

台風8019号に伴い発生した竜巻に関する数値実験

佐藤和歌子*・石川裕彦

* 現 東日本電信電話株式会社

要 旨

1980年10月13日に宮崎平野上で発生した竜巻について、領域気候モデルPSU/NCAR MM5を用いて再現実験を行った。モデルの初期値に用いたデータの解像度が粗いにも関わらず、竜巻の引き金となったと考えられるメソサイクロンの再現に成功した。また、地形や海陸間の粗度長差が竜巻発生に与える影響を調べるために感度実験を行った。その結果、宮崎平野の北西に位置する九州山地が竜巻の元となるメソサイクロンを発生しやすい環境を作っている可能性が示唆された。海陸間の粗度長差については、3次元モデル内でのメソサイクロン発生に対する影響については確認できなかった。

キーワード: 竜巻, 台風, 数値予報モデル

1. 研究背景

2006年は甚大な被害をもたらした竜巻が複数発生した。特に9月に宮崎県延岡市で発生した延岡竜巻（死者3名）、11月に北海道佐呂間町で発生した佐呂間竜巻（死者9名）は記憶に新しい。これらの竜巻による大きな被害発生を機に、竜巻研究に再び注目が集まり始めた。過去にも竜巻に関する研究が積み重ねられてきたが、その多くは高層観測や地上観測データなどの時間的・空間的に限定されたデータをコンポジット解析することによる、統計学的・気候学的な観点に基づく研究であった。

米国では毎年多数の竜巻が発生しており、その構造、発生機構、発達機構などに関する研究が積み重ねられている。米国で発生する竜巻の数は、年間約800個にも上る（Niino et al., 1997）。全世界で1年間に確認される竜巻の数はおよそ1000個である（気象庁, 2007）ことを考慮すると、約8割が米国で発生していることになる。それに対し日本で発生する竜巻は年間約20個ほどである（Niino et al., 1997）。この事実から「日本は竜巻のあまり発生しない地域である」、といえるだろうか？ 竜巻の発生数を年間発生総数ではなく、単位面積あたりの年間発生数で比較すると、米国では ~ 1 個/ km^2 、日本では約0.5個/ km^2 となり（Niino et al., 1997）、単位面積あたりの発生数で考えると、日本で発生する竜巻の数は

決して少なくはない。

米国において、ハリケーンに伴って竜巻が多発することが知られている。Hill et al. (1966) は1916年から1964年までの熱帯低気圧に伴う竜巻の発生地点データセットを用いて統計解析を行い、熱帯低気圧に伴い発生する竜巻は、地上気圧の中心から相対的に見て北東象限において発生頻度が高いことを指摘した。また、ハリケーンの強い水平循環内に上層の乾燥空気が巻き込まれることにより対流不安定成層となっていたことがいくつかの事例で確認された。移動する台風に対して、相対的に北東側象限に位置する領域が最も台風外からの異質空気が流入しやすい場所であると彼らは指摘している。一方、ハリケーンに伴い竜巻が発生した場合と発生しなかった場合との最も大きな相違点は、ハリケーン内部の対流圏下層において、非常に強い鉛直シアが存在するか否か、ということである（Novlan and Gray, 1974）。また、ハリケーンの北東側象限の対流圏下層1500mにおいて強い水平風の鉛直シアの存在が指摘されている（Gentry, 1983）。強い鉛直シア（水平渦度）を持つハリケーン内部の環境下では、その立ち上がり（tilting）により、竜巻のような強い鉛直渦度が形成されやすい大気状態になっていると考えられる。

以上、米国でハリケーンに伴い発生する竜巻の特徴について述べたが、日本およびその周辺においても台風に伴って竜巻が発生することが知られている

(光田, 1983)。日本で発生する全ての竜巻の約20%は、直接的・間接的に台風に関わっていたと言われている(小元, 1982; Niino et al., 1997)。また、竜巻発生場所の熱帯低気圧に相対的な分布を見てみると、日本においても米国と同様に、台風中心から見て相対的に北東～東象限において発生頻度が偏っている。さらに、竜巻発生時の環境であるが、台風内部で強い水平風の鉛直シアが存在していることが知られており、このことも米国での事例と一致し、日本で発生する台風に伴う竜巻は、米国におけるハリケーンに伴う竜巻と、ある程度類似していると考えられる。

一般的に米国のハリケーンに伴う竜巻はメキシコ湾岸地域において発生しやすい。一方で日本における台風に伴う竜巻に関しては、関東平野、東海地方、高知平野、宮崎平野、琉球諸島など、特に太平洋に南向きに面した海岸地域において被害が集中している(林ら, 1994)。琉球諸島を除くこれらの地域には、関東山地、日本アルプス、四国山地、九州山地などの標高1500m以上からなる山脈の南側山麓の平野部であるという共通点がある。また、これらの竜巻多発地帯は海岸線からそれほど離れていない場所であるというのも特徴的である(吉野ら, 2002)。このことから、日本で発生する竜巻は、台風近辺の強い鉛直シア環境以外にも、山岳による障害物としての影響や、海陸間の粗度長が不連続である影響も大きく受けて発生していると考えられる。よって、米国での研究成果をそのままあてはめるのではなく、竜巻発生環境に関する日本独自の指標を考えなければならない。そのためには、日本で発生した竜巻について、より多くの事例解析をする必要がある。しかし、竜巻の水平スケールは平均的には100m程度と小さく、寿命も10分程度と短いので、その構造、発生機構、発達機構を観測的に調べることは容易ではない。最近ではドップラーレーダー観測網が発達し、その観測結果の解析から、顕著な竜巻の親雲の多くがメソサイクロンを持つ積乱雲(スーパーセル)であったこと、台風に伴う竜巻の親雲はスーパーセルと比較して鉛直・水平スケールが一回り小さいミニスーパーセルが多いことなどが知られるようになった。しかし、このように観測機器や観測網が発達しても竜巻の時間的空間的スケールが小さいため、観測結果のみからは、発生・発達メカニズムの理解が十分進まないのが現状である。そこで、雲解像領域予報モデルにより、竜巻発生時の環境を高解像度で再現し、その再現された場を解析することが発生・発達メカニズムの理解へつなげると思われる。

