

竜巻などの激しい突風に関する気象情報の 利活用について

平成 22 年 3 月

気象庁

初 版 平成 21 年 3 月 27 日
改訂版 平成 22 年 3 月 30 日

目 次

「利活用について」作成の目的	3
----------------------	---

【 第一部 】 利用と留意点

1. 竜巻などの激しい突風に関する気象情報の解説	
1-1 対象となる「竜巻などの激しい突風」とは	5
1-2 竜巻などの激しい突風に関する気象情報とは	7
1-3 竜巻注意情報について	8
1-4 竜巻発生確度ナウキャストについて	10
1-5 竜巻発生確度ナウキャストと竜巻注意情報の関係	17
2. 竜巻などの激しい突風に関する気象情報の利用方法と留意点	
2-1 段階的に発表される各気象情報の関係	18
2-2 竜巻などの激しい突風に関する気象情報の基本的な利用方法	20
2-3 各段階で発表される気象情報の精度	22
2-4 予測精度の低い情報を利用する場合の留意点	24
《参考1》竜巻による被害の例	25
《参考2》竜巻注意情報の発表に際してとるべき行動	26
《参考3》実際に竜巻が間近に迫った場合の身の守り方	27
2-5 竜巻などの激しい突風に関する気象情報の入手方法	28
3. 竜巻などの激しい突風に関する気象情報の想定利用例	
3-1 対応計画の作成	30
3-2 屋外作業や行事における情報利用イメージ	31

4. 報道機関や民間気象事業者による情報提供	
4-1 情報提供の基本的な考え方	34
4-2 テレビ・ラジオによる情報提供	34
4-3 携帯電話による情報提供	36
4-4 ホームページ（インターネット）による情報提供	36

【第二部】技術解説

1. 概要	38
2. 気象レーダーの基礎知識	39
3. メソサイクロンの検出（気象ドップラーレーダー）	40
4. 突風ポテンシャル指数（数値予報）	42
5. 突風危険指数（数値予報＋気象レーダー）	43
6. 竜巻などの激しい突風の可能性がある地域の判定技術	44

【参考資料】

1. 竜巻などの激しい突風による被害の現状	47
2. コスト／ロスを考慮した竜巻発生確度ナウキャストの発生確度1と2の利用	61

「利活用について」作成の目的

平成 22 年 5 月から「竜巻発生確度ナウキャスト」の提供を開始する。本書では、事業者などの利用者、及び情報提供に協力をいただく報道機関・民間気象事業者などが、提供開始当初から速やかに新たな情報を利用できるよう、竜巻などの激しい突風に関する気象情報の特徴、効果的な利用法、および利用上の留意点などを示す。

(1) 竜巻発生確度ナウキャストの提供の背景

近年、竜巻などの激しい突風による災害が相次ぎ、平成 17 年 12 月に山形県内の羽越線で発生した突風による列車脱線事故、平成 18 年 9 月に宮崎県延岡市、同年 11 月に北海道佐呂間町でそれぞれ発生した竜巻では、多数の死者を出す大きな災害となった。これらの災害を契機に、気象庁では竜巻などの激しい突風の予測技術の開発を進め、平成 20 年 3 月に、「竜巻注意情報」の発表を開始した。更に、平成 22 年 5 月からは、竜巻などの激しい突風が発生する可能性がある地域を解析し、1 時間後までの移動を予測した分布図型式の情報である「竜巻発生確度ナウキャスト」の提供を開始する。

(2) 「利活用について」作成の目的

竜巻などの激しい突風は、発現時間が短く極めて小規模な現象のため、最新の技術を用いても観測や予測が難しい。このため、「竜巻注意情報」や「竜巻発生確度ナウキャスト」の精度は必ずしも高くはない。しかし、情報の精度及び利用上の留意点等を理解した活用方法を広めることで、できるだけ多くの皆様に利用していただき、ひとりでも多くの命を救うことに繋がることを目指している。

竜巻などの激しい突風に注意を呼びかける気象情報は、一般の利用者には、テレビ・ラジオ等による報道の他、一部自治体等の情報提供サービス、気象庁のホームページなどを通じて提供されている。さらに、様々なニーズに対応した多様な利用形態に対しては、民間気象事業者などによる対応が期待されている。

本書は、提供開始当初から様々な分野で速やかに竜巻発生確度ナウキャストを利用できるよう、竜巻発生確度ナウキャストを中心に、竜巻などの激しい突風に関する気象情報の特徴や効果的な利用法、および報道機関や民間気象事業者などから利用者への情報提供に関する留意点をまとめて解説したものである。

(3) 「利活用について」の対象と構成

本書の内容は、竜巻などの激しい突風に関する気象情報を、屋外作業の安全確保などの目的で利用する事業者や、テレビなどの気象情報解説者、気象庁が提供する各種情報や資料から気象情報を加工して提供を行う民間気象事業者などを対象としている。

