

令和元年6月7日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05295

研究課題名(和文) 二重偏波レーダーと数値シミュレーションを用いたスーパーセル竜巻の前兆現象の解明

研究課題名(英文) Clarification of precursory signatures of supercell tornadogenesis by using polarimetric radar and numerical simulations

研究代表者

益子 渉 (Mashiko, Wataru)

気象庁気象研究所・予報研究部・主任研究官

研究者番号：30354476

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：2012年5月6日につくば市で発生したスーパーセル竜巻の発生メカニズムを解明するために、二重偏波レーダーによる観測と数値シミュレーションを用いて解析を行った。その結果、竜巻発生の約10分前に、フック状の降水物質の分布の先端付近において、降水コアが上空から地上に落下しているのが分かった。その降水コアは、渦の生成やスーパーセル後方の下降流とも関係しており、それはその後の竜巻発生に直接寄与していた。これらの結果は、フック先端の降水コアの落下はスーパーセル竜巻発生の前兆現象であることを示唆しており、高速スキャンレーダーを用いてそれを検出することが竜巻発生予測の改善につながると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強い竜巻をしばしばもたらすスーパーセルの内部構造や竜巻の発生機構は十分に理解されておらず、竜巻発生予測の精度も極めて低いのが現状である。本研究では、二重偏波レーダーと高解像度の数値シミュレーションを用いた解析を行い、スーパーセルのフック状の降水物質の先端付近において降水コアが落下することが竜巻発生にとって重要であることを示した。また、その物理的メカニズムを明らかにしたことは、竜巻研究において重要な知見となった。2012年つくば竜巻の事例では、この降水コアの落下は竜巻発生の約10分前に生じており、今後竜巻発生予測を向上させる上で新たな知見を与えた。

研究成果の概要(英文)：Generation mechanisms of the 6 May 2012 Tsukuba City supercell tornado were investigated by using polarimetric radar data and 50-m grid simulation results. The precipitation core at the tip of the hook-shaped distribution of hydrometeors in the supercell storm descended from above the 3-km level to the surface about 10 min prior to tornadogenesis. The descending precipitation core was tied to the baroclinic vorticity generation and the strong downdraft on the rear side of the storm, which later contributed directly to the tornadogenesis. This suggests that a descending precipitation core at the tip of the hook is a precursory phenomenon of supercell tornadogenesis and that detecting the precipitation core by rapid-scan radar may contribute to the improvement of tornado forecast in the future.

研究分野：メソ気象

キーワード：スーパーセル 竜巻 突風 数値シミュレーション 気象レーダー

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

竜巻にはスーパーセルと呼ばれる上空に渦(メソサイクロン)を伴った特殊な積乱雲のもとで発生するものがあり、米国では強い竜巻のほとんどがスーパーセルによって引き起こされている。日本においても、9名もの死者を出した2006年佐呂間竜巻や1000棟以上の住家被害をもたらした2012年つくば竜巻などは、スーパーセル竜巻であると考えられている。しかしながら、スーパーセルが竜巻を引き起こす割合は小さく、どのようなスーパーセルが竜巻を起こすのか、その内部構造の違いは未だ十分に明らかにされていない。最近の観測的研究では、スーパーセル後方の局所的な強い下降気流が竜巻の発生に重要であることを示すものがあり、竜巻の発生過程は断片的には捉えられるようになってきている。しかし、メソサイクロンや降水コアの落下、局所的な下降流が相互にどのように関係しているのか、そして何が竜巻発生のトリガーとなっているのか未だ十分に明らかにされていない。これが、竜巻の発生予測を困難にしている大きな要因であり、その解明が竜巻研究において最大のテーマとなっている。

日本では、気象庁のドップラーレーダーの全国展開が完了するとともに、二重偏波ドップラーレーダーなどの最新の観測機器の整備、電子計算機の性能向上などにより、観測と数値シミュレーションの両面からスーパーセル内部の詳細構造を研究できる環境が整ってきている。