日本において1991年～2006年に発生した竜巻のうち、台風に伴って発生したものは全体の約15.8%で

あった。宮崎平野で発生した竜巻だけに着目すると、台風に伴って発生したものは83.0%にも上った。Saito (1992)は入手でき得る観測データを用いて、1980年10月に宮崎平野で発生した5つの竜巻と発生時の環境について解析し、これらの竜巻が海上から上陸した長続きする積乱雲に伴って発生したこと、その積乱雲が低気圧性の渦を伴っていたことを示した。台風に伴って竜巻が頻発する宮崎平野で起こった竜巻の中でも、この台風8019号は計7個もの竜巻を発生させた(うち5個が宮崎平野で発生)。しかし、30年近く前の事例であり、当時の観測網は今日ほど発達しておらず、再解析データも整備されていないことから、竜巻発生環境を十分に知るための時間的・空間的に解像度の高いデータが存在しない。そのため、この竜巻についての詳しい事例解析はほとんどなされてこなかった。

先述したとおり、日本における竜巻の構造や発生機構、発達機構を解明するためには事例解析を数多く行わなければならない。しかし、現象の時間的・空間的スケールの小ささや、発生数の少なさから、観測だけでは理解を深めることは困難である。観測データの少なさを補完するためには、数値モデルを用いることによって竜巻発生時の環境場や竜巻そのものを再現し、その結果から解析を行うのが適当であると考えられる。近年、数値モデルを用いた竜巻の再現実験が行われるようになった。しかし、1999年の豊橋竜巻や2006年の延岡竜巻・佐呂間竜巻など比較的最近の事例についてしか行われていないのが現状である。近年の事例については、気象庁のRANAL(水平解像度20km)など、数値モデルの初期値として使用するのに好都合な解像度の高いデータがあることが一因と考えられる。しかし、日本における竜巻の発生数は非常に少ないため、近年発生したものだけではなく、過去に発生した事例についても数値モデルによる再現実験を行い、詳細な解析データを蓄積していかなければならない。過去の事例を数値モデルによって再現するにしても、初期値として入力できるデータには解像度が粗いものしか存在しない(NCEP Final AnalysisやJRA-25再解析データなど)。解像度の粗いデータを初期値にして、どこまで現実に近い再現ができるか、ということも興味深い問題である。

日本で発生する台風に伴う竜巻は、台風近辺の強い鉛直シア環境以外にも、山岳による障害物としての影響や、海陸間の粗度不連続の効果も大きく受けた結果、発生していると考えられる。しかし、地形が大気現象に及ぼす影響について行われた数値実験は、集中豪雨(東ら, 2007)や豪雪に関するものはあるものの、竜巻に関するものは今まで行われてこ

なかった。そこで、本研究では数値モデルによる感度実験を行い、宮崎平野独特の地形が竜巻発生に及ぼす影響について考察する。

本研究では、台風8010号に伴って発生した竜巻の発生発達メカニズムを探るために、PSU/NCARの雲解像数値予報モデルMM5による再現実験を行った。この再現実験により得られた場（モデル水平格子間隔27km）を用いて、台風8010号に伴う竜巻の発生・発達環境を解析した。また2-wayネスティング（9km, 3km, 1km, 0.333km）して、メソサイクロンスケールの高解像度再現実験を行い、宮崎平野において擾乱が発達する過程を調査した。さらに、数値モデル内の地形や粗度長を操作した感度実験を行い、地形等が竜巻発生に及ぼす影響を調査した。

この次の章からは以下のような構成となっている。第2章は宮崎平野と竜巻の概要について説明する。第3章では使用したモデルの概要について説明する。第4章では、MM5による再現実験結果を示し、竜巻の発生環境と発生・発達メカニズムについて考察する。第5章では宮崎平野の地形を考慮した感度実験の結果を示し、竜巻発生における地形の影響について考察する。第6章はまとめである。

2. 宮崎平野と竜巻の概要

2.1 宮崎平野の地形概要

宮崎平野は、九州南東部に位置する南北方向に約60 km、東西方向に最大30 kmの範囲に広がる三角形の地域である。東部は日向灘に面した海岸線になっており、北西部には九州山地が、南部には鰐塚山地が迫っている。平野部は多少起伏に富んでおり、標高200m以下の丘陵や台地が多数存在する。宮崎平野の地形は、第1章で述べた台風に伴って竜巻が発生しやすい場所の条件（1500m以上の山からなる山脈の南側山麓かつ海岸線からそれほど離れていない）を満たしている。

2.2 宮崎平野で発生する竜巻の特徴

宮崎平野で発生した竜巻に注目してみると、約80%が台風に伴うものである。日本で発生する竜巻のうち、台風に伴うものは20%であるから、宮崎平野は、特に台風に伴って竜巻が発生しやすい場所であるといえる。

2.3 台風8019号に伴う竜巻の特徴

台風8019号の元となる熱帯低気圧は1980年10月3日15UTCにフィリピンの東の北西太平洋（東経155.0度、北緯5.3度）で確認され、同月8日15UTCに東経

