

令和 5 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01277

研究課題名(和文) 低気圧に伴う竜巻の階層構造と予測可能性に関する基礎研究

研究課題名(英文) Basic study on hierarchical structure of tornado-spawning cyclones and predictability of tornadoes

研究代表者

新野 宏 (Niino, Hiroshi)

東京大学・大気海洋研究所・名誉教授

研究者番号：90272525

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：我が国や海外で竜巻・突風を生ずる熱帯低気圧や温帯低気圧の構造、低気圧内で竜巻・突風を生ずる多様なメソスケール擾乱の構造とその環境場、及びこれらのメソスケール擾乱が生ずる竜巻・突風の実態や発生機構を、地上観測、ドップラーレーダー観測、客観解析、高解像度数値シミュレーションおよびアンサンブル数値シミュレーションのデータを用いて調べた。海上で竜巻状渦を生ずるメソスケール渦の発見、準線状の対流系に伴う竜巻や台風内の小型スーパーセルに伴う竜巻の非閉塞型世代交代の数値シミュレーションに初めて成功し、エントレインメントを考慮したCAPEが低気圧に伴う竜巻のポテンシャルの把握に有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では竜巻から、竜巻を発生させる様々なメソスケール擾乱 - 古典的スーパーセル、小型スーパーセル、準線状対流系 -、さらには総観規模の熱帯低気圧や温帯低気圧に至るまでの階層構造にわたって発生機構と環境場の解明を進めると共に、低気圧に伴う竜巻のポテンシャルの把握の上で「エントレインメントの効果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示した。また、竜巻状の突風により船舶の遭難を生ずるメソスケール渦も新たに発見した。これらの竜巻に関わる階層構造の理解と竜巻ポテンシャルの把握に有効な指標の開発は、竜巻の予測精度を向上を通して、より安全・安心な社会の実現に寄与することが期待される。

研究成果の概要(英文)：Surface and Doppler radar observations, objective analysis data, high-resolution numerical simulations and ensemble numerical simulations are used to clarify the characteristics of structures of tropical and extratropical cyclones that spawn tornadoes and/or gusty winds (hereafter simply referred to as tornadoes) in Japan, the United States, China and Italy, the structures and environments of various mesoscale disturbances that spawn the tornadoes, and the mechanisms of tornadogenesis associated the mesoscale disturbances. A new type of a meso-beta-scale vortex that spawns tornado-like vortices over the sea was found, and a tornado associated with a quasi-linear convective system and a cyclic tornadogenesis of a non-occluding type were first numerically simulated. It is also shown that convective available potential energy incorporating the effect of entrainment gives a useful estimate of a tornado potential associated tropical and extratropical cyclones.

研究分野：気象学

キーワード：竜巻 温帯低気圧 熱帯低気圧 台風 スーパーセル 線状降水系 メソサイクロン 環境場

1. 研究開始当初の背景

竜巻は対流圏の大気現象の中でその発生機構が解明されていない数少ない現象の1つである。竜巻が大きな自然災害の1つとなっている米国では1年あたり約1200個の竜巻が発生し、平均すると70人近くがその犠牲になる(1986-2015のNOAAの統計)ため、多くの研究者により精力的に研究が行われているが、竜巻の発生機構は現在も十分に解明されておらず、その予警報の精度も十分向上しているとは言えない。

竜巻は、強い鉛直シアのある環境場で発生する特殊な積乱雲であるスーパーセル、準線状の対流系(QLCS: Quasi-Linear Convective System)、局地前線など様々なメソスケール擾乱に伴って発生する(Agee and Jones 2009)。また、近年は日本周辺の海上で、強い対流系に伴う直径30km程度のメソ β スケールの渦(MBV: Meso Beta-scale Vortex)や台風の壁雲付近に生ずるメソスケール渦に伴っても、被害をもたらす竜巻状の渦や突風が生ずる事例が報告されている。これらメソスケール擾乱のうち、局地前線に伴う竜巻については、その生成機構は比較的良く理解されているが、それ以外のメソスケール擾乱に伴う竜巻の発生機構については現在も十分に理解されておらず、また最近見つかったMBVの発生機構も理解されていない。本研究では、(1)竜巻を生ずるメソスケール擾乱の環境場の特徴とこれらの環境場を生ずる温帯低気圧や熱帯低気圧などの構造、(2)竜巻を生ずるメソスケール擾乱の構造・生成機構と各メソスケール擾乱に伴う竜巻の生成機構の解明に取り組んだ。本研究開始当初のそれぞれの背景は以下の通りである。

