

平成30年5月30日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24244074

研究課題名(和文) 竜巻等突風現象を生ずる低気圧の内部構造と力学

研究課題名(英文) Structure and Dynamics of Cyclones that Cause Tornadoes and Severe Gusty Winds

研究代表者

新野 宏 (Niino, Hiroshi)

東京大学・大気海洋研究所・客員教授

研究者番号：90272525

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,900,000円

研究成果の概要(和文)：竜巻を生ずる温帯低気圧や熱帯低気圧の構造と環境場を解明すると共に、熱帯低気圧に伴う竜巻の可能性の評価には環境場の空気の連行を考慮した対流有効位置エネルギーが有効であることを見出した。また、稠密な地上観測網やドップラーレーダー観測網等のデータの同化により、竜巻を生ずるスーパーセルの下層メソサイクロン(LMC)の位置の予測の改善が可能であり、竜巻の強度はLMCの鉛直渦度や下層の相対湿度と相関が良いこと、従って竜巻のリスクを予測する上でアンサンブル予報によりLMCに遭遇する確率分布を求めることが有望であることを示した。さらに、超高解像度再現実験により現実事例の竜巻の多重渦構造の再現に成功した。

研究成果の概要(英文)：Structure and environment of tornado-spawning tropical and extratropical cyclones are clarified, and convective available potential energy that incorporates effects of entrainment of the environmental air is shown to be useful for estimating tornado potential in a tropical cyclone. Assimilation of data of dense surface observational network and Doppler radars, using nested local ensemble transform Kalman filter, is shown to improve the prediction of the path of the low-level mesocyclone associated with the tornado-spawning supercell. The predicted strength of the tornado is well correlated with the vertical vorticity of the LMC and low-level relative humidity in the supercell, so that a probability map of encounter with LMC based on an ensemble prediction is promising for predicting tornado risk. Furthermore, an ultra-high resolution simulation succeeded in reproducing the observed multiple-vortex structure of Tsukuba, Ibaraki tornado on 6 May 2012.

研究分野：気象学

キーワード：竜巻 スーパーセル 温帯低気圧 熱帯低気圧 積乱雲 対流有効位置エネルギー ヘリシティ 温帯低気圧化

## 1. 研究開始当初の背景

ほとんどの竜巻は温帯低気圧・熱帯低気圧などの低気圧(メソ低気圧も含む)に伴って発生する。北半球においては、温帯低気圧(以下、温低)に伴う竜巻は、温低の暖域、とりわけ下層の暖湿な南風と、中層の乾いた西風が交差する領域で発生しやすいことが知られている。しかし、どの温低が竜巻を発生させ、どの温低が竜巻を発生させないか、またそれが温低の環境場や内部構造のどのような違いによって生じているのかは解明されていない。

一方、我が国で発生する竜巻の約20%は台風に伴って発生し、米国でも多くの竜巻を伴うハリケーンが存在する。熱帯低気圧(以下、熱低)の中で竜巻を発生させる積乱雲は、米国中西部で激しい竜巻を発生させるスーパーセルという特殊な積乱雲に比べると、その水平・鉛直スケールが小さく、小型スーパーセルと呼ばれている。小型スーパーセルに伴って竜巻を起こす熱低と起こさない熱低がどのような環境場や構造の違いを有するかは現在も明らかになっていない。

以上のように、竜巻は積乱雲によって作られ、その積乱雲の特性は低気圧の内部構造に支配されるが、更に低気圧の内部構造はその環境場によって規定されていると考えられる。しかし、低気圧の環境場が低気圧の内部構造にどのように影響し、これが低気圧と比べて4桁も小さい水平スケールを持つ竜巻に至るまでの階層構造にどのように影響しているかに関する理解は現在も十分ではなく、これらの階層構造とそのメカニズムを普遍的かつ統一的に理解することが求められていた。