141.0度、北緯17.4度にて台風強度に達し台風8019号となった。その後台風8019号は24時間の間に75hPaという急発達をしながら北進し、9日00UTCに最低気圧890hPaを記録した。その後、+25hPa/dayの割合で減衰しながら北西進を続けた。12日06UTC頃に進路を北東に変え、さらに減衰しながら速度を上げ、北東進を続けた（Fig. 1）。

台風8019号の接近時には、宮崎平野上で計7つの竜巻が発生した。本研究では特に、1980年10月13日16～18UTCにかけて宮崎平野で発生した5つの竜巻を対象とする。これらの竜巻は前述した台風8019号のアウトバーンに相当する位置で発生し、負傷者15名、家屋の損壊約400戸、農作物の損害約16億円という大きな被害をもたらした（Saito,1992）。

竜巻発生時の台風の位置は宮崎平野から南西方向の東経130.7度、北緯30.5度であり、竜巻は台風の進行方向に相対的に右前方象限、距離にすると台風中心から約120km離れた位置で発生した。また、このときの中心気圧は950 hPaであり、急激に減衰する過程（+25hPa/day）において竜巻が発生した。

この事例に関して、気象観測データを詳細に解析した Saito (1992)によると、竜巻発生時には、地表と高度1 km との間に約 20 m km^{-1} の風の鉛直シアがあり、潜在不安定の飽和大気が対流圏のほぼ全層を占めていた。さらに、竜巻は台風8019号のレインバンドを構成し、西北西～北西に進むエコー群の通過に伴って発生し、そのうち4つが1つの長時間持続したエコー付近で発生した。各地点における風の変動成分の解析により、竜巻は日向灘から内陸に約 13 ms^{-1} の速さで進入してきたメソサイクロンの内部（多くは後面）で発生したことが分かっている。

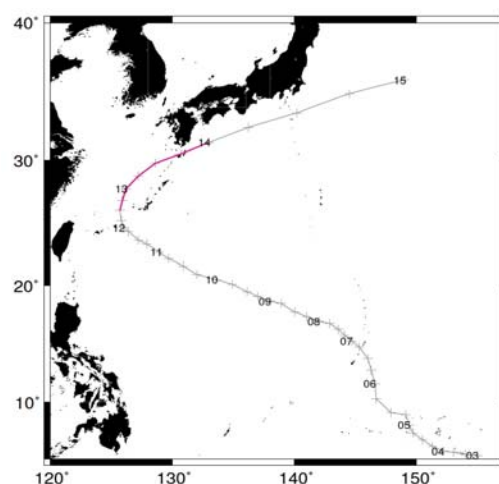


Fig. 1 Track of typhoon 8019. Solid line and plus marks indicate typhoon track and every 6hour position respectively.

3. 使用した数値モデルの概要

本研究ではFig.2に示す計算領域を用いた。最も粗い計算領域(D1)は、水平解像度27-km×27-kmで、90×90の格子数からなる。その領域の中にネスティングドメインD2(100×100), D3(265×265), D4(310×310), D5(325×325)を置いた。D1は北緯30°, 東経130°を中心とする日本列島, 朝鮮半島, 日本海, 北西太平洋をカバーする約2400km四方の領域である。このドメインは台風8019号とその周辺のシステムを再現するために設定した。D2およびD3は台風8019号のレインバンドを高解像度で再現するために適用した。D2からD3へは初期値に用いたデータの解像度の粗さを補うためにネスティングを行った。D4およびD5はレインバンド内のメソサイクロンを再現するために適用した。D4からD5へはモデルアウトプットの解像度を上げるためにネスティングを行った。初期値・境界値条件には、6時間毎、1.25°×1.25°の解像度をもつJRA-25再解析データを使用し、海面温度には、NCEP-NOAA Optimal Interpolating Reynolds SST (1°×1°格子)を用いた。積分時間は1980年10月12日12時(UTC)から14日00時(UTC)の36時間である。時間ステップはD1で60秒である。また台風の発達を現実に近づけるために初期値に台風ボーガスを組み込んだ。鉛直方向には、1000hPaから50hPaまでを参照レベルとして、計33フルσレベルを与えた。

MM5には多くの物理過程や力学過程に関するオプションが存在している。本研究では、大気境界層のパラメタリゼーションとして、4つの安定度レジームから構成される高解像度Blackadar PBLスキームを全てのドメインに使用した。地形や土地利用に関する情報は、D1に対しては5minの、D2に対しては2minの、D3~D5に対しては30 secの空間解像度を持つNCARアーカイブを利用した。また、雲の微物理過程に関しては、Reisner et al. (1996)の水蒸気、雲水、雨水、氷水、雪水、雹水の混合比と氷の数密度を陽的に予報する雲解像スケールに適した計算スキームを全てのドメインに対して適用した。D3以下のドメインに関しては、一切の降水過程をこのバルクスキームだけで表現し、サブグリッドスケールの積雲対流パラメタリゼーションは適用しなかった。D1とD2に対しては、Arakawa-Schubertタイプの単一雲を仮定したGrell積雲対流パラメタリゼーションを適用した。また、晴天、雲、降水、地表面と相互作用する長波放射・短波放射スキームによる計算を1分毎に更新した。解析値および観測値ナッジングは行わなかった。

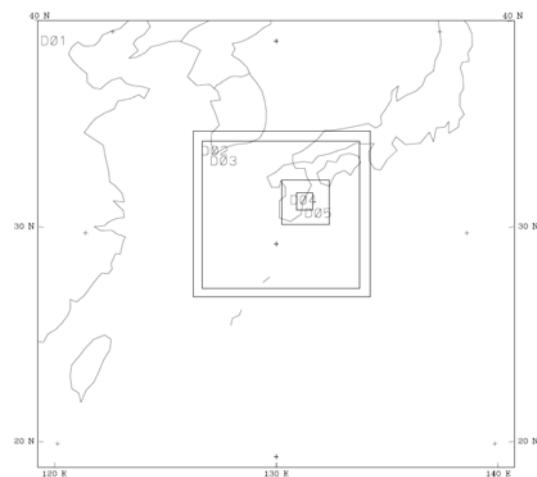


Fig. 2 Model computational domains. Coarsest model domain is labeled D01, and nested domains are labeled D2~D5.

