

竜巻の発生メカニズムと事例

しも せ けん いち
下 瀬 健 一 †

竜巻は、他の気象災害と比べ発生頻度は高くなく被害が及ぶ範囲も狭いが、ひとたび発生し我々の生活圏を直撃した場合、構造物や農作物への被害による経済的損失のみならず、人的被害を引き起こす。そのため、竜巻の予測・監視が防災上非常に重要であるが、竜巻は短時間かつ局所的に発生する現象であるため、竜巻を直接観測することは困難であり、その発生メカニズムは未だ十分に解明されていない。ゆえに、竜巻の予測・監視技術は発展途上であり、竜巻の発生メカニズムと予測・監視技術は今なお積極的に研究開発が続けられている。本稿では、これまでの研究でわかってきた竜巻発生メカニズムとそれを基に気象庁で開発されている予測・監視技術について解説し、竜巻発生時に必要とされる避難行動などを日本における竜巻の事例を交えながら紹介する。

キーワード：竜巻，気象災害

1. 竜巻とは

竜巻は気象庁によって以下のように定義されている：「積雲や積乱雲に伴って発生する鉛直軸を持つ激しい渦巻で、漏斗状または柱状の雲を伴うことがある。地上では、収束性で回転性の突風や気圧の急下降が観測され、被害域は帯状・線状となることが多い」¹⁾。その寿命は数分から1時間程度であり、水平の大きさは数十メートルから数百メートル程度である。現象が短時間かつ局所的に発生するので、竜巻の構造を直接観測することは困難を極めるが、発生した竜巻の近傍に観測測器を配置することにより、約100 hPaの気圧降下や100 m s⁻¹を超える風速を観測した例がある(Karstens et al., 2010; Wurman, 2002)^{2),3)}。すべての竜巻を観測することは不可能であるので、竜巻の風速は被害の痕跡を頼り推定されてきた。この竜巻の風速と被害の痕跡を関連付けて、推定された風速の大きさに応じてF0からF5まで階級分けしたものがFujita Scale (Fujita, 1971)⁴⁾であり、この階級分けを改良したものが各国で利用されている。日本では日本版改良藤田(JEF)スケール⁵⁾(JEF0～JEF5の階級)が用いられている。日本における被害痕に基づいた竜巻の構造の統計値はNiino et al. (1997)⁶⁾によってまとめられており、平均被害幅約100 m、平均被害長約3.2 km、平均寿命約12分となっている。日本において竜

巻の構造を直接観測した例としては、冬季日本海で発生した竜巻渦の直接観測において、3.8 hPaの気圧降下と35.3 m s⁻¹の風速が記録されている(Kato et al., 2015)⁷⁾。

2. 竜巻の発生メカニズム

2.1 竜巻発生の基本メカニズム

上述のように、竜巻は短時間かつ局所的に発生するので直接観測が難しく、発生メカニズムに関して未解明な点も多い。基本的な発生メカニズムは室内実験などでの再現により確認されており(Ward, 1972など)⁸⁾、以下の経過で発生に至る(図1)；(1)地表付近に何らかのきっかけで竜巻の水平スケールよりも大きい(数km)鉛直方向に軸を持ったゆっくりと回転する渦が発生し、その渦の直上で積乱雲が発生する、(2)積乱雲が発達し、雲内に強い上昇流が生じる。その強い上昇流により積乱雲直下の空気が上空に向かって吸い寄せられ、地表付近では積乱雲の直下に収束する流

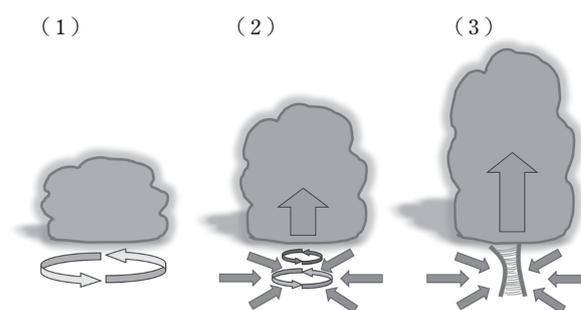


図1 基本的な竜巻の発生メカニズムの概念図

† 国立研究開発法人 防災科学技術研究所：〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1
E-mail: kshimose@bosai.go.jp

れが生じる、(3) 地表付近にある大きな渦も吸い寄せられることで鉛直方向に引き伸ばされ、渦の直径が小さくなり、角運動量保存則により回転速度が速くなることで竜巻のような激しい渦が発生する。このように、竜巻が発生するためには地表付近の渦と積乱雲の強い上昇流が必要となる。地表付近の渦が強ければ強いほど、また、積乱雲の上昇流が強ければ強いほど、発生する竜巻の渦は激しくなる。竜巻が発生する前に生じる地表付近の渦の詳細な成因については不明な点が多く、現在でも調査研究が進められている。竜巻を引き起こす積乱雲については、通常の積乱雲でも竜巻を引き起こすが、スーパーセル (Browning, 1964)⁹⁾ という通常の積乱雲と比べて規模が大きく長寿命な積乱雲がより強い竜巻を引き起こすということがわかっている。以下、通常の積乱雲が引き起こす竜巻 (非スーパーセル竜巻) とスーパーセルが引き起こす竜巻 (スーパーセル竜巻) について、それぞれの発生メカニズムを記述する。