一方、竜巻の発生機構、とりわけその回転源については、地表面付近の水平渦度がスーパーセル内の上昇流により立ち上げられ、続いて引き伸ばされることが重要と考えられているが、水平渦度の成因については水平温度傾度による傾圧生成、環境場の鉛直シアに伴うもの、地表面摩擦による生成など諸説があり、現在も解明されていない。これらの説は特定の事例解析によって提案されたものであるが、これらがどれくらい普遍的なものかはわかっていなかった。このため、スーパーセルのどのような特徴に注目すれば、竜巻の発生の予測可能性を高めることができるかも不明で、その解明が求められていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、竜巻を伴う温低や熱低が、竜巻を伴わない温低や熱低とどのような環境場や構造の違いを持つかを解明することを主な目的とした。また、スーパーセルにおいても竜巻を生ずるものと生じないものがあるが、竜巻を生ずるスーパーセルの特徴を明らかにし、竜巻のポテンシャルの早期把握に資すると共に、現在も活発な研究が行われている竜巻の発生機構や内部構造に関する基

礎的理解を深めることも目的とした。

## 3. 研究の方法

## (1) 竜巻を伴う熱帯低気圧

竜巻を伴う熱低の環境場と内部構造を把握するため、1991-2013年の期間に、日本で竜巻を伴った34個の台風(TT: Tornado-spawning Typhoon)と伴わなかった276個の台風(NT: Non-tornado-spawning Typhoon)の構造と環境場の違いを、客観解析データ(JRA-55)に基づくコンポジット解析により調べた。ここでは、特に竜巻を生ずる特殊な積乱雲であるスーパーセルの環境場を特徴づける対流有効位置エネルギー(CAPE: Convective Available Potential Energy)とストームに相対的な環境場のヘリシティ(SREH: Storm-Relative Environmental Helicity; Davies-Jones et al. 1990)に注目した。CAPEは対流が発生したときの上昇流の強さの目安を与え、SREHは上昇流で環境場の鉛直シアに伴う水平渦度を立ち上げることにより生成する鉛直渦度の強さの目安を与えるパラメータである。またこれらの積として与えられるパラメータ Energy Helicity Index (EHI; Hart and Korotky, 1991)などの分布も調べた。

## (2) 竜巻大発生を伴う温帯低気圧

1995-2012年の4月と5月に米国で15個以上の竜巻を伴った温帯低気圧(以下、OC: Outbreak cyclone)55個と、5個以下の竜巻しか伴わなかった温帯低気圧(以下、NOC: Non-Outbreak Cyclone)41個の構造と環境場の違いを、客観解析データ(JRA-55)に基づくコンポジット解析で調べた。竜巻を伴う熱低の構造を調べたのと同様に、CAPE、SREH、EHIなどのスーパーセルの発生に関係の深い環境パラメータの分布に注目した解析を行った。また、得られた環境場と低気圧の構造の関係を検証するために、水平格子間隔20kmのWeather Research and Forecasting (WRF) modelを用いた理想化数値実験を行った。

## (3) 竜巻の発生機構・構造・予測可能性

2012年5月6日、つくば市に大きな被害をもたらした竜巻について、アンサンブル同化を用いた再現数値実験や超高解像度数値実験により、竜巻の予測可能性や発生機構および竜巻の内部構造に関する研究を行った。

アンサンブル同化を用いた再現数値実験では、Nested LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter; Seko et al., 2013)という手法を用いた。すなわち、水平解像度15kmの外側のモデルの中に、水平解像度1.875kmの内側のモデルを埋め込み、外側のモデルには毎時の地上観測の気圧、高層ラジオゾンデの水平風・気温・相対湿度、航空機の水平風・気温、ウィンドプロファイラの水平風、ドップラーレーダーのドップラー速度と反射強度から推定した相対湿度を、6時間の同化ウィンドウで32メンバーのLETKFで同化し、内側のモデルには、外側のモデルの各メンバーの予報値を境界値として、10分毎の地上観