2. 研究の目的

2012年つくば市や2013年越谷市、2006年佐呂間町を襲った竜巻は、スーパーセルと呼ばれる特殊な積乱雲によってもたられ、その被害は極めて甚大である。しかしながら、スーパーセル内部の詳細な構造や竜巻の発生機構が十分に理解されていないため、予報現場ではドップラーレーダーによる上空の渦の探知をベースとして竜巻注意情報が出され、精度が低いのが現状である。本研究では、地上観測データをもとに竜巻等突風の実態を把握するとともに、降水粒子の判別が可能で3次元的に高解像度で観測できる二重偏波レーダーによる解析や超高解像度の数値シミュレーション結果を用いて、スーパーセル内部の構造を詳細に解析して竜巻発生のトリガーとなる前兆現象を特定し、竜巻の発生機構を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、(1)2002年から2017年までの全国の気象官署の1分値データを用いた突風の統計解析を行い、日本で発生する竜巻等突風の実態を把握する。(2)最新式の気象研究所の二重偏波レーダーによって捉えられたスーパーセルについて、竜巻をもたらしたものと竜巻が発生しなかった事例について、その内部構造を解析し、降水の形状に特徴的な違いがみられないか調査する。(3)顕著なスーパーセル竜巻の事例に対して、二重偏波ドップラーレーダーや水平解像度50mの高解像度数値シミュレーション結果を用いてストーム内部の降水粒子の3次元分布の詳細な解析を行い、局所的な下降流や下層のメソサイクロン、竜巻発生との因果関係を調べ、竜巻発生の前兆現象を明らかにする。

4. 研究成果

地上気象データを用いた竜巻等突風の統計調査

日本で発生する竜巻等突風の実態を把握するため、2002年から2017年までの全国の気象官署151地点の地上観測データを用いて、日本における突風の統計解析を行った。本研究で使用したデータは前1分間最大瞬間風速(3秒平均値)が格納されている1分値データで、突風は次の3つの条件を課して定義した。1)瞬間風速(3秒平均風速)が前10分平均風速より15m/s以上増加、かつ突風率(瞬間風速/前10分平均風速)が2.0以上。2)瞬間風速が、前3分平均最大瞬間風速よりも10m/s以上増加。3)後10分平均風速が瞬間風速より10m/s以上減少。

その結果、3531もの突風が検出され、発生分布で見ると、突風は全国的に発生しているが、特に沿岸部や島嶼部で多いことが明らかになった(図1)。全官署で平均すると、25m/s以上の突風の発生頻度は1年当たり0.97回となり、これは竜巻の遭遇確率に比べて4から5桁大きかった。沿岸部では内陸に比べて突風の発生頻度が約3倍大きかった。月別で見ると、9月が最も発生頻度が高く、6月に最も低かった。突風は日中、特に午後発生頻度が高まっていた。発生した突風の約半数は台風中心から800km以内で発生しており、そのほとんどは8月から10月に発生していた。また、台風

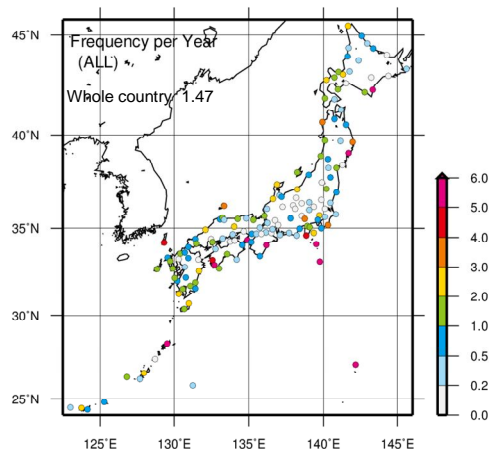


図1 全国の気象官署151地点における2002年から2017年までの1年あたりの突風の発生頻度の分布。

に伴う突風の約半数はミニスーパーセル竜巻の発生しやすい台風の進行方向右前方で発生していた(図2)。西日本では台風に伴う突風が多く、東日本や北日本では台風に伴わない突風が多いのが特徴であった。突風と同じような風速変化をするが急激な風速減少を伴わない持続的な強風についても調査したところ、そのような強風は日本海側で発生しやすく、特に12月に発生頻度が高かった。