(1) 竜巻を生ずるメソスケール擾乱の環境場の特徴とこれらの環境場を生ずる温帯低気圧や熱帯低気圧などの構造

強い竜巻は、特殊な積乱雲であるスーパーセルに伴って発生する。スーパーセルは環境場の大気が2つの要因、大きな対流有効位置エネルギー(CAPE: Convective Available Potential Energy)で特徴づけられる「強い不安定性」と、大きな「ストームに相対的な環境風のヘリシティ」(SREH: Storm-Relative Environmental Helicity)で特徴づけられる、高度とともに風向が時計回りに回転する「強い鉛直シア」が重なったときに発生しやすいとされてきた。実際、我々のグループは、日本で竜巻を伴う台風と伴わない台風、および米国で竜巻大発生を伴う温帯低気圧と伴わない温帯低気圧の構造や環境場の違いを調べ、竜巻を伴う台風や竜巻大発生を伴う温帯低気圧ではCAPEやSREHが有意に大きいことを示してきた(Sueki and Niino 2016; Tochimoto and Niino 2016)。しかし、ヨーロッパや中国など他の地域の竜巻を生ずる熱帯低気圧や温帯低気圧がどのような特徴を持つかは調べられていなかった。また、日本で竜巻を生ずる台風についての竜巻の発生分布は、SREHが大きな領域とは良く対応するが、CAPEの大きな領域との対応はあまり良くなく、積乱雲内の気塊が上昇するときに環境場の空気を取り込む「エントレインメント」の効果を考慮したEntraining CAPE(E-CAPE)の分布と対応が良いことがわかってきた(Sueki and Niino 2016)が、E-CAPEが温帯低気圧に伴う竜巻のポテンシャルの把握に有効かどうかは、未だ調べられていなかった。また、MBVを伴う温帯低気圧がどのような特徴を持つかも調べられていなかった。

(2) 竜巻を生ずるメソスケール擾乱の構造・生成機構とそれぞれの擾乱に伴う竜巻の生成機構
スーパーセルに伴う竜巻の回転の起源に関しては、環境風の鉛直シアに伴う水平渦度(Mashiko et al. 2009)、中心後方の下降流(RFD: Rear Flank Downdraft)に伴って傾圧的に作られる水平渦度(Mashiko 2016)、地表面の摩擦によって作られる水平渦度(Schenkman et al. 2014)などが提案されているが、決着はついていない。スーパーセル内で竜巻が発生する前には、ドップラーレーダーで回転する上昇気流(メソサイクロン)が観測されることが多いが、メソサイクロンが検出されても竜巻が発生する確率は26%であり(Trapp et al., 2005)、その発生予測は現在も難しい。

QLCSに伴う竜巻については、これまで数値シミュレーションで再現された例がなく、その発生過程に関する理解は十分でない。また、2015年9月1日、東シナ海を東する弱い温帯低気圧に伴い、対馬沖では6隻の漁船を転覆させ死者5名と行方不明1名を生じる突風が生じたが、事故が起きた時刻、当該海域には気象庁の福岡ドップラーレーダーでスパイラル状の反射強度分布を伴うMBVが観測されていた。MBVに伴う船舶の遭難は2011年8月21日にも起きているほか、2016年9月と10月にも太平洋上に類似のMBVが見られている。MBVに伴う突風は海上交通に対する脅威であり、その発生機構の解明が望まれていた。

また、台風に伴ってはアウターレイnbバンド内でメソサイクロンを伴う小型スーパーセルによってしばしば竜巻が発生すること知られているが、目の壁雲上にもメソスケール渦が存在することがあり、2015年8月に八重山諸島を通過した非常に強い台風Goniではメソスケール渦に伴って突風が生じた。台風に伴う竜巻や壁雲上のメソスケール渦に伴う突風についてもその実態や発生機構の解明が望まれていた。

2. 研究の目的

以上のことから、本研究では以下の2つを目的として遂行した。

(1) 我が国や海外の熱帯低気圧や温帯低気圧の環境場と構造を通して、竜巻を伴う多様なメソスケール擾乱の環境場がどのように作られるかを明らかにする。さらに、最近の我々の研究により有効性が指摘されているE-CAPEが、海外の熱帯低気圧や温帯低気圧に伴う竜巻や米国や日本で温帯低気圧に伴って発生する竜巻のポテンシャル予測や竜巻の強度予測に対してどのような有効性を有するかについて調べる。