4. 再現実験の結果と考察

4.1 再現実験

MM5による台風8019号の再現の妥当性を検証するために、まず台風経路と最低海面更正気圧の時系列変化を気象庁のベストトラックデータと比較した。台風経路は時間が経つにつれて現実よりもやや南よりの進路をとったが、時間的には現実と非常に類似した結果が得られた。最低海面更正気圧の時系列変化を比較すると、台風ボーガスを入れたにも関わらず実際よりも約+20hPaほど大きい値となった(図には示さない)。しかし、本研究で対象としている現象は、台風の中心付近の内部構造ではなく、台風からかなり離れたアウターレインバンドであるため、この結果を用いて解析を行っても差し支えないと判断した。さらに、台風の再現性を考察するため、モデルの結果から見積もられたレーダー反射強度の時間変化を追った。Fig. 5は、D3の再現実験の結果から得られた高度850hPa面(約1500m)における台風8019号の雲分布パターン(雨水混合比などの凝結物質から見積もられたレーダー反射強度)を1980年10月13日16時(UTC)~19時(UTC)の範囲で1時間ごとに示したものである。これを見ると、台風8019号に伴うレインバンドが台風と平行して移動している様子が再現されているのが分かる。また竜巻発生時刻付近で、台風8019号のレインバンドが宮崎平野上空を通過している様子が再現されていることが分かる。これは、竜巻発生前後に台風8019号のアウタ

レーンバンドが宮崎平野上空を通過したとする Saito(1992)の解析結果と一致する。

以上の結果から、台風の経路や中心気圧などに多少違いがあるものの、比較的現実に近い台風を再現できたと判断した。

次に、竜巻発生時の大気の状態がどのくらいの精度で再現されているかを確かめるために、1980 年 10 月 13 日 18UTC における鹿児島高層観測所の観測結果と、D3 の再現実験結果から得られた大気鉛直プロファイルを比較した。MM5 によって再現された大気鉛直プロファイルを、鹿児島高層観測所における大気鉛直プロファイルと比較するとかなり類似しており、対流圏全体が非常に湿っていた様子が再現できていることが分かった (not shown)。このことから MM5 によって、台風だけでなく大気の状態についても、現実非常に近い再現ができたといえる。

4.2 メソサイクロンの発生

MM5 モデルアウトプットから見積もられたレーダー反射強度の変化を 5 分ごとに追うと、日向灘から宮崎平野に向かってレーダー反射強度の大きい領域が西～西北西に向かって進んでいる様子が再現されていた。レーダー反射強度が特に長時間維持されたエコー領域がいくつか再現されていたが、その中でも特に長時間強度が維持されていたエコーについて考察した。エコー付近の鉛直渦度の変化を見てみると、周囲より鉛直渦度の大きな領域がしだいにその大きさを増しながら下降していく様子が見られた。Saito(1992)によると、竜巻は台風 8019 号のレーンバンドを構成する西北西～北西に進むエコー群に伴って発生し、発生した 5 個の竜巻のうち 4 個は 1 つの長時間持続したエコー付近に存在した竜巻低気圧 (メソサイクロン) から発生したとしている。このことから、今回 MM5 で再現されたこのエコーや鉛直渦度の大きい領域は、Saito(1992)で述べられている、長時間持続しかつ、竜巻を発生させたメソサイクロンとそれに伴うエコーではないかと考えられる。つまり、このエコーの付近で竜巻を発生させたメソサイクロンが再現されている可能性があると考えられる。鉛直渦度が最大になり、地上にタッチダウンした時刻(19:25)の、このエコー付近における雨水量と鉛直渦度の鉛直断面を見ると、スーパーセル様の積乱雲が再現されていた。しかし、再現された積乱雲の高度は約 5km ほどであり、米国のグレートプレーンズで観測されるスーパーセルと比較すると規模が小さい。今回再現した積乱雲は、1990 年 11 月に千葉県茂原市で発生した台風 9019 号に伴う竜巻の事例 (Suzuki et.al., 2000) と同様にミニスーパーセルとい

われるものであると考えられる。このミニスーパーセル状構造付近の地上気圧を真上から見た様子を Fig.3 に示した。このミニスーパーセル状積乱雲が存在している場所と一致して地上気圧が周囲より低くなっているのが分かる。さらに最低気圧付近の鉛直渦度の断面図 (Fig. 4) をみると、中心付近で鉛直渦度が約 0.02 s^{-1} とかなり大きくなっているのが分かる。これはメソサイクロンの目安である鉛直渦度強度 0.01 s^{-1} を満たしている。このことから、MM5 によってミニスーパーセルとその中に存在するメソサイクロンが再現されたといえる。

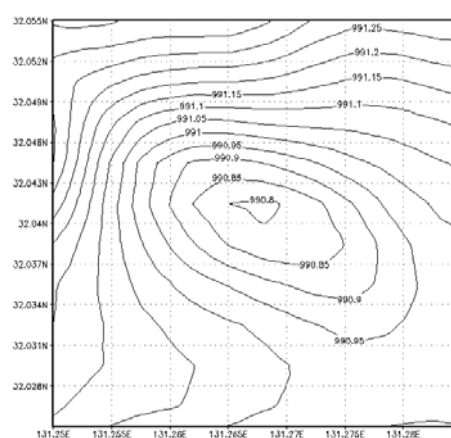


Fig. 3 Horizontal distribution of model-simulated surface pressure around the miniature supercell-like structure at 19:25

