

竜巻の数値シミュレーション：現状と課題

Numerical Simulation of a Tornado: Current Status and Future Tasks

新野 宏 (東大・海洋研) 野田 暁 (東北大・理)

Hiroshi NIINO, Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Akira T. NODA, Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

FAX: 03-3377-3395 E-mail: niino@ori.u-tokyo.ac.jp

Recent progress in atmospheric numerical modeling and computer technology makes it possible to simulate realistically a tornadogenesis in a supercell storm, a special kind of a cumulonimbus cloud that develops in a strong-shear environment. In this paper, our current understanding on tornadoes is briefly reviewed, and then introduced is our recent successful simulation of a tornado spawned by a supercell storm. The tornadogenesis process as revealed from the simulation is discussed. Finally, the remaining problems to be pursued in future are suggested.

1. はじめに

竜巻は積雲・積乱雲のような対流雲によって作られる激しい鉛直軸まわりの渦である。最近、トラックに搭載したドップラーレーダーという風速を測ることのできる特殊なレーダーの観測で秒速 142m という風が測られている¹⁾。このような風が吹くと大抵の地上の構造物は壊滅的な被害を受ける。上記の秒速 142m の風を記録した 1999 年 5 月 3 日のオクラホマ州の竜巻では、死者 36 名、負傷者 295 名を記録した。1993–2002 年の統計によれば、アメリカでは平均すると 1 年当たり約 60 人の方が竜巻で亡くなっており、深刻な自然災害の 1 つである。わが国ではこれほど大きな被害が起きた記録はないが、1990 年 12 月 11 日の千葉県茂原市の竜巻では、死者 1 名、負傷者 73 名、家屋の全壊 82 棟、1999 年 9 月 24 日豊橋市の竜巻では、負傷者 415 名、家屋の全壊 40 棟の被害が出ている。

このように多くの被害を生ずる竜巻であるが、その構造や発生機構は現在も十分には理解されていない。これは竜巻が極めて小規模かつ短寿命の渦であることによるところが大きい。日本の竜巻に関する 1961–1993 年の統計²⁾によると、竜巻の平均的な寿命は 12 分、被害域の平均的な幅と長さは 100m と 3.2km である。日本が世界に誇るアメダスの空間密度でさえ 17km に 1 点であり、既存の気象観測網で竜巻の構造を捉えることはほとんど不可能に近い。最近、上述した可搬式ドップラーレーダーで竜巻を起こしそうな雲の傍まで近づき、竜巻の速度構造や発生過程を調べようとする試みもなされており、徐々に貴重なデータが蓄積されつつある。しかしながら、運よく竜巻の発生に出会える機会は少ないし、ドップラーレーダーで速度場の 3 次元構造を把握するには、仰角を変えながら 5 分程度かけて空間スキャンを行う必要があるため、短時間に進行する竜巻の発生過程を捉えることは困難である。

近年、電子計算機の性能の向上と大気の数値モデルの進歩は著しく、竜巻の発生過程を数値シミュレーションにより調べることが可能になりつつある。本講演では、筆者のグループの最近の数値シミュレーション研究³⁾により明らかになりつつある竜巻の発生機構と、近い将来に解決すべき課題について紹介することにした。

2. 竜巻の発生環境

現在のところ、竜巻の発生環境には次の 2 通りがあると考えられている。1 つは局地前線に伴って発生するもの、もう 1 つ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である。

局地前線というのは、地形などの影響で地表面から高度 1–2km までの範囲で、風や温度が急激に変化する帯状の領域である。このようなところでは、前線に直交する方向に風速は大きく変化しており、強い水平シアと収束を伴うことが多い。水平シア流はシア不安定を生じて、前線沿いに直径数 km の渦列を生ずる。一方、前線に伴う収束は、前線上に上昇流を作るため、積雲や積乱雲が生じやすく、これらの雲の強い上昇流の領域が、上述の渦の上空にたまたま来ると、渦管が引き伸ばされて強い渦一すなわち竜巻一が作られることになる⁴⁾。積雲や積乱雲の動きは、一般的には下層の渦と異なるので、このようにして作られる竜巻は比較的短寿命で弱いものが多いと考えられている。