本書の構成は、第一部に、事業者などの利用者が竜巻発生確度ナウキャストを効果的に利用するための方法や留意点、および、報道機関や民間気象事業者などが情報を提供する際の解説例や留意点など、特に理解していただきたい内容を示す。第二部では、竜巻などの激しい突風の予測に関する技術の解説を行い、参考資料では竜巻などの激しい突風による被害の現状、およびコスト／ロスモデルに基づいた予測利用の考え方について解説している。第二部や参考資料は、第一部を理解するうえで背景となる技術的事項等であり、必要に応じて目を通していただきたい。

コラム 「ナウキャスト」

ナウキャストとは、今（ナウ）と予報（フォーキャスト）を組み合わせた造語であり、現在までの天気の解析と、その変化傾向の外挿を基に、1～2時間程度先までの短時間予報を行うものである。突風・雷・強雨など状況の変化の大きい局地的な現象の予測にはナウキャスト技術は非常に有効な手段となる。

【 第一部 】 利用と留意点

1. 竜巻などの激しい突風に関する気象情報の解説

1-1 対象となる「竜巻などの激しい突風」とは

「竜巻などの激しい突風」とは、積乱雲に伴って発生する「竜巻」、「ダウンバースト」、「ガストフロント」による激しい突風の総称である。竜巻発生確度ナウキャストや竜巻注意情報など、竜巻などの激しい突風に関する気象情報は、これらの突風を対象とする。

竜巻などの激しい突風に関する気象情報は、積乱雲に伴って発生して災害をもたらす激しい突風を対象とする。具体的には「竜巻」や「ダウンバースト」及び「ガストフロント」による突風である。台風や低気圧、冬型の気圧配置などにより、広い範囲で平均的に強い風が吹く状況下で「風の息」により一時的に風が強まる突風や、地形による局地風、強い日射により発生する塵旋風などは対象としない。

本書においては、積乱雲に伴って発生する「竜巻」、「ダウンバースト」、「ガストフロント」による激しい突風を総称して、「竜巻などの激しい突風」と呼ぶ。竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストでは名称に「竜巻」という用語を使っているが、これは利用者が激しい突風に対して最も危機意識を感じる現象が竜巻と考えられるためであり、「竜巻」の中にはダウンバーストやガストフロントに対する注意も含んでいる。

低気圧や台風は数百 km～数千 km と水平規模が大きいですが、竜巻などの激しい突風は水平規模が数十 m から数 km と小さく、アメダスなどの気象観測網でも捉えることは困難な現象である。寿命は数分から数十分と非常に短い現象にもかかわらず、建物などに甚大な被害をもたらす、生命も脅かす危険な現象である。

竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストの対象になる突風の強さは、F スケール（参考資料 1(7)、付録 1 参照）で概ね F0（15 秒間の平均風速で 17～32m/s）以上である。しかし、発達した積乱雲の下では F0 に満たない突風もしばしば発生するので、この程度の突風にも注意を要する利用者は、竜巻注意情報などの情報が発表されていなくても、発達した積乱雲の発生や接近に注意する必要がある。

(1) 竜巻 (図 1-1 a)

竜巻は、積雲や積乱雲に伴って発生する鉛直軸を持つ激しい大気中の渦巻きが地上に達しているものである。漏斗状または柱状の雲を伴うことがある。多くの場合、竜巻の直径は数十～数百mで、数kmに渡ってほぼ直線的に移動する。移動速度は時速数十km程度のものが多いが、中にはほとんど動かないものや時速90kmと非常に速い場合もある。被害地域は帯状になる特徴がある。

(2) ダウンバースト (図 1-1 b)

ダウンバーストは、積雲や積乱雲から吹き降ろす下降気流が地表に衝突して水平に吹き出す激しい空気の流れである。吹き出しの広がり直径数百 m から 10km 程度である。その広がり大きさが 4km 以上のものをマクロバースト、4km 未満のものをマイクロバーストと分類することがある。被害地域は面的に広がる特徴がある。

(3) ガストフロント (図 1-1 c)

ガストフロントは、積雲や積乱雲の下で形成された冷たい空気のかたまりが、その重みによって周辺に流れ出ることによって発生する。流れ出る空気の先端は冷気と周囲の暖かい空気との境界であり、突風を伴うことからガストフロント (突風前線) と呼ばれている。水平の広がり竜巻やダウンバーストより大きく、数十 km 以上に達することもある。

