

現実場を用いた竜巻発生の数値シミュレーション： 下部境界層環境の重要性

下瀬, 健一
九州大学大学院理学府

<https://doi.org/10.15017/1470184>

出版情報：九州大学情報基盤研究開発センター全国共同利用システム広報. 3 (1), pp.28-30, 2009-10.
九州大学情報統括本部広報委員会
バージョン：
権利関係：

Numerical Simulation of Tornadogenesis in a Realistic Condition: Importance of Lower-PBL Environments.

(現実場を用いた竜巻発生の数値シミュレーション：下部境界層環境の重要性)

下瀬 健一

1. はじめに

竜巻は積雲あるいは積乱雲に伴って発生する激しい鉛直渦である。竜巻の典型的な時間、空間スケールはそれぞれ 10 分、数 100 m と非常に小さい。そのため、既存の気象観測網で竜巻を捉えることはほとんど不可能に近い。したがって、竜巻の発生メカニズムは今も十分に理解されてはいない。

これまでの研究から、大規模な竜巻はスーパーセルと呼ばれる、長寿命で非常に強い上昇流を引き起こす積乱雲によって引き起こされることがわかってきた。スーパーセルからの強い降水が雲底下で蒸発し、地上付近の空気が冷却され、その冷却された空気と相対的に暖かい周囲の空気との間にガストフロントと呼ばれる大きな水平温度傾度が発生する。その温度傾度に沿って水平渦が傾圧的に生成され、スーパーセルの上昇流によって鉛直渦へと傾けられる。その鉛直渦がスーパーセルの強い上昇流によって伸張され竜巻が発生する (Klemp and Rotunno, 1983^[1]; Wicker and Wilhelmson, 1995^[2]など)。しかしながら、Burgess (1997)^[3]は、観測されたスーパーセルの約 20% しか竜巻を発生させないことを報告している。これは、竜巻発生にはスーパーセルだけでなくその他の条件も重要であることを示唆している。このような付加的条件を明らかにし、竜巻の発生過程を理解するためには、高時空間分解能 (1 分・100 m 以下) を持つ機器によって観測実験を行うことが重要であるが、日本では、観測実験は難しい。観測実験が不可能な地域で発生する竜巻を理解するためには、現実的な数値シミュレーションによるアプローチが有用である。

本研究では、現実場を用いた数値シミュレーションを行い、竜巻発生過程におけるキーファクターを調査した。解析事例は 2004 年 6 月 27 日に佐賀市から鳥栖市にかけて梅雨前線 (先在境界) でスーパーセル

に伴って発生した竜巻である。

2. 使用した数値モデルと設定

使用した数値モデルは PSU/NCAR MM5 ver.3.7.4 である。雲の微物理過程には、霰まで含むバルクパラメタリゼーションを用い、積雲対流のパラメタリゼーションは使用していない。初期値・境界値には、気象庁メソ客観解析(MANAL)の 6 月 26 日 21 時の値を用いた。ドメインは図 1 のように設定した。

数値計算には、最大 800 コアのプロセッサを使用した。プログラムの並列化には MPI が用いられている。

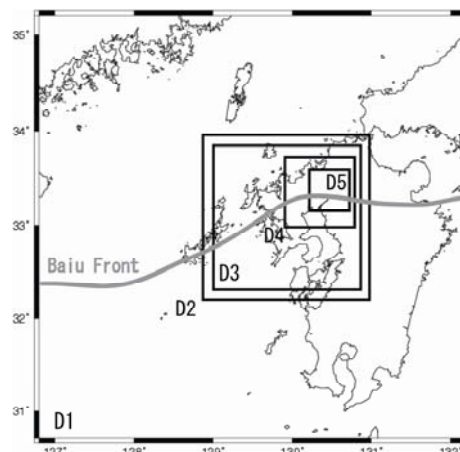


図 1: ドメインの設定。灰色の線は梅雨前線の位置を示す。領域 1・ $\Delta x=3$ km, 領域 2・ $\Delta x=1$ km, 領域 3・ $\Delta x=0.9$ km, 領域 4・ $\Delta x=0.3$ km, 領域 5・ $\Delta x=0.1$ km (Δx は水平解像度)。鉛直層数は全ての領域で 38 層。

3. 結果

シミュレーションでは、フック状のエコーを伴った、強い上昇流と回転 ($\zeta > 0.01$ s⁻¹) を持つ、梅雨前線に沿ったスーパーセルと 5 つの竜巻の再現に成功した (図 2)。図 3 は、0710 から 0810 JST の間における鉛直渦度の極大値の時系列変化を示している。0730 から 0800 JST にかけて、鉛直渦度は周期的に強化されており、最も発達し

