

報 告

アメリカにおけるトルネード（竜巻）の予・警報について

On the tornado forecasting and warning in the United States

藤谷 徳之助*¹ 新野 宏*²

Tokunosuke FUJITANI, Hiroshi NIINO

1. はじめに

1990年12月11日千葉県茂原市に発生した竜巻は、戦後最大級といえる被害を生じた。発生した場所が首都圏に近いこともあって、この竜巻は気象学や耐風工学の研究者のみならず、一般の人々の関心をも集めた。この竜巻については多くの研究グループによって調査がなされ、そのうちのいくつかの結果は既に発表されている^{1, 2, 3)}。研究者の関心が、竜巻の性質や被害の特徴、竜巻を生み出した気象条件など、純粋に学問的な課題に集まっているのに対し、一般の人々の関心はむしろ、竜巻の発生に対する予知・予報（さらには警報）にあると考えられる。

日本においては、従来から台風や集中豪雨などが最も重要な気象災害と考えられており、竜巻は気象災害としてはあまり重要視されていなかった。竜巻は、その発生機構が学問的に明らかになっていないこと、その規模が小さく、継続時間も短いため、信頼性のある予警報を発表することが技術的に困難であることなどから、竜巻の予警報は全く実施されてきていない。確かに竜巻による強風災害は、その直接的な被害の範囲はきわめて限定されている。しかし、近年の社会システムの複雑化に伴い、被害が生じた場合に間接的に社会全体に大きな影響を及ぼす可能性の高い構造物、例えば原子力発電所・化学工場・新幹線・超長大橋梁などが増加している。今後、竜巻の予警報に対する社会的なニーズは増大するも

のと考えられる。

アメリカにおいてはトルネード^{#1}（竜巻）に対して従来から、注意報・警報が国家気象局から発表されており、その効果が広く一般に認められている。これに関連して、アメリカ気象学会の機関誌（Bulletin of the American Meteorological Society）の最近号（Vol. 72, No. 8, August 1991）に、竜巻の予警報に関するアメリカ気象学会の声明が掲載されている。ここに示された内容は、一部の気象学研究者にはある程度は知られているものの、多くの気象技術者および耐風工学の研究者にとっては興味深い内容であると思われる。後述するように、アメリカと日本とでは竜巻を生み出す積乱雲の特性に差異がある可能性もあり、アメリカにおける竜巻予警報のシステムをそのままの形で日本に適用できるかどうかは明らかではない。しかし、この声明が日本における今後の予警報の動向を考える上での1つの指標となることは明らかであるので、以下にその全文の翻訳を掲載し、併せて、日本における竜巻の予警報に関する若干の問題点について簡単に触れる。

2. 「竜巻の予報と警報」(Tornado forecasting and warning) に関するアメリカ気象学会の政策的声明 (Policy statement) (1991年1月13日付 評議会で採択)

(1) 序

*1 気象研究所, 応用気象研究部, 第2研究室長 Applied Met. Res. Div., Met. Res. Inst.
*2 気象研究所, 物理気象研究部, 主任研究官 Physical Met. Res. Div., Met. Res. Inst.

注1 トルネード (tornado) は陸上の竜巻を指し、水上の竜巻はウォータースパウトと呼ばれるが、本報告においては竜巻の訳語を使用する。
(原稿受理: 1991年10月31日)

竜巻の予報、探知、監視は気象の専門家の行うべき最も重要なサービスの1つである。時宜を得た警報の発令と情報の伝達は、この国のほとんどの地域において、生命と財産を守るために不可欠である。竜巻による死者は今世紀の後半になってかなり減少してきたが、このことのかなりの部分が現在の竜巻の警報および予報のシステムの出現によっていることは今や多くの人が認めるところである。この声明は、一般の方のために、この警報システムの様々な構成要素を解説し、また最近の技術の進歩に伴って予想されるいくつかの改良点に対する見通しを提供することを目的としている。

