

19 平成 17 年 1 月 27 日に読谷村で発生したノン・スーパーセル型竜巻について

出原幸志郎・外間宏信・新垣秀治・大田潤・裁吉信（沖縄気象台）

1 はじめに

平成 17 年 1 月 27 日 17 時 10 分頃、読谷村の沿岸地区で竜巻が発生した。現地調査の結果、竜巻の幅は 30～50m、強さは F1 で北東方向に約 1.2km 移動していた。

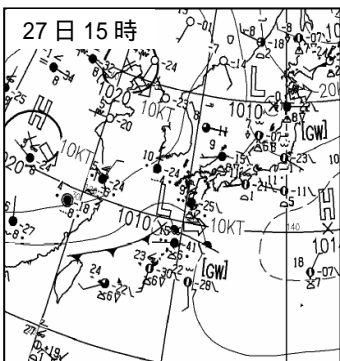
本稿では、この竜巻の発生した環境場の特徴や発生構造について、実況資料及び気象庁非静力学モデル（以下 JMANHM）による解析結果を述べ、その監視方法について考察する。

なお、本調査は平成 19 年度沖縄管内共同調査「竜巻やダウンバースト等の突風現象の監視技術及び予測可能性について」の一環として実施し、また、航空気象業務に資する調査である。

2 総観場の特徴

第 1 図に 27 日 15 時の地上天気図、第 2 図に同日 09 時の 850hPa 面の高層天気図、第 3 図に同日 17 時 07 分頃のレーダーエコー図を示す。

本島西海上には、低気圧からのびる寒冷前線があり、約 40km/h で東進し同日 20 時頃に沖縄本島を通過した。また、寒冷前線の暖域内には約 15km/h で東進する線状に分布した対流セルがあり（以下 ラインエコー）、竜巻は、このラインエコーが本島を通過する際に発生した。また、那覇の高層資料から、09 時の SSI は 1.5 と大気の成層状態は不安定であり、21 時には SSI は -2.0、自由対流高度は約 940hPa となり、寒冷前線通過時にか

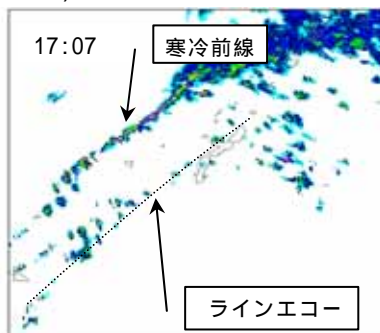


第 1 図 地上天気図



第 2 図 850hPa 高層天気図

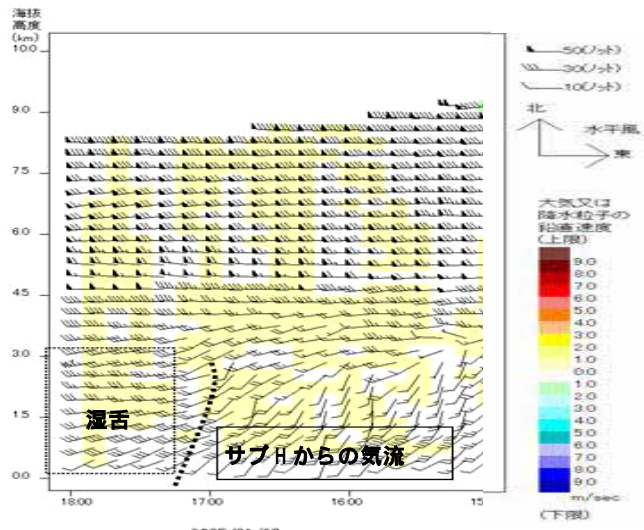
けて更に不安定度は強まっていた（図略）。第 2 図から、暖域場にはサブ H を回り込む南西の気流（点線）と華中からの西よりの気流（実線）の合流場がみられ、両者共に湿潤な気流（ $T-TD < 3$ ）である。



第 3 図 レーダーエコー

また、西よりの気流は 700hPa 面では湿域に対応しており（図略）、湿舌の特徴を備えている。

暖域内の合流場がシアラインに対応するかどうかを確認するため、第 4 図に恩納村にある（独）沖縄亜熱帯計測技術センターのウィンドプロファイラ（以下 NICT 沖縄 WPR）をみると、27 日 17 時 10 分頃にシアラインの通過が認められた。また、850hPa と 700hPa 面（略）の高層天気図を考慮すると、シアラインを構成する気流はサブ H を回り込む南西の気流と西よりの湿舌であると考えられる。