測とレーダー観測データを1時間の同化ウィンドウで同化した。同化した地上観測データは気象台とアメダス及びNTTドコモの基地局の水平風・気温・相対湿度であり、レーダーデータは気象研究所二重偏波レーダー(MACS-POL)と柏・羽田空港・成田空港の現業ドップラーレーダーの動径風とMACS-POLから推定した雨量である。さらに、内側のモデル結果に350mの水平解像度のモデルを埋め込んで、竜巻を起こしたスーパーセル内の直径数kmの回転上昇流(メソサイクロン)のアンサンブル予報を試みた。また、さらにこの中に水平格子間隔50mの高解像度モデルを埋め込んで、竜巻のアンサンブル予報を試み、これらの結果をもとにアンサンブル感度解析を行って、メソサイクロンや竜巻の発生に重要な物理量の推定や発生機構の検証を行った。

さらに、竜巻の内部構造を調べる数値実験では、Mashiko (2016)で再現された竜巻周辺に水平解像度10mの気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)をネストした計算を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 竜巻を伴う熱帯低気圧

図1は、竜巻を伴った台風(TT)と伴わなかった(NT)に対するSREHの分布を示したものである。TTはNTより大きなSREHを持ち、TTにおいてSREHが大きい領域は竜巻の発生分布と良く対応していることがわかる。図2は、図1と同様だがCAPEの分布を示したものである。CAPEの値は、中心の南東側で大きく、TTの方が大きい。竜巻の発生している領域ではNTがTTよりも大きな領域もあり、CAPEは必ずしも竜巻の発生分布を良く説明するわけではないことがわかる。

図3は環境場の空気を取り込みを考慮したCAPE(ECAPE: Entraining CAPE)の分布を示し

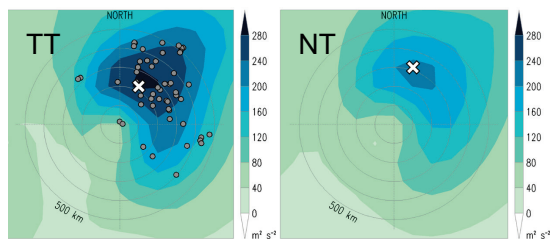


図1: TTとNTに対するコンポジットから求めたSREHの分布。正方形の中心が台風中心に対応する。TTの図の○は竜巻の発生位置、×はSREHの最大位置を示す。

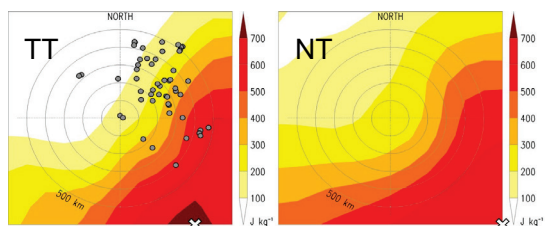


図2: 図1と同様。但し、CAPEに対するもの。

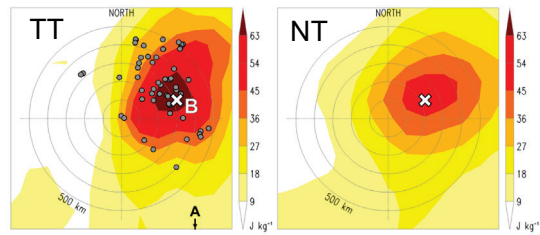


図3: 図1と同様。但し、E-CAPEに対するもの。

たものがある。ここで、entrainment rateは、20%/kmを仮定した。ECAPEの値はNTよりもTTで大きく、竜巻の分布とTTにおけるECAPEの分布は良く対応していることがわかる。Entrainment rateを変えた解析の結果から、竜巻の発生分布との対応は、20%/kmを用いた場合が適切であり、台風に伴うミニスーパーセルの事例のラージ・エディ・シミュレーションの結果からも、このentrainment rateの値は支持されている。なお、渦の対称性を調べると、TTではNTよりも非軸対称性が大きく、温帯低気圧化の過程にあるものが多いことがわかった。