(2) スーパーセルや準線状の対流系、MBV、台風の壁雲上のメソスケール渦等、多様なメソスケール擾乱に伴って発生する竜巻や突風の実態や構造・発生機構・環境場を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 我が国や海外で、竜巻や突風を生ずるスーパーセル、QLCS、MBV などのメソスケール擾乱を伴う熱帯低気圧や温帯低気圧の構造の特徴、およびこれら熱帯低気圧や温帯低気圧が作り出すメソスケール擾乱の環境場について、客観解析データやアンサンブル再現シミュレーションを用いたコンポジット解析並びにアンサンブル感度解析などを用いて解明する。特に、竜巻を生ずるメソスケール擾乱の環境場を把握するコンポジット解析においては、E-CAPE の有効性を適切なエントレインメント率も含めて検証する。

(2) 我が国や海外で、竜巻や突風を生ずるスーパーセル、QLCS、MBV、台風の壁雲に生ずるメソスケール渦などのメソスケール擾乱の構造を、地上観測やドップラーレーダー観測、数値シミュレーションによる再現などのデータを用いて解析すると共に、高解像度数値シミュレーションを用いて、竜巻や突風の再現も行い、メソスケール擾乱並びに竜巻の生成機構を解明する。

4. 研究成果

(1) 竜巻を生ずるメソスケール擾乱の環境場の特徴とこれらの環境場を生ずる温帯低気圧や熱帯低気圧などの構造

米国で竜巻大発生を起こす温帯低気圧の構造を特徴づける環境場のパラメータ

米国で 1995-2012 年の間に、15 個以上の竜巻を伴った温帯低気圧(OC: Outbreak Cyclone)と 5 個以下の竜巻しか伴わなかった温帯低気圧(NOC: Non-outbreak Cyclone)の構造と低気圧内部の環境場の特徴をコンポジット解析により調べた。その結果、OC の暖域では NOC の暖域よりも E-CAPE が 95%–99% の信頼度で有意に大きく、E-CAPE の空間分布は CAPE よりも竜巻の発生分布を良く説明することがわかった(Tochimoto et al. 2019)。ここで E-CAPE を求める際のエントレインメント率は、台風においては 20%/km のときに竜巻の発生分布を最も良く説明することが知られていたが(Sueki and Niino 2016)、温帯低気圧の場合も 10~30%/km の範囲で変えてみたところ、20%/km のときに竜巻の発生分布を最も良く説明した。米国の竜巻大発生においては古典的スーパーセル、台風環境では小型スーパーセルに伴って竜巻が発生すると思われるが、いずれにおいても 20%/km のエントレインメント率が最適であったことは興味深い。

OC の暖域で NOC に比べて E-CAPE が大きいのは、強い南寄りの風に伴う移流により下層から中層にかけて水蒸気量が多く、総観規模の上昇流も大きいことによる。竜巻のポテンシャルの予測に広く使われている energy helicity index(EHI), supercell composite parameter(SCP)、significant tornado parameter (STP)に含まれる CAPE を E-CAPE に置き換えたところ、いずれの指標の分布も CAPE を使う場合よりも竜巻の発生分布とより強い相関を持つことがわかった。

イタリアで竜巻を生ずる温帯低気圧の特徴と温帯低気圧に伴う発生環境場

イタリアにおいて、2007 - 2016 年に竜巻を生じた温帯低気圧の構造と環境場を客観解析データ JRA-55 に基づいて調べた(Tochimoto et al. 2021)。竜巻は低気圧中心から 10°×10°の領域に発生していた。竜巻の地理的分布の季節変化は、低気圧経路の違いによりある程度説明される。最も竜巻数が多いのは低気圧の南側の暖域であったが、いくつかは寒冷前線沿いに起きていた。コンポジット解析により、異なる季節の竜巻の環境場を特徴づける環境パラメータを調べたところ、秋には潜在不安定の領域で竜巻発生が多かった。この季節は、暖かい地中海からの強い蒸発により、大気下層が高湿多湿になり、最も大きな CAPE が実現する。春や冬は、上層の渦位擾乱とそれに伴う寒気により低気圧の中心近くの静的安定度が小さくなったときに発生していた。イタリアの竜巻の環境場の CAPE の値は平均的には米国に比べて小さく、日本と同程度である。一方、SREH は米国と同程度で、日本よりは大きい。このように、イタリアの竜巻の環境場は、日本と異なる特有の特徴を持っており、どちらかというとも米国南東部の寒冷期の竜巻に見られることが多い、鉛直シアが大きく CAPE が小さいという環境場に近いことがわかった。