2.2 非スーパーセル竜巻

非スーパーセル竜巻は、寒冷前線のような温度や風向・風速がある線状の領域を境にして水平方向に大きく変化する場所 (局地前線) で発生する。図2は、非スーパーセル竜巻の発生メカニズムの概念図を示している。竜巻が発生する前に生じる地表付近の渦は、前線に沿った風の不連続によって生じる一種の不安定 (水平シア不安定) によって生成される。水平シア不安定では、直径数 km の渦が一定間隔で複数生成されることが多い。前線上では、風向の変化による収束や温度差により空気が持ち上げられて積乱雲が発生する。この積乱雲が発達すると雲内に強い上昇流が生じ、強い上昇流が地表付近で生成されている複数の渦のいずれかと重なることがきっかけとなり竜巻が発生する。条件が重なれば、複数の竜巻が同時に発生することもある。

2.3 スーパーセル竜巻

スーパーセル竜巻はスーパーセルという特殊な積乱雲によってもたらされる。スーパーセルの特徴は、通常の積乱雲よりも規模が大きく長寿命であることに加

え、メソサイクロンという直径数 km の渦を積乱雲の中に持ち、非常に強い上昇流を伴うことである。通常、積乱雲が発達し雲内に強い上昇流が発生した後、大きく成長した雨滴が地上に向かって落下し始めるため、上昇流が下降流に変わり積乱雲が消滅する。この時間スケールが約1時間であるため、通常の積乱雲の寿命は1時間程度となる (水平スケールは10 km 程度)。図3にスーパーセルの構造の概念図を示す。スーパーセルが発生する大気環境では、地表付近の風向と積乱雲 (高度3~10 km) 付近の風向が90~180度ずれており、強い上昇流が発生する領域と成長した雨滴が落下する領域が重ならないため、上昇流が衰退することなく成長し、規模が大きく寿命の長い積乱雲となる。スーパーセルの水平スケールは数十 km、寿命は数時間である。

スーパーセルのもうひとつの特徴であるメソサイクロンも、上述の大気環境によって作られる。地表付近の風向と積乱雲付近の風向が180度ずれている場合、水平方向に軸を持った渦が地表と積乱雲の間に生成される。この水平方向に寝ている渦が積乱雲の上昇流によって鉛直方向へ傾けられることにより、鉛直方向に軸を持った渦であるメソサイクロンが積乱雲の中に生成されスーパーセルへと発達する。

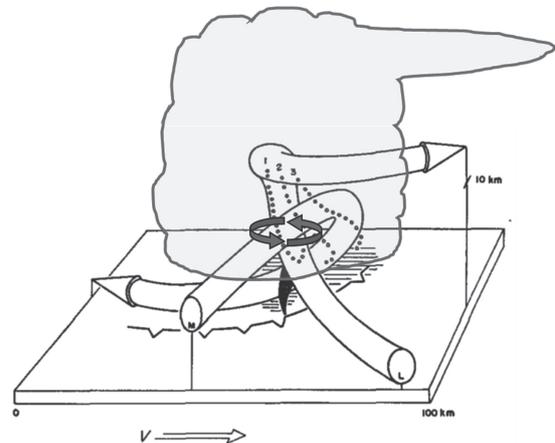


図3 スーパーセルの構造の概念図 (Browning, 1964⁹⁾ に加筆). 白抜矢印は気流を、とげ付実線は地表の風の境目を、灰色矢印はメソサイクロンを示す。

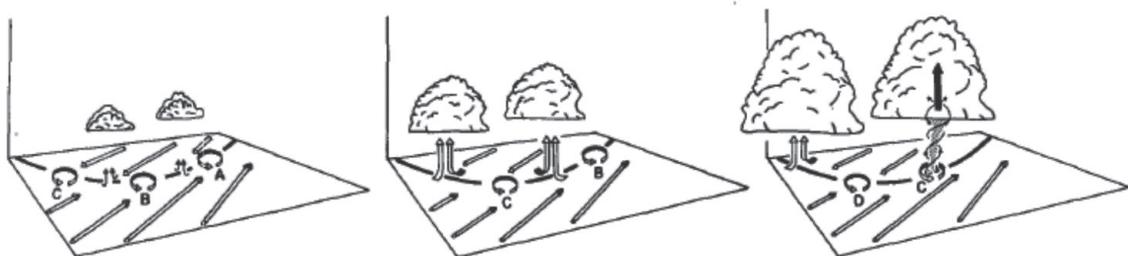


図2 非スーパーセル竜巻の発生メカニズムの概念図 (Wakimoto and Wilson, 1989)¹⁰⁾

スーパーセルが竜巻を発生させる段階になると、雨滴の落下に伴う下降流が地表に達し、地表付近では下降流の中心から風が四方に発散する。一方、持続する上昇流により、地表付近ではスーパーセルの上昇流の直下へ収束する流れも存在しており、下降流による発散する風と上昇流による収束する風の境目に前線（ガストフロント）が形成される。このガストフロント上に地上付近の渦が形成され、この渦がスーパーセルの非常に強い上昇流によって引き伸ばされることによって竜巻が発生する。

