

2012年5月6日茨城・栃木の竜巻に関する調査研究報告会

1. はじめに

コンピーナー：石原正仁*

2012年5月6日に茨城県・栃木県の常総市・つくば市、真岡市・益子町・茂木町・常陸大宮市、及び筑西市・桜川市の3つの地域に発生した竜巻群は各地に甚大な被害をもたらした。特につくば市では1名の方が亡くなった。亡くなられた方のご冥福を心からお祈りするとともに、被害を受けられた皆様にお見舞い申し上げます。

竜巻発生直後から多くのグループが被害調査やモデル研究などに着手した。気象学会気象災害委員会では、気象学会春季大会期間中の5月27日にこの竜巻を中心の話題とする研究報告会を緊急に開催した。

近年に顕著な被害をもたらした竜巻として、2006年9月17日の宮崎県延岡市及び同年11日7日の北海道佐呂間町における竜巻があげられる。前者は台風レインバンド内、後者は寒冷前線付近といった発生場の違いはあるが、竜巻にともなう激しい突風によってそれぞれ3名と9名の方が亡くなった。これらを契機として、気象庁では気象レーダーのドップラー化を促進するとともに、レーダー観測結果と数値予報結果の組み合わせにもとづき、2008年3月から「竜巻注意情報」を、また2010年5月からは「竜巻発生確度ナウキャスト」の提供を開始し、竜巻などの激しい突風の発生について注意喚起を行っている。その一方で、わが国における竜巻の発生環境や発生メカニズムは十分に解明されるには至っていない。

今回は竜巻の発生からわずか3週間であったにもかかわらず、各講演者の精力的な活動によって報告会を開催することができた。竜巻研究の現状、竜巻の気象学的現地調査、レーダー観測結果、数値シミュレーション、被害調査にもとづく下層風の推定、建物被害の実態、ポテンシャル予報の可能性など、竜巻につい

て多角的な視点から報告された。

多くの住民の方々から竜巻についての生々しい映像が提供されたことは、今回の竜巻発生後の特徴のひとつである。被災地の各自治体や気象庁、さらに現場近くに立地する気象研究所、防災科学技術研究所、国土技術政策総合研究所、建築研究所等では、各機関のウェブサイトにも専用ページ等を設け、収集した資料や解析結果の速報を一般に提供している。今後これらの資料が活用され、多面的な竜巻研究が進展することが期待される。

以下に報告会当日の9名の方の講演及び講演後の討論の概要を示す。なお竜巻の発生した2012年5月6日を「当日」と記す。

2. 竜巻研究の課題と今回の竜巻の特徴

新野 宏 (東京大学大気海洋研究所)

竜巻は積雲や積乱雲などの対流雲によって作られる激しい鉛直軸まわりの渦である。わが国では年間約20個発生しており、単位面積あたりの発生数は、米国の3分の1程度となっている。我が国の竜巻は、季節的には9～10月に、時刻的には10～18時に、また地理的には沖縄などの島嶼、沿岸部、関東平野などで発生が多いが、全国どこでもいつでも発生すると考えた方がよい。しかしながら、その発生範囲は狭く、継続時間も短いため、竜巻の構造や発生機構には現在も未解明の点が多い。

竜巻の発生機構としては現在のところ、局地前線に伴うものと、スーパーセルと呼ばれる特殊な積乱雲(ストーム)に伴うものがあると考えられている。前者では、局地前線に伴う水平シア流がシア不安定を起こして生じた直径数kmの渦が、上空に生じた対流雲の上昇流で引き延ばされ、竜巻へと発達する(Wakimoto and Wilson 1989)。一方、後者ではストーム自らが、メソサイクロン(MC)と呼ばれる直径数kmの回転する上昇気流を作り出し、竜巻を発生させる。強い竜巻の多くはスーパーセルによって発生する。

* Masahito ISHIHARA, 京都大学.
ishihara.masahito.7u@kyoto-u.ac.jp
© 2013 日本気象学会

スーパーセルの力学は比較的良く理解されている。スーパーセルは大気の成層が不安定で、環境場の風が強い鉛直シアを持つときに発生する。特に北半球では、下層で暖湿な南寄りの風、中上層で乾いた西風が吹き、高度と共に風向が時計回りに変わるようなときに発生しやすい。米国ではこのような環境が広い範囲で整うと、スーパーセルが多数発生し、1日のうちに竜巻が100個発生したりする「竜巻大発生」が起きることがある。このように、スーパーセルが起りやすい環境場は理解が進んでいるので、日々の数値天気予報でそういう環境場が予測される時は、竜巻への注意を呼びかける根拠の1つとなる。更に、米国では、ドップラーレーダーによりMCが検出されたり、MCによって作られるフック状のレーダーエコーが見られたときには、竜巻警報が発せられる。日本でもMCの情報等をもとに、気象庁が竜巻注意情報を出している(瀧下 2009)。しかしながら、1990年代からドップラーレーダーの全国展開が進んでいる米国でも、MCが確認されたときに竜巻が発生する確率は20%程度にすぎない。このことは、MCの存在だけでは竜巻の発生に十分ではなく、降水域から吹き出す冷氣流の先端にあたるガストフロントなど地表近くの気流系が重要な役割を演じている可能性があり(Noda and Niino 2005; Markowski *et al.* 2008; Mashiko *et al.* 2009)、現在も観測や数値シミュレーションにより活発な研究が進められている。一方、数値シミュレーションでは、竜巻発生直前に、雲内の高度1kmでMCに伴って 40 ms^{-1} を超える強い上昇流が見られており、地表付近の鉛直渦度の引き延ばしを通して、竜巻の発生に寄与していると考えられている(例えばNoda and Niino 2005)。