一方、大きな被害をもたらす強い竜巻の多くは、スーパーセル⁵⁾に伴って起きると考えられている。スーパーセルというのは、環境場の風が高度と共に大きく変化するとき (Fig. 1 参照) に発生する強い積乱雲で、通常の積乱雲が 1 時間程度で寿命を終えるのに対し、数時間も長続きし、竜巻や降雹などによる被害を生ずる。スーパーセルが長寿命なのは上昇流の領域で作られる雨粒やあられ・雹などの降水粒子が、風の高度変化のために上昇流域と異なるところから落下し、上昇流を弱めないためと考えられている。

しかしながら、スーパーセルの最大の特徴は、発生後 1 時間位経つと雲内の下層から中層にかけて、メソサイクロンと呼ばれる直径数 km、鉛直渦度 0.01s^{-1} 以上の回転場を自ら作り出すことにある。この回転の成因は環境風の鉛直シアに伴う水平渦度と下層の降水域と周囲の空気の水平温度差により傾圧的に作り出された水平渦度の上昇流による立ち上げにあると考えられている⁶⁾。

メソサイクロンが生ずると、降水域の雨粒がメソサイクロンの循環によって移流され、鉤針状の降水分布を生ずる。これを通常のレーダーで観測すると鉤針状のパターン (フック・エコーと呼ばれる) が見える (Fig. 4c 参照)。一方、ドップラーレーダーで見ると、メソサイクロンの渦は、視

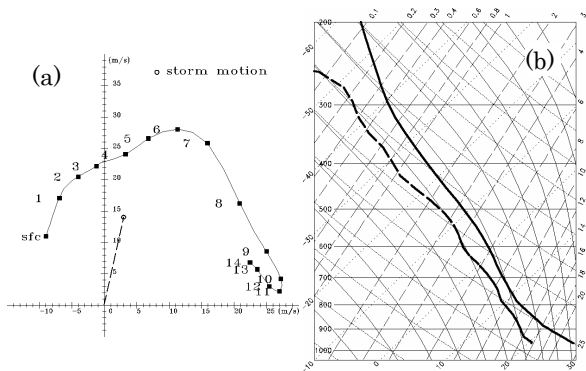


Fig. 1: Initial state of the model: (a) Wind hodograph (The numerals beside the curve show the height in km), (b) Skew-T diagram (thick solid and thick dashed lines denote vertical profiles of temperature and dew point temperature).

線方向に直交する方向に並んだ正負のドップラー速度の対として見える (Fig. 4d 参照)。これまでの長い観測的経験からメソサイクロンが現れると竜巻が起きる可能性が高いと考えられているため、アメリカではフック・エコーやメソサイクロンの速度パターンが観測されることは竜巻警報の発令基準の1つとなっている。

しかしながら、最近の研究によると、メソサイクロンが観測されても、そのうち約20%しか竜巻を起こさないことがわかってきた⁷⁾。また、ドップラーレーダーで見たとき、ほとんど同じ構造をしているメソサイクロンやその周辺場が観測されたときでも、実際には竜巻が発生する場合と発生しない場合があり⁸⁾、竜巻の予知の上で大きな問題となっている。このように、竜巻の発生機構の理解は、防災対策上も重要な課題である。

3. 数値シミュレーション

スーパーセルの数値シミュレーションを行うには、空気の運動方程式、熱力学の第1法則、質量の保存則、水蒸気・雲粒・雨粒それぞれの保存式、空気に対する状態方程式を数値的に解く必要がある。今回利用した数値モデルは準圧縮非静力学モデルである ARPS Ver. 4.2.1⁹⁾である。

水平スケールが10-20km、鉛直スケールが10数kmのスーパーセルを現実的に再現するためには、スーパーセルがすっぽり入るような大きな箱の中で計算を行う必要がある。今回の計算では66.36km×66.36km×15.08kmの計算領域を用いた。一方、直径100mの竜巻を解像するためには理想的には水平格子間隔10m程度の計算を行いたいところである。しかしながら、計算資源の制約のため、ここでは水平方向は70mで一様、鉛直方向は地表面近くの10mから上端では382mに徐々に増加する格子配置を用いた。

境界条件は、水平方向は開放、上・下端はfree-slipの剛体壁とした。また、高度12km以上では上端からの内部重力波の反射を防ぐためにRayleigh dampingを入れてある。

