

# 竜巻を伴う回転積乱雲（スーパーセル）のエントレインメントを調べる理想化数値実験

末木 健太

東京大学大学院理学系研究科（現所属：理化学研究所計算科学研究機構）

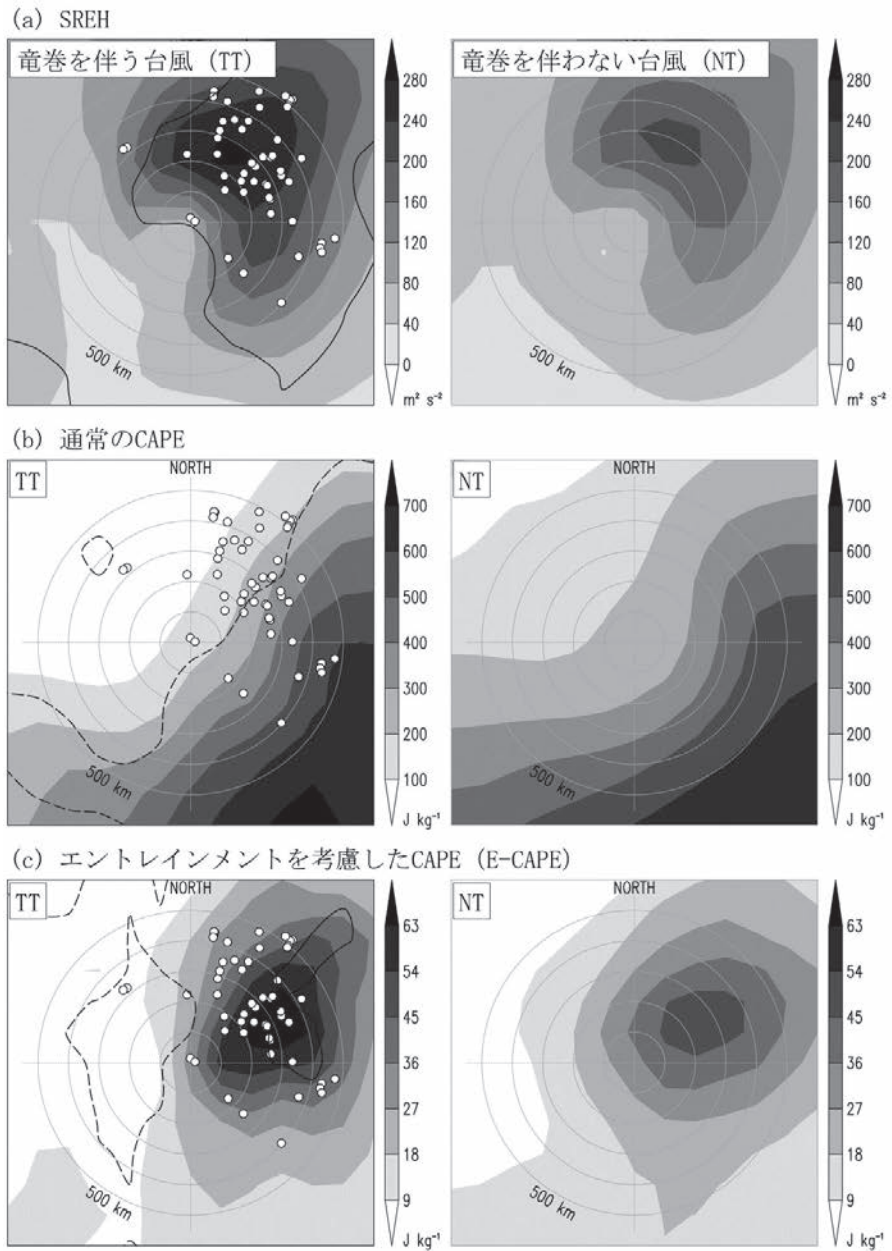
## 1. はじめに

竜巻は、一度発生すると甚大な被害をもたらす大気中の激しい渦であるが、空間スケールの小ささと寿命の短さのため、数値モデルによる予測や直接観測は依然困難である。一方、過去に発生した竜巻データの蓄積や、精度の良い大気の再解析データの登場により、竜巻の発生環境場の統計的な研究が可能となってきた。竜巻そのものの力学を理解すると同時に、竜巻の起こりやすい環境場を明らかにしていくことが、竜巻による人的被害を軽減するために必要である。

