

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540518

研究課題名(和文) 関東平野に突風をもたらすシビアストームの発生機構に関する研究

研究課題名(英文) Studies on severe local storms accompanied by wind gusts in the Kanto Plain

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) 3,800,000円、(間接経費) 0円

研究成果の概要(和文)：2012年5月6日につくば市に甚大な被害をもたらした竜巻について、二重偏波レーダーによる観測データや高解像度数値シミュレーションの結果を用いて構造や発生機構について解析した。その結果、竜巻をもたらした積乱雲は米国中西部でしばしばみられるスーパーセルの特徴をもち、竜巻発生前に直径約1kmのトルネードサイクロンと呼ばれる渦が形成されていたことが分かった。そして、竜巻の渦は、ストーム後方の強い降水を伴った下降流に伴ってつくられていることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：On 6 May 2012, a F3 tornado, which was one of the most destructive tornadoes ever in Japan, hit Tsukuba City in eastern Japan. To clarify the structure of a tornado-producing storm and mechanisms of tornadogenesis, detailed analyses were conducted using polarimetric radar data and high-resolution simulation results. The storm, which spawned the tornado, exhibited characteristics of a typical supercell storm as often observed in midwestern United States. The tornadogenesis was preceded by "Tornado Cyclone" with a diameter of about 1 km. The rear-flank downdraft associated with heavy precipitation was crucial for vorticity generation of the tornado.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：竜巻 シビアストーム 突風 気象学 自然現象・予測 自然災害

1. 研究開始当初の背景

関東平野では竜巻等突風の発生頻度が高く、甚大な被害をもたらされることがしばしばある。しかし、関東平野で発生する竜巻の特徴について、これまで統計的に調べられたものはない。また、竜巻や竜巻をもたらす積乱雲は、時空間的に極めて小さい現象であるために観測することや数値シミュレーションによる再現が難しく、その構造や発生機構は未だ十分に理解されていない。最近になって二重偏波ドップラーレーダーが整備されると共に、電子計算機の性能の向上や数値予報技術の発展により、観測・数値シミュレーション両面から竜巻等突風に関する研究が可能になりつつある。

2. 研究の目的

(1) これまでに発生した竜巻について統計的に解析し、関東平野とそれ以外の地域を比較するなどして、関東平野で発生する竜巻の特徴を明らかにする。

(2) 過去の顕著な事例に対して、ドップラーレーダーによる高分解能データによる解析と、現実場に即した高解像度数値シミュレーションの結果を用いた解析によって、シビアストームの構造と突風の発生機構の解明を行う。特に研究期間中に気象研究所近辺で発生したのものに対しては、最新式の二重偏波ドップラーレーダーによる高解像度の観測データや高解像度数値シミュレーションデータ、現地調査結果などを用いて最優先で解析を行う。本研究は、このような包括的な解析を行うことで、これまで捉える事が困難であった突風の構造をより詳細に明らかにすることを目的とする。さらに、現実場に即した超高解像度の数値シミュレーション結果を解析することによって、これまでの理想実験では明らかにすることができなかった実際の現象に対する理解を大きく進展させ、シビア現象の発生機構を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 統計的調査

1961年以降に発生した竜巻を対象として、最新の気象庁竜巻データベースやアメダス、ウィンドプロファイラなどの観測データを用いて、関東平野で発生する竜巻の特徴を統計的に明らかにする。また、関東平野特有の下層の局地前線に伴うシアや温度場に注目した解析を行い、発生環境場の特徴を明らかにする。

(2) 突風をもたらすシビアストームの構造と発生機構の解明

過去の顕著な事例について、気象研究所に保存されている4次元変分法で作成した数値モデル解析データから、超高解像度数値シミュレーション(水平解像度50m程度)によって現実に近い状態で再現し、ストームの

構造や発生機構を明らかにする。また、ドップラーレーダー等による観測データを用いた解析も行い、観測・数値シミュレーション両面から調査を行う。もし、当研究課題実施中に気象研究所の近辺で突風が発生した時には現地調査なども行って観測データを収集し、最優先で解析を行う。気象研究所に設置してある二重偏波ドップラーレーダーを用いれば、12km圏内では水平分解能200m以下で観測することができるため、竜巻渦を含むシビアストームの構造を明らかにすることができる。