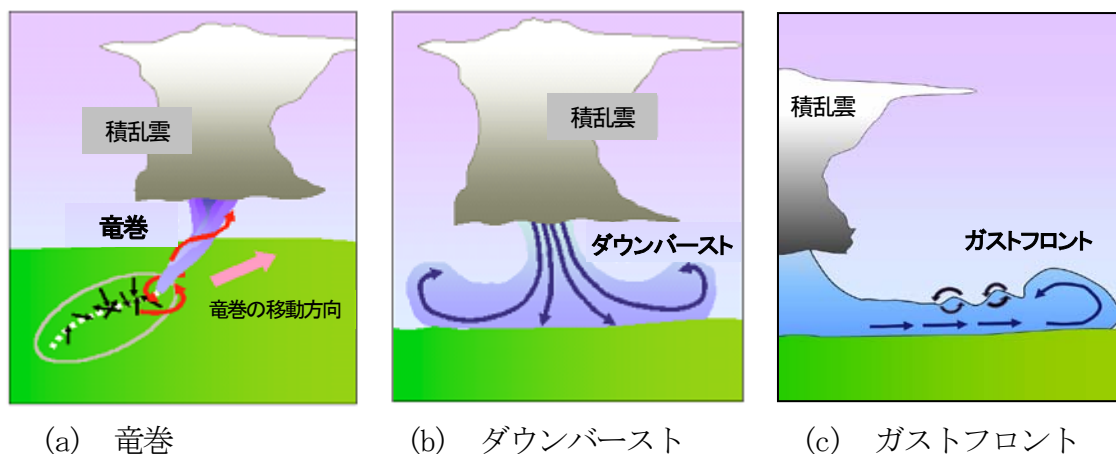


図 1-1 積乱雲に伴って発生する激しい突風をもたらす現象

※ 各現象に伴って見られることの多い主な特徴については、参考資料 1 【付録 2】を参照

1-2 竜巻などの激しい突風に関する気象情報とは

竜巻などの激しい突風に関する気象情報には、事前に注意を呼びかける「予告的な気象情報」と「雷注意報」、竜巻などの激しい突風が発生しやすい気象状況になった時点の「竜巻注意情報」があり、各地の気象台から発表される。さらに平成 22 年 5 月からは、平常時を含めて常時提供する「竜巻発生確度ナウキャスト」が加わる。本書ではこれらを総称して、「竜巻などの激しい突風に関する気象情報」と呼ぶ。

(1) 予告的な気象情報

低気圧の発達などにより災害に結びつく気象現象が予想される場合、半日～1 日程度前に「大雨と雷及び突風に関する〇〇県気象情報」などの標題で予告的な気象情報が発表される。このとき、竜巻などの激しい突風の発生が予想される場合には、「竜巻などの激しい突風」と明記して注意を呼びかける。

(2) 雷注意報

雷注意報は積乱雲に伴う激しい現象（落雷、ひょう、急な強い雨、突風など）の発生により被害が予想される数時間前に発表される。このとき、竜巻などの激しい突風の発生が予想される場合には、注意報本文の付加事項に「竜巻」と明記して特段の注意を呼びかける。

(3) 竜巻注意情報

気象ドップラーレーダーの観測などから、竜巻などの激しい突風が発生しやすい気象状況になったと判断されたときに、竜巻注意情報が発表される。詳しくは 1-3 で解説する。

(4) 竜巻発生確度ナウキャスト

気象ドップラーレーダーの観測などを利用して、竜巻などの激しい突風の可能性がある地域を分布図（10km 格子単位）で表し、その 1 時間後までの移動を予測する。竜巻発生確度ナウキャストは、平常時を含めて常時 10 分毎に発表される。詳しくは 1-4 で解説する。

《 暴風警報や強風注意報との違い 》

暴風警報や強風注意報は、台風や低気圧、冬型の気圧配置などにより、広い範囲で平均的に強い風が吹いて災害の恐れがある場合に発表される。

1-3 竜巻注意情報について

竜巻注意情報は、竜巻などの激しい突風が発生しやすい気象状況になったときに、各地の気象台が、県などを対象に発表する文章形式の気象情報である。

(1) 竜巻注意情報の概要

竜巻注意情報は、気象ドップラーレーダーによる観測等から竜巻などの激しい突風が発生しやすい気象状況になったと判断されたときに、各地の気象台から発表される。竜巻注意情報は、雷注意報の発表中に発表される雷注意報を補完する気象情報であり、各地の気象台などが担当している地域（概ね1つの県）を対象に文章形式で発表される（図1-2）。

なお、竜巻などの激しい突風の発生しやすい状況は長時間継続しないことが多いことから、竜巻注意情報では発表から1時間の有効時間を設けている。有効時間を過ぎても危険な気象状況が続くと予測した場合には、竜巻注意情報を再度発表する。

なお、これまで最後の行で「対象地域」として、竜巻注意情報の発表時点で雷注意報が発表されている二次細分区域を表示していたが、竜巻発生確度ナウキャスト開始以降は、「対象地域」の表示は廃止する。これは、竜巻注意情報発表後も状況は刻々と変化するため、注意を要する地域の詳細や今後の変化は竜巻発生確度ナウキャストを利用して把握するという役割分担を明確にするためである。

〇〇県竜巻注意情報 第1号
平成××年6月21日15時26分 △△地方気象台発表

〇〇県では、竜巻発生のおそれがあります。

竜巻は積乱雲に伴って発生します。雷や風が急変するなど積乱雲が近づく兆しがある場合には、頑丈な建物内に移動するなど、安全確保に努めてください。

この情報は、21日16時30分まで有効です。

図1-2 竜巻注意情報の文例

(2) 竜巻注意情報の精度

竜巻などの激しい突風は、非常に規模が小さく稀にしか発生しない現象であるため、最新の技術を用いても予測が難しい。このため、竜巻注意情報の精度は通常の天気予報などと比べて低く、これまでのところ適中率は概ね5～10%程度、捕捉率は20～30%程度となっている。