強い竜巻の多くは、鉛直軸回りの回転（メソサイクロン）を内部に有する特殊な積乱雲スーパーセルに伴って生じる。メソサイクロンは、環境風の鉛直シアに伴う水平渦度が、上昇流によって鉛直方向に立ち上げられることによって生じる。メソサイクロンの起源となる水平渦度の総量は「ストームに相対的な環境場のヘリシティ (Storm-Relative Environmental Helicity: SREH)」と呼ばれるパラメータによって見積もられ、メソサイクロンの回転の強さの指標となる。一方、積乱雲の上昇流の強さは「対流有効位置エネルギー (Convective Available Potential Energy: CAPE)」と呼ばれる大気成層のパラメータによって見積もられる。一般的には、SREH や CAPE が大きい環境場ほどスーパーセルが生じやすく、竜巻の発生リスクも高いと考えられる。

日本の竜巻の約 20%は台風に伴って発生する[1]。台風は、竜巻の主要な発生環境の 1 つといえるが、竜巻を多数発生させる台風と、竜巻を全く伴わない台風があり、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。我々の先行研究[2]では、日本で竜巻を発生させた台風 (Tornadic Typhoon: TT) とそうでない台風 (Non-tornadic Typhoon: NT) の SREH や CAPE を比較し、竜巻の発生が集中する台風北東象限において、TT の SREH が NT よりも有意に大きいことを示した (第 1 図 a)。一方、通常の計算方法により算出した CAPE は、竜巻の発生が比較的少ない台風の南東側で大きく、TT の値が NT に比べ大きい傾向も見られなかったが (第 1 図 b)、CAPE の計算に、積乱雲の上昇流が周囲の空気を取り込む効果 (エントレインメント: **Entrainment**) を加味した Entraining CAPE (E-CAPE) を調べたところ、E-CAPE は台風の北東象限で大きく、TT の方が NT よりも有意に大きくなっていった (第 1 図 c)。CAPE の計算にエントレインメントを考慮することが、台風に伴う竜巻の発生リスクを評価する上で重要であることが、初めて示唆された。

解析では、E-CAPE の計算に用いるエントレインメント率を  $20\% \text{ km}^{-1}$  とした。しかしながらこの値は、E-CAPE の空間分布と竜巻の発生位置分布との整合性の観点から導入した値であり、実際のスーパーセルのエントレインメント率に基づくものではなかった。エントレインメントは、積乱雲側面で生じる乱流混合と、スーパーセルの移動に相対的な環境風の雲内部への吹込みによって生ずると考えられるが、その量を観測により見積もることは困難であり、数値モデルを用いたシミュレーションを行う必要がある。計算には、スーパーセルとその環境場を表現する 100 km 四方程度の計算領域と、乱流混合によるエントレインメントを陽に表現する 100 m 程度の空間解



第1図：竜巻を伴う台風（TT）とそうでない台風（NT）のパラメータの平均空間分布の比較

(a)：台風周辺のSREHの分布．左はTT，右はNTについて．TTの図中の白丸は，台風中心に相対的な竜巻の発生位置を示し，黒実線のコンターは，TTのSREHがNTに比べ，5%水準で有意に大きい領域を表す．(b)：(a)と同じ．ただし通常のCAPEについて．TTの図中の黒破線のコンターは，TTのCAPEがNTに比べ，5%水準で有意に小さい領域を表す．(c)：(a)・(b)と同じ．ただし，エントレインメントを考慮したCAPE（E-CAPE）について．

像度が必要であり，スーパーコンピューターの利用が不可欠だ．本研究の目的は，高解像度の理想化数値実験によりスーパーセルのエントレインメント率を明らかにし，E-CAPEの計算で用いたエントレインメント率の物理的な裏付けを得ることである．

