

論文の内容の要旨

A study on the structure of tornado-spawning typhoons (竜巻を生ずる台風の構造に関する研究)

末木 健太

1. はじめに

熱帯低気圧 (Tropical Cyclone: 以後 TC) 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 (Niino et al., 1997)。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い。McCaul (1991) は、竜巻の発生が集中する TC の右前方象限において、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 (McCaul, 1991)、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 (Molinari et al., 2012)、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。本研究では、SREH や CAPE を用いた解析により、竜巻を伴う台風と、竜巻を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。

2. 竜巻を生ずる台風の統計的な特徴

(a) 使用データ・解析対象の定義

竜巻の発生位置・時刻は気象庁の「竜巻等の突風データベース (<http://www.data.jma.go.jp/>)

obd/stats/data/bosai/tornado/index.html)」、台風の中心位置・気圧は気象庁のベストトラックデータに基づく。台風周辺の大気の3次元データとして、気象庁55年長期再解析を使用した。

本研究では、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、TTの比較対象となる「竜巻を伴わない台風 (Non-tornadic Typhoon: 以後 NT) 」は、一生涯で竜巻を全く発生させなかった台風のうち、中心位置がTTと似たような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。

(b) SREH の解析

SREH は下式で定義される。

$$\text{SREH} = \int_{0 \text{ km}}^{3 \text{ km}} (\vec{V}_h - \vec{C}) \cdot \left(\vec{k} \times \frac{\partial \vec{V}_h}{\partial z} \right) dz \quad (1)$$

ただし、 $\vec{V}_h(z)$ は環境場の水平風速、 \vec{C} は対流セルの移動速度、 \vec{k} は鉛直方向の単位ベクトルである。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・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(図1)。一方、TTとNTを比較すると、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。

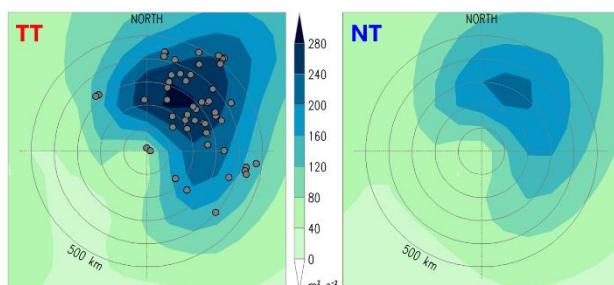


図1 台風周辺のSREHのコンポジット。左はTT、右はNT。TTの図には、竜巻の発生位置を灰色の丸で示している。

台風北東象限のSREHを大きくする要因を高度ごとに調べると、地表面付近($z=0-0.5$ km)では台風強度が強いほどSREHが大きく、中層($z=0.5-3$ km)では台風渦に重なる総観規模の鉛直シアが大きいほど、SREHも大きくなることが分かった。このため、TTの強度(中心気圧の平均: 966 hPa)がNT(平均: 974 hPa)よりも強く、 $z \geq 1$ km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と結論付けた。また、台風の北東象限では、対流圏中層の総観規模の風が、対流セルの対地移動速度 \vec{C} を速めることにより、地表面付近のSREHを間接的に大きくする効果を持つ。このため、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 (CPS; Hart, 2003)の1つで、台風の対称性を表すパラメータ B は、TTの平均が22 m、NTの平均が9 mであり、TTの方がより非対称な構造を持っていた。 $B \geq 10$ mは温低化開始の目安であるから(Evans and Hart, 2003)、TTには温低化の進んだ台風がより多く含まれていたともいえる。

(c) CAPE の解析

CAPE は下式で定義される。

$$\text{CAPE} = \int_{\text{LFC}}^{\text{EL}} g \frac{T_{vp} - \bar{T}_v}{\bar{T}_v} dz \quad (2)$$

ただし、 g は重力加速度、 T_{vp} は持ち上げ空気塊の仮温度、 \bar{T}_v は環境場の仮温度であり、LFC は自由対流高度、EL は平衡高度を表している。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。本研究では、空気塊を偽断熱的に持ち上げる通常の CAPE に加え、Romps and Kuang (2010) の方法を用いて、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 (図 2a)。また、TT の北東象限の CAPE が NT に比べて大きいわけでもない。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 (図 2b)。さらに、TT の北東象限の E-CAPE は NT よりも有意に大きく、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された。