適中率とは、竜巻注意情報を発表した回数のうち、実際に竜巻などの激しい突風が発生した比率である。適中率が10%の場合、竜巻注意情報を100回発表すると、そのうち10回は実際に竜巻などの激しい突風が発生するが、残りの90回では発生せず空振りになるということである。

捕捉率とは、実際に発生した竜巻などの激しい突風の回数に対して、竜巻注意情報を発表できた回数の比率である。捕捉率が30%とすると、竜巻などの激しい突風が100事例発生したとして、そのうち30事例については竜巻注意情報を発表できるが、残りの70事例については発表できず（または間に合わず）見逃しになるということになる。

(適中率と捕捉率の意味については、13ページのコラムも参照。)

(3) 雷注意報と竜巻注意情報の特徴の比較

竜巻などの激しい突風が発生するときには、ほとんどの場合、事前に雷注意報が発表されている。すなわち、雷注意報を突風発生の予報とみなした場合、捕捉率は100%に近いということである。しかし、雷注意報の発表回数は竜巻注意情報の10倍以上、1回当たりの発表時間も10時間以上と長い。つまり、雷注意報の発表時間は竜巻注意情報に比べ、延べ時間にして100倍以上も長いということになる。

一方、竜巻注意情報は、捕捉率は20～30%程度であるものの、竜巻などの激しい突風が発生しやすい気象状況を絞り込んでいるので、竜巻注意情報発表中は雷注意報発表中に比べて竜巻などの激しい突風の発生する可能性ははるかに高い。地域・期間とも限定的な試算ではあるが、竜巻注意情報運用開始前の関東地方の1年間のデータで調べたところ、竜巻注意情報発表中に竜巻など激しい突風の発生する可能性は、雷注意報の30倍以上も高いという結果であった。

1-4 竜巻発生確度ナウキャストについて

竜巻発生確度ナウキャストは、気象ドップラーレーダーによる観測などから竜巻などの激しい突風の発生する可能性がある地域を解析し、1時間先までの移動を予測する情報である。分布図形式（格子点データ）で、平常時も含めて10分毎に最新の情報を提供する。

(1) 竜巻発生確度ナウキャストの概要

竜巻発生確度ナウキャストは、気象ドップラーレーダーの観測等に基づき、10km四方の格子単位で竜巻などの激しい突風の発生する可能性を解析し、その1時間先までの移動予測を行うものである。発表時刻における解析と1時間後までの10分単位の予測を分布図で示し、格子点データとしても提供する。時々刻々変化する状況に追従できるよう、平常時も含めて10分毎に最新の情報を提供する（図1-3）。

降水や雷とは異なり、竜巻などの突風はレーダーなどの観測機器で実体を捕らえることができないため、竜巻発生確度ナウキャストでは、「発生確度」という言葉を使って、ドップラーレーダー観測などのデータから推定した「竜巻が現在発生している（または今にも発生する）可能性の程度」を示す。なお、竜巻注意情報は、竜巻発生確度ナウキャストで予測も含めて発生確度2となった地域（県など）に対して発表される。発生確度1は発生確度2に比べて適中率は低いが捕捉率は高いという特徴がある。