3. 竜巻発生の予測・監視技術

これまでにわかっている竜巻の発生メカニズムを考慮すると、竜巻発生の予測・監視を行うためには、地表付近の数 km の大きさの渦と積乱雲内の強い上昇流（こちらも数 km の大きさ）を予測・監視する必要がある。しかしながら、気象庁が現在運用している予測技術では 10 km 程度の水平スケールの現象までしか予測することができず、監視技術では建物などの影響で地表付近を監視することは難しい。スーパーセルが発生する大気環境や上空の渦であるメソサイクロンについては、気象庁の現業技術で予測・監視ができる程度なので、強い竜巻を発生させる可能性があるスーパーセル発生の予測・監視が行われている。

スーパーセルが発生する大気環境の予測は大気の流れを予測可能な数値予報によって行われる。数値予報は大気の運動方程式などの物理方程式により、風や気温などの時間変化をコンピュータで計算して将来の大気状態を予測する方法である。竜巻に関連するスーパーセルの大気環境の数値予報には気象庁メソモデル (MSM)¹¹⁾ が用いられている。MSM は日本付近を 5 km メッシュで 39 時間先まで予測する数値予報で、各メッシュで風・気温・気圧・湿度・降水などの高度約 20 km までの鉛直分布の予測を得ることができる。MSM は、水平スケールが 5 km 以下の現象を捉えることはできないため、竜巻やメソサイクロン、積乱雲の上昇流を直接予測することはできないが、水平スケールが数十 km となるスーパーセルの大気環境を予測することは可能である。これらの予測を基に、大気の大気温度の鉛直分布の予想から大気が不安定で積乱雲が発生しやすい環境であるか、地表付近と高度 3～10 km の風向がメソサイクロンの発生に好ましい環境であるか、といった様々な指数（突風関連指数¹²⁾ と呼ばれる）が計算され、スーパーセルが発生しやすい大気環境にあるかどうかの予測が行われる。こうして得られた予測は、スーパーセル発生が予測される 1 日～半日前には「気象情報」、数時間前には「雷注意報」

として気象庁から発表され、竜巻発生の恐れがあることが注意喚起される。

メソサイクロンの監視は、気象ドップラーレーダーによる観測によって行われる。気象ドップラーレーダーはパラボラアンテナから電波を打ち出し、雨雲に反射される電波から、打ち出した方向にある雨雲内の雨粒の量（降水量）とその雨粒の動き（レーダーに向かって動いているか、レーダーから遠ざかっているか：ドップラー速度）を観測することができる。気象庁の現業レーダーでは 250 m メッシュで降水量とドップラー速度を得ることができる。レーダーは地面に設置されているため、地形や構造物に電波が遮蔽されてしまう地表付近の観測はできないが、上空にあるメソサイクロンの渦によって移動している雨粒のドップラー速度を観測することはできるので、メソサイクロンなどの上空の渦の監視に利用できる。気象ドップラーレーダーの観測に基づくメソサイクロンの検知や雨雲の形状、更に MSM の予測による突風関連指数などを用いて、「竜巻発生確度ナウキャスト」¹³⁾ による竜巻発生確度が予測される。竜巻発生確度ナウキャストでは、竜巻の発生確度を 10 km メッシュで解析し、その 1 時間後までの予測を行うものである。竜巻発生確度には危険度に応じてレベル 1 と 2 があり、レベル 2 となっている地域には「竜巻注意情報」が発表される。竜巻注意情報は 2008 年より発表が開始され、2017 年現在、竜巻発生の適中率は約 14 % と報告されている（中里ほか、2017）¹⁴⁾。適中率の低さの原因の一つは、スーパーセルが竜巻を伴う割合にある。Trapp et al. (2005)¹⁵⁾ によると、高度 1 km にメソサイクロンが検知されたときの竜巻の発生確率は約 40 % であったが、高度 1 km より上でメソサイクロンが検知されたときの竜巻の発生確率は約 15 % であった。このように、スーパーセルのすべてが竜巻を伴うというわけではなく、また、非スーパーセルによる竜巻も発生するので、メソサイクロンの監視を主な情報源として発表される竜巻注意情報の適中率は残念ながら低くなってしまふ。しかしながら、スーパーセルは竜巻のみならず、落雷・降雹・突風をもたらす恐れのある積乱雲なので、気象災害に備えるという点で竜巻注意情報は有効に活用すべき情報であることに間違いない。また、より適中率の高い予測を実現させるためには竜巻の発生メカニズムのさらなる理解が必要不可欠であり、今後の研究の進展が待たれる。