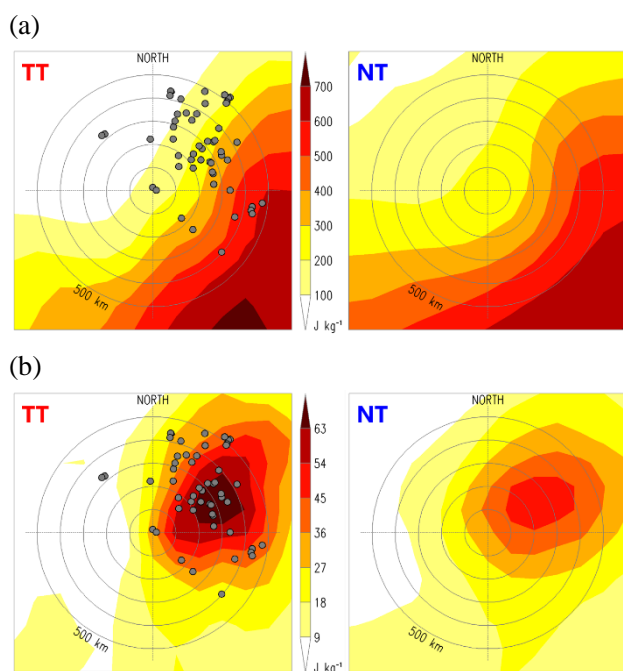


図 2 図 1 と同じ。ただし、(a) は CAPE、(b) はエントレインメント率 $20\% \text{ km}^{-1}$ の E-CAPE について。

エントレインメントの考慮が CAPE の分布を変えるのは、対流圏中層の水蒸気量が反映されることによる。台風の南東側は、対流圏中層が比較的乾燥しているため、エントレインメントを考慮すると持ち上げ空気塊が浮力を失い、E-CAPE は小さな値になる。一方、台風北東象限は中層が十分に湿っているため、E-CAPE は比較的大きな値を保つ。

また、TT の E-CAPE が NT よりも大きくなるのは、対流圏中層 (850–550 hPa) の気温の逓減率が TT の方が大きく、TT の方がより不安定な大気成層を持つためであることが分かった。これは、エントレインメントを考慮しない通常の CAPE では判別できない TT の特徴である。

3. Large Eddy Simulation (LES) を用いた台風に伴うスーパーセルのエントレインメント率の見積もり

E-CAPE による解析では、竜巻の発生位置の分布とよく一致することなどから、 $20\% \text{ km}^{-1}$ 程度のエントレインメント率が適切に思われた。しかしながら、この値は台風に伴うスーパーセルのエントレインメントの実態に基づくものではない。本研究では、高解像度 LES により、スーパーセルのエントレインメント率を検証した。

使用モデルは理想化実験に特化した非静力学モデル CM1 ver18.3 である。水平・鉛直格子間隔は 100 m。計算領域として水平に 96 km 四方、鉛直に 25 km を確保した ($z \geq 20 \text{ km}$ は Rayleigh damping 層)。時間ステップは 0.9 s (音波は 0.15 s)。subgrid の乱流輸送のパラメタリゼーションには Deardorff (1980)、微物理過程のパラメタリゼーションには Morrison double-moment スキーム (雲水・雨・雲氷・雪・雹を予報、Morrison et al., 2005, 2009) を用いた。実験では、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の環境場を代表する高層観測データ (1990/09/19 21:00 JST、館野) を平滑化し、それを基本場として水平一様に与え、温位バブル (中心で最大 +4K) により対流を励起した。この結果、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。

本研究では、 $w \geq 5 \text{ m s}^{-1}$ の連続的な上昇流域を解析対象とし、 $t = 90\text{--}150$ 分で平均した上昇流内の特性を調べた。移流・拡散のみに従うトレーサーを導入し、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。

4. まとめと今後の展望

竜巻を伴う台風 (TT) と伴わない台風 (NT) を比較した。TT は、台風強度が強いことと、台風渦に重なる総観規模の鉛直シアが大きいことのため、台風北東象限で SREH が大きくなっていた。さらに、TT は対流圏中層の成層の安定度が低く、台風北東象限でエントレインメントの効果を加味した CAPE (E-CAPE) が大きくなっていた。TT の大気成層の特徴は、エントレインメントを考慮しない通常の CAPE では判別できないものだった。また、高解像度 LES を用いた台風に伴うスーパーセルの理想化数値実験を行い、E-CAPE で用いたエントレインメントのモデルの妥当性を示した。

本研究では、日本で竜巻を発生させた台風のみを解析したが、米国の竜巻を伴うハリケーンに対しても同様の解析を行い、日米での共通点・相違点を明らかできれば、竜巻の発生環境場に関するより一層の理解が得られるだろう。また、本研究で用いた E-CAPE が、台風以外の環境場で発生する竜巻や、竜巻以外の顕著現象 (ダウンバースト、降雹、集中豪雨など) に対しても、有効なパラメータとなりうるかどうか検証する必要がある。さらに、エントレインメント率の環境場依存性を定量的に評価し、それを適切にパラメタライズすることで、E-CAPE の有効性がさらに高まることが期待される。