竜巻の予報や警報について考える際には、まず竜巻の実態を把握しておくことが重要である。第1に、竜巻はその母胎となる積乱雲の小規模な副産物である。竜巻を生み出す積乱雲は全体のわずか1%以下に過ぎない。しかし、多くの積乱雲は潜在的に竜巻を作り出す能力を持っているので監視する必要がある。第2に、竜巻の強さや、大きさ、寿命は個々に大きく異なっている。米国で毎年報告される700 - 1100個の竜巻のうち約79%は弱いものであり、20%が強いもの、1%が猛烈なものと分類される。一般に、弱い竜巻は寿命が10分以下、被害幅と長さがそれぞれ100m、1.6km以下である。これらの弱い竜巻の代表的な風速は50m/s程度であるが、それでもかなりの被害を出す可能性がある。特に、その寿命が短いために適切な警報を出すことは非常に難しいことが多い。

一方、強い又は猛烈な竜巻は寿命が10分程度から極端な場合には2時間にも及ぶ場合があり、同一の積乱雲から繰り返し発生することもある。このように繰り返し発生する場合には、それぞれの竜巻は数10分の寿命であるが、被害はほぼ連続的に長さ160km、幅1km以上にもわたることがある。このような竜巻を生み出す雲はしばしば雹害や強風 (straight-line winds)^{注2}を生ずる。竜巻の中の風速の信頼できる直接測定は存在しないが、被害跡の調査から推定した最大風速の上限は125m/s程度となっている。強い又は猛烈な竜巻の場合にはいくつかの前兆現象が知られているため、竜巻の

注意報・警報システムが最も有効に働く。

国家気象局 (National Weather Service : NWS) は法律によって竜巻の予報・警報を公共に発令する権限を与えられている。しかしながら、その予報・警報の成否は公的・私的を問わぬ多岐にわたる集団——例えば報道機関、民間気象サービス会社の予報官、アマチュア無線家、ストーム・スポッター^{注3}、および地方自治体 (警察・消防・市民防衛組織 (civil defense workers)) の人々——の積極的な協力にかかっている。これらの人々は警報に必要な情報を集め、また伝達する上で非常に重要な役割を演ずる。予報・警報の成否はまた、与えられた情報に対して公衆がいかに迅速かつ正確に対応する能力を持っているにもかかっている。人命を救うためには、各々の構成員が効率よく機能し、また全ての構成員が協力して潜在的な脅威に対する正確かつ整合性のある記述を提供することが必要である。

(2) 竜巻注意報と警報

NWSは竜巻の予・警報の情報を伝達する上で以下の用語を使用している。

竜巻注意報 (tornado watch) はある特定の地域で、特定の時間内に竜巻が発生する可能性があることを人々に知らせる為に発令される。

竜巻警報 (tornado warning) は竜巻を伴っているか、竜巻を伴う可能性が極めて高い積乱雲が確認されたときにだけ発令され、高い確率で危険がさしめまわっていることを知らせる。

竜巻注意報は、総観場の気象条件が竜巻の発生にむいていると考えられるときに、ミズーリ州カンザス市のNWSの国立シビアトーム^{注4}予報センター (National Severe Storms Forecast Center : NSSFC) によって発令される。注意報はその効力を発する1時間前に、約40000km²の領域を単位として発令され、通常6時間の間有効である。注意報の発令は警報システムの重要な構成要素である。なぜなら、注意報の発令と共に、竜巻の探知、追跡、警報およびこれに対する対応等を適切に扱うのに必要な手続きが開始されるからである。注

注2 積乱雲から生じる下降気流が水平方向に広がる際に生じる強風。

注3 NWSによって組織された民間のボランティアで、竜巻を目撃した場合、規定にしたがって無線局を通じて気象官署に通報する。司法警察官や市民防衛組織のスポッターの場合には、連邦緊急対策庁が運用するNAWAS (National Warning System) のホットラインによって、気象官署に通報する。アメリカにおける竜巻監視システムの一翼を担っている。