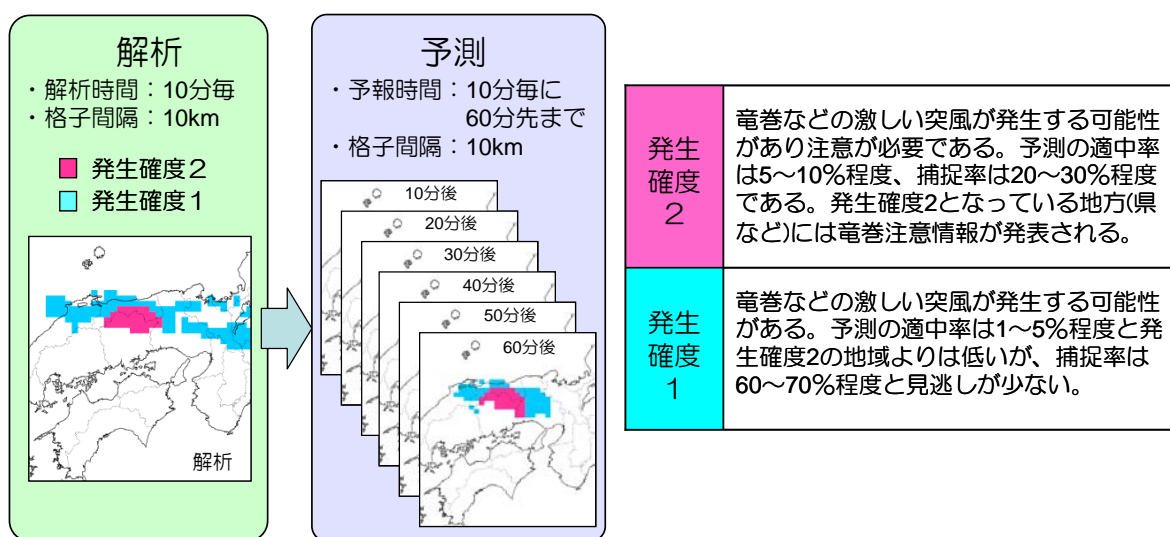


図1-3 竜巻発生確度ナウキャストの概要

竜巻発生確度ナウキャストの分布図の見方は次の通りである。

- 発生確度 2 の地域
 - 竜巻などの激しい突風が発生する可能性があり、竜巻の発生に注意が必要である。
 - 発生確度 2 となっている地域（県など）には竜巻注意情報が発表される。
 - 予測の適中率は 5～10%程度と発生確度 1 に比べて高いが、捕捉率は 20～30%程度と低く、竜巻などの激しい突風の発生を見逃してしまう場合が多いことに留意する必要がある。
- 発生確度 1 の地域
 - 発生確度 2 の地域よりは低いですが、竜巻などの激しい突風が発生する可能性がある。
 - 予測の適中率は 1～5%程度と低いが、発生確度 1 と 2 を合せると捕捉率が 60～70%と高くなり見逃しを減らすことができる。
- 発生確度 1 や 2 となっていない地域
 - 発生確度 1 や 2 となっている地域に比べると竜巻など激しい突風の可能性は低いですが、積乱雲が発生している場合には竜巻などの激しい突風が発生する可能性があることに留意する必要がある。

(2) 竜巻発生確度ナウキャストの精度

竜巻発生確度ナウキャストについて、開発段階での検証結果を図1-4に示す。検証方法等は以下の通りである。

- 検証期間は、平成20年4月～平成21年3月の1年間。
- 検証地域は、全国。
- 発生確度1や2となった時刻から1時間（6回）分の一連の予測を1回の予測とカウントして検証した。
- 1格子単位ではなく、1回の発表で発生確度1や2となった範囲（図1-3のように一定の広がりを持った範囲）を対象とした検証とした。
 - ▶ 解析時刻から60分後までの予測の間に発生確度2（発生確度1の検証では発生確度1以上）となった全ての格子内のどこかで竜巻などの激しい突風が発生した場合、この回の予測を適中とした。
 - ▶ 発生確度2（または発生確度1以上）となった全ての格子内のどこにも竜巻などの激しい突風が発生しなかった場合、この回の予測を空振りとした。
 - ▶ 適中率や捕捉率の計算方法は、次ページのコラムを参照。

発生確度2の適中率は6.1%、捕捉率は26%である。一方、発生確度1の適中率は2.7%と低いが、捕捉率は62%と高く見逃しが少ない。発生確度1の捕捉率が高く見逃しが少ないのは発表回数が多いためであり、発生確度1の発表回数は発生確度2の5倍以上となっている。

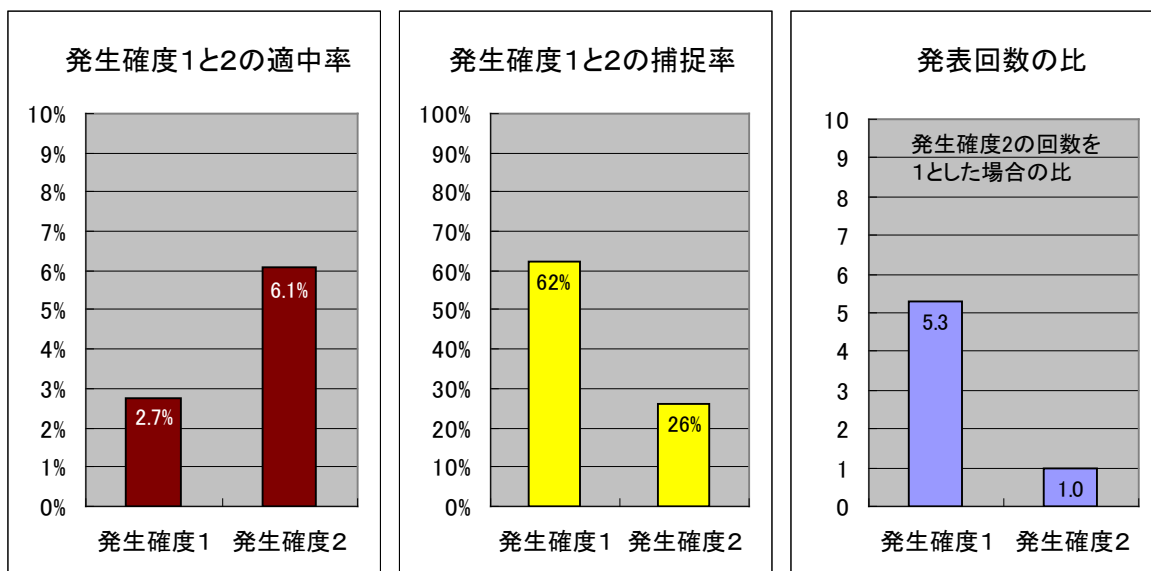


図1-4 竜巻発生確度ナウキャストの精度

コラム 評価スコアの計算方法について

突風の有無の予報の検証では、まず、予報有りで突風有り、予報有りで突風無し、予報無しで突風有りのなどの回数を数える。これを整理したものを分割表という。

突風（竜巻などの激しい突風）の有無予報の分割表

		実況（突風の発生）		計
		有り	無し	
予報	有り	a 突風有り予報の適中数 (突風有り事例の捕捉数)	c 突風有り予報の空振り数	a+c
	無し	b (突風有り事例の見逃し数)	d 突風無し予報の適中数	
計		a+b		