今回の事例は、線状降水システムに伴って、複数の竜巻がほぼ同時に発生した点で、1992年12月8日の茨城県千代田町(当時)・石岡市の竜巻に似た面もあるが、3つの竜巻がほぼ同時

に発生し、いずれも15 km以上の被害跡を生じた点で、過去に例を見ない。他にも、竜巻発生地点から15 kmしか離れていない気象研究所の二重偏波ドップラーレーダーにより、MCだけではなく竜巻渦が観測され、竜巻による飛散物のレーダー観測特性が観測されたこと(4節:山内ほか)、数値シミュレーションによりスーパーセルと竜巻が良く再現されたこと(6節:加藤ほか)、これまでになく多くの竜巻の写真・動画が撮られたこと(8節:佐々・宮城)、基礎を上にした形で倒壊した家屋があったこと(9節:喜々津)など、我が国の竜巻として前例を見ない貴重な資料が揃っており、これらの解析により竜巻研究の進展が期待される。

3. 気象庁による今回の竜巻の調査結果概要

鈴木 修(気象庁観測システム運用室)

気象庁で竜巻の発生直後から水戸地方気象台・宇都宮地方気象台・福島地方気象台・東京管区気象台・仙台管区気象台・気象研究所が現地調査と解析を行い、その結果を5月7, 11, 16日及び6月8日に気象庁ホームページ「報道発表資料」に掲載した(気象庁2012)。

調査によると当日、次の4つの竜巻の発生が確認された。① 12時35分(以下、日本時間)頃に発生した



第1図 2012年5月6日に発生した4つの竜巻のうち関東で発生した3つの竜巻の位置(気象庁2012)。

茨城県つくば市・常総市の竜巻, ② 12時40分頃に発生した栃木県真岡市・益子町・茂木町・茨城県常陸大宮市の竜巻, ③ 12時30分頃に発生した茨城県筑西市・桜川市の竜巻, ④ 11時20分頃に発生した福島県大沼郡会津美里町の竜巻. 第1図は①～③の竜巻の発生地点である.

常総市からつくば市にかけて発生した竜巻は藤田スケール (Fスケール) では2 (最終的には, 家屋被害から3へ修正) と判定され, 東京レーダーによる親雲の観測から, この親雲がスーパーセルと呼ばれる発達した積乱雲に見られるMC及びヴォールト (Vault, 丸天井) 構造などの特徴を有していたことが判った. また, この親雲はアメダスによる観測から, 暖かい南寄りの風の領域と冷たい北寄りの風の領域との境界付近に位置していたことが判った.

4. 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

山内 洋・小司禎教・足立アホロ・佐藤英一
(気象研究所)

当日, 茨城県常総市からつくば市にかけて被害をもたらした竜巻について, 気象研究所のCバンド固体素子二重偏波ドップラーレーダー (気象研レーダー) の観測に基づいて解析した. 竜巻の発生位置は気象研レーダーから約15 kmの近距離に位置していたため, 竜巻の親雲だけでなく竜巻渦もレーダーに捉えられた. レーダーの観測モードは, 仰角 0.5° (高度約0.1 km) から仰角 18° (高度約4 km) までの複数仰角のPPIと西北西方向のRHIであった.

この竜巻の親雲は典型的なスーパーセルの特徴を備えていた. 親雲の南西部には, 渦度約 0.015 s^{-1} , 直径約5 kmで, 少なくともPPIで観測していた最大の高度 (約4 km) までの深いMCがあり, その南西側がフックエコーになっていた. またフックの内側の弱いエコー域の上部を覆う強いエコー (ヴォールト構造) も確認できた. 親雲の水平スケールは約15 km, エコー頂は約14 kmであった. アンヴィルの高度は約10 kmであり, そこからエコー頂までの大きなオーバーシュートは, 非常に強い上昇流の存在を示していると考えられる.