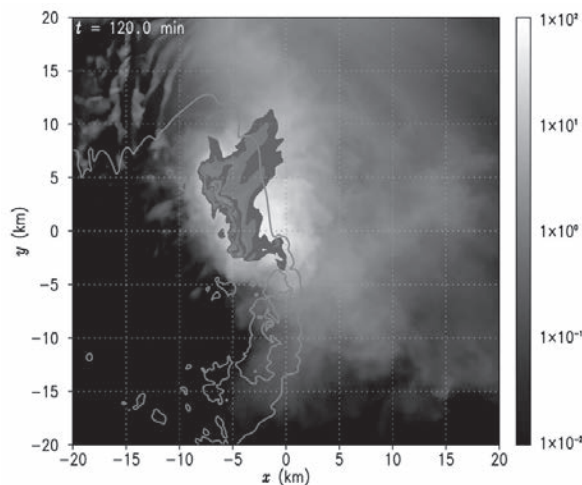
## 2. 実験設定

本研究では、非静力学気象モデル CM1 ver. 18.3<sup>1</sup>を使用した。積乱雲側面で生ずる乱流混合を陽に表現するため、水平・鉛直格子間隔を 100 m、積分の時間ステップを 0.9 s (音波は 0.15 s) とした。計算領域として水平 96 km 四方、鉛直 25 km (ただし高度 20 km より上は、風速・温位を基本場の値に強制する Rayleigh damping 層) を確保し、側面境界は解放境界、下部・上部境界は自由滑りとした。サブグリッドの乱流運動エネルギーは Deardorff のスキーム [3] により予報する。雲微物理過程の表現には、雲水・雨・雲氷・雪・雹を予報する Morrison のダブルモーメントバルクスキーム [4] [5] を用いた。

実験では、スーパーセルの発生に適した大気プロファイルを水平一様に与え、回転楕円体型の温位擾乱 (中心で +4 K) によって対流を励起し、スーパーセルを発生させた。大気プロファイルには、1990 年 9 月 19 日に台風 19 号に伴って複数のスーパーセル・竜巻が関東地方で発生した環境場を代表する高層観測データ (1990/09/19 21:00JST, 館野) を平滑化したプロファイルを用いた。ただし、スーパーセルが計算領域外に出ていくことを防ぐため、水平風速には、スーパーセルの移動速度を鉛直一様に差し引いた値を用いた。

## 3. 計算結果の概要

第 2 図は、積分開始 120 分後における鉛直積算凝結物量 (シェード,  $\text{kg m}^{-2}$ ), モデル最下層の温位擾乱が  $-0.5 \text{ K}$  のコンター (実線) を表しており、それぞれ雲、積乱雲が作り出す冷氣外出流の様子を示している。中心付近のべた塗り部分は、高度約 1 km の凝結物混合比が  $1 \times 10^{-3} \text{ kg kg}^{-1}$  以上の領域を示しており、気象レーダーで捉えられる雨水の様子を模している。積乱雲の南端では雨水分布がフック状に湾曲しているが、これは回転する風に雨水が流されることで生じた形状であり、メソサイクロンを有するスーパーセルの典型的な特徴を示している。スーパーセル

