

論文の内容の要旨

論文題目 A Study of Supercell Tornadogenesis Using Data Assimilation
and High-resolution Ensemble Forecasts

(データ同化と高解像度アンサンブル予報を用いた
スーパーセル竜巻の発生に関する研究)

氏 名 横 田 祥

強い竜巻の多くは、メソサイクロン(MC: Mesocyclone)と呼ばれる直径数 km の渦を伴う発達した積乱雲(スーパーセル)のもとで発生する。スーパーセルに伴う竜巻(以下、スーパーセル竜巻)は、(1)環境場の水平渦度の立ち上げによる中層 MC の形成、(2)ストームの下降流が作る水平渦度の立ち上げによる下層 MC 形成、(3)下層 MC が作る上向き気圧傾度力による竜巻形成の順で発生すると考えられている。しかしこれらは、限られた観測データや単一の決定論的な数値実験、理想的な感度実験による解析に基づく知見であり、実際の竜巻の発生機構が多数の事例で十分に検証されているとは言えない。また、竜巻の渦度や循環の起源に関しては、環境場の鉛直シアによるとするもの、傾圧項によるとするもの、摩擦項によるとするものがあり、決着を見ていない。そこで、本研究では、日本で発生したスーパーセル竜巻の事例について、稠密観測データの同化により、これまで試みられていなかった「現実の竜巻のアンサンブル予報実験」を行った。そして、アンサンブル予報の特性を活かした解析により、スーパーセル竜巻の渦度や循環の起源や、その発生条件を明らかにすることを目的とした。

上記の目的を達成するために、2012年5月6日1230-1250 JST 頃につくば市を通過した強いスーパーセル竜巻を対象として、32メンバーの局所アンサンブル変換カルマンフィルター(LETKF)を用いた観測データの同化と気象庁非静力学モデル(JMANHM)を用いた32メンバーアンサンブル予報を繰り返し行う解析・予報サイクル実験により、下層 MC や竜巻のアンサンブル予報を行うための初期値を作成した。具体的には、水平格子間隔 $\Delta x=15$ km の親 LETKF により、5月3日0900 JST から6時間サイクルで、気象庁現業メソ解析で同化されている観測データを同化し、これにネストした $\Delta x=1.875$ km の子 LETKF により、5月6日0300 JST から1時間サイクルで、高密度の地上観測とレーダー観測を同化した。地上観測としては、気象庁アメダスによる水平風・気温と、NTT ドコモ社環境センサーネットワークによる水平風・気温・相対湿度を用い、これをモデル最下層(地上20 m)の値に変換したものを観測値として同化した。また、レーダー観測としては、気象庁の東京・

羽田空港・成田空港レーダーと気象研究所の二重偏波レーダー(MACS-POL)の動径風と、MACS-POLの反射強度と比偏波間位相差から推定した雨水量を用い、これを仰角毎に $\Delta x=1.875$ kmに内挿したものを観測値として同化した。そして、5月6日1200 JSTまでの観測値を同化した5月6日1100 JSTの子LETKF解析(32メンバーとその平均の計33メンバー)を初期値とする $\Delta x=350$ mのアンサンブル実験で下層MCを予報し、さらに1110 JSTから $\Delta x=50$ mにダウンスケールした高解像度アンサンブル実験で竜巻を予報した。

$\Delta x=350$ mのアンサンブル予報実験では、全てのメンバーで、地上0.8 kmの最大鉛直渦度 $\zeta^{(LMC)}$ が 0.03 s⁻¹を超えるような、スーパーセルに伴うメソスケール渦(下層MC)が実際の竜巻の被害域の近くに予報された。しかし、この下層MCの強さ $\zeta_{MAX}^{(LMC)}$ ($\zeta^{(LMC)}$ の20分移動平均最大値で定義)は、アンサンブルメンバー間で大きく異なっていた。そこで、 $\zeta^{(LMC)}$ が最大となる時刻と初期時刻(1100 JST)の物理量に対する $\zeta_{MAX}^{(LMC)}$ の感度を、アンサンブルに基づく感度解析により求めた。すなわち、着目する物理量の $\zeta_{MAX}^{(LMC)}$ に関する回帰直線の傾きを、アンサンブル予報実験の結果を用いて格子点毎に計算することにより、感度の大きな位置を求めた。その結果、特に1100 JSTの下層0-1 kmの水平風に対する感度がストームの進行方向右前方の南風に対して大きく、1100 JSTの下層0-1 kmの水蒸気混合比に対する感度がストームの進行方向後方で大きかった。このことは、ストーム前方の下層収束とストーム後方の下層水蒸気が下層MCの強化に重要であったということを示している。