中国の台風に伴う竜巻

中国において 2006-2018 年の台風に伴う竜巻(以下 TC 竜巻)と環境場の特徴を調べた。この期間に記録された TC 竜巻は 64 個で、1 年当たり約 5 個であった。中国に上陸する台風の約 1/3 が竜巻を伴っていた。TC 竜巻の多くは上陸する直前から上陸後 36 時間以内の午後、台風中心から 500km 以内で、主として江蘇省と広東省の沿岸部の比較的平らな地域で発生していた。TC 竜巻の発生分布は、台風中心の進行方向右前方象限というよりは、北東象限の方が適合していた。米国では多くの竜巻が強い熱帯低気圧に伴うのに対し、中国では比較的弱い台風に伴うものが多かった。中国の TC 竜巻の環境場は下層の大きな SREH と大きな E-CAPE で特徴づけられていた(Bai et al. 2020)。

メソβスケール渦(MBV)に伴う突風を生じた温帯低気圧の構造の特徴

2015 年 9 月 1 日に対馬海峡で突風により多数の船舶の遭難を生じたメソβスケール渦(MBV)の形成に適した環境場を理解するため、アンサンブルカルマンフィルターを用いた 101 メンバーのアンサンブル再現実験(うち 1 メンバーはアンサンブル平均)を行った。強い MBV と弱い MBV の構造や環境場の違いを調べるため、渦度が上位 8 位までと下位 10 位までの MBV のメンバーのコンポジット解析(それぞれ STRG と WEAK と呼ぶ)を行った。ここで、渦度が上位 10 位までの MBV のメンバーのうち 2 つは他のメンバーよりはるかに早い時間に発達したため、コンポジット解析からは除外した。解析の結果、STRG では WEAK より、MBV の北東側と南側における下層の低気圧性の水平シアが大きいことがわかった。また、STRG では下層の水蒸気量とそのフラックスが大きいこと、MBV の南東側の CAPE が大きく、MBV 周辺での対流が強かつ

た。コンポジット解析の結果は、アンサンブル感度解析(Torn and Hakim 2008)の結果からも統計的に支持されている。下層の水平シアの違いはMBVを作り出した東シナ海の温帯低気圧の構造の違いに起因していた。STRGとWEAKでは、温帯低気圧の強さはほぼ同じだったが、温帯低気圧の北東象限における下層の低気圧性の水平シアはSTRG

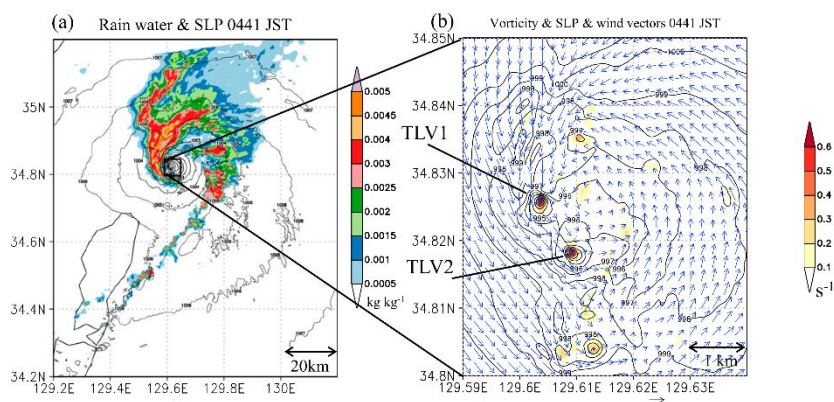


図 1: 数値シミュレーションで再現された(a)MBV と(b)竜巻状の渦。(a)(b)のカラーはそれぞれ雨水の混合比と鉛直渦度、黒線は等圧線、青の矢印は水平風ベクトル(Tochimoto et al. 2019)

の方が大きかった(Tochimoto et al. 2022)。

(2) 竜巻を生ずるメソスケール擾乱の構造・生成機構とそれぞれの擾乱に伴う竜巻の生成機構 メソスケール渦(MBV)に伴う突風

2015年9月1日に対馬海峡でMBVに伴う突風による漁船の遭難の起きた時間・場所では、Cバンドのドップラーレーダーにより降水系に伴う螺旋状の反射強度の分布が見られ、これに伴いドップラー速度の分布には直径30kmのMBVが見られた。水平解像度50mの数値シミュレーションを行ったところ、観測と良く似た螺旋状の降水分布とスーパーセルのメソサイクロンに匹敵する強い反時計回りの循環を持つMBVが再現された(図1a)が、スーパーセルのメソサイクロンとは異なり、その鉛直渦度は海面付近で最大で高度と共に減少するという、これまで世界的にも報告されたことがないメソスケール渦であることがわかった。このMBV内部の西寄りの部分には強いシアラインが見られ、その中で最大風速が50m/sに達する複数の竜巻状の渦が繰り返し発生する様子が見られた(図1b)。このことから、竜巻状の渦はシアラインにおける水平シアの不安定により発生していたものと思われる(Tochimoto et al. 2019)。