抽出された突風の約10%は気象庁竜巻等突風データベースの事例と同一の環境場で発生していたとみられ、リアルタイムで解析できれば将来的に竜巻等突風の予測に役立てられる可能性があることが分かった。特に2012年つくば竜巻の事例では、同じ降水システムによって竜巻発生約1時間40分前に河口湖で突風をもたらしていたことが明らかになった。

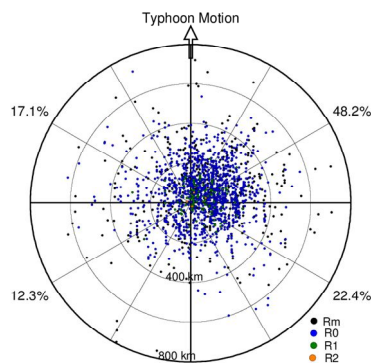


図2 台風中心に対する突風の発生位置の分布。上向きが台風の進行方向を示す。色分けでJEFスケールに対応した風速を示す。各象限の比率も合わせて表示...

二重偏波レーダーで観測された竜巻・非竜巻事例のフックエコーの比較

2012年5月6日につくば市を襲った竜巻はスーパーセルから延びるフックエコー下に発生した。一方、2015年8月12日につくば市に発生した積乱雲においてもフックエコーがみられ、中層にはメソサイクロンや渦状のレーダー反射因子の特徴がみられたが、竜巻発生には至らなかった。本解析では、竜巻の前兆現象及び検知の特徴を明らかにすることを目的に、気象研究所の固体素子二重偏波レーダーで数km~10数kmの近傍で高い空間分解能で捉えた竜巻を伴うフックエコーと竜巻を伴わなかったフックエコーの特徴を比較した。

図3は2012年つくば竜巻の事例において、竜巻の地上到達時(図3a,b)とその約8分後(図3c,d)のフックエコーの分布である。フックエコーはこの10分以上前に出現し、時計回りと反時計回りのエコーの内、反時計回りのエコーが顕在化した。竜巻発生8分後には反射強度の強い領域が中心に分布し(図3c)、反対に偏波間相関係数の中心の値が0.80以下に低下した(図3d)。飛散物が巻き上げられてしばらくしてから偏波間相関係数の低下がみられることから、この特徴は竜巻の検知に用いることができると考えられる。

一方、竜巻を伴わなかった2015年の事例では、時計回りと反時計回りのフックエコーが存在していたが(図4a)、この時刻以降は時計回りの分布(高気圧性回転の領域)が顕在化する竜巻事例と逆の特徴がみられた。この事例も下層ほど偏波間相関係数が低下する特徴がみられ、仰角6.2度でもフックの中心付近は反射因子が20dBZ以上にもかかわらず、0.8程度まで低下する特徴がみられた(図4b)。これは雨滴の数が少ない一方、個々の雨滴は大粒であるからと推察された。