4. 竜巻注意情報発表時にとるべき行動

上述のように、竜巻注意情報は竜巻が発生すると予想される 1 時間前～直前に発表される。竜巻注意情報

は、以前は府県単位で発表されていたが、2016年12月より一次細分区^{*1}単位で発表されている。発表される単位は小さくなったものの、東京地方に発表された場合、実際に危険が差し迫った地域が多摩南部のみであっても、23区にも情報が発表されることになる。そのため、竜巻注意情報が発表されたときに最初にとるべき行動は、自分が現在いる位置に竜巻の危険が差し迫っているかを把握するために、激しい降水がある位置の情報を取得することである。テレビ視聴時に竜巻注意情報の発表をテロップにより知った場合は、データ放送を活用することにより気象レーダーによる降水観測の情報を得ることができる。また、インターネットに接続が可能な状況であれば、気象庁高解像度ナウキャストのHP¹⁶⁾にアクセスすることにより、気象レーダー観測に基づいた激しい降水が起こっている地域や竜巻発生確度ナウキャストに基づいた危険地域の情報を地図上で確認できるようになっている。これらの気象レーダー観測に基づいた情報を利用し、竜巻の発生させる可能性のある積乱雲が自身の近傍に存在または接近していないかを確認することが重要である。竜巻を発生させる可能性のある積乱雲が近傍に確認された場合には、次節で紹介する避難行動を取る必要がある。積乱雲が近傍に確認されなかった場合でも、大気環境はスーパーセルを引き起こすような状況になっているので、竜巻注意情報が発表されている間は、こまめにレーダー観測に基づいた積乱雲の情報を取得し、新たに発生した積乱雲が接近していないか注視することが望ましい。

5. 竜巻接近時の避難行動

竜巻注意情報発表時に自身の近傍に激しい降水域が確認された場合、実際に空の様子を眺めるなどし、以下のような竜巻接近時の特徴がないか確認することが重要である：

- ・真っ黒い雲や激しい雷、雹
- ・雲底から垂れ下がるような漏斗雲
- ・筒状に舞い上がる飛散物
- ・気圧の変化による耳の違和感

このような特徴が確認された場合は、直ちに竜巻から身を守る行動をとる必要がある。竜巻から身を守る行動は屋内にいるときと屋外にいるときで異なる。

屋内では：

- ・窓やカーテン、雨戸を閉める
- ・最下階の窓のない部屋に移動する（トイレや浴室など）

*1 府県天気予報を定常的に細分して行う区域。気象特性、災害特性及び地理的特性により府県予報区を分割¹⁷⁾。

- ・部屋の中心の丈夫な机やテーブルの下に入るなど身を小さくして頭を守る
- ・飛散物により窓ガラスが割れる可能性があるので、窓の側には行かない

屋外では：

- ・コンクリート製などの頑丈な建物の屋内へ駆け込む
- ・頑丈な建物が近くにない場合は、頑丈な構造物の物陰に入って身を小さくして頭を守る
- ・倒壊の危険性があるプレハブや樹木の側には行かない

竜巻から身を守る際に特に注意すべき点は、突風によって巻き上げられた飛散物から身を守ることである。特に、割れた窓ガラスが飛散することによって怪我をするケースが多いので、毛布などがある場合はそれを被るなど、飛散物から身を守ることが重要である。

6. 日本で発生する竜巻の特徴

日本で発生する竜巻の特徴は、気象庁HPにある「竜巻等の突風データベース」¹⁸⁾にまとめられている。以下、このデータベースにまとめられている情報を基に、日本で発生する竜巻の特徴を記述する。

6.1 竜巻の発生確認件数

2010年から2014年の年間平均の竜巻発生確認^{*2}件数は27である。一方、アメリカの同じ期間における年間平均の発生確認件数は1140件であり、年間発生確認件数としては圧倒的に日本の竜巻のほうが少ない。しかしながら、単位面積あたりの発生頻度に換算すると、日本はアメリカの約3分の1の発生頻度となり、決して少ないとはいえない。

6.2 竜巻の発生場所

図4は1961年から2015年の間に日本で発生した竜巻の位置を示している。発生していない都道府県はなく、日本全国どこでも発生する可能性がある。特に発生が多いのは平野や海岸で、海岸線の多い島嶼部や、平野が広がる関東平野などではより発生件数が多い。

6.3 竜巻の発生時間帯

図5は1991年から2015年の間に日本で発生した竜巻の発生時刻別確認数を示している。発生していない時間帯はなく、どの時刻でも起こりうるが、夜間に比べて昼間の発生件数が多くなっている。特に、11時から18時の間で発生件数が多くなっている。これは、午前中に日射の加熱により地表付近が暖まり、午