本書で用いている評価スコアの適中率と捕捉率は、この分割表の各回数を用いて以下の定義で計算したものである。

$$\text{適中率} = a / (a + c)$$

$$\text{捕捉率} = a / (a + b)$$

竜巻などの激しい突風のように稀にしか発生しない現象については、「予報も突風も無し」という場合が圧倒的に多いので、突風無しの予報の適中数dは非常に大きな数になり、dも加えた適中率の評価にはあまり意味がない。このため、今回の評価で利用する適中率は、予報有りの全発表回数のうち予報が適中した発表回数の比率とした。適中率の高い（低い）予報とは、空振りが少ない（多い）予報ということになる。

捕捉率とは、全突風事例数のうち発生時に予報が発表されていた事例数の比率である。捕捉率の高い（低い）予報とは、見逃しが少ない（多い）予報ということになる。なお、本書で「空振りが多い（少ない）」と記述しているのは、分割表のcの回数であり、「見逃しが多い（少ない）」と記述しているのは、分割表のbの回数のことである。

(3) 竜巻発生確度ナウキャストの発生確度1と2の発表回数

竜巻発生確度ナウキャストの利用にあたっては、発生確度1や2の発表回数がどの程度になるのかも考慮する必要がある。そこで、平成19年4月～20年3月の1年間について、関東地方周辺における発生確度1と2の発表回数を調べた(図1-5)。特定の1年間のみのデータであることに留意が必要である。

竜巻発生確度ナウキャストは10分毎に発表するので年間の発表回数は52560回となる。発生確度1や2の発表回数とは、そのうち各格子において発生確度が1以上または2となった回数である。関東地方の各格子では、発生確度1の発表回数が年間200回前後、発生確度2の発表回数が多い格子で20～30回程度であった。

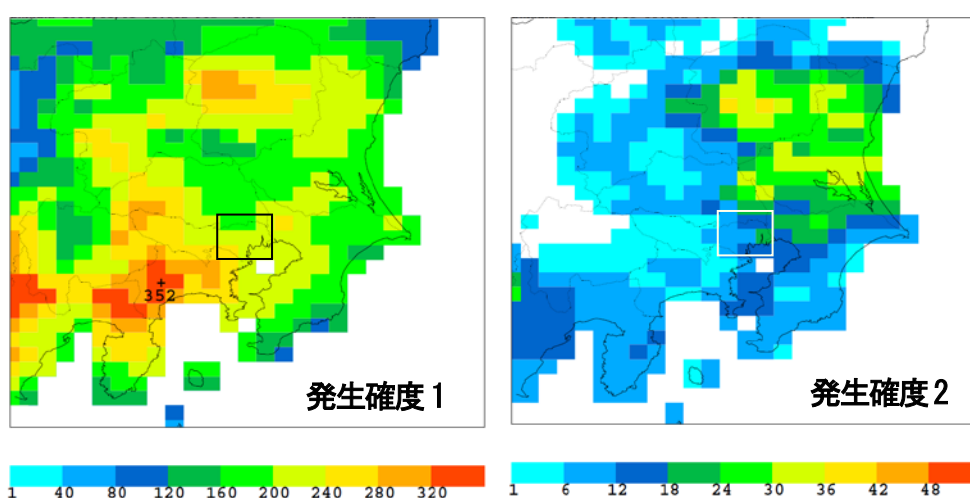


図1-5 竜巻発生確度ナウキャストの発生確度1と2の1年間の発表回数分布

次に東京23区(図1-5に示した枠内9格子)を例に発生確度1と2の発表回数をみる。この9格子のうち1格子でも発生確度1や2となった回数を集計すると表1-1の通りとなる。発表時間数とは発生確度1や2が発表された延べ時間であり、発表回数(10分毎)の1/6となる。発表日数とは1回でも発生確度1や2が発表された日数である。発生確度1や2が発表される日には、複数回の発表(10分毎)となることが多いため、発表日数で見ると数字は小さくなる。調査した東京23区の1年間では、発生確度1の発表日数は37日あったのに対し、発生確度2の発表日数は5日であった。

表1-1 東京23区内における1年間の発生確度1と2の発表回数

東京23区内	発生確度1	発生確度2	1年間総数
発表回数(10分毎)	483	25	52560(10分)
発表時間数	80	4	8760(時間)
発表日数	37	5	365(日)