第 4 図 NICT 沖縄 WPR 観測値 点線：シアライン

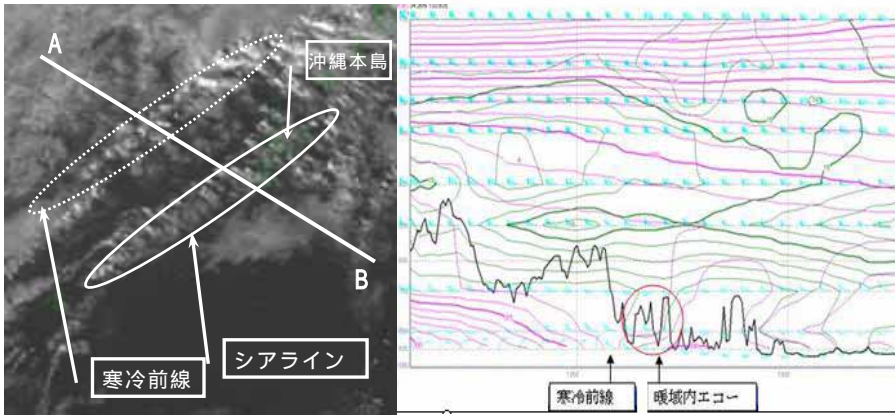
次にシアラインの形成の要因をみるため、第 5 図に衛星雲画像と A から B に沿った雲頂高度及び数値予想資料から得られた相当温位、風、湿数の鉛直分布を示す。

暖域場のシアラインに対応する対流雲域は赤丸で囲んだ領域に対応し、気塊の追跡結果（省略）から、相当温位 325K ($T-TD < 3$) の西よりの湿舌と相当温位 330K ($T-TD < 3$) のサブ H の縁辺流である南西風の合流場に対応することが再確認できた。

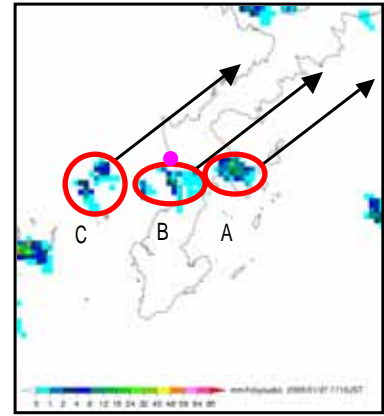
以上の結果から総観場の特徴をまとめると次のようになる。

竜巻は暖域場のシアラインの通過に伴い発生している。

シアラインは、サブ H の縁辺流である南西の気流と華中から流入する湿舌に対応する西よりの気流により強化される。



第5図 衛星雲画像と雲頂高度、相当温位、風、湿数の鉛直分布(27日17時)



第6図 レーダー画像(17時07分) 竜巻発生場所(印)

3 竜巻の発生構造

次に、どのようなメカニズムで竜巻が発生したかを考察するため、エコー強度断面図やドップラーレーダー(以下 DRAW)を用いて解析をした。

第6図は第3図を竜巻発生地点を中心に拡大したものである。竜巻発生時前後に発生場所付近を3つの対流セル(以下、それぞれをセルA,B,Cとする)が40~50km/hで北東進しており、エコー強度は共に32~48mm/h、頂高度は3~4km程度であった。また、竜巻の発生時刻を考慮すると最も近くを通過したのはセルBである。

竜巻が発生するには、地表面付近のシアの存在、つまり鉛直軸をもつ渦(以下 鉛直渦)の形成と鉛直渦を持ち上げる上昇流の存在が必要である。

以下はこれらの条件について検証する。

(1) 地表面付近のシアの存在

ア 暖域場のシアラインに伴う渦度

NICT沖縄WPRの観測値からシアライン上の渦を計算した。竜巻が発生した時間帯(17時00分と17時10分)の値を用い、高度450mの渦度を計算すると、 10^{-3} から $10^{-4} s^{-1}$ 程度のオーダーとなり、渦度を対流セルの頂高度4kmまで持ち上げたとしても 10^{-2} から $10^{-3} s^{-1}$ 程度で竜巻とはならない。