初期条件としては1977年5月20日に米・オクラホマ州・デルシティで竜巻を伴うスーパーセルが発生したときの高層観測データ (Fig. 1) を水平一様に与えた。環境場の風は地表面近くの南東風から高度10kmの西風へと、高度と共に時計回りに向きを変えていることが重要な特徴である。積乱雲を発生させるために、初期に計算領域の中央の地上1.5kmに中心を持つ振幅4Kの回転楕円体型 (水平10km、鉛直1.5km) の温度擾乱を与えた。また、積乱雲が領域の中心に留まるように、座標系を東に3m/s、北に14m/sで移動させた。以下に示す計算結果はNoda and Niino³⁾による。

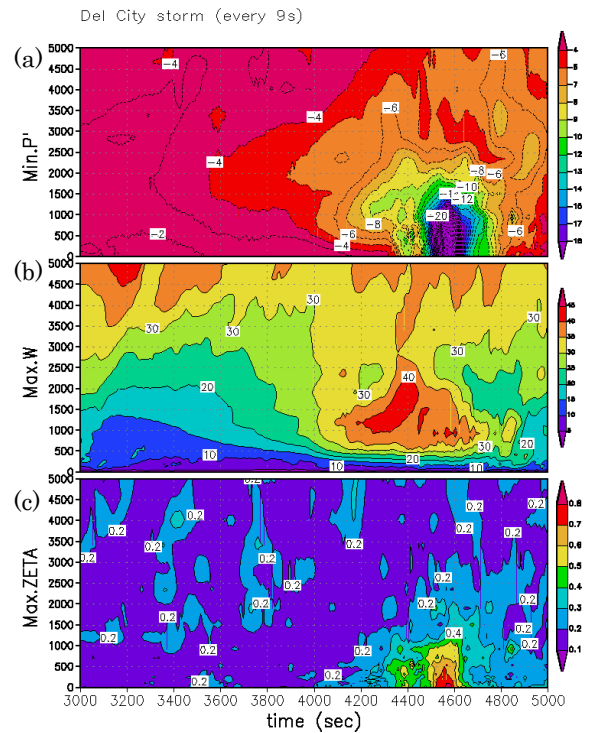


Fig. 2: Time-height cross-section of (a) minimum perturbation pressure (hPa), (b) maximum updraft (ms^{-1}) and (c) maximum vertical vorticity (s^{-1})³.

Fig. 2は計算を開始してから3000~5000sの各高度の気圧偏差の最低値、上昇流の最大値、鉛直渦度の最大値の時間変化を示したものである。3600sを過ぎる頃から、高度2km付近で4hPa近い気圧低下が生じ (Fig. 2a)、これに伴い急激な上昇流の強化が起きる。更に4000sを過ぎると、高

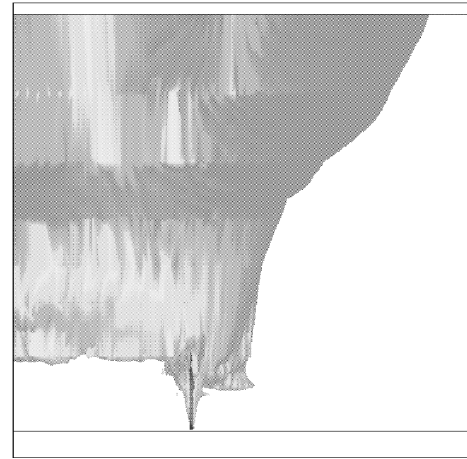


Fig. 3: Close-up view of the cloud and vertical vorticity around the simulated tornado as seen from east at $t=4504\text{s}$. The size of the view is 8.4 km in the north-south direction and 2.3 km in the vertical direction. The horizontal line near the bottom indicates the ground level. Gray and blue colors show isosurfaces of cloud water (0.1 g/kg) and vertical vorticity (0.5s^{-1}), respectively. Note that only the clouds in the foreground are shown³⁾.

度1.3km付近に直径数km程度の回転場 (メソサイクロン) が形成され、これに伴う8hPa近い気圧低下が生ずる。このため、高度1km付近で40m/sという異常に強い上昇流が形