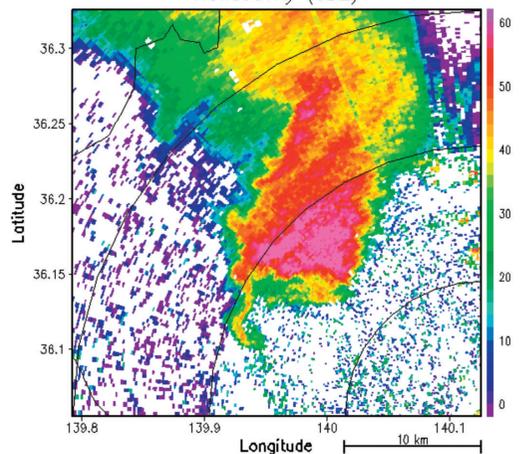
竜巻渦と考えられる, 数百mスケールの渦を表すドップラー速度の分布は, フックエコーの先端部に現れた (第2図). ドップラー速度の極大・極小点から見積もった渦の直径は $0.5 \sim 1 \text{ km}$ 程度であり, 渦度

は 0.15 s^{-1} 程度であった. この渦は, 12時35分から12時53分にかけて2分毎の仰角 0.5° のPPI観測に捉えられた. 発生時刻から消滅時刻までの軌跡は, 地上被害の発生から終了までの分布とよく対応していた. 距離17 kmを18分で移動していることから, 移動速度は約 60 kmh^{-1} と見積もられた.

さらに, 竜巻渦の鉛直構造もわかった. この渦は, MCの内部に, MCと同様に少なくとも高度約4 kmまで存在していた. 上空では, 渦の中心の反射強度が低く, 管状になっていた. また進行方向に向かって傾いていることもわかった.

竜巻渦に対応するレーダーエコーに対して, 通常の降水エコーとは異なる, 特徴的な二重偏波情報が得られた. まず渦パターン周辺の偏波間相関係数 ρ_{hv} は低かった. これは, レーダーの電波を散乱したターゲット (散乱体) の一様性が低いことを示しており, 散乱体が地上から巻き上げられた飛散物であった可能性を示唆する. さらに, 散乱体の扁平さを表す反射因子差 Z_{DR} は渦の中心近くで小さく, 周囲で大きかった. 飛散物であれば, 風の抵抗を受け易くなるよう, 広い面を下向きに落下すると考えられ, その場合高い Z_{DR} が観測されることが期待される. 中心付近で Z_{DR} が低いことは, 飛散物が強い遠心力を受けた広い面を斜め横に向けているか, あるいは激しい気流中で回転してさまざまな方向を向いていることを示しているのかも知

MRI-C 2012 05/06 12:35:10JST PPI EL= 0.5 deg
Reflectivity (dBZ)



第2図 気象研究所の二重偏波ドップラーレーダーが捉えたスーパーセルストームとフックエコー. 5月6日12時35分, 仰角 0.5° の反射強度の分布.

れない。これら二重偏波情報の特徴は、Ryzhkov *et al.* (2005) の報告と総合的である。

このような竜巻渦における二重偏波情報の特徴は、渦が接地したか否かの判断に利用できる。また、ドップラー速度のパターンで渦を検出する際よりも低い解像度で竜巻を認識できる可能性があることから、より遠方における竜巻の検出に役立つ可能性がある。

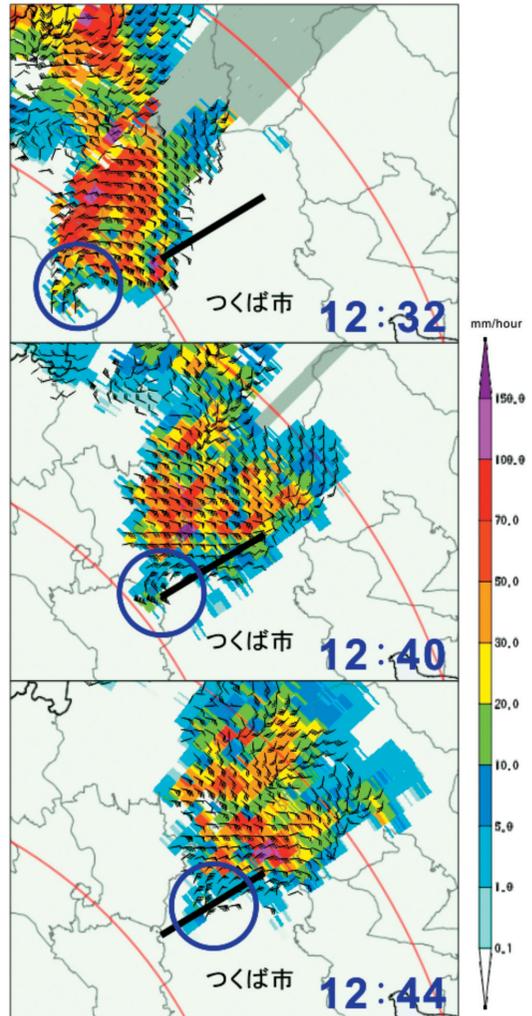
5. 2012年5月6日つくば市の竜巻における親雲の構造について

鈴木真一・前坂 剛 (防災科学技術研究所)