た竜巻を中心に解析を行った。

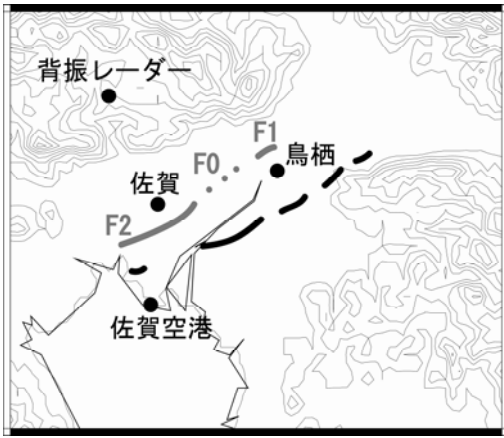


図 2 : 竜巻の経路。灰色の線が観測された竜巻を黒色の線が再現された竜巻を示している。

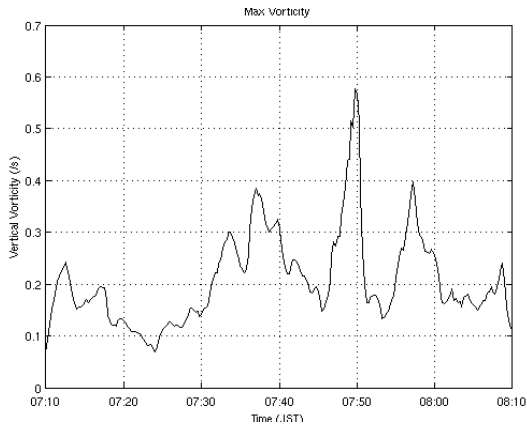


図 3 : 0710~0810 JST の間における鉛直渦度の極大値の時系列プロット。

図 4 は 0745 JST における地表付近の鉛直渦度と高度 2 km の上昇流を示している。地表付近の鉛直渦とシステム中層の上昇流がカップリングしたときに、鉛直渦が強化されていた。図 5 は 0750 JST における地表付近の鉛直渦度と相当温位を示している。地表付近では等間隔に並ぶ鉛直渦の列がみられ、相当温位傾度が大きい領域も同様に波打っている。このことから、下部境界層の鉛直渦の発達にはシア不安定が寄与していることが示唆される。また図 4 の鉛直渦度に注目すると、シアライン上でいくつかの小規模渦ができ、それらが合併して発達していた。

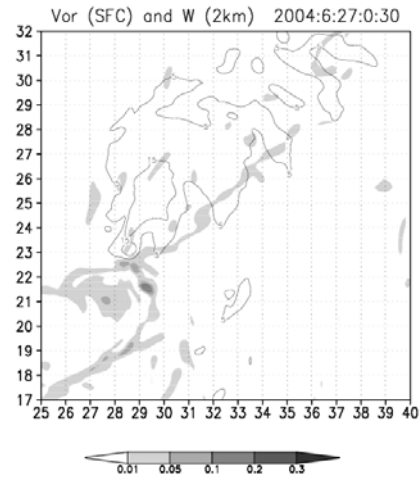


図 4 : 0745 JST における地表付近の鉛直渦度 (シェイド) と高度 2 km 上昇流(コンター)。

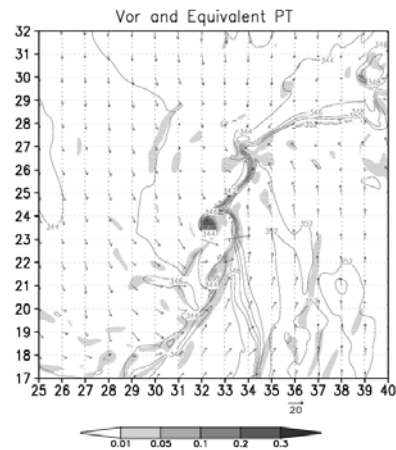


図 5 : 0750 JST における地表付近の鉛直渦度 (シェイド) と相当温位 (コンター)。

下層の鉛直渦の発生・発達過程を調査するため、非弾性系におけるフラックス系の鉛直渦度方程式

$$\frac{\partial(\rho_0 \zeta)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho_0 u \zeta)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho_0 v \zeta)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho_0 w \zeta)}{\partial z} + \zeta \frac{\partial(\rho_0 w)}{\partial z} + \left[\xi \frac{\partial(\rho_0 w)}{\partial x} + \eta \frac{\partial(\rho_0 w)}{\partial y} \right]$$

を用いて渦度収支解析を行った。ここで、 x, y, z はそれぞれ東西、南北、鉛直軸、 u, v, w は風速の x, y, z 成分、 ξ, η, ζ は渦度の x, y, z 成分、 ρ_0 は大気密度を示している。0740 JST から鉛直渦度が最大となる 0750 JST までの 10 分間における、竜巻を囲む $200 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ の BOX に流入・流