注4 中規模 (メソスケール) の対流現象 (主に強い積乱雲) に伴って生じる、竜巻・雹・ダウンバースト・突風・鉄砲水など、局地的で激しい気象現象をいう。

意報は人々に激しい気象現象 (severe weather) の発生する恐れを警告し、引き続いて警報が発令された場合には安全な場所に避難する用意をさせる為に、予想された積乱雲が発達する前に発令される。注意報はまた地方の気象官署の当番の職員を増強したり、ストーム・スポッターの人々を組織的に展開したりする時間を与える。

注意報に加えて、NSSFCは激しい気象現象の起こる可能性のある地域を指摘し、それがどれぐらいの激しさを予想する「対流現象に関する見通し」 (Convective Outlook) を1・2日前に定期的に発表する。竜巻の脅威が特に強く予想され、かなり広い地域に竜巻の発生が予想される日には、NSSFCは特別に「公共に対する激しい気象現象に関する見通し」 (Public Severe Weather Outlook) を発表する。

竜巻警報は、気象レーダーとストーム・スポッターの報告から得られた情報に基づいてNWSの地方官署が発令する。警報は、竜巻を伴っている積乱雲の位置とその予想される移動速度に基づいて、注意報よりずっと狭い範囲、通常1つまたはいくつかの郡 (County : 州の1つ下の行政組織) の一部分に対して発令される。警報の発令される期間は普通30分から60分程度である。竜巻警報は竜巻が実際に目撃されてから出されることもあるので、竜巻発生の前に出されるとは限らない。しかし、スポッターが上空のろう斗雲を目撃したとの報告、レーダーによりフック・エコー (hook-shape echo)、エコーの弱い領域 (weak-echo region)、周囲を囲まれたエコーの弱い領域 (bounded weak echo region) のいずれかが見つかった場合などは、竜巻が実際に発生する数分前に警報が出される場合がある。

1990年代はNWSにとって施設近代化の10年となろうとしている。というのは、ドップラー・レーダーなどの新しい観測システムが全国展開されようとしているからである。これらの新しいシステムは、積乱雲の移動を追跡し、それらが竜巻を生み出す可能性を判定する能力を大幅に改善すると期待される。例えば、現在使われている従来型の気象レーダーは降水粒子やその他電波の反射体の反射強度と空間分布しか測定しないのに対し、ドップラー・レーダーはこれらに加えて積乱雲の中や周辺の空気の流れに関する推定を与える。すなわち、竜巻の発生に関連したレーダーの反射強度の分布のいくつかの特徴に加えて、ドップラー・レーダーは積乱雲の中に存在するかも知れない竜巻の発生初期の回転性の循環場を見いだすことができる。最近の研究によれば、

多くの強い竜巻の発達に関係する初期の循環は竜巻発生30分前から親雲の中に存在する場合がある。加えて、レーダーに近い距離では、竜巻自身の循環も観測できる場合がある。

しかしながら、竜巻を生み出す積乱雲の中にはレーダーによる明瞭な特徴をもたないものがあり、一方、明瞭な特徴を示しながらも竜巻を生み出さない積乱雲があることも事実である。レーダー画面上の特徴を捕えることは、しばしば主観的な作業を必要とし、与えられたレーダー表示画面が何通りにも解釈できる場合もある。野外において、目視で回転している雲の形やろう斗雲を観測することは、竜巻が存在するか発生間近であることの最も信頼できる指標の1つであることに変わりはないので、司法警察官や訓練されたボランティアのストーム・スポッターの観測網は、技術革新に関係なく当分の間、警報システムの欠くべからざる構成員であり続けるであろう。アマチュア無線家たちもまた情報の伝達の重要な担い手である。これらの情報網やストーム・スポッターの観測網は今後も支援し拡大すべきである。多くのストーム・スポッターの人々はNWSの警報や防災の専門家によって教育・訓練される。いくつかの州では、その観測・報告網は残念ながら望ましいレベルに達していない。教育・訓練制度は更に増強すべきであり、各州の警報や防災の専門家にはより多くの教材を提供すべきである。