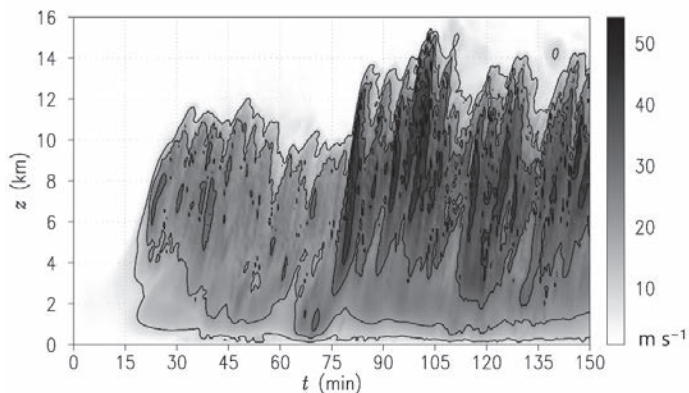


第 2 図：再現されたスーパーセルの様子

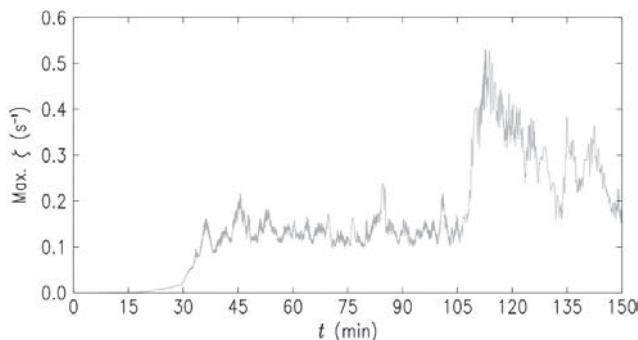
積分開始 120 分後における鉛直積算凝結物量 (シェード,  $\text{kg m}^{-2}$ ) と、モデル最下層の温位擾乱が  $-0.5 \text{ K}$  のコンター (実線)。中心付近のべた塗り部分は、高度約 1 km の凝結物混合比が  $1 \times 10^{-3} \text{ kg kg}^{-1}$  以上の領域。

<sup>1</sup> 米国大気研究センター (National Center for Atmospheric Research : NCAR) の George Bryan 氏が開発・管理している気象モデル。氏のウェブページ上からダウンロードが可能である (<http://www2.mmm.ucar.edu/people/bryan/cm1/>)。

内部における上昇流の最大値の時間高度断面を見ると(第3図), 75分頃から上昇流が強化され, その後は断続的な強い上昇流が維持されている. また, モデル最下層における鉛直渦度の最大値の時系列を見ると(第4図), 110分から130分にかけて渦度が強まる様子が見られる. この時間帯の流れ場を詳細に調べたところ, 地表面から雲底に伸びる竜巻状の渦が確認された. 本計算では, 理想的な環境場の下, 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といえる.



第3図：スーパーセル内部における上昇流の最大値の時間高度断面  
横軸は時間 (min), 縦軸は高度 (km). コンターは  $10 \text{ m s}^{-1}$  ごと.



第4図：モデル最下層における鉛直渦度の最大値の時系列  
横軸は時間 (min), 縦軸は渦度 ( $\text{s}^{-1}$ ).

#### 4. エントレインメント率の見積もり

本研究では, 鉛直流速が  $5 \text{ m s}^{-1}$  を超える連続的な上昇流域をスーパーセルの上昇流コアと定義し, 解析対象とした. 上昇流コアのエントレインメント率を見積もるため, 濃度が高度と共に線形に減少するようなトレーサー  $\bar{\Psi}$

$$\bar{\Psi} = 1 - \frac{z}{H} \quad \text{for } z \leq H \quad (1)$$

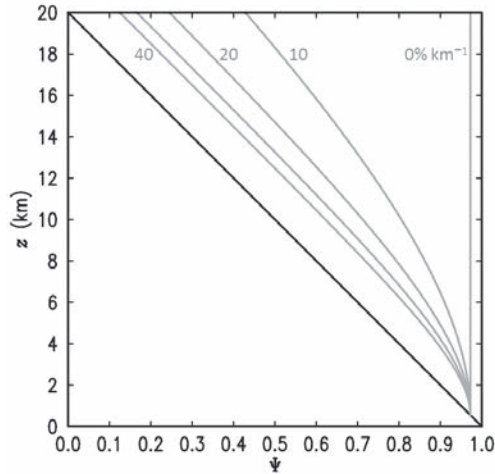
を初期時刻に与えている. ただし,  $H$  は  $20 \text{ km}$  とし,  $z > H$  では  $\bar{\Psi} = 0$  とした. 一方, 上昇流コア内部のトレーサー濃度を  $\hat{\Psi}$  と書くと, エントレインメント率  $\varepsilon$  で環境場の空気を取り込む場合の  $\hat{\Psi}$  の高度変化は, 定常状態を仮定すれば

$$\frac{d\hat{\Psi}}{dz} = \varepsilon(\bar{\Psi} - \hat{\Psi}) \quad (2)$$

を満たす。  $\varepsilon$  が定数ならば、(1)式の下、(2)式の解析解

$$\hat{\Psi} = 1 - \frac{z}{H} + \frac{1}{\varepsilon H} \{1 - e^{-\varepsilon(z-z_0)}\} \quad (3)$$