当日に常総市からつくば市にかけて多くの被害をもたらした竜巻について、その竜巻をもたらしたと考えられる積乱雲の構造を調べるために、気象レーダの観測データを解析した。

まず、埼玉県さいたま市に設置されている国土交通省 X バンド MP レーダの観測データから、12時32分の高度1.5 km における降雨強度を解析した。この時刻は竜巻の発生する直前にあたると考えられる。このとき、積乱雲に伴う降水は下妻市から八千代町で強く、降水強度は最大で100 mm/h を超えていたが、この強い降水域の南西側に鉤状に突き出た弱い降水分布が見られた。この「フックエコー」は、積乱雲全体が東北東へ移動するに従い、竜巻の被害があった線状の領域の上を通過していった。さいたま市の X バンド MP レーダと千葉県柏市の気象庁レーダの2台のレーダのデータから風のデュアル解析を行い、雲に相対的な風の水平分布をみると、フックエコーの場所に反時計回りに回転する風場が解析された。この位置での相対渦度は $2 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ ほどで、MC と呼べる大きさの渦度であった (第3図)。

次に、さいたま市レーダで観測された12時35分における反射因子差 Z_{DR} を高度 1 km でみた (図略)。降水粒子の粒径分布が Marshall-Palmer 分布に従うような場合は、反射強度 Z_H が大きければ Z_{DR} も大きくなるが、降水域の南側の Z_H の水平傾度の大きい位置で Z_{DR} が 4 dB を超える帯状の領域が確認された。このような Z_{DR} の大きな領域が、積乱雲の下層で進行方向の右側の縁に沿って見られる分布は Z_{DR} arc と呼ばれ、スーパーセルによく見られる特徴である (Kumjian and Ryzhkov 2008)。このような分布は、落下する雨滴が下層の環境風の影響を受けて、大きな雨滴が降水域の南側縁辺に集中することによって形成されており、積乱雲に相対的なヘリシティ (SREH) の値が



第3図 2012年5月6日12時32分、40分、44分における降雨強度 (カラスケール; 国土交通省 X バンド MP レーダで観測されたもの)、及び積乱雲の移動に相対的な風向・風速 (矢羽根)。矢羽根の向きは風向を示し、旗、長棒、短棒はそれぞれ 10 ms^{-1} 、 2 ms^{-1} 、 1 ms^{-1} の風速を示す。黒い太線は被害調査から推定された竜巻の移動経路を示し、青丸はフックエコーの位置を示す。

大きな環境場であるときに Z_{DR} arc が現れる (Kumjian and Ryzhkov 2009)。

また、この時刻のフックエコー周辺の Z_{DR} の値を見ると (図略)、4 dB 以上の領域が直径 4 km 程度、高さ 6 km の円柱状に分布していることが分かった。このような特徴は Z_{DR} column と呼ばれ、強い上昇流の

存在が示唆されるものである (Kumjian and Ryzhkov 2008)。レーダの観測データを5分毎の3次元データに内挿したデータセットを作成し、高度5 kmにおける Z_{DR} の時間変化をみると、12時20分から12時55分にかけて3 dB以上の値がフックエコーの見られた位置の上空で見られた。これは竜巻の発生した時刻と対応しており、その前後40分程度の期間に Z_{DR} columnが発達していたことを示している。

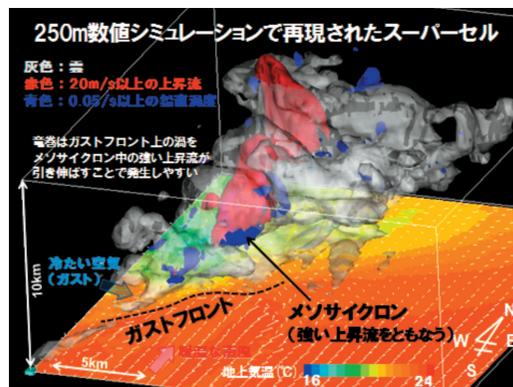
これらのレーダ観測の解析結果から、竜巻の発生した前後40分にわたって、積乱雲はスーパーセルでよく見られる特徴を持っていたことがわかった。しかしながら、このような構造の持続時間は1時間弱程度であることから、積乱雲はミニスーパーセルと呼ぶことが妥当であると考えられる。

6. 発生環境場、佐呂間竜巻との比較と250m/50 m 数値シミュレーションの結果

加藤輝之・津口裕茂・益子 渉 (気象研究所)