時宜を得た警報と注意報を発令し人命を救うことができるかどうかは、多くの異なった観測網からどれだけ正確かつ迅速に情報を伝達できるにかかっている。ドップラー・レーダーに加えて、1990年代には改良された人工衛星搭載の測器、ウインド・プロファイラー、全国展開された自動地上気象観測網など、多くの観測システムの進歩が期待できる。更に、何日も前から大規模場の中に竜巻の発生しやすい前兆を見いだすことを可能にする期待されている数値モデルも現在開発途上にある。増大する気象データと数値モデルの出力をとりこんで、最新気象情報処理システム (Advanced Weather and Information Processing System) のように、利用しやすい形で表示することを可能にする新しい電子計算機システムも、近代化の努力の一端であろう。ストーム・スポッターとの既存の協力体制を改良すると共に、これらの技術的な発展も取り込んでいくことが、より適切で信頼度の高い竜巻警報・注意報へと通ずる。

(3) 竜巻に関する情報の伝達と広報

NWSによって発令された竜巻警報は、サイレン、ラジオ、テレビ、国家海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration : NOAA) の気象ラジオ放送など様々な手段を通じて公衆に伝達される。警報が公衆に迅速かつ正確に伝達されるためには、多くの異なる組織の人々の協力が要求される。NWSの地方官署や報道機関、民間気象サービス会社の予報官、アマチュア無線家および警察・消防・市民防衛組織などの地方自治体組織が密接に協力し、警報の情報の迅速な収集、分析、広報を行うことが不可欠である。公衆に対する正確かつ迅速な警報の伝達は多くの人々の生命を救ってきた実績があり、警報は最優先で取り扱うべきである。

警報をどのように解釈し発令するかに関する方針は、多くのテレビ・ラジオ局、民間気象サービス会社の予報官、そして地域社会さえもが従来型またはドップラー方式のレーダーを整備したり、独自のストーム・スポッターの観測網を持ったりするようになるにつれ、急速に複雑化しつつある。これらのレーダー・システムやストーム・スポッター網に、よく訓練された優秀な人材が配備されたならば、NWS独自の警報への努力だけでなく更に付加的な情報が得られる。さらには、公衆の竜巻に対する意識と適切に対応する能力を増加させることが期待できる。しかしながら、竜巻は公衆に対する切迫した危険であるので、竜巻を伴う積乱雲の探知と監視に必要な情報は遅れ無しにNWSへ伝達され、警報が首尾一貫した形で発令され、適切かつ効率的に公衆に到達されることが不可欠である。異なる警報がいくつか発令されることは、混乱を生じ、危険を生み出すことさえある。この理由により、NWSは竜巻警報を発令する唯一の正式な組織であり続けなければならない。

(4) 公衆の意識と対応

警報の成否は最終的には、公衆が正確に脅威を感知し、安全へと通ずる行動をとれるかどうかにかかっている。したがって、公衆への教育は、警報が成功するために不可欠である。NWSでは激しい気象現象に関する公衆の教育に重点をおいた非常に良く整備された警報・防災対策のカリキュラムを持っている。このカリキュラムは竜巻の活動頻度の高い中西部では非常に効果を発揮しているが、中西部と南部の東側、大陸東岸など、竜巻の活動頻度はそれほど高くないが時には非常に激しいものが起こる地域へも拡大する必要がある。気象番組のキャスターや報道機関は教育に関する努力に大きく

貢献してきた。これらの努力は更に継続すると共に拡大し、公衆が竜巻の脅威に対して適切に対応できるようにしなければならない。竜巻に対する警報・防災対策のカリキュラムに関するより詳しい情報はNWSの地方官署から取得可能である。