出する鉛直渦度を考える。BOXの重心が常に鉛直渦度極大の点を追跡し、BOX内における全ての格子点での各項の値を積分し平均値を求めた。

図6は計算によって導かれた渦度方程式の各項の値の時間変化を示している。ストレッチングによる鉛直渦度の増加の直前にティルティングにより鉛直渦度が生成されている。また、水平移流による鉛直渦度の増加が見られ、このタイミングは小規模の渦の合併と一致している。

4. まとめ

現実場を用いた数値シミュレーションにより、梅雨前線（先在境界）で発達したスーパーセルに伴う竜巻の再現に成功した。まず、先在境界でのシア不安定とティルティングにより下部境界層の鉛直渦が形成され、それらが合併して発達していた。竜巻はその発達した鉛直渦とスーパーセルの上昇流がカップリングしたときに発生した。

過去の研究との比較などから、竜巻発生のキーファクターは、(1)先在境界でのシア不安定とティルティングによる鉛直渦の形成、(2)下部境界層の鉛直渦の合併、(3)下部境界層の鉛直渦とスーパーセルの上昇流のカップリング、の3つであることが明らかになった。

参考文献

- [1] Klemp, J. B. and R. Rotunno, 1983: A study of the tornadic region within a supercell. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 359-377.
- [2] Wicker, L. J. 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.
- [3] Burgess, D. W., 1997: Tornado warning guidance. *OSB/OTB*, Oklahoma, 28pp.

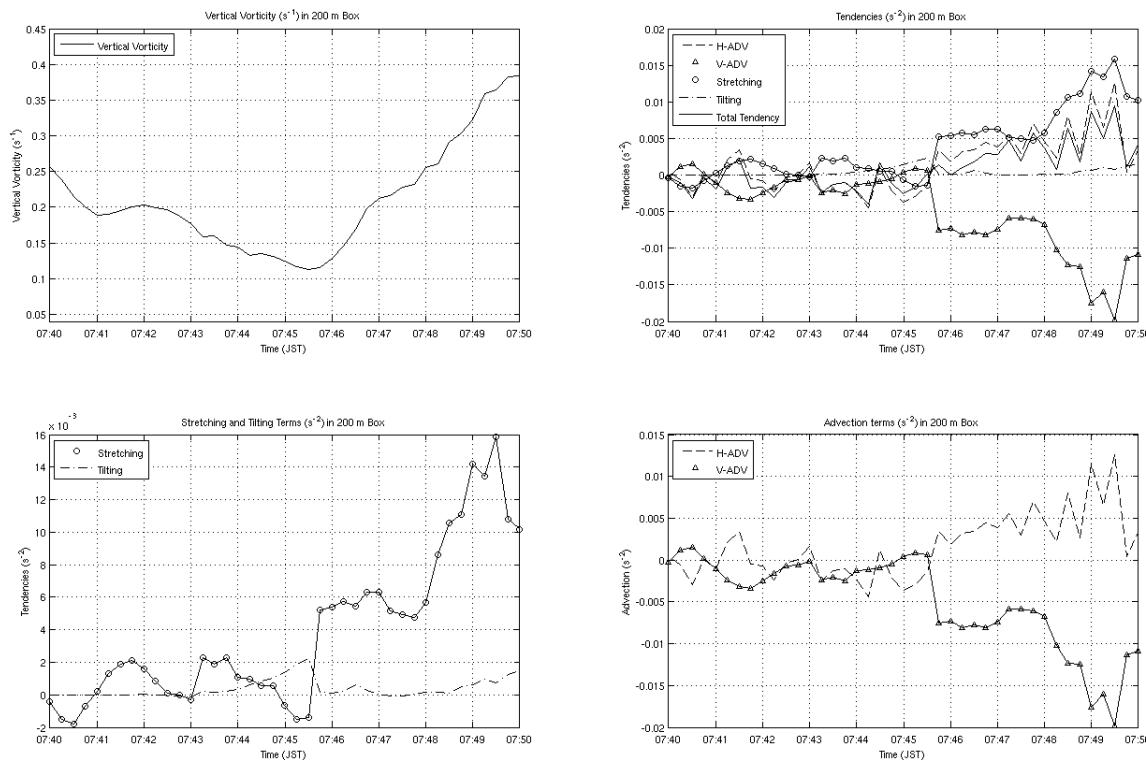


図6：0740～0750 JSTにおけるBOX内の鉛直渦度と渦度方程式の各項の時間変化。(左上図)鉛直渦度、(左下図)ストレッチング項(○)とティルティング項(鎖線)、(右下図)水平移流(破線)と鉛直移流(△)、(右上図)渦度傾向項(実線)と各項。