5月5日～6日にかけて、関東上空500 hPaの気温は約 -18°C であった。一方、日射の影響で地上の気温は上昇して 25°C を超え、上下の温度差が40度以上になり、大気状態が非常に不安定だった。また、6日12時前後の短い時間帯に限っては、強い南風により、日本列島南岸で作られたメソスケールの非常に湿った空気(比湿 $\sim 12\text{ g kg}^{-1}$)が約50 kmの幅を持って関東平野中部に流入していた。これらにより、対流有効位置エネルギー (CAPE) が 2500 Jkg^{-1} に達するとともに、高度500 mの気塊を持ち上げた場合の自由対流高度までの距離が500 m以下となり、積乱雲が発生・発達しやすい環境場となった。このときの水蒸気量はこの時期としては非常に多い。さらに、この下層の強い南風に上空の強い南西風が関東地方上空で重なったことで、SREHが $250\text{ m}^2\text{s}^{-2}$ に達し、強い竜巻をもたらすスーパーセルが発生しやすい状況であった。なお、前日(5日)は、6日と同様、地上と上空500 hPaの温度差は40度以上であったが、水蒸気量はその半分の約 6 g kg^{-1} であったために、関東山地などの山岳部を除いて、自由対流高度が算出できず、積乱雲が発生しにくい状況であった。これらのことから、上下の温度差だけでなく、下層に非常に湿った空気が流入したことが竜巻をもたらした積乱雲発生の鍵であったことがわかる。

今回のケースの発生環境場を2006年11月7日に北海道佐呂間町で発生した竜巻のケースと比較した。共通



第4図 250 m 数値シミュレーションで再現されたスーパーセルストーム。

点として、竜巻をもたらした積乱雲の発生位置の西側に山地(山脈)があり、下層の湿った空気が海上から流入しており、上空に向かって時計回りに回転して強い風が吹いていたことが挙げられる。これらは竜巻をもたらす積乱雲が発生しやすい場所および条件を示している。佐呂間のケースではCAPEが 500 Jkg^{-1} 以下である一方、SREHが $500\text{ m}^2\text{s}^{-2}$ に達していた。このことは、今回の方が大気不安定度が大きく、逆に佐呂間のケースの方が下層に渦が作られやすい大気状態であったことを示している。

気象庁非静力学モデルを用いた水平分解能250 mの数値シミュレーションを行った結果、竜巻をもたらした積乱雲に対応するものが観測より約20 km北側に再現された(第4図)。その鉛直断面をみると、強い竜巻をもたらすスーパーセルの構造(30 ms^{-1} を超える強い上昇流、上昇域で丸天井といわれる雨粒やあられなどの降水物質が少ない領域)がみられた。また、その積乱雲内に再現されたMCはスーパーセルの判断基準(鉛直渦度が 0.01 s^{-1} 以上)も満たしていた。水平分解能50 mの数値シミュレーションでは、鉛直渦度約 1.0 s^{-1} 、気圧低下約20 hPaをとまなう竜巻がフックエコー先端のガストフロント上に再現され、スーパーセル竜巻の典型的な発生形態が示された。これら数値シミュレーションの結果から、今回竜巻をもたらした積乱雲はスーパーセルだったと推定される。

7. 上空から見た被害の特徴

小林文明 (防衛大学校)

竜巻の研究において、被害域を把握することは重要

であり、そのために上空からの観測が有用であることはいうまでもない。特に、今回の竜巻被害は広域で複数発生したため、できるだけ早く現地の被害状況を把握する必要があった。竜巻被害は茨城県常総市からつくば市、筑西市から桜川市にかけてと、栃木県真岡市から益子町、茂木町にかけて確認されているが（気象庁 2012）、竜巻発生当日は被害の全貌は把握できていなかった。5月7日13時から17時30分まで、ヘリコプターによる上空からの観測を実施した。フライト時間を考慮して、観測地域は常総市からつくば市にかけてと、真岡市、益子町、茂木町とし、高度500 m～700 mから、被害状況、土地利用や周囲の地形を把握した。

常総市の被害は、非住家の屋根の破損や植生などごく一部に限られていた。つくば市の被害は吉沼地区から始まり、北条地区にかけてほぼ直線的に連続した被害が確認された。吉沼地区は田畑が広がっていたが、ビニルハウスの破壊や植生の被害、飛散物が連続して散乱している様子が確認された。防風林に囲まれた旧家や研究所、工場オフィス建物群の被害が連続し、住宅が密集した北条地区では、木造家屋の基礎からの横転、集合住宅の全階におよぶ被害など甚大な被害も確認された（第5図）。これら比較的新しい構造物や工場オフィス建物群の被害などはこれまでに経験のない被害といえる。北条地区では壊滅的な被害域が直線的に存在し、竜巻による被害の局在化が明瞭であった。竜巻が向きや速度を変えたという証言が得られたが、地上付近における竜巻渦構造の著しい変化の結果と推測される。また、最も被害の大きかった北条地区が経路の終点に位置していたのは、その後方に存在するつくば山系の影響が大きいと考えられる。

真岡市から益子町、茂木町にかけては、相対的に住宅や構造物は少なく、広く田畑が広がっており、住家や農業施設の被害は間歇的に確認された。また、被害域は直線ではなく、被害幅の変化も著しく、竜巻渦が複雑な挙動をしたことが推測された。点在した被害域には、住家の倒壊、屋根の剥ぎ取り、ビニルハウスの壊滅的被害、倒木など顕著な被害が確認された。