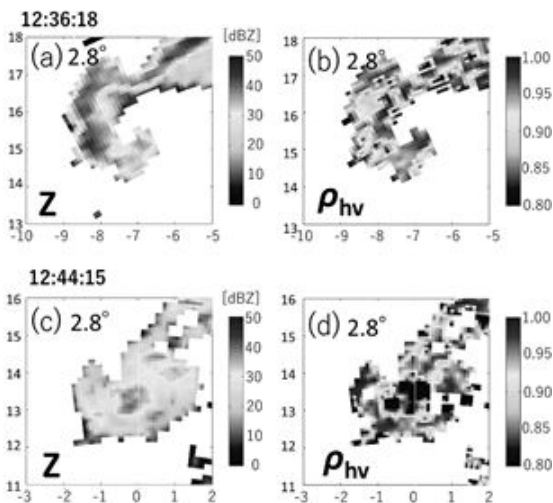


図3 2012年5月6日につくば竜巻事例の竜巻発生及び8分後の仰角2.8度PPIのフックエコー分布。高度は600-700m。(a)12時36分の反射因子、(b)同時刻の偏波間相関係数、(c)12時44分の反射因子、(d)同時刻の偏波間相関係数。座標はレーダーからの距離を表している。

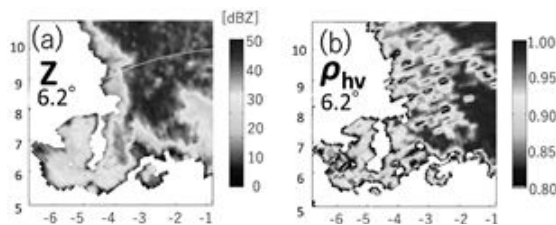


図4 2015年8月12日17時59分の仰角6.2度PPIのフックエコー分布。高度は800-900m。(a)12時36分の反射因子、(b)同時刻の偏波間相関係数。

高解像度数値シミュレーションによる竜巻発生の前兆現象の解析

2012年つくば竜巻を対象にして、竜巻発生の前兆現象を明らかにするために水平解像度50mの高解像度シミュレーションを行った。気象庁非静力学モデルを使用し、初期値・境界値には気象庁メソ解析を用いて実験を行った。5月6日0900JSTを初期値として、最初に水平解像度

1km のモデルを実行し、それに水平解像度 250m、50m のモデルを段階的にネストして実験を行った。実験では実地形データを取り入れ、地表摩擦の効果も考慮している。その結果、実況に比べて約 25 分早いものの、南北に延びる線状の対流システムが再現され、その南端では、レーダーによる観測と同じようにつくば市付近を通過するメソサイクロンを伴ったフック状の降水物質の分布が再現された。竜巻についてもレーダーによる観測と同じように、フックの先端において再現され、典型的なスーパーセル竜巻の特徴を有していた。竜巻は、後方ガストフロント上において 1208JST 頃に顕著な気圧低下と鉛直渦度の増大を伴って発生していた。竜巻発生直前に着目すると、ストーム後方の下降流が局所的に強まり、それに伴う外出流が強化されてストームの循環中心にくさび状に進入していた。竜巻渦を起点とした後方トラジェクトリ解析を行った結果、ストーム後方の下降流に伴う外出流のサージが竜巻発生の重要なトリガーであったことが分かった。竜巻渦を取り囲むリングに沿った循環解析を行ったところ、下降流周辺の傾圧性が竜巻渦の主な起源であることが示された。

竜巻発生の前兆現象を捉えるために、ストーム後方の下降流周辺の傾圧性の要因について詳細な解析を行った。その傾圧性は、主にフック状の降水物質の分布の先端付近の降水コア域において、雨滴の蒸発と氷物質の融解による冷却によって形成されていた。その降水コアは、竜巻発生の約 13 分前から高度 2~3km 付近において顕在化し、徐々に下層でも見られるようになった(図 5)。二重偏波レーダーによる観測と同じように、フック先端の南西側に高気圧性の回転が見られるが、これは徐々に弱まっていった。時間高度断面図で見ると、竜巻発生の 10 分以上前に、降水コアが高度 3.5km 付近から 6 分程度で地表に降下していくのが分かる(図 6)。これらのことから、フックの先端における降水コアの降下に伴って傾圧的に渦が生成されるとともに、局所的に強い RFD が形成され、竜巻発生に至っていたといえる。レーダーによる観測によって、この降水コアの落下を捉えられれば、竜巻発生の前兆現象として竜巻予測に活用できる可能性があると考えられる。数値シミュレーションの結果から、このフック先端の降水コアの落下をレーダーで捉えるには 500m 程度の水平分解能と 1 分程度の時間分解能が必要であることが分かった。高速スキャンレーダーを用いて降水コアを検出することが竜巻予測の改善につながると考えられる。