(4) 発表日数から見た雷注意報と竜巻発生確度ナウキャストの関係

表1-1では、東京23区における1年間の発表日数は発生確度1が37日、発生確度2は5日であった。一方、同じ1年間に東京23区に雷注意報が発表された日数は述べ66日であった。これらの関係を図示したのが図1-6である。通常、雷注意報は発生確度1や2が現れる前に発表されている。この1年間の東京23区では、発生確度1の発表日数は雷注意報発表日数の約半分、発生確度2は1/10以下であった。雷注意報が発表されても竜巻発生確度ナウキャストの発生確度1や2が現れない日が半数近くある。

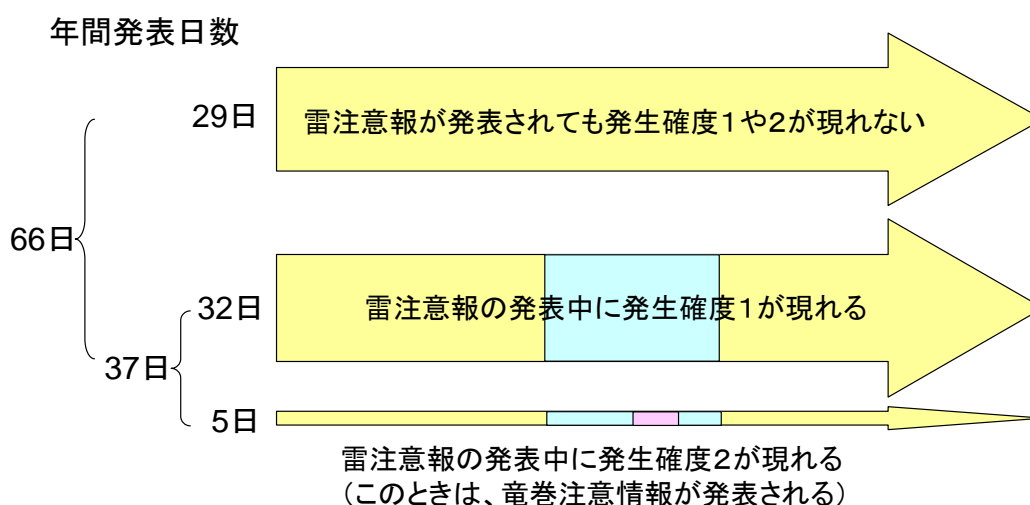


図1-6 発表日数から見た雷注意報と竜巻発生確度ナウキャストの関係
平成19年4月～20年3月の1年間に於ける東京23区の場合。黄色は雷注意報が発表されている時間帯、水色は発生確度1が現れている時間帯、桃色は発生確度2が現れている時間帯を意味する。

(5) 竜巻発生確度ナウキャストの例

図1-7は2007年4月28日15時00分、図1-8は2008年7月27日12時00分を発表時刻とした竜巻発生確度ナウキャストの例である。最上段は発表時刻における発生確度の解析、その他の6枚は10分後～60分後までの予測である。

図1-7の事例には発生確度1と2の両方が現れている。予測部分は主に移動を考慮したものだが、有効時間も考慮している。60分後の予測で発生確度2が消えているのは、発生確度2の有効時間が、発表時刻15時00分の時点で残り50分になっていたためである。

図1-8の事例では発生確度1のみが現れている。発生確度2に比べて発生確度1の発表回数はかなり多いので、このような分布となることが多いが、竜巻などの激しい突風の多くは発生確度1の段階で発生していることを認識しておく必要がある。



図 1-7 2007 年 4 月 28 日 15 時 00 分発表の例

■ 発生確度 2
■ 発生確度 1

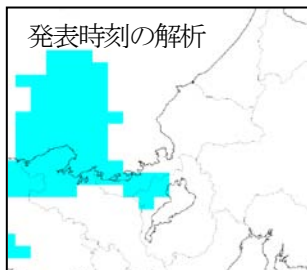
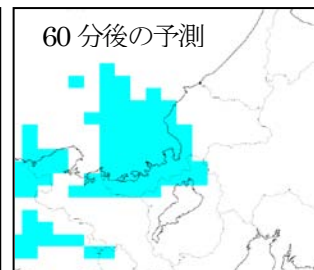
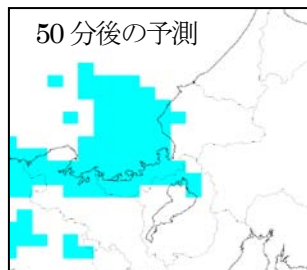
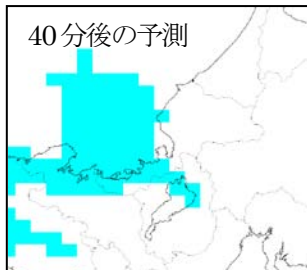
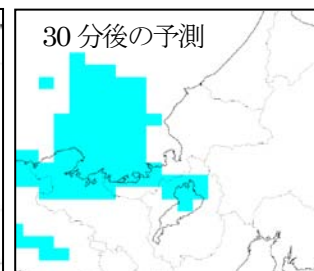
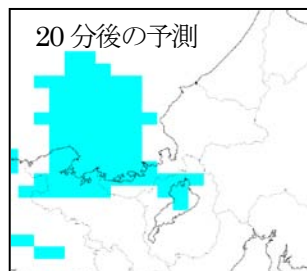
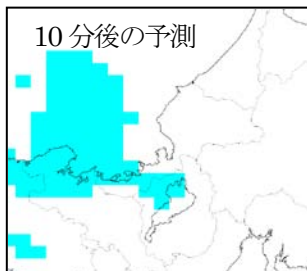