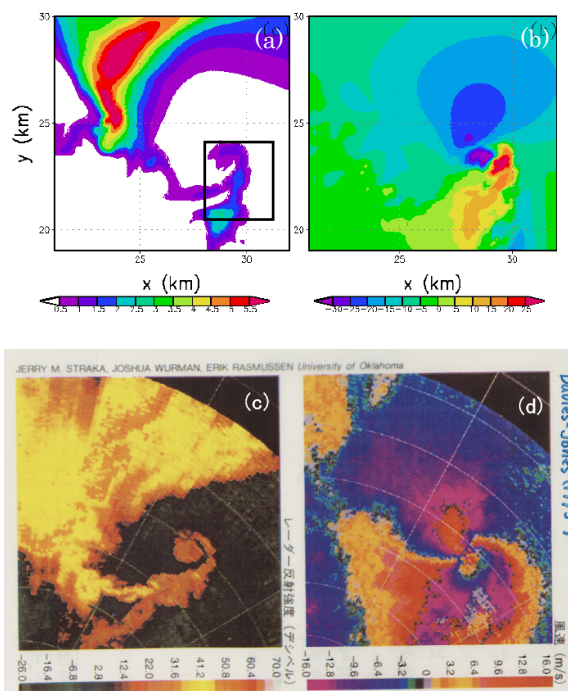


Fig. 4: Horizontal distributions of (a) simulated rain water (g/kg) and northeastward component of the simulated wind at $t=4504s$ at 1 km AGL³⁾. The solid square in (a) indicates the region shown in Fig. 5. Labels for x- and y-axes are in km. (c) and (d) are those of reflectivity and Doppler velocity as observed by a mobile Doppler radar in Jetmore, Kansas on 17 May 1995^{10,11)}.

成される。この上昇流によって、地表面近くのガスト・フロント（降水域から吹き出す冷たい空気と周辺から上昇流域に吹き込む暖湿な空気）に伴う鉛直渦度が引き伸ばされ、4500sには鉛直渦度 (Fig. 2a) が $0.8s^{-1}$ に達する竜巻が発生する。竜巻に伴う気圧降下は 27hPa に達した (Fig. 2c)。

Fig. 3 は竜巻が最盛期を迎えた 4504s の竜巻周辺の雲の様子と鉛直渦度が $0.5s^{-1}$ より大きな領域の 3 次元画像である。現実の竜巻に匹敵する強い鉛直渦度の領域が地面から高度 1km まで伸びており、その付近で雲底が漏斗状に垂れ下がっているのが見られる。

Fig. 4a と 4b は竜巻が最盛期を迎えた $t=4504s$ のスーパーセルの南西部の高度 1km における雨水の混合比と南西方向から見た視線方向の風速の分布を示したものである。Fig. 4c と 4d は、事例は異なるが、1995 年 5 月 17 日、米カンサス州ジェットモアでスーパーセルに伴って発生した竜巻の際に観測されたドップラーレーダーの反射強度とドップラー速度の分布^{10,11)}で、Fig. 4a と 4b とほぼ同じ空間スケールにして示してある。

Fig. 4a を見ると、領域の右半分にある直径 5km くらいの反時計回りの循環 (メソサイクロン) によって左上にある降水域の雨が流され鉤針 (フック) 状のパターンを形成していることがわかる。この鉤針状のパターンの先端は、更に螺旋状に巻き込んでいるのがわかる。実はこの螺旋状の領域が竜巻に対応している。Fig. 4b を見ると、メソサイクロンの回転場に対応する差し渡し 5km 程度の正負の速度のペアが見られるのに加えて、Fig. 4a の螺旋状の領域に竜巻に対応する差し渡し 1km 程度の正負の速度のペアが見られる。これらの様子は、ドップラーレーダー観測で見られた反射強度 (雨粒の混合比に大まかに対応; Fig. 4c) とドップラー速度 (Fig. 4d) に驚くほど良く似ている。

Fig. 5 は竜巻が最盛期に達する 4504s の前 600 s 間の地上 5m の鉛直渦度と高度 200m の上昇流の時間変化を示したものである。3900s を見ると領域の北西から南東に細長く伸びる鉛直渦度の大きい領域が見られる。これは Fig. 2 の説明で述べたように、北西側の降水域から吹き出す冷たい風と北東側から流れ込む相対的に暖湿な風の間で風向が急変するガスト・フロントに対応している。ガスト・フロント上には、水平シアの不安定によると思われる多数の渦 (A、B、C、D) が見られる。これらの渦は、一時的に強まりを見せるが、あまり発達せず、南東に移動しながら減衰する。3968s になると、 $y=22.3km$ 付近に新しい渦 E が発達を始める。渦 E は上空の上昇流域に比較的近く、上昇流自身も次第に強まりを見せる中、発達を続けながら南東へと移動する。しかしながら、4069s になると上昇流の領域からはずれ始め、その後は減衰を始める。一方、4069s には渦 E の北側の上昇流の領域に渦 F が現れ、周辺の小さな渦を次々と吸収しながら発達して、遂には竜巻になる。竜巻の角運動量はガスト・フロントに伴う水平シア流の持つ角運動量から供給されているように見える。