*2 発生確認件数と記述しているのは、被害痕などから発生を推定しているため、被害痕がなく認知されなかった竜巻に関してはアーカイブされていないことから、発生件数ではなく発生確認件数としている。実際の発生件数はこれよりも多い可能性がある。



図4 1961-2015年の日本の竜巻の発生分布
(気象庁HP¹⁹⁾から引用)

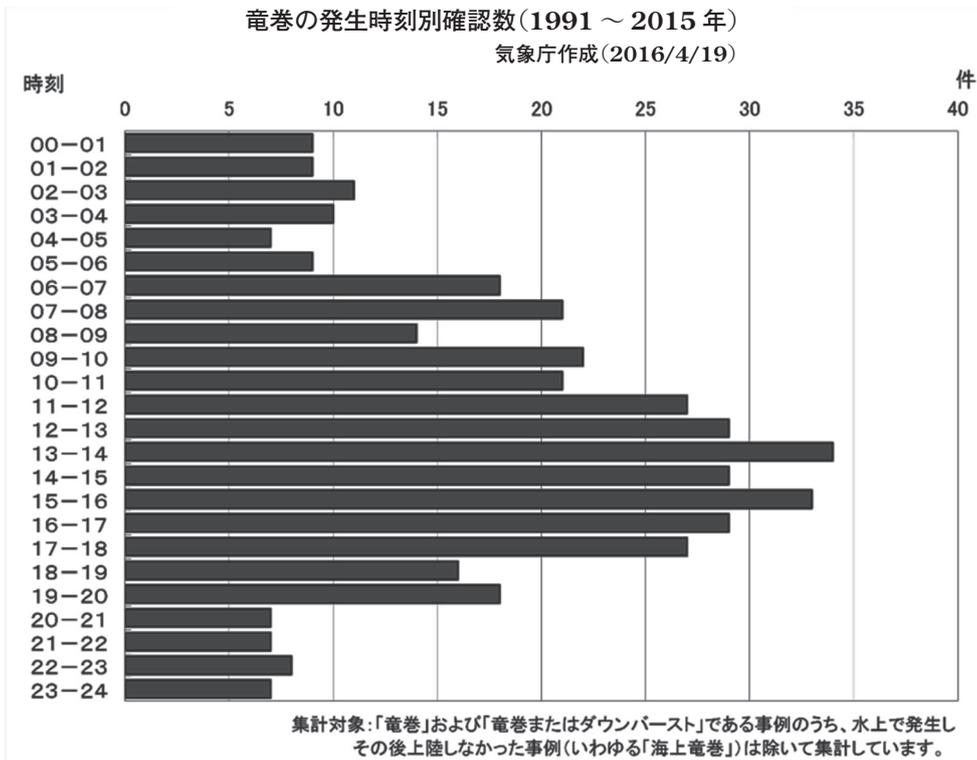


図5 1991-2015年の日本の竜巻の発生時刻別確認数(気象庁HP²⁰⁾から引用)

後に大気が不安定になりやすいことが要因として挙げられる。

6.4 竜巻の発生原因

図6は1991年から2015年の間に日本で発生した竜巻の発生要因別確認件数を示している。暖気や寒気の移流など前線に付随した現象が原因で発生することが多く、全体の約60%を占める。また、台風が原因で発生する竜巻も多く、全体の約15%を占める。

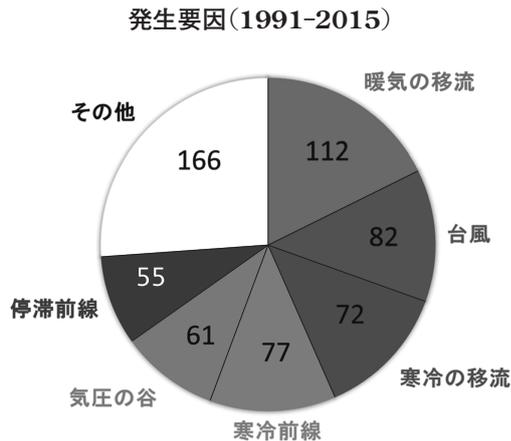


図6 1991-2015年の日本の竜巻の発生要因別確認数 (気象庁HP²¹)を基に作成)

6.5 竜巻の発生時期

図7は1991年から2015年の間に日本で発生した竜巻の月別発生確認数を示している。竜巻の発生はどの月でも確認されているが、7月から11月にかけて特に多く、この5ヶ月で全体の約70%を占める。こ

れは、前述の竜巻の発生原因となる前線や台風の活動が活発になる時期と重なっていることが要因として挙げられる。

6.6 竜巻の発生確認件数の経年変化

図8は、1961年から2015年の間に日本で発生した竜巻の年別発生確認件数を示している。1991年と2007年に統計方法が変更されているのですべての期間を通した発生確認件数の経年変化について議論することはできないが、強い竜巻に限れば被害痕がはっきりと残るので議論できると考えられる。しばしば、「地球温暖化や気候変動の影響を受けて竜巻は増加しているのか」という議論がなされるが、この資料からは、F2/JEF2以上の強さの竜巻がこの50年間で増加している、という傾向は見られない。