4. 研究成果

(1) 関東平野で発生する竜巻の統計解析

関東平野で発生する竜巻の特徴

1961年以降に発生した竜巻を対象として、気象庁竜巻データベースやアメダス、ウィンドプロファイラなどの観測データを用いて、統計的に調査を行った。その結果、関東平野では竜巻の発生頻度が全国平均に比べて約2倍と高く、その内42%が海岸線から10km以上の内陸部において発生しており、他の地域よりも内陸で多い特徴が定量的に示された。(図1)。竜巻の強度については、関東以外では藤田スケールでF2以上の割合が19.5%であったのに対し、関東では41.5%と強い竜巻が多くなっていった。

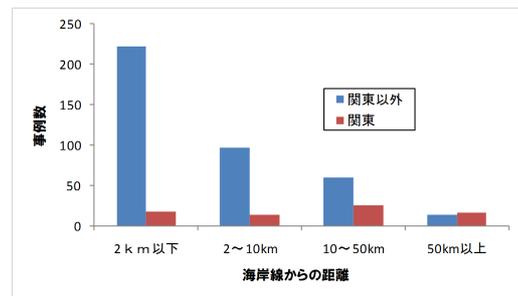


図1. 関東と関東以外の地域における竜巻発生地点の海岸線からの距離の比較

関東平野で発生する竜巻の環境場の特徴

関東平野で発生する竜巻は、総観場の特徴として寒冷前線に伴うものが少なく、台風に伴って発生するものが多いことが示された。メソスケールの特徴としては、関東平野特有の気流系によって、温度傾度と風向の変化を伴った局地前線が形成されているときに発生することが多いことが明らかになった。また、内陸部ではより地表付近の局地前線の影響を受けやすく、房総半島付近では環境場の水平渦の影響を受けやすいことがわかった。

(2) 2012年5月6日に発生したつくば竜巻の二重偏波ドップラーレーダーによる解析ストームの構造

二重偏波ドップラーレーダーを用いた解析により、竜巻を引き起こした親雲の特徴を調べた。その結果、親雲が米国中西部でしばしばみられるクラシック型のスーパーセル

であったことがわかった。親雲中層には、図2に示すように、直径5 km、渦度 0.02 s^{-1} 程度のメソサイクロン (MC) とよばれる渦が存在し、強い反射強度のエコーによって下層の弱い反射強度領域が覆われるヴォールト (丸天井) 構造を確認することができた。親雲の進行方向 (図2の右上方向) を基準として、メソサイクロンの後方側には細く明瞭なフック状のエコーがあり、前方側には 60 dBZ を超える強い反射強度の領域が広がっていた。

次に tornado cyclone (TC) とよばれる直径1 km 程度の、竜巻とメソサイクロンの中間のスケールを持つ渦の特徴について、時間・空間的な構造の変化を調べた。その結果、フック状のエコーの先端部において竜巻発生10分前に地表付近からストーム中層にかけてほぼ同時に形成されていたことが明らかになった。竜巻発生前までは渦度一定のまま直径が増大していたが、竜巻発生後は直径が縮小するとともに渦度が増大し、移動経路は竜巻の被害分布と一致していた。

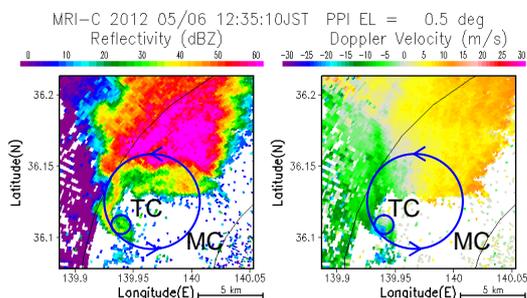


図2. 仰角 0.5° (およそ高度150mに相当) のレーダーによるつくば竜巻を引き起こした親雲の観測結果。左: 反射強度、右: ドップラー速度。

竜巻の観測

二重偏波ドップラーレーダーにより竜巻の飛散物が上空に運ばれていく様子を国内で初めて捉えることに成功した。通常、竜巻は、その直径 (100 m 程度) がレーダーの解像度に比べて小さいため、観測することはできないが、今回は「球状」かつ「一様性が低い」という二重偏波観測における特徴により、竜巻による飛散物を降水粒子 (雨など) と区別することで竜巻を観測することができた。