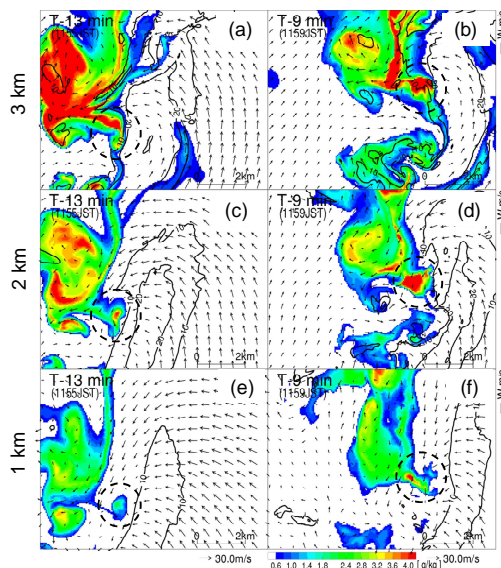


図 5 竜巻発生 13 分前の高度(a)3km、(c)2km、(e)1km におけるスーパーセルの降水物質の分布。(b)、(d)、(f)は竜巻発生 9 分前を示す。破線の黒丸はフック状の降水域先端の降水コアの位置を示す。

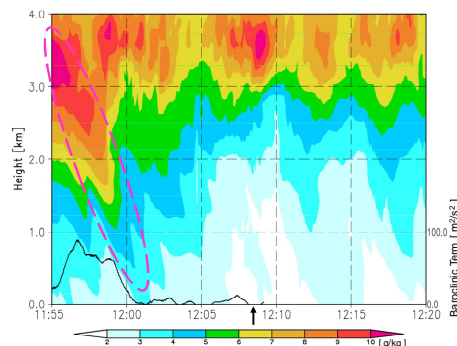


図 6 降水物質の時間高度断面図。矢印で示した 1208JST は竜巻発生時刻を示す。ピンクの破線域は降下するフック先端の降水コアを示す。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 9 件)

Mashiko, W., 2019: A statistical study of wind gusts in Japan using surface observations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 査読有, 97, 39-54.

Nagumo, N, A. Adachi, and H. Yamauchi, 2019: Geometrical properties of hydrometeors during the refreezing process and their effects on dualpolarized radar signals. *Mon. Wea. Rev.*, 査読有, in press.

山内洋, 足立アホ口, 小司禎教, 佐藤英一, 2018: 2014 年 6 月 24 日に東京都調布市付近に激しい降雹をもたらした雷雨の二重偏波解析, 気象研究ノート, 査読無し, 236, 165-174.

南雲信宏, 2018: 2013 年 7 月 23 日孤立積乱雲発生に先立つ開封前線と非降水エコーの関係, 気象研究ノート, 査読無し, 236, 97-107.

Mashiko, W., and H. Niino, 2017: Super high-resolution simulation of the 6 May 2012 Tsukuba supercell tornado: Near-surface structure and its evolution. *SOLA*, 査読有, 13, 135-139.

益子涉, 2017: 竜巻の発生機構 特集「強風をもたらす様々な空間スケールの渦」, 日本風工学会誌, 査読無し, 42, 31-38.

Mashiko, W., 2016: A numerical study of the 6 May 2012 Tsukuba City supercell tornado. Part II: Mechanisms of Tornadogenesis. Mon. Wea. Rev., 査読有, 144, 3077-3098.

益子涉, 2016: 数値シミュレーションを用いた竜巻の発生機構に関する研究, 2016 年度気象学会春季大会シンポジウム「竜巻の観測・予測の現状と将来」の報告, 天気, 査読無し, 63, 970-973.