イ 対流セルの相互作用

3つの対流セルは15時には久米島の南海上に存在し、盛衰を繰り返しながら北東進し、本島中部

を通過した。

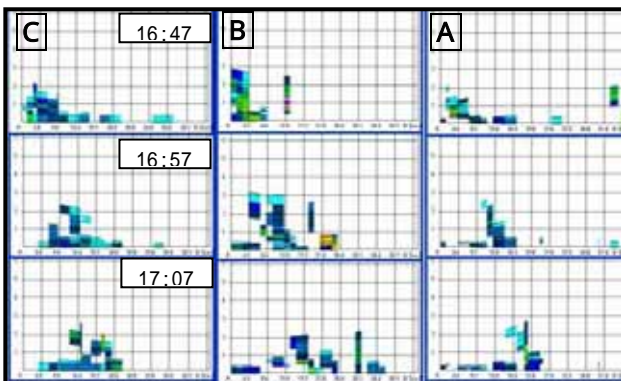
第7図にエコー強度断面図を示す。16時47分では、セルBが衰弱し、セルAとCが発達中である。その後17時07分以降は逆にセルBが発達しセルAとCが衰弱傾向にあった(略)。このため対流セルの発達・衰弱の過程でセルの下に上昇流と下降流が発生しており、これに何かしらの作用が加わり地表面付近にシアが形成され渦が強化した可能性も考えられる。

(2) 上昇流の存在

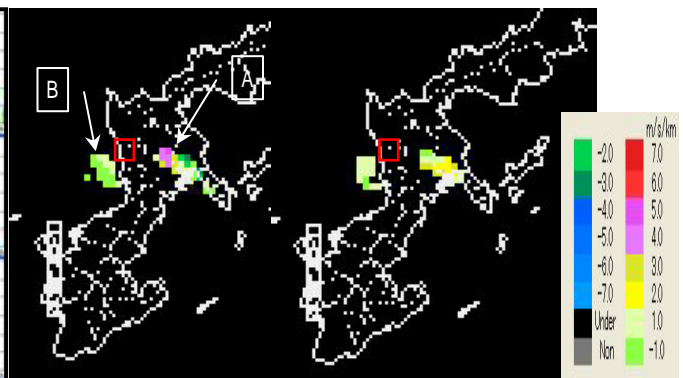
第8図にDRAWからみた16時56分の高度約300mにおける対流セルAとBの距離方向シアと方位方向シアを示す。

セルBは距離方向シアが負(収束つまり上昇流に対応)、方位方向シアが正(発散つまり下降流に対応)、方位方向シアが負に対応している。またエコー強度から、セルAは16時50分頃にピークを迎えそれ以降は次第に弱まっていた(図略)。この特徴は、第7図でみたセルA、Bの特徴ともほぼ一致している。

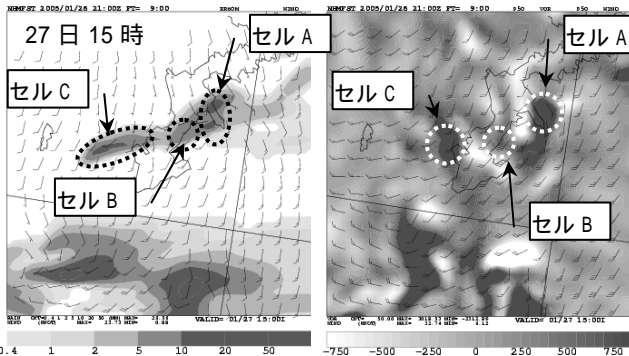
このことは、セルAの衰弱過程で発生した下降流により強化された暖域場のシアライン上の渦が東進してきたセルBにより引き上げられ竜巻となった可能性を示唆している。



第7図 各対流セルのエコー強度鉛直断面図



第8図 距離方向シア(左) 方位方向シア(右)は竜巻発生地点(16時56分)



第9図 左:地上(降水・風) 右:950hPa面(渦度・風)
4 JMANHM による再現実験

JMANHM の再現実験は、次の目的をもって行った。

実況解析で得られた環境場の特徴及び発生メカニズムの推定が再現実験でも得られるか。

地形効果による渦形成の可能性は無いのか。

実験は「JmaNhm 統合環境 CGI on ミニスーパー」を用いて、MSM の 27 日 3 時を初期値として格子間隔 5km で計算し、更に計算された 5kmNHM の 27 日 6 時を初期値として格子間隔 2km で計算を行った。