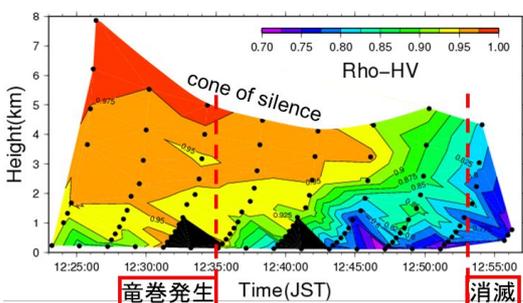


図3. 散乱体の一様性を示す二重偏波情報 ρ_{HV} の時間高度変化。値が低いほど、一様性が低いことを示す。

図3に示すように、この特徴は、地上で竜巻被害が確認された時点で地表近くに生じ、時間の経過とともに上空4 km まで伝播する様子が捉えられた。米国における先行研究では、飛散物の到達高度と竜巻の強さの関係が指摘されており、本事例の観測結果も先行研究と整合していることがわかった。

(3) つくば竜巻の高解像度数値シミュレーションによる解析

実験概要と再現結果

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値を用いて、水平解像度50 m の実験を行った。最初に水平解像度1 km のモデルを実行し、それに水平解像度250 m、50 m のモデルをネストして実験を行った。本実験では、これまでの多くの先行研究と異なり、実際の地形を取り込み、地表摩擦の効果も考慮している。その結果、時間は約30分早く位置もやや北にずれているものの、レーダーによる観測と同じように、つくば市を通過するスーパーセルの再現に成功し、上空にメソサイクロンを伴ったフック状の形状をした降水物質の分布が再現された (図4a)。そして、竜巻は観測と同じように、フックの先端付近で発生していた (図4b)。竜巻は最も発達した時、気圧低下は30 hPa、最大風速は約 67 m s^{-1} に達していた。

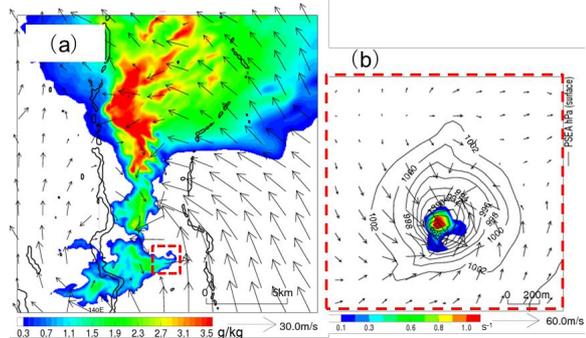


図4. (a) 再現された高度1 km の降水物質の分布。ベクトルはストームの動きに相対的な風を示す。(b) (a) の赤枠域における高度10 m の鉛直渦度の分布。実線のコンターは気圧、ベクトルは風を示す。

環境場の特徴

竜巻が発生した時、低圧部が日本海に位置し、その前面にあたる関東平野では下層で南よりの湿った気塊が入りやすい総観場であった。モデルの結果を用いて大気の安定度の指標となるCAPEを計算すると、約 2000 J kg^{-1} と大きな値となり、かなり不安定であったことが分かった。また、風のプロファイルを調べると、地表付近では南風で、高度が上がるにしたがって南西風となり、時計回りに大きく変化していた (図5)。このような特徴は、米国中西部で発生する典型的なスーパーセル竜巻の発生環境場に共通するものである。また、高度1 km のメソサイクロンの移動速

度を求めると、高度 6 km までの平均風を平均したものと比較して、進行方向右側に約 26 度ずれており、米国中西部で発生するスーパーセルに一般的にみられる特徴が表れていた(図 5)。

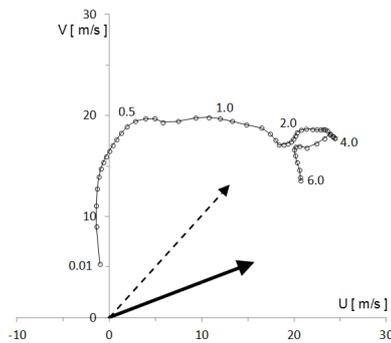


図 5. 風の鉛直プロファイル。プロファイルわきの数字は高度 (km) を示す。ストームの移動速度を実線の矢印で、高度 6km までの風を平均したものに 0.75 倍したものを破線の矢印で示す。

竜巻の発生機構

竜巻発生直前には高度 1 km 付近を中心として下層のメソサイクロンが発達し、顕著な気圧低下と 30 m s^{-1} 以上の強い上昇流を伴っていた。しかし、スーパーセル竜巻の発生に対して、メソサイクロンの発達が必要条件ではないことが先行研究により示されている。そこで、下層の運動場の時間変化に着目すると、南北に延びるガストフロントが存在し、前方ガストフロントと後方ガストフロントの交点近傍の後方ガストフロント側において、顕著な気圧低下と鉛直渦度の増大を伴って竜巻が発生していた。その後方ガストフロントの西側では Rear-Flank Downdraft とよばれる下降流域となっており、竜巻発生直前にはそ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竜巻が発生していた。その下降流と竜巻発生の因果関係を明確にするために、発生直後の竜巻渦を起点として後方トラジェクトリ解析を行った。その結果、最初はストーム前方にあたる北東側の下層のみから気塊が流入していたが、竜巻発生直前になるとストーム後方の下降流に沿ったものが入り始め、その後の竜巻発生に至っていることが明らかになった(図 6)。これらのことから、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といえる。