当日の上空からの観測では、つくば市の竜巻の被害スケールは、局所的にF3を含んだF2スケール、真岡市から益子町、茂木町にかけては局所的にF2を含んだF1スケールとみなされた。結果として被害戸数など両地域では異なったが、双方の被害状況は決して大きく異なっているわけではなかった。



第5図 つくば市北条地区。南西から望む（撮影：小林文明）。

日本でもひとつの気象擾乱に伴いある時間差をもって複数地点で竜巻が発生した事例は、2002年10月6日から7日にかけて温帯低気圧の東進に伴い各地で発生した竜巻事例（小林ほか 2007）や、2006年9月18日台風に伴い延岡市で発生した竜巻に代表される複数の竜巻事例（小林 2007）などがある。ただし、今回のように広範囲の複数地点でほぼ同時に発生した事例は少なくとも筆者にとって初めてであった。限られた時間内にどこから、どのような順番で見て回るか、その判断は難しかった。また、上空からの被害調査の重要性を再認識するとともに、複数地点の被害を同じ眼で観る必要性を痛感した。最後に、本観測でお世話になった関係各位に謝意を表します。

8. つくば竜巻の現地調査に基づく下層風の推定

佐々浩司（高知大学）、宮城弘守（宮崎大学）

今回発生した竜巻のうち茨城県常総市からつくば市を通過した竜巻の被害について、発生翌日の5月7日から9日にかけての3日間と5月19日の計4日間現地調査を行うとともに、住民の方々によって記録された動画や写真の収集と撮影地点の検証を行った。

被害状況については倒木や電柱の倒壊など破壊時の風向が比較的判断しやすいものを中心に調査した。これらから判断される風向は竜巻の移動方向である南西から北東方向に沿った南西風が顕著であったが、他にも南風、北風、北東風など竜巻特有の収束性を示す風向が明瞭に認められた。これらから竜巻の地上における軌跡を推定すると、ほぼ北東方向に進行しているものの、進路は蛇行していることがわかった。同時に被害域の広がりも場所によって大きく変化していた。画像によって評価した地上付近の竜巻渦の渦径は桜川近傍で100 mほどであったが、そこから400 mほど南西の針葉樹林の倒木被害幅は50 m程度、雇用促進住宅付近の被害状況においても被害幅から推定される渦径は40 mほどであったと思われる。このように竜巻の渦径は数十 m から100 m 以上まで変化するとともに最大風速も変化していたことが推定される。

収集した動画により、地面付近の竜巻渦の挙動を見たところ、地面付近の渦軸は平行移動だけでなく傾斜するなど大きく変化しており、時として吸い込み渦が2個含まれるような多重渦の様相(第6図)を呈することさえあった。このような渦構造の変化が移動経路の蛇行や渦径の変化に対応しているものと思われる。

竜巻の移動速度も竜巻の移動経路と動画の時刻変化より求めることができるので、初期解析を行った。その結果、桜川を渡る前後1.4 km ほどの地上における竜巻渦の移動速度は 12 ms^{-1} であった。これは気象研のドップラーレーダーにより求めた地上高100 m における竜巻渦の移動速度(山内ほか 本報告第4節)よりもわずかに小さい。

泉地区における竜巻内の風速については飛散物の挙動を追跡するPTV (Particle tracking velocimetry) 解析を行うと 30 ms^{-1} であったが、より細かい土埃や水田の水しぶきなどによって画像パターンの移動量から速度を評価するPIV (Particle image velocimetry) 解析を行ったところ、平均して 50 ms^{-1} ほどであった。すなわち、映像で明瞭な飛散物として認められるような大きなものは竜巻渦の風速の60%程度で飛翔していたことになる。また、竜巻渦の風速 50 ms^{-1} は進行方向前面における回転の接線風速にあたるため、移動速度を足し合わせた竜巻渦のこの位置における最大風速は 62 ms^{-1} ほどであったと思われる。これらの結果は初期解析によるものであり、今後移動とともに渦径や風速がどのような変化をしたのか詳細に調べていきたい。



第6図 多重渦構造を示す竜巻(市民提供動画より)。



第7図 木造建築物A。

9. 茨城県つくば市内における建築物被害の概要

喜々津仁密(独立行政法人建築研究所)

当日12時35分頃に発生した竜巻により、茨城県つくば市の北条地区、大砂地区及び筑波北部工業団地を中心に建築物の被害が発生した。国土技術政策総合研究所と建築研究所では、つくば市内での建築物の被害発生直後より、上記の地区を中心に被害の状況を把握するための現地調査を実施した。調査概要は以下の通りである。

調査日程：5月6日(日)・7日(月)

調査者：奥田泰雄・深井敦夫・植本敬大(国土技術政策総合研究所)、喜々津仁密・荒木康弘・中川貴文・永井 渉(独立行政法人建築研究所)

本稿では、現地調査から得た建築物等の主な被害状況をまとめる。なお、今回の調査で得られた被害状況の知見を利用して、今後調査分析を継続する予定である。



第8図 木造建築物 B.