##### (2) 竜巻大発生を伴う温帯低気圧

図4は中心を合わせてコンポジットした温帯低気圧の構造から求めたSREHと等高線の分布である。OCはNOCよりも大きなSREHを持っており、SREHの大きな領域は竜巻の発生頻度が高い低気圧の暖域と一致している。ま

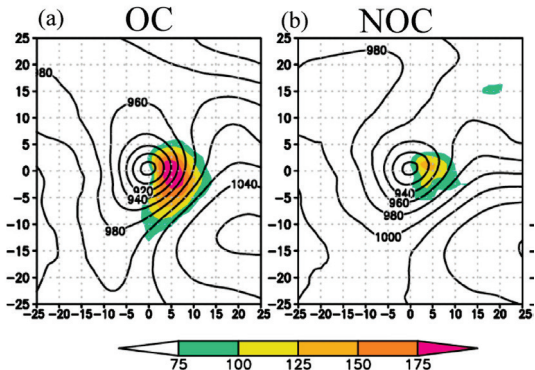


図4: 竜巻大発生を伴う温帯低気圧(OC)と伴わない温帯低気圧(NOC)のコンポジット解析から求めたSREH(陰影)と850hPaの等高線(黒線)。

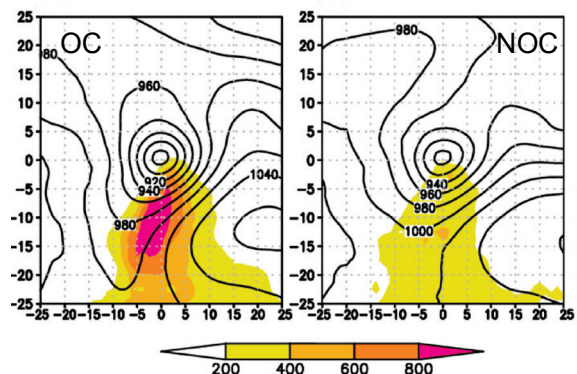


図5: 図4と同様。但し、CAPEに対するもの。

た、等高線の分布を見ると、TT では NT よりも南北に長い構造を持っており、その結果、南風が強くなっていることがわかる。

図5は図4と同様のCAPEに対するものである。TTはNTに比べて暖域で大きなCAPEを持っていることがわかる。これには、TTがNTよりも強い南風を伴っており、この南風による移流の効果が大きいものと思われる。CAPEとEHIを積の形で組み合わせたエネルギーヘリシティ指数(EHI: Energy Helicity Index)は、竜巻の発生分布と良く対応し、NTに比べてTTで有意に大きいことがわかった(図略)。

次に、TTとNTの環境場を調べたところ、TTの環境場の西風ジェットはNTに比べてジェット軸の南側で強い時計回りの水平シアを持っていることがわかった。時計回りの水平シアは、南西-北東方向の変形場を有するため、TTの構造が南西-北東方向に伸びていることと整合的である(実際、コンポジット解析で得られた環境場の西風ジェットを東西一様に与えて、温低の理想化数値実験を行ったところ、コンポジット解析と同様、TTの環境場で発達する温低は、南西-北東方向に伸びた構造となり、南風が強くなることが確認された。

### (3) 竜巻の発生機構・構造・予測可能性

2012年5月6日のつくばの竜巻を生じたスーパーセルに関して、従来より多くの地上観測データやレーダーデータをNested LETKFという手法で同化した再現数値実験により、スーパーセル内の下層のメソサイクロン(LMC: Low level mesocyclone)の経路が観測された竜巻の経路の北数kmという近距離に再現された。また、アンサンブル数値実験の結果を用いて、LMCが5km以内を通過する確率の分布を描くことができるが(図6)、これは将来の数値予報に基づく竜巻予報(Warn-on-forecast)を期待させるものとなった。