準線状降水システム(QLCS)に伴う竜巻

1992年12月8日関東平野を東進したQLCSに伴って茨城県千代田町から石岡にかけて竜巻が発生した。この竜巻の上空には気象研究所のドップラーレーダーにより、直径数kmの渦(マイソサイクロン:MC)が検出されていた。このQLCSとそれに伴う竜巻を、水平解像度50mの高解像度数値シミュレーションで再現し、その発生過程を調べた。竜巻を生じたQLCSの環境場は、比較的小さなCAPEで特徴付けられていたが、下層ジェットに伴う強い鉛直シアによりSREHは大きかった。この強い下層ジェットは、南北に並んだ2つ玉低気圧と東側の総観規模高気圧の間の大きな気圧傾度によって生じていた。シミュレートされた竜巻はQLCSの中央付近で発生した。竜巻発生前には、高度500mで南北方向に並んだ3つのメソ渦が発達し、西側の上空から下降しながらQLCSに向かって吹き込む相対的に冷たいジェット(RIJ: Rear Inflow Jet)が生じた。竜巻は3つのメソ渦の最も南に位置し、RIJのすぐ北側にあったメソ渦の中で発生した。このメソ渦は、鉛直方向の気圧傾度力によって、直下に強い上昇気流を生じた。後方流跡線に沿った循環の解析を行ったところ、メソ渦の形成にはQLCSの東側の流入域の環境場の鉛直シアに伴う水平渦度が重要な役割を担っていたことがわかった。一方、竜巻渦の循環の形成には、環境場の風の鉛直シアに伴う水平渦度と水平シアに伴う鉛直渦度、地表面の摩擦で生ずる水平渦度のいずれもが重要な役割を演じていることが分かった(Tochimoto and Niino 2022)。QLCSに伴うメソ渦の数値シミュレーションはこれまでも報告があったが、QLCSに伴う竜巻の数値シミュレーションの報告は本研究が世界で初めてである。

台風に伴う竜巻

2019年9月22日九州の南西海上を北東進中の台風Tapahの北東約500kmの延岡市で竜巻が発生した。3重ネストした数値シミュレーションにより、台風とレインバンドを構成する小型スーパーセル及びそれに伴う竜巻の再現に成功した。レインバンド周辺は、小型スーパーセルの発生に適した環境場を有していた。海上も含めてシミュレートされた竜巻は2回世代交代をし、最も強かった2番目の竜巻の中心気圧は945hPaまで降下した。再現された竜巻の時間変化は非常に速く、竜巻が最盛期に近づいた頃、中心を含む全域で上昇流が卓越する1セル型から、中心で下降流を伴う2セル型へと移行した遷移は1分以内で起きていた。後方流跡線解析を行ったところ、竜巻の循環のほとんどはRFDから供給されていることがわかった。竜巻の世代交代は、新しい竜巻が古い竜巻の北西で成長しており、竜巻は非閉塞型のメソサイクロンの世代交代に伴って起きていたものと思われる(Ito et al. 2023)。非閉塞型の竜巻の世代交代が数値シミュレーションで見られたことは世界で初めてである。

イタリアの竜巻

Cバンドの二重偏波ドップラーレーダーのデータを使って、2017年12月1日にイタリア北西部のサンレモ市沖の地中海で発生し、上陸した2つの竜巻の解析を行った(Miglietta et al. 2020)。

ドップラーレーダーのデータは竜巻の上空にメソサイクロンがあったことを示しており、その中に2つの高度で隣り合うビームの風速と風向が変化する Tornado Vortex Signature (TVS) が見られた。メソサイクロンと TVS の経路は、目視で観測された竜巻の経路とよく一致していた。2つの水上竜巻は南側から流入する暖湿な気流と、北側から侵入する冷気との間の収束線に伴って発生していた。

台風の壁雲付近の突風

2015年8月に八重山諸島を通過した非常に強い台風 Goni の急発達時に見られた中心付近の壁雲に伴う突風の特徴を地上観測データとドップラーレーダーにより調べた(Mashiko and Shimada, 2021)。壁雲は四角形をしており、四角形の頂点付近には渦ロスビー波によると思われる直径7-10kmの渦が、地上観測・ドップラーレーダーの両方で確認された。これらの渦は約2hPaの気圧低下を伴っていた。レーダー反射強度の分布には、壁雲に直交するフィラメント状の構造が多数見られ、これらのフィラメント状構造が突風を伴っていた。フィラメント状構造は台風の高解像度ラージ・エディ・シミュレーションに見られる縞状構造似ているが、その生成機構の解明は今後の課題である。