第9図 集合住宅南面の状況.



第10図 窓ガラスへの飛来物の衝突痕.

(1) 木造建築物の被害

木造建築物の主な被害事例を以下に示す。木造建築物 A (第7図) では、べた基礎の底面が地盤から離れ、上部構造とともに完全に裏返しになっていた。上

部構造全体が飛散した事例もみられ、木造建築物 B (第8図) では一部土台を残すものの、ほとんどの上部構造が飛散していた。また、小屋組の破壊・飛散や開口部の破損は竜巻による典型的な被害事例であり、今回の調査でも多く確認された。これら以外にも上部構造の水平移動、屋根ふき材等の脱落・飛散といった被害事例が確認されている。

(2) 鉄骨造及び鉄筋コンクリート造建築物の被害

鉄骨造建築物の被害事例としては、倉庫と思われる建築物において構造骨組の残留変形が認められたほか、車庫の転倒もみられた。

鉄筋コンクリート造による5階建て集合住宅では、南側の窓ガラス、サッシの枠、ベランダの手すり等が損壊した(第9図)。

(3) 飛来物による被害

竜巻通過時に発生する多数の飛来物による外装仕上げ材や開口部の被害も多数確認された。第10図はショッピングセンターのエントランスでの飛来物の衝突痕である。

(4) その他の被害

(3) までに掲げた以外の被害事例としては、ガソリンスタンドでの屋根の脱落、電柱や樹木の折損、比較的重量のある乗用車やトラックの横転等が挙げられる。

本稿では、茨城県つくば市で発生した竜巻による建築物被害について、国土技術政策総合研究所・建築研究所(2012)が実施した現地調査の概要を報告した。被害の詳細は後掲の参考文献を参照されたい。

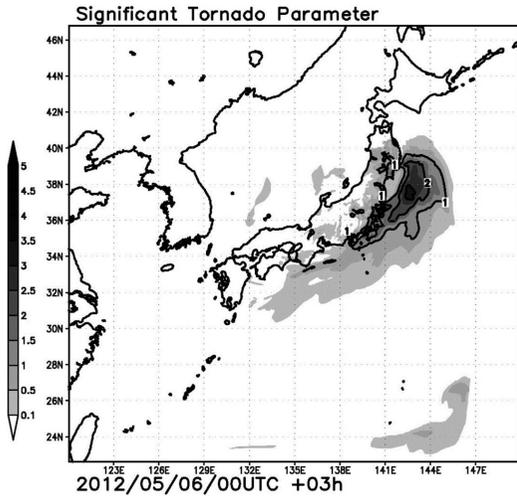
今回の竜巻の災害で亡くなられた方及びそのご遺族に対し深く哀悼の意を表するとともに、被災された方々に心からお見舞い申し上げます。なお、本調査を実施するに当たり、調査建築物の関係各位には現地被害調査にご協力頂きました。ここに謝意を表します。

10. 2012年5月6日関東地方における竜巻の発生環境場とポテンシャル予報について

櫻井溪太(日本気象株式会社)

気象庁メソ数値予報モデルGPV(MSM-GPV)データ及び5km格子WRFモデル(WRF-5km)の予報データを用いて、当日に関東地方で発生した竜巻の発生環境場のポテンシャル予報を行った結果を報告した。

WRF-5kmは、日本気象株式会社の社内サーバーに構築した予報システムにおいて、54時間予報を1時



第11図 初期時刻2012年5月6日09時のWRF-5 kmで計算したSTP (Significant Tornado Parameter) の3時間予報値の分布図。

時間隔出力で毎日4回(初期時刻00, 06, 12, 18 UTC)計算している。ポテンシャル予報は、MSM-GPVとWRF-5 kmの予報データから、大気の安定度に関するパラメータ(CAPEなど)及び水平風の鉛直シアーの大きさに関する環境パラメータ(SREHなど)とそれらの組み合わせで作られた複合パラメータ(Significant Tornado Parameter (STP)など)を計算している。