次に、竜巻の渦の起源を明らかにするために、後方トラジェクトリ解析をもとにした循環の計算を行った。その結果、上空のメソサイクロンが環境場の水平渦を起源としているのに対し、竜巻の渦はストーム自身が作り出していることが明らかになった。渦は主としてフック状の降水物質の分布の先端付近において傾圧的につくられており、摩擦の効果も寄与していることが定量的に確かめら

れた。フックの先端において傾圧的に作られる渦については、雨滴の蒸発や雹/霰の融解による冷却の効果が効いており、降水物質の荷重の効果は小さいことが示された。感度実験から、雨滴の蒸発の効果は渦の生成には寄与するが、地表付近を冷やし過ぎることにより竜巻発生にとって負の効果も持ち合わせていることが明らかになった。雹/霰の融解は、雨滴の蒸発ほど上空の冷却量は大きくないが、地表付近を過度に冷やさないため、竜巻の発生に最も効率的に効いていることが明らかになった。

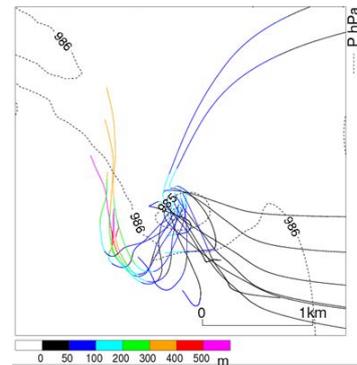


図 6. 竜巻の渦を起点とした後方トラジェクトリ解析の結果。水平面に投影し、色で高度を表している。コンターは起点の時刻における気圧分布。

他の顕著事例との比較

つくば竜巻は典型的なスーパーセルの特徴を有しており、土浦・龍ヶ崎竜巻(2009)のような渦が下層のみに存在する非スーパーセル竜巻とは大きく異なっていた。また、2006 年台風第 13 号に伴って発生した延岡竜巻はスーパーセル竜巻であったが、竜巻の渦は環境場の下層の水平渦を起源としており、つくば竜巻の発生機構とは大きく異なることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

Shoji, Y., H. Yamauchi, W. Mashiko, and E. Sato, Estimation of local-scale precipitable water vapor distribution around each GNSS station using slant path delay, SOLA, 査読有, 10, 2014, 29-33.

DOI: doi:10.2151/sola.2014-007

益子 涉、領域モデル研究、気象研究ノート「台風研究の最前線(下)」, 査読無し 227, 2013, pp.77-81

山内洋、小司禎教、足立アホロ、佐藤英一、2012 年 5 月 6 日の茨城・栃木の竜巻に関する調査研究報告会 気象研究所・二重偏波ドップラーレーダーで捉えた竜巻渦、天気、査読無し、60, 2013, 49-50

[学会発表](計 22 件)

Mashiko, W., Numerical Simulation of Supercell Tornadogenesis: The 2012 Tsukuba F3 Tornado Event, 7th European Conference on Severe Storms, 2013年6月4日、Scandic Marina Congress Center
Yamauchi, H., Vertical structure of the Tsukuba F3 tornado on 6 May 2012 as revealed by a solid-state polarimetric radar, International Symposium on Earth-Science Challenges 2013, 2014年10月4日、京都大学

山内洋、気象研究所・二重偏波ドップラーレーダーで捉えた竜巻渦、日本気象学会・2012年5月6日の茨城・栃木の竜巻に関する調査研究報告会、2012年5月27日、つくば国際会議場

Mashiko, W., Numerical Simulations of Supercell Tornadogenesis: The Structure and Evolution of Vortex Lines within Low-Level Mesocyclones and Tornadoes, 26th Conference on Severe Local Storms, 2012年11月5日、Loews Vanderbilt Hotel

益子渉、関東平野で発生する竜巻の環境場の特徴、日本気象学会 2011年秋季大会、2011年11月16日、名古屋大学

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

山内洋 (YAMAUCHI, Hiroshi)

気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・主任研究官

研究者番号：00354522