3. 日本における竜巻の予警報について

アメリカでは、1956年～1985年の30年間に年間平均で771個の竜巻が発生している⁹⁾。竜巻による死者は近年は減少傾向にあるとはいえ、平均で年間90人となっている。この数はハリケーンによる死者 (1958年～1977年の20年間の平均で40人)⁹⁾と比較して2.5倍程度になっており、竜巻による被害がいかに大きいかを示している。このため、アメリカにおける竜巻対策は多岐にわたっており、上述の国家気象局における予警報システムをはじめ、連邦緊急対策庁 (Federal Emergency Management Agency) と提携した緊急放送プログラムも整備されている。実際、竜巻の予警報システムが整備されるようになって、竜巻による死者は減少傾向を示している。

アメリカにおいては1960年代から、竜巻とそれを生み出す積乱雲の特性に関する研究が精力的に実施されてきている。しかしながら日本においては、竜巻を生み出す積乱雲の特性に関する統計すら十分に存在しないのが現状である。大陸性気候のアメリカと、周囲を海に囲まれた東岸海洋性気候の日本とでは大気の平均的な構造が異なるため、そこに発生する積乱雲の特性にも差異があることが十分予想される。したがって、上述したようなアメリカにおける予警報のシステムがそのまま適用出来る訳ではない。将来における竜巻の予報可能性を検討する上で必要な基礎資料を蓄積するためにも、竜巻を伴う積乱雲の特性に関するケーススタディを積み重ね、積乱雲の気候学を確立することが、日本における竜巻研究に課せられた急務である。

わが国においては、気象業務法および同施行令に基づき、災害が起こるおそれがある場合に、その旨を注意して行う予報として注意報を、また重大な災害の起こるおそれのある旨を警告して行う予報を警報と定義している。すなわちわが国では、気象現象の激しさの程度によって注意報と警報を区分しているものと考えられる。一方アメリカにおいては、上述の声明にも見られるように、竜巻注意報は竜巻が発生する可能性のある場合 (most likely to occur) に、竜巻警報は竜巻がまさに発生するか、現に発生している場合 (be imminent or

occurring) に発令される。すなわち現象の発生の可能性の程度で区分している。今後日本における竜巻の予警報を考える場合にはこれらの日米の相違を認識しておく必要がある。

耐風工学の分野について振り返ってみると、わが国の建築物荷重指針・同解説においては、風荷重を算定する場合に熱帯低気圧および温帯低気圧に伴う強風のみを対象としており、竜巻による強風は考慮していない。一方アメリカにおいては、風荷重基準 (ANSI A58.1-1982) において、竜巻を考慮した耐風設計を行うことの重要性が指摘され、参考のためにいくつかの文献が示されている。実際アメリカにおいては、原子力関係施設に対して、1974年に定められたアメリカ原子力委員会規則 (US AEC Regulatory Code 1.76) によって、地域別に、竜巻による強風、竜巻に伴う気圧降下および竜巻による飛散物に対する耐風設計基準が示されている。

日本においても、竜巻による強風や飛散物に対する耐風設計を定めるための研究を開始する時期に来ているものと考えられる。このためにも竜巻に関する基礎資料を蓄積することが急務である。

謝 辞

この報告を準備するにあたって貴重な資料を提供していただいた、気象庁企画課の桜井邦雄補佐官に感謝いたします。

参考文献

- 1) 新野 宏・藤谷 徳之助・室田 達郎・山口 修由・岡田 恒, 1991: 1990年12月11日に千葉県茂原市を襲った竜巻の実態とその被害について, 日本風工学会誌, No. 48, 15-25.
- 2) 桂 順治編, 1991: 1990年12月11日千葉県に発生した竜巻による暴風災害の調査研究, 文部省科学研究費突発災害調査研究成果, 131pp.
- 3) Niino, H. et al., 1991: An Observational Study of the Mobarra Tornado, Proceedings of Tornado Symposium III, April 2-5, 1991, Norman Oklahoma (Submitted).
- 4) Fergusson, E. W. et al., 1989: The Tornado Season of 1986, Mon. Wea. Rev., 117, 221-230.
- 5) Hope, J. R., 1975: Atlantic Hurricane Season of 1974, Weatherwise, 28, 12-18.