しかし、 $\Delta x=350$ mは竜巻の解像には不十分であるため、これらの要素が竜巻の発生にも重要かどうかは $\Delta x=350$ mの実験からは分からない。そこで次に、 $\Delta x=50$ mのアンサンブル予報実験の結果を用いた解析により、竜巻の発生にとって直接的に重要な要素を調べた。この $\Delta x=50$ mの実験では、メンバーによっては地上30 mの最大鉛直渦度 $\zeta^{(TOR)}$ が 1.0 s⁻¹を超えるような強い渦が予報され、33メンバー中7メンバー(21%)で竜巻が発生した(ただし、 $\zeta^{(TOR)}$ の5分移動平均最大値 $\zeta_{MAX}^{(TOR)}$ が 1.0 s⁻¹を超えることを竜巻発生の基準とした)。そこで、この竜巻がどのような機構で発生したのかを調べるため、 $\zeta_{MAX}^{(TOR)}$ が大きい順に数メンバーを選び、発達中の地上渦($\zeta^{(TOR)}$ が 0.6 s⁻¹を超えた時刻の $\zeta^{(TOR)}$ の位置)を囲む閉曲線内のパーセルの後方流跡線解析を行って、そのパーセルの渦度・閉曲線の循環・それらの生成項の時系列を求めた。渦度解析の結果からは、発達中の地上渦の気塊の鉛直渦度の起源が、地表近くの摩擦によって生ずるパーセルの進行方向に直交する向きの水平渦度であることが見出された。また、循環解析の結果からも、循環は、全体として傾圧項よりも摩擦項による増減の方が大きく、摩擦が竜巻の循環の主な起源となり得ることが分かった。しかし、メンバーによっては摩擦項が必ずしも循環の増大に寄与しておらず、循環の生成項と竜巻の発生に明瞭な関係性は見られなかった。このことから、竜巻のもととなる地上渦の循環の起源は着目する気塊によって大きく異なり、竜巻の発生にとっては本質的ではないことが示唆される。

そこで、竜巻の発生に本質的な物理量を調べるために、竜巻発生前のMCスケールの物理量に対する $\zeta_{MAX}^{(TOR)}$ の相関を、全33メンバーを用い、高度・時刻毎に調べた。その結果、 $\zeta^{(TOR)}$ が最大となる数分前の地上約1 kmの最大鉛直渦度と地表付近の水蒸気に対する相関が特に大きく、温位に対する相関は小さかった。地上約1 kmの最大鉛直渦度は下層MCの強さに対応し、これが強いほど、そこで気圧が大きく低下するため、この下層MCの下では強い上向きの気圧傾度力が生ずる。また、地表付近の水蒸気が多いほど、その気塊の持ち上げ凝結高度(LCL)と自由対流高度(LFC)が低下するため、LFCより上空の浮力が増大するとともに、LCLより上空の負の浮力が減少し、さらにLCL付近では、浮力の鉛直勾配によって上向き気圧傾度力が生ずる。これらの

上向き気圧傾度力と浮力が $\zeta_{\text{MAX}}^{(\text{TOR})}$ と強い相関を持っていたことから、強い下層 MC と地表付近の高湿気塊によるこれら 2 つの上向き加速と、それによる地上の渦の引き伸ばしが、竜巻の発生にとって本質的だと考えられる。本実験の結果から、 $\zeta^{(\text{TOR})}$ が最大となる 3 分前の地上 1 km の最大鉛直渦度 ζ_{max} と地上 100 m 以下で平均した水蒸気混合比 QV_{mean} に対して竜巻発生($\zeta_{\text{MAX}}^{(\text{TOR})} > 1.0 \text{ s}^{-1}$)の条件を求めると、竜巻発生の必要条件はそれぞれ「 $\zeta_{\text{max}} > 0.077 \text{ s}^{-1}$ 」と「 $QV_{\text{mean}} > 10.6 \text{ g kg}^{-1}$ 」であり、十分条件は「 $\zeta_{\text{max}} > 0.1 \text{ s}^{-1}$ かつ $QV_{\text{mean}} > 10.7 \text{ g kg}^{-1}$ 」であった。

本研究は、現実のスーパーセルに伴う下層 MC と竜巻を解像するアンサンブル予報実験を初めて行い、これを用いた解析により、スーパーセル竜巻の発生に関して、以下の 3 点を明らかにした: (1)ストーム前方の下層収束とストーム後方の下層水蒸気が下層 MC を強める。(2)地上約 1 km の下層 MC が強く地表付近の水蒸気が多いことが竜巻の発生にとって本質的である。(3)地上渦の渦度や循環の起源は多様であり、地上渦の起源としての傾圧性や摩擦の強さは竜巻の発生にとって本質的ではない。(1)と(2)は先行研究の知見を補強する結果であり、下層 MC が強いほど竜巻の発生に有利であることから、ストーム前方の下層収束とストーム後方の下層水蒸気は、下層 MC の強化と竜巻の発生の双方にとって重要であり、これらをデータ同化によって修正することが竜巻の予報の改善に有効と言える。実際、稠密な地上観測データやレーダーデータを同化しない実験では、下層 MC を正しく予測することは出来なかった。(3)は本研究で初めて明らかになった結果であり、この結果から、地上渦の起源を解像出来るような高解像度モデルは、竜巻を予報する上では必ずしも必要ではないということが示唆される。