Bluestein et al.⁹⁾ は、可搬型ドップラーレーダーを用いて 1999 年 6 月 5 日の米・ネブラスカ州バセットの竜巻の詳細な観測を行い、竜巻の発生前後に周辺に小規模な渦が多数存在したことを報告している。彼らの観測は時間解像度が十分でないため、Fig. 5 のような個々の渦の追跡はしていないが、今回の数値シミュレーションで見られたガスト・フロントを起源とする竜巻の発生と矛盾しない結果が観測されていることは極めて興味深い。

4. まとめと今後の課題

スーパーセル型積乱雲とこれに伴って発生する竜巻を水平格子間隔 70m の高解像度数値モデルで再現することに成功し、竜巻の発生機構と構造を明らかにした。竜巻は、地表面付近で降水域から吹き出す冷気と周囲から吹き込む暖湿な気流の間に形成されるガスト・フロントがシア不安定を起こして生じたと思われる多数の渦の 1 つから成長した。竜巻の発生前には、高度 1km 付近で下層のメソサイクロンが発達するのに伴い、その低圧がもたらす鉛直気圧傾度力による加速で、高度 1km で 40m/s を越える非常に強い上昇流が形成された。前述の多数の渦のうち、竜巻に発達した渦はこの上昇流の下に位置したものであった。従って、竜巻の発生には、メソサイクロンに伴う上昇流と、下層のガスト・フロントの位置がうまく合致することが重要であると思われる。このことは、メソサイクロンが検出されるだけでは、竜巻が発生することを保証しないという最近の観測結果と整合的である。スーパーセルによる竜巻が、実は局地前線による竜巻と似た環境を、スーパーセル自身が作り出すことによらずれば、従来 2 通りあると考えられていた竜巻の発生機構に多くの共通点があることになり、非常に興味深い。

今回の数値実験では、初期に鉛直渦度は存在しないので、竜巻の発生に直接的に寄与するガスト・フロントの鉛直渦度は、もとを辿れば環境風の鉛直シアに伴う水平渦度あるいは傾圧的に生成された水平渦度を傾けることによって生成されたと考えられる (例えば、降水域での下降流が上空の水平運動量を地表面まで運んできたなど)。では、どのような条件のときに、ガスト・フロントと下層のメソサイクロンに伴う上昇流がタイミング良くカップリングするのか? スーパーセルに伴う竜巻の発生機構を本当に理解し、竜巻の予知に利用するには、この点を明らかにする必要がある。