Mashiko, W., 2016: A numerical study of the 6 May 2012 Tsukuba City supercell tornado. Part I: Vorticity sources of low-level and midlevel mesocyclones. Mon. Wea. Rev., 査読有, 144, 1069-1092.

〔学会発表〕(計 20 件)

益子涉, 2019: 全国の気象官署の地上データを用いた突風の統計解析, 東京工芸大学風工学研究拠点共同研究・合同公開研究会.

Mashiko, W. 2018: Wind Gusts Associated with Small-Scale Vortices in the Core of Typhoon GONI (2015), 29th Conference on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc.

南雲信宏、足立アホ口、山内洋, 2018: 凍雨の地上観測に基づく二重偏波レーダーによる凍結域・非凍結域の調査, 2018 年日本気象学会秋季大会.

益子涉, 2018: 高解像度モデルを用いた Updraft Helicity の日本で発生する竜巻への適用, 2018 年日本気象学会春季大会.

南雲信宏, 益子涉, 山内洋, 足立アホ口, 2018: 二重偏波レーダーで観測された竜巻・非竜巻事例のフックエコーの比較, 2018 年日本気象学会春季大会.

益子涉, 2018: 高解像度モデルを用いた竜巻等突風の発生予測, ポスト「京」第 2 回 竜巻研究会.

益子涉, 2018: 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, 2018 年日本気象学会秋季大会.

益子涉, 2018: 2015 年台風第 15 号のコア域の風構造, 2018 年日本気象学会秋季大会.

Mashiko, W., and H. Niino, 2018: Super high-resolution simulation of the 6 May 2012 Tsukuba supercell tornado, International Workshop on Wind-related Disasters and Mitigation Committee of WRDM.

益子涉, 2018: 地上気象データを用いた突風の統計解析, 風工学共同研究拠点・公開研究会「日本版竜巻スケールおよびその評価手法に関する研究」.

Mashiko, W., 2017: Super High-resolution Simulation of the 6 May 2012 Tsukuba Supercell Tornado, AORI-ISAC Workshop on Tornadoes and Supercells in Japan and Italy.

益子涉, 2017: 地上気象データを用いた突風の統計解析(第 2 報), 2017 年気象学会秋季大会.

益子涉, 2017: 地上気象データを用いた突風の統計解析, 2017 年気象学会春季大会.

Mashiko, W., 2017: Super high-resolution simulation of tornado-vortex structure, 97th American Meteorological Society Annual Meeting.

Mashiko, W., 2017: A statistical study of wind gusts in Japan using in situ surface observations, 97th American Meteorological Society Annual Meeting.

Mashiko, W., 2016: Numerical simulation of the 6 May 2012 Tsukuba City supercell tornado, AORI-ISAC Workshop on Tornadoes and Supercells in Japan and Italy.

益子涉, 2016: 数値シミュレーションを用いた竜巻の発生機構に関する研究, 2016 年度気象学会春季大会シンポジウム「竜巻の観測・予測の現状と将来」.

益子涉、山内洋、南雲信宏, 2015: 2013 年台風第 18 号に伴って発生したミニスーパーセルの構造, 2015 年気象学会秋季大会.

益子涉, 2015: 台風に伴う竜巻の特徴, 平成 27 年度京都大学防災研究所共同研究集会.

益子涉, 2015: 気象分野における竜巻の数値シミュレーション, 日本建築学会「建築物の突風荷重に関する公開研究会」.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 南雲 信宏

ローマ字氏名: Nagumo Nobuhiro

所属研究機関名：気象庁気象研究所
部局名：気象衛星・観測システム研究部
職名：研究官
研究者番号（8桁）：30624960

(2)研究協力者

研究協力者氏名：山内 洋
ローマ字氏名：Yamauchi Hiroshi

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。