日本で発生する竜巻の特徴をまとめると、場所、時期、時間帯を問わず発生する可能性があるが、海岸線や平野で多く発生し、台風や前線の活動が活発な7月から11月にかけて多く、日射の影響により大気が不安定になりやすい11時から18時の間に発生する傾向がある。

7. 日本における最近の竜巻事例

表1は、2006年から2015年までの10年間における日本で死者や多数の負傷者をもたらした竜巻事例を示している。この10年間の日本における竜巻による死者は16人、負傷者は383人であった。死者・負傷者をもたらした竜巻に関しても、海岸付近や平野で台風や前線の活動が活発な時期の11時から18時の間に

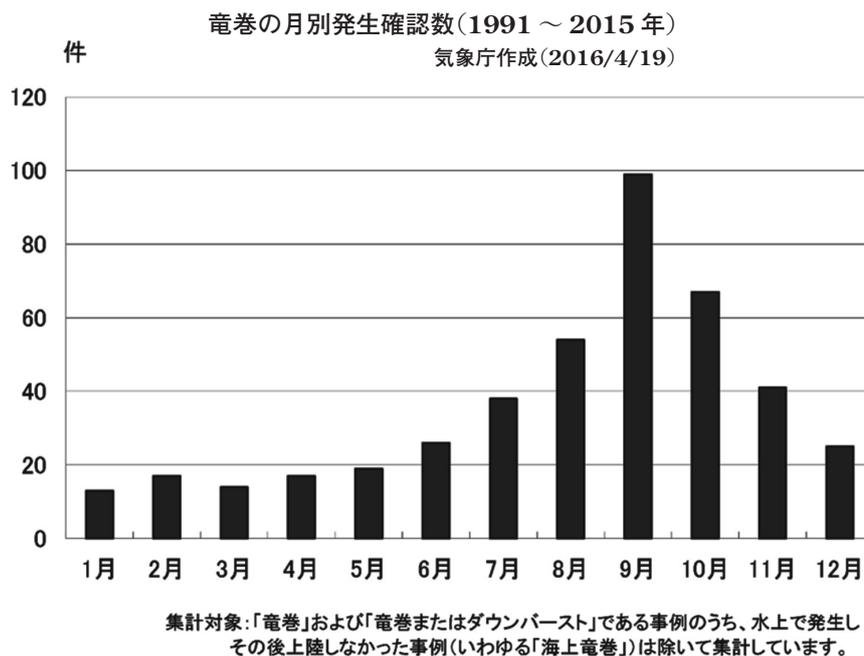
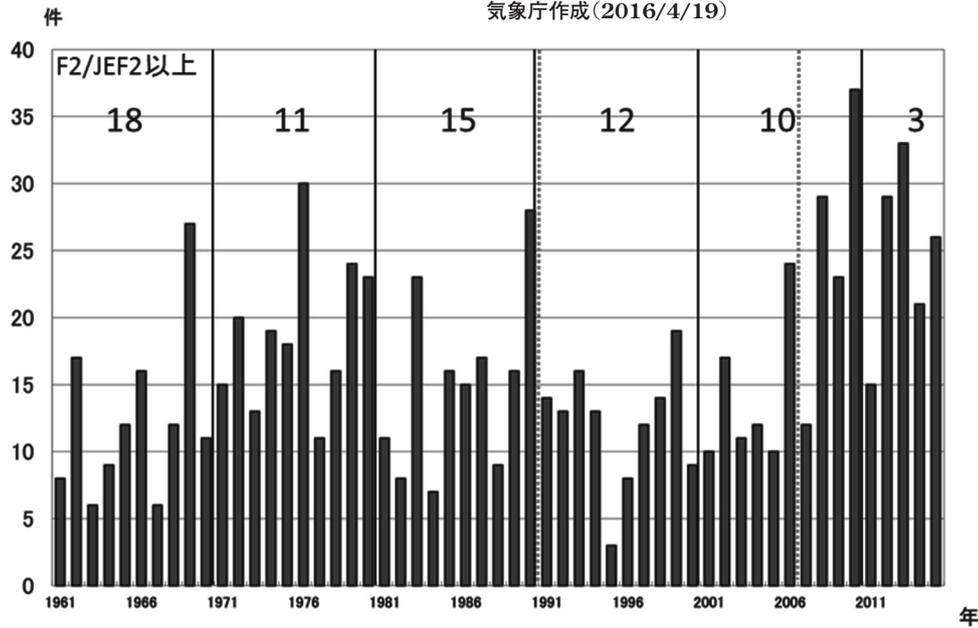


図7 1991-2015年の日本の竜巻の月別発生確認数 (気象庁HP²²)から引用)

竜巻の年別発生確認数(1961～2015年)