当日の関東地方付近では、当日00UTCを初期時刻とする両予報モデルの3時間予報値(竜巻発生時刻頃)において、大気が非常に不安定($CAPE > 1500 \text{ Jkg}^{-1}$)で鉛直シアーの大きい($SREH \approx 150 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$)大気状態が総観規模場の擾乱によって形成されることが予報されていた。低気圧の南東側に位置していた関東地方では、下層は南海上からの相当温位の高い空気が存在し、上層はトラフに伴う相当温位の低い環境場となっており、対流不安定が顕著で積乱雲の発達しやすい大気状態であった。また、風は、下層は南寄りであったが高度とともに上層の強風帯に伴って西風が強まっており、積乱雲がスーパーセルに発達しやすい分布となっていた。このような環境場の特徴から、STPは関東地方付近で大きく(STPは1.5~3.0程度)なっていた(第11図)。講演では時間の都合上、当日00UTC初期の3時間予報値のみ示したが、2日前となる5月4日00UTCを初期時刻とするWRF-5

kmの予報でも同様の特徴が見られた。

以上から、当日の竜巻事例は、ポテンシャル予報によって強い竜巻を伴うスーパーセルの発達に適した環境場を数時間から数日前に把握することが可能であったことが示唆される。ポテンシャル予報は各パラメータの閾値などに課題はあるが、竜巻発生の事前把握情報(いつ、どこで、どれくらい発生可能性があるか)を強化する上で非常に有用である。情報の多様化・複雑化の問題は、竜巻注意情報などの竜巻発生直前に発表される情報などへ導線を張った竜巻予報に特化した防災ツールにより解決することができ、ユーザーは適切な情報利用によって避難行動に繋げることができるだろう。

11. 討論

- 2006年の佐呂間町の竜巻にくらべると、今回は多くの目撃情報と写真が得られた。(北大 藤吉康志)
- 南からの暖湿流の流入の強化が今回のスーパーセルストームの成因となったのであろうが、流入強化の原因は何であろうか。(同上)
- 竜巻研究には目には見えない竜巻“もどき”も含めた幅広いスペクトルでの観測が必要である。(同上)
- 気象庁では竜巻等突風の監視・予測技術、予測情報の発表・伝達及び利活用推進策の改善方策についての議論するため有識者による「竜巻等突風予測情報改善検討会」の開催を検討している(5月31日、7月3日、17日に開催)。(気象庁予報部 松村崇行)
- 数値シミュレーションでは水蒸気の情報不足している。海岸線にあるアメダスだけでも水蒸気センサーがほしい。(JAMSTEC 茂木耕作)
- 水蒸気量の大きいバンドが竜巻発生の1~2時間前にGPS観測によって認められている。(気象研究所 小司禎教)
- 今回の竜巻では中学生が亡くなった。子供がひとりで家にいるときの注意(窓がなく狭い部屋に入るなど)を今後喚起する必要がある。(気象庁観測部 熊本真理子)
- 今回の竜巻の発生地点の近くには高層気象台があり、ここでは竜巻の発生時に6 hPaの気圧低下が認められた。(高層気象台 森 一正)

謝辞

今回の研究会を開催するにあたって、会場の準備・運営にご協力をいただいた学会員の皆様及び気象研究

所企画室の皆様には感謝いたします。

参 考 文 献

- 気象庁, 2012 : 平成24年5月6日に発生した竜巻等について (中間報告その2)。気象庁ホームページ, <http://www.jma.go.jp/jma/press/1205/16c/toppu120516.pdf> (2012.6.15閲覧)。
- 小林文明, 2007 : 竜巻の多様性—2006年9月17日台風13号に伴う竜巻を中心として—。天気, **54**, 891-892。
- 小林文明, 藤田博之, 野村卓史, 田村幸雄, 松井正宏, 山田 正, 土屋修一, 2007 : 2002年10月7日横須賀で発生した竜巻—10月6日から7日にかけて各地で発生した突風災害に関連して—。天気, **54**, 53-64。
- 国土技術政策総合研究所, 建築研究所, 2012 : 平成24年5月6日に茨城県つくば市で発生した突風による建築物被害 (速報)。 <http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h24tsukuba/h24tsukuba.pdf> 又は <http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/disaster/kaze/2012tsukuba/120506-tsukuba.pdf> (2012.6.15閲覧)。
- Kumjian, M. R. and A. V. Ryzhkov, 2008 : Polarimetric signatures in supercell thunderstorms. *J. Appl. Meteor. Clim.*, **47**, 1940-1961.
- Kumjian, M. R. and A. V. Ryzhkov, 2009 : Storm-relative helicity revealed from polarimetric radar measurements. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 667-685.
- Markowski, P., E. Rasmussen, J. Straka, R. Davies-Jones, Y. Richardson and R. J. Trapp, 2008 : Vortex lines within low-level mesocyclones obtained from pseudo-dual-Doppler radar observations. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3513-3535.
- 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.
- Noda, A. T. and H. Niino, 2005 : Genesis and structure of a major tornado in a numerically-simulated supercell storm : Importance of vertical vorticity in a gust front. *SOLA*, **1**, 5-8.
- Ryzhkov, A. V., T. J. Schuur, D. W. Burgess and D. S. Zrnic, 2005 : Polarimetric tornado detection. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 557-570.
- 瀧下洋一, 2009 : 突風に関する防災気象情報の改善—竜巻注意情報の発表開始—。天気, **56**, 167-175。
- Wakimoto, R. M. and J. W. Wilson, 1989 : Non-supercell tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1113-1140.