(3) 竜巻研究に関するレビュー

2020年は竜巻研究に多大な業績を残したシカゴ大学の故藤田哲也博士の生誕100年に当たったため、本研究での研究成果も含めて、最近の我が国の竜巻研究の成果を持ち寄り、議論する「竜巻シンポジウム」を2021年3月に開催し、その講演内容は号外海洋(2022)として刊行した。また、竜巻の環境場に関するレビュー論文も刊行した(Tochimoto 2022)。

< 引用文献 >

- Agee, E. M., and E. Jones, 2009: Proposed conceptual taxonomy for proper identification and classification of tornado events. *Wea. Forecast.*, 24, 609-617.
- Bai, L., Z. Meng, K. Sueki, G. Chen, and R. Zhou, 2020: Climatology of tropical cyclone tornadoes in China from 2006 to 2018. *Sci. China Earth Sci.*, 63, 37-51.
- 号外海洋, 2022: 竜巻シンポジウム - 藤田哲也博士生誕100年を記念して -, 号外海洋, 63, 164pp.
- Ito, J., H. Niino, and E. Tochimoto, 2023: Numerical simulation of tornadoes in a mini-supercell associated with typhoon Tapah on 22 September 2019. *J. Meteor. Soc. Japan* (投稿中).
- Mashiko, W., H. Niino, and T. Kato, 2009: Numerical simulation of tornadogenesis in an outer-rainband minisupercell of Typhoon Shanshan on 17 September 2006. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 4238-4260.
- Mashiko, W., 2016: A numerical study of the 6 May 2012 Tsukuba City supercell tornado. Part II: Mechanisms of tornadogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 3077-3098.
- Mashiko, W., and U. Shimada, 2022: Observed near-surface wind structure in the inner core of typhoon Goni (2015). *Mon. Wea. Rev.*, 149, 1485-1500.
- Miglietta, M. M., K. Arai, K. Kusunoki, H. Inoue, T. Adachi, and H. Niino, 2020: Observational analysis of two waterspouts in northwestern Italy using an OPERA Doppler radar. *Atmos. Res.*, 234, 104692.
- Schenkman, A. D., M. Xue, and M. Hu, 2014: Tornadogenesis in a high-resolution simulation of the 8 May 2003 Oklahoma City supercell. *J. Atmos. Sci.*, 71, 130-154.
- Sueki, K. and H. Niino, 2016: Toward better assessment of tornado potential in typhoons: Significance of considering entrainment effects for CAPE. *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL070349.
- Tochimoto, E. and H. Niino, 2018: Structure and environment of tornado-spawning extratropical cyclones around Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 96, 355-380.
- Tochimoto, E., K. Sueki and H. Niino, 2019: Entraining CAPE for better assessment of tornado outbreak potential in the warm sector of extratropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 147, 913-930.
- Tochimoto, E., S. Yokota, H. Niino and W. Yanase, 2019: Mesoscale Convective Vortex that Causes Tornado-Like Vortices over the Sea: A Potential Risk to Maritime Traffic *Mon. Wea. Rev.*, 147, 1989-2007.
- Tochimoto, E., M. M. Miglietta, L. Bagagnoli, R. Inghrosso and H. Niino, 2021: Characteristics of extratropical cyclones that cause tornadoes in Italy: A preliminary study. *Atmosphere*, 12(2), 180.
- Tochimoto, E., and H. Niino, 2022: Tornadogenesis in a quasi-linear convective system over Kanto Plain in Japan: A numerical case study. *Mon. Wea. Rev.*, 150, 259-282.
- Tochimoto, E., 2022: Environmental controls on tornadoes and tornado outbreaks. *Atmos.-Ocean*, 60, 399-421.
- Torn, R. D., and G. J. Hakim, 2008: Ensemble-based sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 663-677
- Trapp, R. J., G. J. Stumpf, and K. L. Manross, 2005: A Reassessment of the Percentage of Tornadic Mesocyclones. *Wea. Forecast.*, 20, 684-691.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tochimoto, E., and H. Niino	4. 巻 150
2. 論文標題 Tornadoogenesis in a quasi-linear convective system over Kanto Plain in Japan: A numerical case study	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Weather Review	6. 最初と最後の頁 259-282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/MWR-D-20-0402.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tochimoto, E.	4. 巻 60
2. 論文標題 Environmental Controls on Tornadoes and Tornado Outbreaks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Atmosphere-Ocean	6. 最初と最後の頁 399-421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/07055900.2022.2079472	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mashiko, W., and U. Shimada	4. 巻 149
2. 論文標題 Observed Near-Surface Wind Structure in the Inner Core of Typhoon Goni (2015)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Weather Review	6. 最初と最後の頁 1785?1800
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/MWR-D-20-0294.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 新野 宏, 益子 涉	4. 巻 63