気象庁作成(2016/4/19)



集計対象:「竜巻」および「竜巻またはダウンバースト」である事例のうち、水上で発生しその後上陸しなかった事例(いわゆる「海上竜巻」)は除いて集計しています。

赤点線:1990年以前は「竜巻」および「竜巻またはダウンバースト」を確認できる資料が少ないなどの理由により、1991年以降と確認数を単純に比較することはできません。また、2007年から突風の調査を強化したため、見かけ上竜巻が増えている可能性があり、2006年以前と2007年以降も確認数を単純に比較することはできません。

図8 1961-2015年の日本の竜巻の年別発生確認数(気象庁HP²³⁾に加筆。
 図中上部の数字は10年毎のF2/JEF2以上の強さの竜巻の発生確認件数を示す。

表1 2006-2015年の日本で死者や多数の負傷者をもたらした竜巻事例(気象庁HP¹⁸⁾を基に作成)

日時	発生要因	強さ	場所	死者	負傷者
2006/09/17 14:03	台風	F2	宮崎県延岡市	3	143
2006/11/07 13:23	寒冷前線	F3	北海道佐呂間町	9	31
2009/07/27 14:00	暖気の移流	F1-2	群馬県館林市	0	21
2011/11/18 19:10	停滞前線	F2	鹿児島県徳之島町	3	0
2012/05/06 12:40	気圧の谷	F1-2	栃木県真岡市	0	12
2012/05/06 12:35	気圧の谷	F3	茨城県つくば市	1	37
2013/09/02 14:00	停滞前線	F2	埼玉県さいたま市	0	76

発生しているものがほとんどであった。甚大な被害をもたらした最近の事例として、2012年に茨城県つくば市で死者と多数の負傷者をもたらした竜巻(以後、つくば竜巻と呼ぶ)の事例を紹介する。

2012年5月6日12:35頃、茨城県つくば市北条地区を中心に竜巻による災害が発生し、死者1名、負傷者37名、全壊住宅76棟、半壊住宅158棟、一部損壊住宅400棟という甚大な被害をもたらされた。つくば竜巻の被害幅は500m、被害域長さは17km、寿命は

18分、移動速度は60 km h⁻¹、竜巻の強さは日本最大級のF3(5秒平均風速が70~92 m s⁻¹)であった。図9は、気象ドップラーレーダーによって解析された高度1.5 km付近の風向・風速と降水強度の水平分布を示している。竜巻発生直前の12:32の解析から、非常に強い降水域の南端に反時計回りに回転するメソサイクロンが解析されており、つくば竜巻はスーパーセル竜巻であったことが分かる。つくば竜巻に対して、気象庁は発生7時間前の05:35と05:47に「雷と突風及び降ひょうに関する茨城県気象情報第1号」と「雷注意報」を発表し、竜巻発生の恐れがあることを事前に注意喚起していたが、「竜巻注意情報」の発表はつくば竜巻が発生した直後の12:38であった²⁴⁾。このように、顕著な竜巻であっても竜巻注意情報が事前に発表されない事例もあるので、竜巻から身を守るためには、気象庁が発表する気象情報や注意報・警報をこまめに確認し、空の様子に気を配ることが重要である。

8. 最後 に

日本の竜巻は、発生しやすい時期や場所、時間帯はあるものの、どのような環境でも起こりうる。そのため、気象庁や自治体が発表する気象情報や注意報・警報を日頃からこまめに確認し、空の様子に気を配るこ

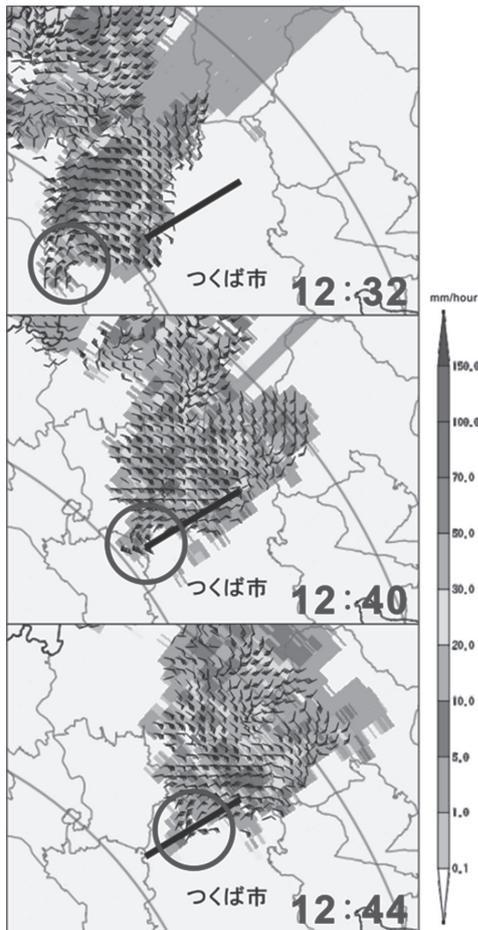


図9 さいたま市に設置された国土交通省 X バンド MP レーダー、および、千葉県柏市に設置された気象庁 C バンドドップラーレーダーにより観測されたドップラー速度データを合成する事により解析された、高度 1.5 km 付近の風向・風速と降水強度の水平分布（防災科研 HP²⁵⁾より引用。矢羽は風向・風速、シェイドは降水強度を示す。黒太線は竜巻の被害域、丸はメソサイクロンの位置を示す。