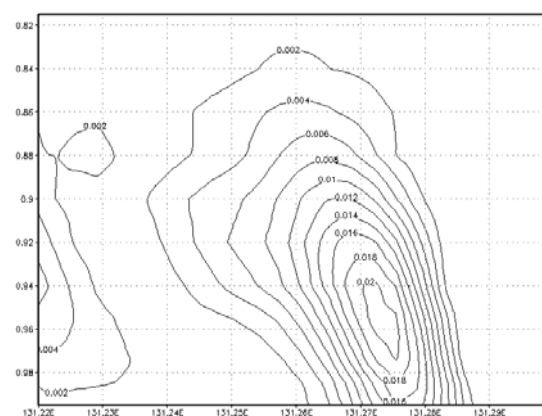


Fig. 4 Vertical profile of model-simulated vertical vorticity around the miniature supercell-like structure at 19:25

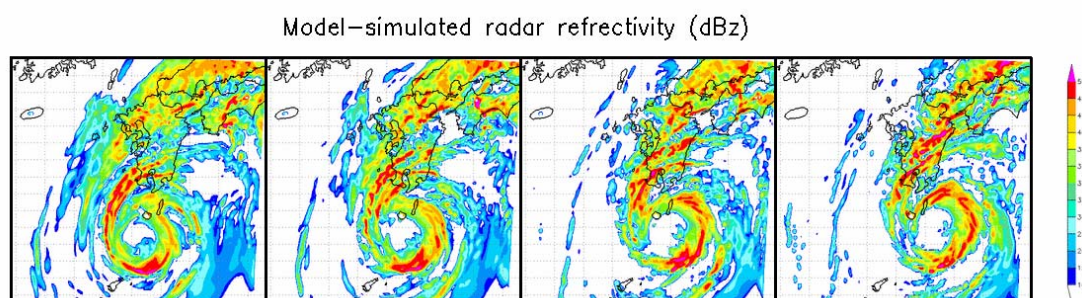


Fig. 5 model-simulated radar reflectivity from 16UTC to 19UTC on 13 October 1980 (at 850 hPa)

4.3 再現実験まとめ

MM5を用いて、1980年10月13日に宮崎平野で発生した竜巻の再現を試みた。再現実験の結果、ミニスーパーセルに類似した構造の積乱雲の中にメソサイクロンと思われる、鉛直渦度の大きい領域が再現された。これは、前述の千葉県茂原市で発生した台風9019号に伴う事例や、2006年に宮崎県延岡市で台風0613号に伴って発生した事例とも一致する。よって、台風8019号に伴い宮崎平野で発生した竜巻は、ミニスーパーセル中に存在するメソサイクロンから発生した可能性があることが分かった。また、今回のMM5による計算結果は、1999年に愛知県豊橋市で発生した台風9918号に伴う事例をARPSによって再現した結果（坪木ら、2000）と同様に、メソサイクロンが存在していた場所と上昇流が強い場所とがほぼ一致していた。このことから、本研究で扱った台風8019号の事例についても、比較的大きな渦度が鉛直流によって引き伸ばされることによって渦度がさらに増大し、竜巻を発生させるに至ったのではないかと考えられる。

また、本研究では空間的、時間的に解像度の粗い初期値を用いて再現実験を行った。しかし、初期値の解像度の粗さにも関わらず、解析に耐えうる程度の再現に成功した。このことから、解像度の粗いデータしか残されていない過去の事例についても解析が可能であることが分かった。

5. 感度実験

5.1 感度実験概要

比較のため、第4章で行ったMM5による再現実験の結果をコントロールランとし、以下の3実験を行った。

実験1．鰐塚山除去実験：宮崎平野南西部に広がる鰐塚山の除去を行った。宮崎平野はまったくの平らではなく200m以下の小さな起伏がある。そこで鰐塚山の高度を0にしてしまうのは問題であると考え、高度200m以上の部分を200mにし、台地に変えた。この地形を使い、MM5による計算を行った。

実験2．九州山地除去実験：次に九州山地が宮崎平野における竜巻発生に与える影響を調べるために、鰐塚山に行ったものと同様の処理を九州山地についても行い、この地形を用いてMM5による計算を行った。

実験3．海陸間粗度長差0実験：海陸間での粗度長の不連続が竜巻発生に与える影響を調べるために、地形はそのまま海陸の粗度差を0（陸地部分の粗度長を全て海のものに合わせる）にしてMM5による計算を行った。

いずれの実験も地形や粗度長以外はすべてコントロールランと同じ条件で計算を行った。

5.2 結果

(1)実験1

Fig 6 はコントロールランと鰐塚山を除去した場

合のそれぞれのモデルアウトプットから見積もられたレーダー反射強度を比較したものである。コントロールランでは鰐塚山付近でレーダー反射強度が大きくなるが、地形を除去した場合にはレーダー反射強度の強まりがほとんど起こっていないのがわかる。また、コントロールランでは鰐塚山付近で鉛直渦度、鉛直流ともに大きくなっているが、地形を除去した場合はそれが見られなかった (not shown)。