2. 論文標題 我が国における竜巻研究 気象学の立場から	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 号外海洋	6. 最初と最後の頁 8月22日
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 栃本英伍、新野 宏、末木健太、横田 祥、柳瀬 亘	4. 巻 63
2. 論文標題 竜巻を生ずる温帯低気圧の階層構造・環境場	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 号外海洋	6. 最初と最後の頁 24-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 末木健太、新野 宏	4. 巻 63
2. 論文標題 竜巻を生ずる台風の構造・環境場について	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 号外海洋	6. 最初と最後の頁 32-39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 足立 透、益子 涉、梅原章仁	4. 巻 63
2. 論文標題 フェーズドレイレーダーを用いた竜巻研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 号外海洋	6. 最初と最後の頁 56-62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 梅原章仁、足立 透、益子 涉、山内 洋	4. 巻 63
2. 論文標題 二重偏波レーダーによる竜巻観測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 号外海洋	6. 最初と最後の頁 63-68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 益子 涉	4. 巻 63
2. 論文標題 数値シミュレーションによるスーパーセル竜巻の発生機構に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 号外海洋	6. 最初と最後の頁 99-105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 伊藤純至、新野 宏	4. 巻 63
2. 論文標題 2019年台風17号に伴う延岡竜巻のシミュレーション	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 号外海洋	6. 最初と最後の頁 92-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 横田 祥、新野 宏、瀬古 弘、國井 勝、山内 洋、佐藤英一	4. 巻 63
2. 論文標題 データ同化とアンサンブル予報を用いた竜巻発生要因の解析と予測可能性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 号外海洋	6. 最初と最後の頁 106-111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tochimoto, E., S. Yokota, H. Niino and W. Yanase	4. 巻 100
2. 論文標題 Ensemble experiments for a maritime meso-beta-scale vortex that spawned tornado-like vortices causing shipwrecks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 141-165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/jmsj.2022-007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tochimoto, E. and H. Niino	4. 巻 150
2. 論文標題 Comparing frontal structures of extratropical cyclones in the northwestern Pacific and northwestern Atlantic storm tracks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Weather Review	6. 最初と最後の頁 269-392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/MWR-D-21-0181.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miglietta, M.M., K. Arai, K. Kusunoki, H. Inoue, T. Adachi, and H. Niino	4. 巻 234
2. 論文標題 Observational analysis of two waterspouts in northwestern Italy using an OPERA Doppler radar	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Atmospheric Research	6. 最初と最後の頁 104692
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.atmosres.2019.104692	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Bai, L., Z. Meng, K. Sueki, G. Chen, and R. Zho	4. 巻 63
2. 論文標題 Climatology of tropical cyclone tornadoes in China from 2006 to 2018	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science China Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 37-51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11430-019-9391-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tochimoto, E., M. M. Miglietta, L. Bagagnoli, R. Inghrosso and H. Niino	4. 巻 12
2. 論文標題 Characteristics of Extratropical Cyclones That Cause Tornadoes in Italy: A Preliminary Study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Atmosphere	6. 最初と最後の頁 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atmos12020180	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tochimoto, E., K. Sueki, and H. Niino	4. 巻 147
2. 論文標題 Entraining CAPE for better assessment of tornado outbreak potential in the warm sector of extratropical cyclones	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Weather Review	6. 最初と最後の頁 913-930
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/MWR-D-18-0137.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tochimoto, E., S. Yokota, H. Niino, and W. Yanase	4. 巻 147
2. 論文標題 Mesoscale Convective Vortex that Causes Tornado-Like Vortices over the Sea: A Potential Risk to Maritime Traffic	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Weather Review	6. 最初と最後の頁 913-930
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/MWR-D-18-0302.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 横田祥, 新野宏, 瀬古弘, 國井勝, 山内洋	4. 巻 38
2. 論文標題 データ同化とアンサンブル予報による竜巻発生過程の解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 8-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Tochimoto, E., S. Yokota, H. Niino, and W. Yanase
