numerical simulation of tornadogenesis in an outer-rainband minisupercell of Typhoon Shanshan on 17 September 2006. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 4238-4260.
- Niino, H., O. Suzuki, H. Nirasawa, T. Fujitani, H. Ohno, I. Takayabu, N. Kinoshita and Y. Ogura, 1993: Tor-

- nadoes in Chiba Prefecture on 11 December 1990. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3001-3018.
- Rasmussen, E. N., J. M. Straka, R. Davies-Jones, C. A. Doswell III, F. H. Carr, M. D. Eilts and D. R. MacGorman, 1994: Verification of the Origins of Rotation in Tornadoes Experiment: VORTEX. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **75**, 995-1006.
- Rotunno, R. and J. B. Klemp, 1982: The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 136-151.
- 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.*, **134**, 1266-1298.
- Schenkman, A. D., M. Xue and M. Hu, 2014: Tornado-gene-sis in a high-resolution simulation of the 8 May 2003 Oklahoma City supercell. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 130-154.
- Suzuki, O., H. Niino, H. Ohno and H. Nirasawa, 2000: Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1868-1882.
- Trapp, R. J., G. J. Stumpf and K. L. Manross, 2005: A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones. *Wea. Forecasting*, **20**, 680-687.
- Wicker, L. and R. B. Wilhelmson, 1995: Simulation and analysis of tornado development and decay within a three-dimensional supercell thunderstorm. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 2675-2703.
- Wurman, J., D. Dowell, Y. Richardson, P. Markowski, E. Rasmussen, D. Burgess, L. Wicker and H. B. Bluestein, 2012: The second Verification of the Origins of Rotation in Tornadoes Experiment: VORTEX2. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 1147-1170.
- Xue, M., K. K. Droegemeier, V. Wong, A. Shapiro and K. Brewster, 1995: ARPS Version 4.0 User's Guide. Center for Analysis and Prediction of Storms, 380pp.
-