を得る。ただし、 $z_0$  は上昇流コアの起点高度である。様々な  $\varepsilon$  に対応する(3)式のプロファイルを図5に示す。



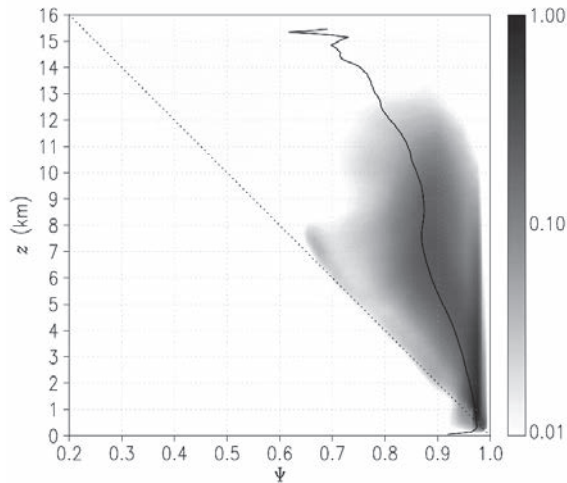
第5図：上昇流コア内におけるトレーサー濃度の高度変化の解析解

(3)式をプロットしたもの。右からエンTRAINMENT率  $\varepsilon = 0, 10, \dots, 40\% \text{ km}^{-1}$  の場合。ただし、上昇流コアの起点高度  $z_0$  は 550 m とした。右下の端から左上の端へ延びる直線は、(1)式的环境場のプロファイル。

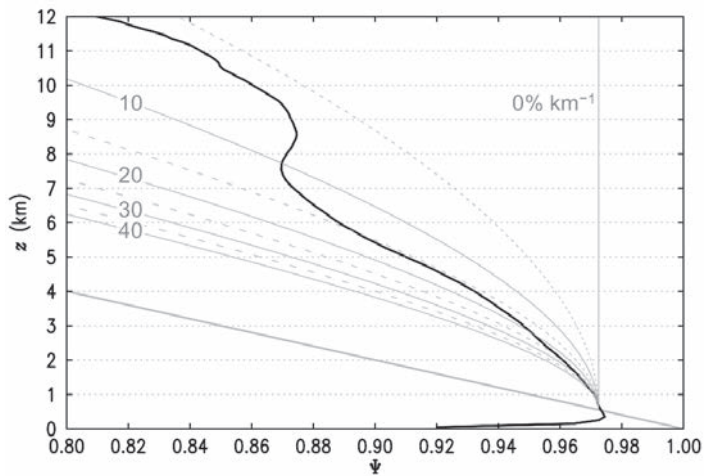
本研究では、準定常状態が維持された 90-150 分における上昇流コア内のトレーサー濃度分布から、エンTRAINMENT率を見積もった。第6図に、90-150分における上昇流コア内の各高度のトレーサー濃度の確立密度分布を示す。実線は上昇流内部のトレーサー濃度の平均プロファイル ( $\hat{\Psi}$  に相当)、点線は環境場のプロファイル ( $\bar{\Psi}$ ) である。高度約 0.5 km 付近を起点に、環境場の空気を取り込みながら、上昇流内部のトレーサー濃度が高度と共に減少する様子が見られる。シミュレーションで得られた上昇流コア内の平均プロファイルと、解析解とを比較すると(第7図)、高度 3 km 程度まではおよそ  $20\% \text{ km}^{-1}$  の線に沿い、高度 6 km 程度では  $15\% \text{ km}^{-1}$  で上昇した場合の値となっている。高度 6 km を超えると、DETRAINMENT (Detrainment: 雲内部から環境場への空気の流出) が支配的になり、(2)式が成り立たなくなるが、対流圏中層までのスーパーセルのエンTRAINMENT率は  $15\text{-}20\% \text{ km}^{-1}$  であると見積もられ、我々が E-CAPE の計算で用いたエンTRAINMENT率 ( $20\% \text{ km}^{-1}$ ) の妥当性が確かめられた。