2. 発表標題 Ensemble Experiments on a Maritime Meso- -scale Vortex that Spawned Tornado-like Vortices causing shipwrecks
3. 学会等名 10th European Conference on Severe Storms (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tochimoto, E., S. Yokota, H. Niino, and W. Yanase
2. 発表標題 Investigating Important Factors for Development of Meso- -Scale Vortex that Caused Tornado-like Vortices over the Sea: Ensemble Experiments and an Ensemble-based sensitivity analysis
3. 学会等名 18th Conference on Mesoscale Processes (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mashiko, W.
2. 発表標題 Wind gusts associated with mesovortices in the inner core of Typhoon GONI (2015)
3. 学会等名 10th European Conference on Severe Storms (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tochimoto, E. and H. Niino
2. 発表標題 A Numerical Case Study on a Tornado that Formed in a Quasi Linear Convective System
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 益子 渉, 嶋田 宇大
2. 発表標題 2015 年台風第 15 号の内部コア域の微細構造
3. 学会等名 日本気象学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Yokota, S., H. Niino, H. Seko, M. Kunii, and H. Yamauchi
2 . 発表標題 Important Factors for Tornadogenesis as Revealed by High-Resolution Ensemble Forecasts of the Tsukuba F3 Tornado on 6 May 2012
3 . 学会等名 29th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Tochimoto, E., K. Sueki, and H. Niino
2 . 発表標題 Entraining CAPE for Better Assessment of Tornado Outbreak Potential in the Warm Sector of Extratropical Cyclones
3 . 学会等名 29th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Tochimoto, E., S. Yokota, H. Niino, and W. Yanase
2 . 発表標題 Structures and Evolutions of Meso- -scale Vortices that Spawned Tornado-like Vortices
3 . 学会等名 29th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Mashiko, W.
2 . 発表標題 Wind Gusts Associated with Small-Scale Vortices in the Core of Typhoon GONI (2015)
3 . 学会等名 29th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Sueki. K
2 . 発表標題 Numerical Investigation on the Environment of Tornado Occurrences Associated with Typhoon 201318 (MAN-YI)
3 . 学会等名 29th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Tochimoto, E., S. Yokota, H. Niino, and W. Yanase
2 . 発表標題 Fine-scale Structures of Meso- -scale Vortices that Cause Tornado-like Vortices
3 . 学会等名 Japan Geophysical Union (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Tochimoto, E., S. Yokota, H. Niino, and W. Yanase
2 . 発表標題 Numerical Simulations of Meso-Beta-Scale Vortices that Spawned Tornado-like Vortices
3 . 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Tochimoto, E., S. Yokota, H. Niino, and W. Yanase
2 . 発表標題 Ensemble Experiments of Meso-beta-Scale Vortex that Caused a Sudden Gusty Wind over the Sea
3 . 学会等名 99th American Meteorological Society Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 横田祥, 瀬古弘, 新野宏, 國井勝, 山内洋, 佐藤英一
2. 発表標題 観測ビッグデータの同化による竜巻予測の高度化
3. 学会等名 ポスト「京」重点課題4 第3回成果報告会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栃本英伍, 横田祥, 新野宏, 柳瀬巨
2. 発表標題 2015年9月1日に対馬海峡で突風を生じたメソ スケール渦のアンサンブル実験
3. 学会等名 2018年日本気象学会春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 益子涉
2. 発表標題 2015年台風第15号のコア域の風構造
3. 学会等名 日本気象学会2018年春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 益子涉
2. 発表標題 2018年台風第6号の接近に伴い沖縄県伊江島で発生した竜巻の発生過程
3. 学会等名 日本気象学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 末木健太
2. 発表標題 台風201318号に伴う竜巻の発生環境場に関する数値的研究
3. 学会等名 日本気象学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Niino, H.
2. 発表標題 Tornadoes: Our current understanding and future subjects
3. 学会等名 Distinguished Ogura Lectures Accompanying Session, Fall Meeting of the Meteorological Society of Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Niino, H.
2. 発表標題 Tornadoes: Their structure, genesis mechanism and environment
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	益子 涉 (Mashiko Wataru) (30354476)	気象庁気象研究所・台風・災害気象研究部・主任研究官 (82109)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	栃本 英伍 (Tochimoto Eigo) (40749917)	気象庁気象研究所・台風・災害気象研究部・研究官 (82109)	令和4年5月に防災科学研究所から気象研究所に異動。
研究分担者	末木 健太 (Sueki Kenta) (50802980)	気象庁気象研究所・台風・災害気象研究部・研究官 (82109)	令和4年5月に理化学研究所から気象庁気象研究所に異動。
研究分担者	横田 祥 (Yokota Sho) (10723794)	気象庁気象研究所・予報研究部・研究官 (82109)	令和元年4月に気象庁気象研究所から気象庁数値予報課に異動したため、研究分担者から外れる。

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
	中国	Sun Yat-sen University	Peking University	Southern Lab. of Ocean Sci. and Eng.
イタリア	The Institute of Atmos. Sci. and Climate			