渦管は引き伸ばされることにより渦の強度が増すことが知られている (ストレッチング)。渦管が山を越えることによって、どのような現象が生じると考えられるだろうか。Fig 7 は考えられる 3 つの現象を示したものである。(a) は渦管がそのまま山を乗り越える場合で、渦管は引き伸ばされることがないため、ストレッチングによる強化が起こらない。(b) は、渦管が山に衝突することによって縮められ、逆に渦が弱くなる場合である。(c) は、(a) の場合と同様に渦管がそのまま山を乗り越えようとするのだが、下層が非常に湿っているため、少しの上昇で凝結が始まり、対流が強化され (つまり上昇流が発生して)、この上昇流により渦管が引き伸ばされる場合である。この場合、降水が発生するため、レーダー反射強度が強化されると考えられる。コントロールランでは、下層が非常に湿っていたため、鰐塚山に渦管が乗り上げるにより凝結が生じ、さらに凝結によって強化された上昇流により鉛直軸をもつ渦管が引き伸ばされ (ストレッチング)、この渦の引き伸ばし効果によってさらに強い鉛直渦が形成されたものと考えられる。地形を除去した場合も、下層は湿っていたが、地形が誘発する凝結やそれによる上昇流が起こらないため、渦の強化も起こらなかったものと考えられる。

また、鰐塚山がある場合、風が山を迂回するように吹き、風向に乱れが生じることによって風の水平シアが発生する。この水平シアによって鉛直軸を持つ渦が生じる可能性があると考えられる。一方、山を除去した場合、山を迂回する流れや山による風向の乱れが生じないため、鉛直軸を持つ渦の発生も起こりにくくなると考えられる。つまり、山を除去した場合、上述したストレッチングによる強化の対象となる渦管すら存在しにくい状況になっていたとも考えられる。

しかし、これらの影響は鰐塚山付近のみの局所的なものであった。実際に竜巻が発生した宮崎平野では、鰐塚山を除去したことによる変化がほとんど見られなかった。鰐塚山の影響はごく局所的なもので、台風自体にはもちろんのこと、宮崎平野にも影響はほとんど与えていないものと考えられる。台風に伴

って宮崎平野で発生する竜巻は、平野の南に位置する鰐塚山よりも、北西に位置する九州山地の影響を受けているのではないかと考えられる。そこで、九州山地を除去する次の実験 2 を行った。

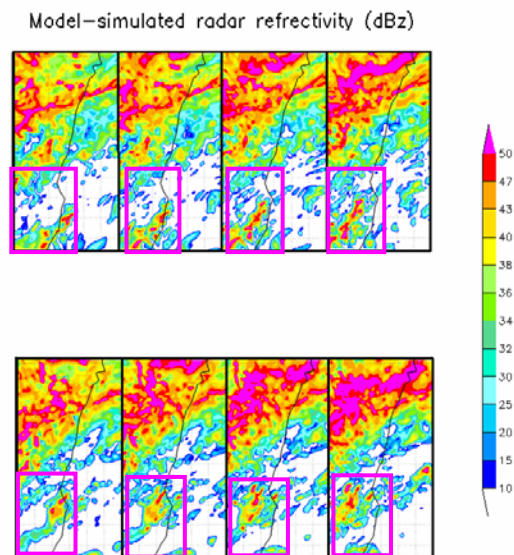


Fig. 6 model-simulated radar reflectivity of control run (upper) and experiment 1 (lower). Squares indicate experimental area.

(2) 実験 2

コントロールランでは 19:25 にメソサイクロンが再現された。この時刻について、コントロールランと九州山地除去実験の結果を比較した。Fig. 8 は、地表付近の風の様子を比較したものである。コントロールランでは、宮崎平野に吹き込む北よりの風も、日向灘から吹き込む東風も、地形の影響を受けて九州山地を迂回するような流れになっている (Fig. 8a)。しかし九州山地を除去した場合、この北よりの風と東風は、遮るものが無くなるため内陸部にそのまま吹き込むようになる (Fig. 8b)。その結果、コントロールランにおいて宮崎平野上を北東から南西にかけて横断していた風の収束線が、九州山地を除去した場合には北北東～南南西に向きを変えることによって宮崎平野上には存在しなくなった。風の収束線付近では、風が収束することにより発生した上昇流により渦が引き伸ばされると考えられる。この引き伸ばしにより鉛直渦度が強化され、竜巻を伴うメソサイクロンへと発達した可能性があると考えられる。しかし、数値モデル内で九州山地を除去した場合、この過程が宮崎平野上では起こらなかった。

以上のことから、「なぜ宮崎平野で台風に伴う竜巻が多発するのか」という問いに対しては、九州山地が風の収束域を宮崎平野上に作り出すことによって、宮崎平野に強い鉛直渦が発生しやすい環境を作り、その結果生じた強い鉛直渦から竜巻が発生する可能性があると言える。

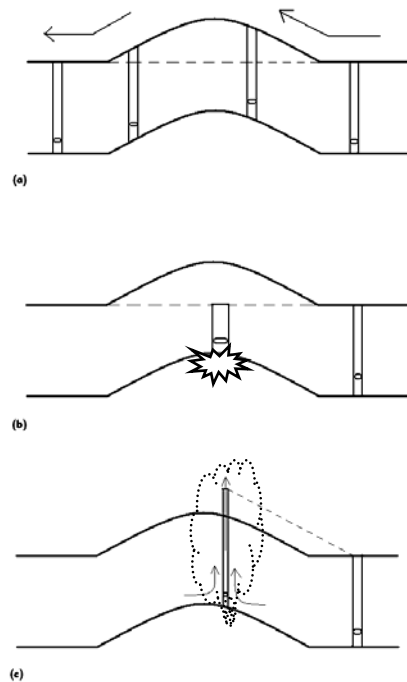


Fig. 7 Three things which may happen when vortex tube passes over the mountain. (a) The vortex-tube does not deform. (b) The vortex-tube is shortened when it collides with a mountain and is shortened. (c) The vortex-tube is stretched by upper wind flow due to convection.