## 5. まとめと今後の展望

本研究では、積乱雲の上昇流強度のポテンシャルを表すパラメータ CAPE にエンTRAINMENTの効果を加味した Entraining CAPE (E-CAPE) が、台風に伴う竜巻の発生リスクを評価する良い指標になるという我々の先行研究を念頭に、E-CAPE の計算に用いたエンTRAINMENT率 ( $20\% \text{ km}^{-1}$ ) の物理的な裏付けを得るため、竜巻を生ずる回転積乱雲スーパーセルの高解像度理想化数



第 6 図：90-150 分における上昇流コア内の各高度のトレーサー濃度の確立密度分布  
 シェードは最大値で規格化した確立密度分布。実線は上昇流内部のトレーサー濃度の平均プロファイル ( $\bar{\psi}$ に相当)、点線は環境場のプロファイル ( $\bar{\Psi}$ ) である。横軸はトレーサー濃度、縦軸は高度 (km)。



第 7 図：シミュレーションで得られた上昇流コア内の平均プロファイルと、解析解との比較  
 黒実線はシミュレーションの結果。灰色の線は右から順に  $\varepsilon = 0, 5, \dots, 40 \text{ km}^{-1}$  の場合の (3) 式の解析解。右下の端から延びる直線は、(1) 式の環境場のプロファイル。

値実験を実施し、そのエントレインメント率を検証した。実験では、1990 年の台風 19 号に伴い関東地方で複数のスーパーセル・竜巻が発生した環境場の下、竜巻状渦を伴う準定常的なスーパーセルを発生・維持させることに成功した。初期時刻に高度と共に濃度が減少するトレーサーを与え、準定常状態に落ち着いたスーパーセルの上昇流内部におけるトレーサー濃度の高度変化からエントレインメント率を見積もったところ、デトレインメントが支配的となる対流圏中層までで  $15\text{-}20 \text{ km}^{-1}$  程度となり、E-CAPE の計算で用いた値を支持する結果を得た。

本研究では、日本の台風に伴うスーパーセルについて解析を行ったが、米国のハリケーンに伴うスーパーセルや、温帯低気圧など他の環境場で発生するスーパーセルに対しても同様の解析を

行い、環境場ごとのエントレインメント率を明らかにしていく必要がある。また、大気成層や風の鉛直シアの違いによるエントレインメント率の環境場依存性を定量化し、E-CAPE の計算に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り、竜巻などのシビア現象の予報精度向上へと寄与することが期待される。

## 謝 辞

本研究の数値計算は、東京大学情報基盤センターの FX10 上で実行された。また、本研究の一部は、東京大学情報基盤センター平成 28 年度後期「スーパーコンピューター若手・女性利用者推薦」課題によって行われたものである。

本内容は、私の博士課程における研究の一部であり、指導教員である新野宏教授（東京大学大気海洋研究所）には多くのご指導・ご助言をいただいた。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Sueki, K., and H. Niino, 2016: Toward better assessment of tornado potential in typhoons: Significance of considering entrainment effects for CAPE. *Geophysical Research Letters*, **43**, 12, 597-12,604.
- [3] Deardorff, J. W., 1980: Stratocumulus-capped mixed layer derived from a three-dimensional model. *Bound.-Layer Meteor.*, **18**, 495-527.
- [4] Morrison, H., J. A. Curry, and V. I. Khvorostyanov, 2005: A new double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models. part I: Description. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 1665-1677.
- [5] Morrison, H., G. Thompson, and V. Tatarskii, 2009: Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 991-1007.