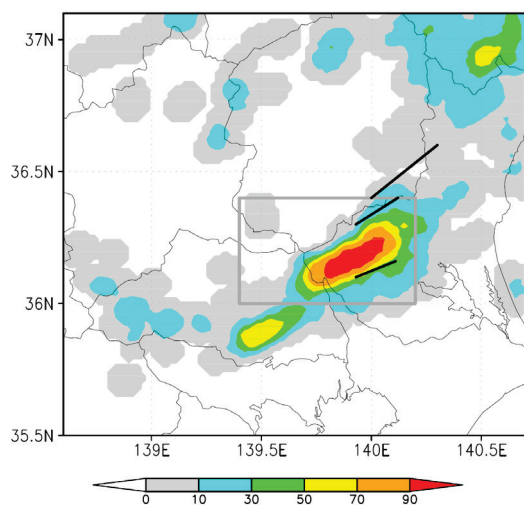


図6: 5km以内を鉛直渦度  $0.03s^{-1}$  以上の下層メソサイクロンが通過する確率。黒線は竜巻の経路。

また、アンサンブル実験の結果を用いた感度解析から、LMCの強度はスーパーセルの進行方向前方の下層の収束および後方の下層の相対湿度と強い相関を持つことがわかった。

竜巻のアンサンブル予報実験では、竜巻の発生の源となる水平渦度には地表面摩擦によるものが大きな寄与をしているアンサンブルメンバーが多かったが、常に正の寄与をしているわけではなく、また場所や時刻によっては傾圧過程による水平渦度形成が効いている場合もあり、竜巻の強度には水平渦度の源はあまり重要でないことが示唆された。実際、アンサンブル感度解析から、竜巻の強度には、渦度源よりも、LMCの強度やLMC後方の下層の相対湿度が重要な役割を演じていることが明らかになった。このことは、竜巻予報にはLMCの予測が重要なことを示唆され、LMCは350m程度の解像度で予測されることから、アンサンブル予報を用いた竜巻の可能性の予報にとって有望な結果であると期待される。

この竜巻は親渦の中に吸い込み渦と呼ばれる複数の子供の渦が存在する多重渦構造を持っていたことが観測されたが、Mashiko(2016)の決定論的再現実験結果に水平格子間隔10mの超高解像度モデルを埋め込むことにより、多重渦構造の再現にも成功した。

### (4) まとめ

以上のように、本研究では、竜巻を生ずる温低や熱低の構造と環境場を明らかにすると共に、熱低に伴う竜巻のポテンシャルを評価する上で環境場の空気のエンタレインメントを考慮した対流有効位置エネルギーCAPEが有効であることを見出した。また、稠密な地上観測網やドップラーレーダー観測網、二重偏波レーダーの雨水量の分布を同化することにより、竜巻を生ずるスーパーセルの下層メソサイクロン(LMC)の位置の予測の改善が可能であり、竜巻の強度はLMCの鉛直渦度や下層の相対湿度と相関が良いこと、従って竜巻のリスクを予測する上でアンサンブル予報によりLMCに遭遇する確率分布を求めるWarn-on-forecastの手法が有望であることを示した。さらに、超高解像度再現実験により現事例の竜巻の多重渦構造の再現に成功し、これによる風速変動に関して新たな知見を得ることができた。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計25件、内査読有20件)  
 主要な10件を以下に記載。

- ① Tochimoto, E. and H. Niino, Structure and environment of tornado-spawning extratropical cyclones around Japan. Journal of the Meteorological Society of Japan, 査読