(3)実験 3

Saito(1992)は、海陸間の粗度長に差があることが竜巻発生に影響を与えているのではないかと述べている。さらに吉野ら(2002)は、海岸線は粗度長の明瞭な不連続線であり、その結果として、地表面付近の風の場合にも影響が生じて、海岸線より海側では風速は大きく、陸側では風速は小さくなると考えられ、この風速差が竜巻発生要因となると示唆している。他にも多くの研究者が、海陸間の粗度長差が竜巻発生要因の一つであると言っている。このことを確認するために、数値モデル(MM5)を用いて、粗度長を変えた実験を行った。数値モデル内における、宮崎平野とその周辺(陸側)はほとんどが森林や耕作地であり、USGS 25-category による分類ではカテゴリ2~15にあたり、その粗度長は10~50cmである。海(カテゴリ16)の粗度長は0.1cmであるから、陸と海との粗度長差は約100~500倍となり、数値モデル内における海陸間粗度長差はかなり大きいといえる。MM5による感度実験の結果、海陸間の粗度長に差があるコントロールランでは海岸線を境にして風速が減少したが、海陸粗度差を0にした場合では風速にあまり変化が見られなかった。また、エクマン境界層の理論から、風速だけでなく風向も海岸線を境にして急激に変化するはずであるが、MM5による数値実験ではコントロールランと海陸間粗度長差を0にした場合とでは、あまり差が見られなかった。つまり、3次元モデルを用いた実験では、メソサイクロンの形成には、粗度長差があまり寄与しないということが言える。ただし、メソサイクロンの中での竜巻渦そのものの形成に対する粗度長差の影響については、より高分解能のモデルを用いた数値実験による検討が必要である。

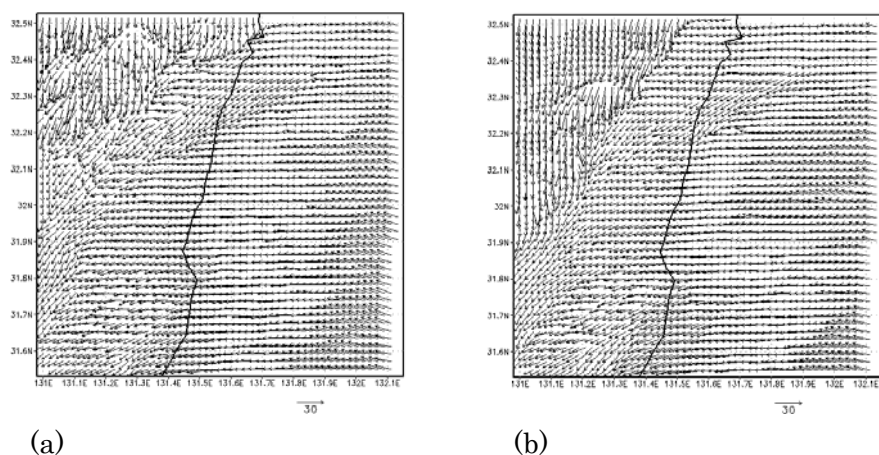


Fig. 8 Horizontal distribution of surface wind, (a) control run (b) simulation without Kyushu mountainous district

5.3 感度実験まとめ

第4章（コントロールラン）で、九州山地の風上側の対流圏下層に存在した収束線（下層収束線）が鉛直渦度の発達に少なからず影響を与えている可能性を示した。この下層収束線が生じる理由として、2つの理由が考えられる。1つめは「山岳によるブロッキング効果」である。九州山地を除去した実験2の結果を見ると、九州山地が除去されたことにより、東から吹き込む風が迂回しなくなり、風の収束線の位置が移動した。しかし、同様に山を除去した実験1（鰐塚山除去実験）では、宮崎平野に存在する下層収束線には影響が見られなかった。このことから九州山地によるブロッキング効果で、宮崎平野の対流圏下層に風の収束線が発生し、この収束線によって鉛直渦度が強化されることが分かった。2つめの理由は「海陸間の地表面粗度長差による影響」である。海陸間の粗度長差を0にした実験3の結果とコントロールランの結果との比較から、海陸間に粗度長差があることによって、陸側で風速が小さくなることが分かった。しかし、風向にはそれほど変化は見られず、宮崎平野に存在している下層収束線に対する影響もほとんど見られなかった。このことから、鉛直渦度の強化やメソサイクロンの発生に影響を与える下層収束線や低風速域の形成には「海陸間の粗度長差」より「九州山地によるブロッキング」による影響の方が大きいと考えられる。

6. 結論

本研究では、台風に伴い宮崎平野において竜巻が発生する過程、及び地形が竜巻発生に影響を及ぼすか否かを調べることを目的とし、台風8019号に伴う竜巻をターゲットとして、MM5による再現実験と3種類の感度実験を行った。

まず、MM5によって台風8019号とそれに伴い発生した竜巻を生み出したと思われるメソサイクロンを再現した。実際に竜巻が発生した時刻とのずれはあるが、ミニスーパーセルの中にメソサイクロンの基準となる 0.01 s^{-1} 以上の鉛直渦度を持つ領域が再現された。このメソサイクロンと思われる領域では、地上1000m付近にある鉛直渦度の強い領域が時間とともに下降して、地上に達する様子が見られた。

次に、宮崎平野で台風に伴う竜巻が発生しやすいのは地形の影響があるのではないかという予測のもと、3種類の地形データを用いてMM5による感度実験を行った。

1つ目は宮崎平野の南に位置する標高1100mほどの鰐塚山を除去した実験を行った。地形を除去した場合、鰐塚山付近でのレーダーエコー、上昇流、鉛

直渦度が小さくなったものの、宮崎平野には影響を及ぼさず、ごく局所的な影響を与えるに過ぎなかった。

2つ目は宮崎平野の北西に位置する標高1700m級の九州山地を除去した実験を行った。宮崎平野の北西部に北東～南西方向に伸びていた風の収束線が、九州山地が無くなったことにより北北東～南南西に向きを変えたことから、風の収束線が宮崎平野上には存在しなくなった。これにより、宮崎平野上の強い収束域が減少、それに伴う上昇流が弱まった。さらに上昇流が弱まったことで、鉛直渦度が大きい領域も減少した。つまり、九州山地は東風を迂回させることにより宮崎平野上に風の収束線を作り出し、そこから生まれる上昇流による渦の引き伸ばし効果によって鉛直渦度を増大させる、という影響を与えていたと考えられる。

