

竜巻様渦の遷移に関する数値実験 Numerical Simulation on the Transition of Tornado-like Vortices

○林悠平・竹見哲也・宮本佳明

○Yuhei HAYASHI、 Tetsuya TAKEMI、 Yoshiaki MIYAMOTO

The transition of tornado-like vortices is numerically investigated with the use of nonhydrostatic axisymmetric and three-dimensional models. Tornado-like vortices are generated by imposing a specified external force near the center axis of the computational domains that are rotating at a constant angular velocity. When the vortex transition from one to two-celled vortex occurs, there is an overshoot of the radial inflow near the surface. The overshoot flow turns upward, rebounding outward to a larger radius. At the same time, downdraft penetrates to the surface at the rotating axis. The overshoot is generated by coupled effects of inward advection and inward pressure gradient force. The downdraft is caused by downward pressure gradient. Thereafter, the two celled vortex transform to a multiple-vortex structure because the horizontal shear and Kelvin-Helmholtz instabilities occur in the non-axisymmetric flow.

1.はじめに

竜巻様渦は、強度が強くなっていくと、構造が遷移していくことがある。まず、我々が竜巻としてよく見る1セル構造ができる。次に、地表面付近に中心軸方向へと流入する流れが大きく行き過ぎ、上昇しつつ外側へと戻るというオーバーシュートと呼ばれる流れが発生する。オーバーシュートが地表面付近で発生すると中心軸上に下降流が発生し、地表面まで下降流が達することによって竜巻様渦は2セル構造と呼ばれる構造に遷移する。遷移後、流れは徐々に乱れていき、非軸対称な流れの成分が大きくなっていく。すると、非軸対称な流れの中に複数の渦が発生して、竜巻様渦は多重渦構造と呼ばれる構造へと遷移する。

数々の先行研究により、竜巻様渦の詳細構造や遷移に関する研究は徐々に進んでいる。竜巻様渦の多重渦構造までの遷移過程を再現するためには、3次元モデルによる数値実験が軸対称モデルによる数値実験に加えて必要である。しかし、3次元モデルを用いた竜巻様渦の遷移に関する数値実験の数は多いとは言えず、竜巻様渦の遷移に関する物理的メカニズムの解明も不十分である。

本発表では、非静力学圧縮流体を用いた軸対称及び3次元の竜巻様渦の遷移に関する数値実験の結果を用いて、竜巻様渦の遷移に関する物理的メカニズムを議論する。

2.非静力学圧縮流体の数値モデル

竜巻様渦の遷移に関する数値実験に使用した数値モデルは、軸対称モデルについては Miyamoto (2010) で使用された Rotunno and Emanuel (1987) に基づく非静力学圧縮流体の軸対称台風様渦モデルを竜巻様渦に適用できるように修正して用いた。また、3次元モデルについては The National Center for Atmosphere Research (NCAR) による非静力学圧縮流体を用いた気象モデルの Weather Research and Forecasting (WRF) -version3.6.1 を竜巻様渦に適用できるように修正して用いた。

本数値実験では、回転場に上向きの鉛直強制を与え、それによって発生する中心軸方向への流れに転向力が加わり竜巻様渦が発生するという Fiedler 型の実験方式を用いた (Fiedler; 1994, 1998)。

本発表で用いる数値実験の計算設定を以下に

まとめる。軸対称モデルの座標は円筒座標系で、領域は動径方向に 6000 m、鉛直方向に 12000 m を取った。格子間隔は動径方向に $\Delta r = 30$ m、鉛直方向に $\Delta z = 5$ m をとった。3 次元モデルの座標は 3 次元直交座標系で、領域は水平方向に 6000 m、鉛直方向に 15000 m をとった。格子間隔は水平方向に $\Delta x = \Delta y = 30$ m をとり、鉛直方向に地表面付近で最短 $\Delta z_{\min} = 4.5$ m の上層に向かうと格子間隔が荒くなる伸縮格子を用いた。初期環境場は無風とし、Weisman and Klemp (1982) に基づく米国中西部でのシビアストームの環境場を想定した解析関数型の温位プロファイルを与えた。地表面摩擦については Garratt (1977) による陸上の摩擦と摩擦無しの設定を用いた。場の回転角速度はコリオリ・パラメータで $f = 0.02 \text{ s}^{-1}$ と $f = 0.10 \text{ s}^{-1}$ の 2 種類を与えた。上向きの鉛直強制については中心軸上に式(1)の動径方向に $\cos$ 関数、鉛直方向に γ 分布（形状及び尺度母数は共に 2）の $\cos$ - γ 型分布を取った（添え字の a は軸対称、3 は 3 次元モデルを表す）。鉛直強制の最大値は $F_{\max} = 1.262 \text{ m s}^{-2}$ とした。渦粘性係数については Smagorinsky モデル (Smagorinsky, 1963) を用いた。

$$F_z(r, z) = \begin{cases} F_{\max} \cos\left(\frac{\pi r^2}{2 R^2}\right) f_\gamma(z_a - 400, z_3) & (0 \leq z_a \leq 1400, 0 \leq z_3 \leq 1000) \\ F_{\max} \cos\left(\frac{\pi r^2}{2 R^2}\right) & (1400 \leq z_a \leq 8000, 1000 \leq z_3 \leq 8000) \\ F_{\max} \cos\left(\frac{\pi r^2}{2 R^2}\right) f_\gamma(z - 7000) & (z_{a,3} \geq 8000) \\ 0 & (r \geq 1000) \end{cases} \quad (1)$$

3. 竜巻様渦の遷移過程の物理的メカニズム

数値実験の結果に基づく竜巻様渦の遷移過程の主な物理的メカニズムを簡単に述べる。

竜巻様渦の地表面付近におけるオーバーシュートは、動径風速の移流と気圧傾度力による内向きの力が、地表面摩擦のために地表面付近で外向

きの遠心力を上回ることによって発生したと見られる。

竜巻様渦が 1 セルから 2 セル構造へと遷移する時に生じる中心軸上の下降流については、鉛直強制による吸い出しによって大きくなった鉛直下向きの気圧傾度力が、上向きの鉛直強制を中心軸付近で上回って発生したと考えられる。

竜巻様渦が 2 セル構造から多重渦構造へと遷移する時に生じた複数の渦の発生については、竜巻様渦の水平風速の非軸対称成分が時に大きな流れを作った際に、風速の向きが急変する部分や流れの合流する部分ができ、そこで水平シア不安定やケルビン・ヘルムホルツ不安定が発生したことによると考えられる。

参考文献

- Fiedler, B. H., 1994: The Thermodynamics speed limit and its violation in axisymmetric numerical simulations of tornado-like vortices, *Atmos. Ocean.*, **32**, 335-359.
- Fiedler, B. H., 1998: Wind-speed limits in numerical simulated tornadoes with suction vortices, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **124**, 2377-2392.
- Garratt, J. R., 1977: Review of drag coefficients over oceans and continents, *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 915-929.
- Miyamoto, Y., 2010: Roles of sea surface fluxes on the maintenance and intensification of tropical cyclones, Ph. D. thesis, Kyoto Univ.
- Rotunno, R. and Emanuel, K. A., 1986: An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part II: evolutionary study using a nonhydrostatic numerical model, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 542-561.
- Smagorinsky, J., 1963: General circulation experiments with the primitive equations. I: the basic experiment, *Mon. Wea. Rev.*, **91**, 99-164.
- Weisman, M. L. and Klemp, J. B., 1982: The dependence of numerically simulated convective storm on vertical wind shear and buoyancy, *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 504-520.