

# 論文審査の結果の要旨

氏名 末木 健太

熱帯低気圧 (Tropical Cyclone: 以後では TC と略す) は竜巻の主要な発生環境の 1 つであり、日本の竜巻の 20% が台風に伴って発生する。しかし、竜巻を伴う TC と、竜巻を伴わない TC があり、その違いが生じる要因は十分には理解されていなかった。過去の研究では、竜巻の発生が集中する TC の進行報告右前方象限ないし北東象限において、竜巻を生ずる特殊な回転積乱雲 (スーパーセル) の発生ポテンシャル Storm-Relative Environmental Helicity (以後 SREH) が大きいことを示したが、竜巻を伴う TC と伴わない TC との比較は行っていない。また、対流有効位置エネルギー (Convective Available Potential Energy: 以後 CAPE) の分布が竜巻の発生位置の分布と一致しないなど、大気成層の安定度と竜巻発生の関係もよく分かっていない。一方、近年の研究では、CAPE の計算にエントレインメントの効果を加味することで、TC 周辺の湿潤対流の活動度を適切に評価できることが指摘されており、エントレインメントを考慮することの重要性が示唆されている。本論文では、SREH や CAPE を用いた解析により、竜巻を伴う台風と、伴わない台風の構造的な違いを明らかにした他、TC 環境下で発生するスーパーセルのエントレインメント率の検証を行った。その結果、SREH とエントレインメントを考慮した CAPE を組み合わせることで、台風に伴う竜巻発生可能性をより適切に表現できることがわかった。

本論文は 4 章からなる。

第 1 章ではスーパーセルの形成と竜巻の発生のメカニズムの研究がレビューされ、竜巻発生可能性を表す環境場のパラメータについて記述されている。さらに竜巻を伴う台風の研究についてレビューされ、本論文の目的が提示されている。

第 2 章では竜巻を生ずる台風の統計的な特徴が調べられている。九州、四国、本州で発生した竜巻のうち、台風中心から半径 550 km 以内で発生したものを「台風に伴う竜巻」と定義し、これらの竜巻を発生させた台風を「竜巻を伴う台風 (Tornadic Typhoon: 以後 TT)」と定義した。一方、「竜巻を伴わない台風 (Non-tornadic Typhoon: 以後 NT)」は、生涯を通して竜巻を発生させなかった台風のうち、中心位置が TT に近い位置に存在した台風と定義した。1991~2013 年の解析期間中に、53 個の竜巻、34 個の TT、276 個の NT が抽出された。

SREH は、対流セルに吹き込む流れ方向の水平渦度の鉛直積算を表し、スーパーセル内部の回転の強さの指標となる。台風周辺の SREH を、TT と NT それぞれについてコンポジットすると、SREH は台風の北東象限で大きくなり、TT では、SREH の分布と竜巻の発生位置の分布が一致した。台風北東象限の SREH は、TT の方が NT に比べて有意に大きく、TT の方がスーパーセルの発生に適した風速場を持っていた。TT の強度が NT よりも強く、高度 1 km 以上の総観規模の鉛直シアが、TT の方が NT に比べて大きいことが、TT の SREH を大きくする主要因であることがわかった。また、TT の総観規模の風が NT に比べ強いことも、TT の SREH を大きくする要因となっていた。TT の総観規模の鉛直シアが大きいことは、台風の温帯低気圧化（温低化）と関係している。台風構造を定量的に評価する Cyclone Phase Space による解析の結果、TT には温低化の進んだ台風がより多く含まれていたことがわかった。

CAPE は持ち上げ空気塊が受ける上向き浮力の鉛直積算を表しており、空気塊が浮力から獲得する上昇運動エネルギーの最大値に対応している。本論文では、通常の CAPE に加え、持ち上げ空気塊の計算にエントレインメントの効果を加味した CAPE (Entraining CAPE: 以後 E-CAPE) についても調べた。通常の CAPE は台風の南東象限で大きく、TT の竜巻の発生位置とは一致しない。一方、エントレインメント率を  $20\% \text{ km}^{-1}$  とした E-CAPE は台風北東象限で大きく、TT では竜巻の発生位置の分布と一致した。また、TT の北東象限の E-CAPE は NT よりも有意に大きかった。

以上のことから、SREH と E-CAPE は、竜巻の発生ポテンシャルを評価する良いパラメータであることが示唆された。

第 3 章では、Large Eddy Simulation を用いて台風に伴うスーパーセルのエントレインメント率が見積もられる。非静力学モデルを用いて、1990 年 9 月 19 日に台風 19 号に伴って関東平野で複数の竜巻が発生した事例を念頭に水平・鉛直格子間隔 100 m の理想実験を行ったところ、竜巻状渦を伴う準定常的なスーパーセルの再現に成功した。

鉛直速度が  $5 \text{ m s}^{-1}$  以上の連続的な上昇流域を解析対象とし、移流・拡散のみに従うトレーサーを導入し、上昇流域の特性を調べた。上昇流内のトレーサーの鉛直分布からエントレインメント率を見積もると、境界層の上部から対流圏中層までは  $15\text{-}20\% \text{ km}^{-1}$  程度であることが確認され、E-CAPE の計算で用いたエントレインメントのモデルの妥当性が示された。

第 4 章ではまとめと今後の展望が提示される。

なお、本論文第 2 章の一部は、新野宏氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析および検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。