3つ目は海陸間の粗度長差を0にした実験を行った。海陸間で粗度長の不連続があることによって、下層の風速が陸側で弱まることは分かったが、宮崎平野上の低風速域や下層収束線にはほとんど影響を与えていないことが分かった。

感度実験によって、宮崎平野が台風に伴って竜巻が発生しやすい環境にあるのは、九州山地が大きく影響している可能性があることが分かった。このことを確認するにはさらに多くの事例について解析する必要がある。

本研究では、竜巻を発生させたと考えられるメソサイクロンまで再現できた。しかし、竜巻自体の再現をすることはできなかった。竜巻自体を再現するためにはさらにネスティングを重ねて解像度を上げる（100m以下）必要があると考えられる。また、米国に比べて日本における竜巻の発生事例は非常に少ない。発生事例数の少なさを補い、日本における竜巻発生環境の指標や発生機構を見出すためには、最近の事例だけでなく過去の事例についても積極的に再現実験を行い、詳細な解析を蓄積する必要がある。今回初期値に用いたデータ（JRA-25）の水平解像度は 1.25° である。これはRANAL（水平解像度20km）など、最近の事例を数値モデルで計算するとき初期値として用いられているデータの解像度に比べるとかなり粗いものである。しかし、初期値のデータが粗くても、竜巻を発生させた環境や、発生機構について考察するのに耐えられる程度の再現ができることが分かった。JRA-25のデータを用いて過去の事例を解析し、日本における竜巻の事例解析を蓄積させていくことは大変意味があると考えられる。

参考文献

- 気象庁(2007) : 突風等短時間予測情報利活用検討会, 参考資料 1.
- 小倉光義(1997) : メソ気象の基礎理論, 東京大学出版会, 215pp.
- 小元敬男(1982) : 台風に伴う竜巻について, 天気, 第 29 巻, 9 号, pp. 91-104.
- 瀬下慶長・安斎緑郎・笠村幸男(1980) : 台風 7912 と台風 7916 によって発生した宮崎市周辺のたつ巻, 天気, 第 27 巻, 6 号, pp. 13-21.
- 坪木和久・武田喬男(2000) : 台風 9918 号外縁部で発生した 1999 年 9 月 24 日の東海地方の竜巻とメソサイクロン, 天気, 第 47 巻, 11 号, pp. 15-21.
- 東佑次・葛葉泰久(2007) : T0514 期間中における地形と降雨発生機構の関係に関する研究, 日本気象学会春季大会講演発表・配布資料.
- 吉野純・石川裕彦・植田洋匡(2002) : 台風 9918 号により東海地方にもたらされた竜巻に関する数値実験, 京都大学防災研究所年報, 第 45 号, pp. 369-388.
- Jimmy Dudhia, Dave Gill, Kevin Manning, Wei Wang and Cindy Bruyere(2005) : PSU/NCAR Mesoscale modeling system tutorial class notes and users' guide(MM5 Modeling System Version3), (<http://www.ucar.edu/mm5/documents/tutorial-v3-notes.html>), pp.4-14.
- Gentry, R. C. (1983) : Genesis Of tornadoes associated with hurricanes, Mon. Wea. Rev., Vol. 111, pp.1793-1805.
- Hill, E. L., Malkin, W. and Schulz, W. A., Jr.(1966) : Tornadoes associated with cyclones of tropical origin-practical features, J. Appl. Meteor., Vol. 5, pp. 745-763.
- McCaul, E. W., Jr. (1991): Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments, Mon. Wea. Rev., Vol. 119, pp.1954-1978.
- Niino, H., Fujitani, T. and Watanabe, N. (1997) : A statistical study of tornadoes and waterspouts in Japan from 1961 to 1993, Journal of Climate, Vol. 10, pp.1730-1752.
- Novlan, D. J. and Gray, W. M. (1974) : Hurricane spawned tornadoes, Mon. Wea. Rev., Vol. 102, pp.476-488.
- Saito, A., (1992) : Mesoscale analysis of typhoon-associated tornado outbreaks in Kyushu island on 13 October 1980, J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 70, pp. 43-55.
- Suzuki, O., Niino, H. and Nirasawa, H. (2000) : Tornado-producing mini supercells associated with typhoon 9019, Mon. Wea. Rev., Vol. 110, pp.504-520.

Numerical Simulation of Tornadoes Associated with Typhoon 8019

Wakako SATO* and Hirohiko ISHIKAWA

* Nippon Telephone and Telegraph Corporation

Synopsis

On 13 October 1980, Typhoon 8019 spawned five tornadoes in Miyazaki Plain. In this study, we attempted to simulate the mesocyclone that have generated these tornadoes by using regional climate community model PSU/NCAR MM5. The spatial resolution of initial input data was very coarse, however, the MM5 simulation successfully reproduced mesocyclone that might have triggered off tornadoes. The results of high-resolution simulation indicated that Kyushu-mountainous district induced the low-level strong horizontal convergence line and it amplified the vertical vorticity on Miyazaki plain. By contrast, differences of roughness length between ocean and land didn't have significant influence on vortical strengthening and generation of mesocyclones in 3dimensional model.

Keywords: tornado, typhoon, numerical prediction model