パラメータの条件は、「CGI 設定のデフォルト」、「地表面を全て海面とする」、「ドライモデル」、「雲物理過程のみを使用し水蒸気拡散（以下 TMD）を弱める」の 4 つのパターンで行った。

第 9 図に最も再現のよかった「雲物理過程のみを使用し TMD を弱める」の結果を示し、実況解析で得られた特徴と比較する。

(1) 降水域

竜巻が発生した 27 日 17 時頃の雨雲の分布（第 6 図参照）の再現は、27 日 15 時の再現結果が最も良かった。南に 10km 程度の位置ズレと約 2 時間の時間ズレがあったが許容範囲と考える。

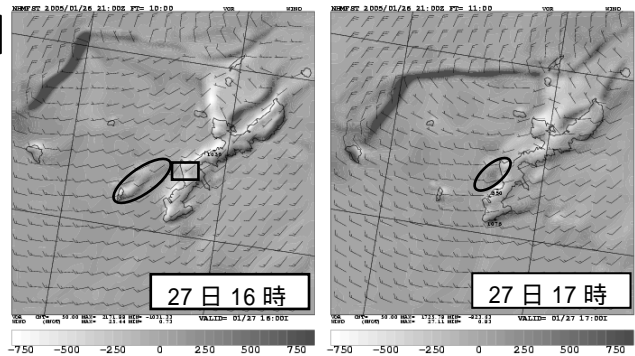
実況では 3 つの降水セルが並んで北東進していたが、モデルでも実況にほぼ対応した降水域が見られた。西側の降水域が第 6 図の対流セル C、東側の降水域が対流セル A、両者に挟まれた降水域が対流セル B に対応する。また、16 時の結果（図略）からセル A と C が衰弱し、セル B が発達したことが示され、第 7 図で示されたセルの盛衰を再現している。

(2) 渦度分布の特徴

対流セル A、C に対応する正渦の値は、地上に比べ 950hPa 面で大きくなっており、強い上昇流の存在を意味している。また、対流セル A の西側には下降流に対応した負渦度がみられる。対流セル B には上昇流がみられないが、下層に正渦度がみられ、発達の兆候と考えられる。

(3) 風の鉛直分布

シアラインの前面は厚さ約 1.5km (850hPa) までサブハイを回り込む南よりの暖湿流、後面は厚



第10図 ドライモデル 地表面の渦度
さ 3km (700hPa) まで西よりの暖湿流が再現され

(図略) これは第 4 図の NICT 沖縄 WPR で見られた特徴と類似している。

(4) ドライモデルによる感度実験

地形効果による地上渦形成の可能性を調べるため水蒸気を取り扱わないドライモデルによる感度実験を行った。その結果を第 10 図に示す。

本島付近は南西風が卓越しており、東海岸に沿って正渦、西海岸に沿って負渦が形成されている。これは陸面での粗度の強まりによるものである。

27 日 16 時には慶良間諸島にあった正渦がシアラインの通過で本島西海上へ引き剥がされている（楕円）。また、竜巻発生地点（四角）では陸面粗度による負渦が弱い、これは同地点が平坦で畑が多く、粗度が弱い地形（図略）であることと対応している。

27 日 17 時には、正渦は竜巻発生地点付近を除き消滅している。これは正渦が海岸線に沿った負渦との合流により弱まったことを意味している。このことから、発生地点が平坦部に当たり、移流してきた正渦が維持されたことも竜巻発生の要因の一つと考えることができる。

5 まとめと考察

今回の読谷村の竜巻は、シアライン通過に伴い発生したものである。また、発生メカニズムは、シアライン近辺の対流セルが衰弱し、その下降流によりシアラインが強化され、正の鉛直渦が強まった。そこに別の対流セルが接近し、その上昇流で渦が引き上げられ竜巻が発生したと考えられる。

暖域内での竜巻発生は過去にも多く見られる。今回の解析により、暖域内でのシアラインの存在と平らな地形、シアライン近辺での対流雲の発達・衰弱が相互に関連して竜巻が発生したと推定されることから、今後、同様な着目点から調査を進めれば、監視の方法を見出せる可能性もある。謝辞

(独)沖縄亜熱帯計測技術センターのウィンドプロファイラのデータを利用させていただいたことに感謝申し上げます。