- 有, 2018, early online release, doi: 10.2151/jmsj.2018-043..
- ② Yokota, S, H. Niino, H. Seko, M. Kunii, H. Yamauchi, 2018: Important factors for tornadogenesis as revealed by high-resolution ensemble forecasts of the Tsukuba supercell tornado of 6 May 2012 in Japan. Monthly Weather Review., 査読有, 146, 2018, 1109-1132 DOI: 10.1175/MWR-D-17-0254.1
  - ③ Mashiko, W., and H. Niino, Super High-Resolution Simulation of the 6 May 2012 Tsukuba Supercell Tornado: Near-Surface Structure and Its Dynamics, SOLA, 査読有, 13, 2017, 135-139 DOI: 10.2151/sola.2017-025.
  - ④ Tochimoto, E. and H. Niino, Structural and Environmental Characteristics of Extratropical Cyclones Associated with Tornado Outbreaks in the Warm Sector: An Idealized Numerical Study. Monthly Weather Review, 査読有, 145, 2017, 117-136 DOI: 10.1175/MWR-D-16-0342.1.
  - ⑤ Sueki, K. and H. Niino, Toward better assessment of tornado potential in typhoons: Significance of considering entrainment effects for CAPE. Geophysical Research Letters, 査読有, 43, 2016, DOI:10.1002/2016GL070349.
  - ⑥ Yokota, S., H. Seko, M. Kunii, H. Yamauchi, and H. Niino, The tornadic supercell on the Kanto Plain on 6 May 2012: Polarimetric radar and surface data assimilation with EnKF and ensemble-based sensitivity analysis. Monthly Weather Review, 査読有, 144, 2016, 3133-3157 DOI: 10.1175/MWR-D-15-0365.1
  - ⑦ Tochimoto, E. and H. Niino, Structural and environmental characteristics of extratropical cyclones that cause a tornado outbreak in the warm sector: A composite study. Monthly Weather Review, 査読有, 144, 2016, 945-969 DOI: 10.1175/MWR-D-16-0107.1.
  - ⑧ 新野 宏, 竜巻研究の現状と課題—風環境の特異点の理解に向けて—, Japan Geoscience Letters, 査読有, 9, 1-3.
  - ⑨ 新野 宏, 「シビア現象」の理解・予測への課題と期待, 天気, 査読有, 59, 2012, 533-539.
  - ⑩ 新野 宏, 竜巻研究の課題と今回の竜巻の特徴, 2012年5月6日茨城・栃木の竜巻に関する調査研究報告, 天気, 査読無, 60, 2013, 47-48.

[学会発表] (計 102 件)

主要な 7 件を以下に記載。

- ① Tochimoto, E., S. Yokota, H. Niino, and W. Yanase, Numerical Simulations of Meso- $\beta$ -scale Vortices that Spawned Tornado-like

Vortices, 15th Annual Meeting of Asia Oceania Geoscience Society (招待講演) 2018.

- ② Niino, H., Understanding Tornadoes: A Challenge in Meteorology, International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation (招待講演), 2018.
- ③ Tochimoto, E., S. Yokota, H. Niino, and W. Yanase, Multi-scale Structure of Meso-beta-scale Vortex Associated with a Maritime Extratropical Cyclone: A Numerical Study, 17th Conference on Mesoscale Processes, 2017.
- ④ Sueki, K., and H. Niino, Entrainment rate of typhoon-associated supercells estimated by a large eddy simulation, 9th European Conference on Severe Storms, 2017.
- ⑤ Yokota, S., H. Seko, M. Kunii, H. Yamauchi and H. Niino, High-resolution ensemble experiments for the Tsukuba city supercell tornado in Japan on 6 May 2012, 28th Conference on Severe Local Storms, 2016.
- ⑥ 新野 宏, 竜巻の謎に迫る, 九州大学数理学研究院, 市民講演会 (招待講演), 2013年03月09日, 九州大学, 福岡.
- ⑦ Niino, H., On the Dynamics, Structure and Genesis Mechanism of Tornadoes, 台風セミナー (招待講演), 2012年08月27日~2012年08月29日, 休暇村気仙沼大島.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新野 宏 (東京大学・大気海洋研究所・教授)  
研究者番号: 9 0 2 7 2 5 2 5

(2) 研究分担者

柳瀬 亘 (東京大学・大気海洋研究所・助教)  
研究者番号: 8 0 3 7 6 5 4 0

(3) 連携研究者

伊賀啓太 (東京大学・大気海洋研究所・准教授)  
研究者番号: 6 0 2 9 2 0 5 9

(4) 研究協力者

栃本英伍 (東京大学・大気海洋研究所・特任研究員)