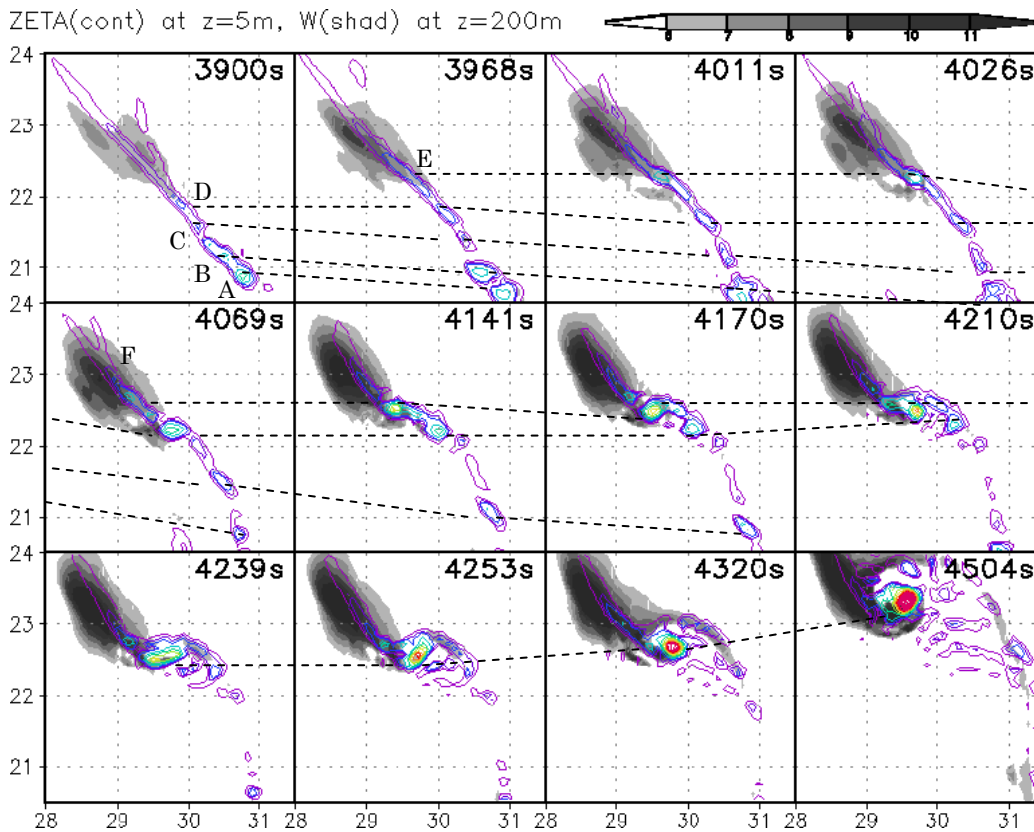


Fig. 5: Vertical vorticity (contoured at 0.01 s^{-1} , 0.03 s^{-1} and every 0.05 s^{-1} between 0.05 s^{-1} and 0.80 s^{-1}) at 5 m AGL between $t=3900\text{s}$ and 4504s . The updraft region at 200 m AGL is shaded according to the gray scale in the right hand side. Dashed lines denote each corresponding small vortex that evolves along the gust front³⁾.

まず最初に行うべきことは、初期の環境場の風速分布や温度・湿度分布を今回のシミュレーションのものから少しずつ変えて、どのような条件のときに竜巻が起きなくなるかを明らかにすべきであろう。また、今回のシミュレーションでは地表面の境界条件は free-slip としたが、竜巻のような渦では、地表面に生ずる回転境界層の影響は非常に大きいと考えられる。地表面の摩擦を考慮すると、初期に与えた環境場の風が時間と共に変形してしまうという厄介な問題があるが、この問題を解決しながら、摩擦ありの場合のシミュレーションも行う必要がある。

今回のシミュレーションの水平格子間隔は 70m を用いたが、竜巻の平均直径が 100m 程度であることを考えると、まだまだ水平解像度は不十分と思われる。竜巻渦の構造を詳しく調べるためには、更に大規模な計算機を利用して、解像度の高いシミュレーションを行う必要がある。この際、地表面の境界条件として、従来の気象分野のシミュレーションで用いられているバルク法によるフラックスをそのまま用いて良いかという基礎的な問題も残されている。現実的な竜巻を数値シミュレーションで再現することは可能になりつつあるが、竜巻を本当に理解するまでには解明すべき課題は多い。

参考文献

- 1) Wurman, J., 2000: Private communication.
- 2) 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.
- 3) Noda, A.T. and H. Niino., 2004: Genesis and structure of a

major tornado in a numerically-simulated supercell storm : Importance of vertical vorticity in a gust front. SOLA (Accepted).

- 4) Wakimoto, R. M., and J. W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1113-1140.
- 5) Browning, K., 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 634-639.
- 6) Rotunno, R. and J. Klemp, 1985: On the Rotation and Propagation of Simulated Supercell Thunderstorms *J. Atmos. Sci.*, **42**, 271-292.
- 7) Burgess, D. W., 1997: Tornado warning guidance. *OSB/OTB*, Oklahoma, 28pp.
- 8) Wakimoto, R. M., and H. Cai, 2000: Analysis of nontornadic storm during VORTEX 95. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 565--592.
- 9) Xue, M., K. K. Droegemeier, V. Wong, A. Shapiro, and K. Brewster, 1995: ARPS Version 4.0 User's Guide. The Center for Analysis and Prediction of Storms, University of Oklahoma, 380 pp.
- 10) Wurman, J.,: (<http://www.cswr.org/dataimages/2004-06/web-images-2004-06/tornado/index.php?path=%2Fhanston>)
- 11) Davies=Jones, R.P., 1995: Tornadoes. *Scientific American*, **273**, August, 48-58.
- 12) Bluestein, H. B., C. C. Weiss, and A. L. Pazmany, 2003: Mobile Doppler radar observations of a tornado in a supercell near Bassett, Nebraska, on 5 June 1999. Part I: Tornado-genesis. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2954-2967.