とが、竜巻が襲来した際に避難行動を迅速にとることにつながる。竜巻の発生メカニズムに関してはまだ不明な点が多く、予測や監視についても不十分なところがあるが、竜巻注意情報などは現在わかっている竜巻の発生メカニズムを考慮した最先端の予測・監視情報であるので、情報の性質を理解して有効に活用していただきたい。今後、竜巻の発生メカニズムについての研究が進み、より適中率の高い竜巻の予測・監視情報が提供されることを期待している。

参考文献

- 1) 気象庁 HP：天気予報等で用いる用語＞風，http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougou_hp/kaze.html
- 2) Karstens, C. D., T. M. Samaras, B. D. Lee, W. A. Gallus Jr., and C. A. Finley, Near-Ground Pressure and Wind Measurements in Tornadoes, *Mon. Wea. Rev.*, 138, pp. 2570–2588 (2010)

- 3) Wurman, J., The Multiple-Vortex Structure of a Tornado, *Wea. Forecasting*, 17, pp. 473–505 (2002)
- 4) Fujita, T. T., Proposed Characterization of Tornadoes and Hurricanes by Area and Intensity, *Satellite and Mesometeorology Research Project Report*, Vol. 91, pp. 1–42, the University of Chicago (1971)
- 5) 気象庁 HP：日本版改良藤田スケールとは，<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/toppuu/tornado1-2-2.html>
- 6) Niino, H., T. Fujitani, and N. Watanabe, A Statistical Study of Tornadoes and Waterspouts in Japan from 1961 to 1993, *J. Climate*, 10, pp. 1730–1752 (1997)
- 7) Kato, R., K. Kusunoki, E. Sato, W. Mashiko, H. Y. Inoue, C. Fujiwara, K. Arai, M. Nishihashi, S. Saito, S. Hayashi, H. Suzuki, Analysis of the Horizontal Two-Dimensional Near-Surface Structure of a Winter Tornadoic Vortex Using High-Resolution in situ Wind and Pressure Measurements, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, pp. 5879–5894 (2015)
- 8) Ward, N. B., The Exploration of Certain Features of Tornado Dynamics Using a Laboratory Model, *J. Atmos. Sci.*, 29, pp. 1194–1204 (1972)
- 9) Browning, K. A., Airflow and Precipitation Trajectories within Severe Local Storms which Travel to the Right of the Winds, *J. Atmos. Sci.*, 21, pp. 634–639 (1964)
- 10) Wakimoto, R. M., and J. W. Wilson, Non-supercell Tornadoes, *Mon. Wea. Rev.*, 117, pp. 1113–1140 (1989)
- 11) 気象庁 HP：メソモデル・局地モデル，<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-6.html>
- 12) 気象庁 HP：数値予測による大気状態の予測，<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/toppuu/tornado2-1.html>
- 13) 気象庁 HP：竜巻確度ナウキャストとは，<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/toppuu/tornado3-1.html>
- 14) 中里真久，西村建志，吉田公一，田中恵信，竜巻注意情報の改善，平成 28 年度予報技術研修テキスト，pp. 48–78，気象庁予報部 (2017)
- 15) Trapp, R. J., G. J. Stumpf, and K. L. Manross, A Reassessment of the Percentage of Tornadoic Mesocyclones, *Wea. Forecasting*, 20, pp. 680–687 (2005)
- 16) 気象庁 HP：高解像度ナウキャスト，<https://www.jma.go.jp/jp/highresorad/>
- 17) 気象庁 HP：気象警報・注意報や天気予報の発表区域，<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/saibun/>
- 18) 気象庁 HP：竜巻等の突風データベース，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>
- 19) 気象庁 HP：突風分布図，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/stats/bunpu/bunpuzu.html>
- 20) 気象庁 HP：発生時刻別の確認数，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/stats/hourly.html>
- 21) 気象庁 HP：発生時の気象条件等，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/stats/youin.html>
- 22) 気象庁 HP：月別の発生確認数 <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/stats/monthly.html>
- 23) 気象庁 HP：年別の発生確認数，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/stats/annually.html>
- 24) 気象庁現地災害調査速報：平成 24 年 5 月 6 日に茨城県常総市からつくば市にかけて発生した突風について，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/2012050603/ref01.pdf>
- 25) 防災科学技術研究所 HP：2012 年 5 月 6 日につくば市で発生した竜巻災害について（速報），<https://goo.gl/9k6t5i>