図 1-8 2008 年 7 月 27 日 12 時 00 分発表の例

■ 発生確度 2
■ 発生確度 1



1-5 竜巻発生確度ナウキャストと竜巻注意情報の関係

竜巻注意情報は、竜巻発生確度ナウキャストの発生確度2が現れた県などを対象に発表される。竜巻注意情報は県内で竜巻などの激しい突風が発生しやすい気象状況になったことをお知らせする情報、竜巻発生確度ナウキャストは、その地域的分布と今後の予測を詳細に示す情報という役割を持つ。

(1) 竜巻発生確度ナウキャストの発生確度と竜巻注意情報の関係

竜巻発生確度ナウキャストの発生確度2の判定基準は、現在の竜巻注意情報の判断基準と同等であり、竜巻発生確度ナウキャストの開始後には、予測も含めて発生確度2が現れた地域（県など）に竜巻注意情報が発表される。県内に竜巻注意情報が発表された場合、竜巻発生確度ナウキャストにより竜巻などの激しい突風の可能性がある地域の詳細や今後の予測を確認することができる。

(2) 竜巻発生確度ナウキャストと竜巻注意情報の役割

竜巻注意情報は、県内で竜巻などの激しい突風の可能性がある発生しやすい気象状況になったことをお知らせする情報である。一方、竜巻発生確度ナウキャストは、竜巻などの激しい突風が発生する可能性の詳細な地域的分布や、1時間先までの予測を示すもので、竜巻注意情報や雷注意報を補足する情報としての役割を持つ。

現在の竜巻注意情報では、情報文の末尾の「対象地域」に、竜巻などの激しい突風が発生する可能性がある地域として、竜巻注意情報発表時点での雷注意報発表地域名を表示しているが、平成22年5月の竜巻発生確度ナウキャストの提供時には「対象地域」の表示を廃止する。これは、竜巻注意情報の発表後にも状況は刻々と変化するので、竜巻注意情報が発表されたら竜巻発生確度ナウキャストを利用して、竜巻などの激しい突風の可能性がある地域の詳細および今後の変化を把握するという役割分担とするためである。

なお、竜巻発生確度ナウキャストの発生確度1は、突風による影響の大きな事業者等で、適中率が低くても捕捉率が高く見逃しが少ないことを重視する場合の利用を想定している。

2. 竜巻などの激しい突風に関する気象情報の利用方法と留意点

2-1 段階的に発表される各気象情報の関係

竜巻などの激しい突風に関連する気象情報には、予告的な気象情報、雷注意報、竜巻注意情報、及び竜巻発生確度ナウキャストがある。これらは、時間経過および突風の発生可能性の高まりに応じて段階的に適宜発表される。竜巻発生確度ナウキャストは常時提供される気象情報だが、発生確度1や2は竜巻などの激しい突風が発生しやすい気象状況となった時点で現れる。

竜巻などの激しい突風が予想される場合には、時間経過および突風の発生可能性の高まりに応じて段階的に適宜、予告的な気象情報、雷注意報、竜巻注意情報が発表される。

一方、竜巻発生確度ナウキャストは10分毎に常時提供される気象情報だが、発生確度1や2は竜巻などの激しい突風が発生しやすい気象状況となった時点で現れ、発生確度2が現れた地域(県など)には竜巻注意情報が発表される。竜巻発生確度ナウキャストでは、現在の発生確度1や2の状況の解析に加えて、1時間後までの移動予測も行う。

以下では、段階的に発表される各気象情報の関係と、各気象情報が発表される時の状況を示す(図2-1)。

(1) 予告的な気象情報と雷注意報(事前に発表される気象情報)

予告的な気象情報は突風の発生が予想される時間帯の半日~1日程度前、雷注意報は数時間前に発表される気象情報である。事前の予測が難しく予告的な気象情報の発表に至らないときでも、雷注意報や竜巻注意情報が発表される場合もある。

- 予告的な気象情報が発表される場合

数値予報資料から竜巻などの激しい突風の可能性が高いと判断された場合、突風の発生が予想される時間帯の半日~1日程度前に、予告的な気象情報が発表される。この状況下で雷注意報が発表された場合には、通常の雷注意報より竜巻などの激しい突風につながるおそれが高いと考えておく必要がある。

- 予告的な気象情報が発表されていないときの留意点

前もって竜巻などの激しい突風に関する気象情報が発表されていない場合でも、当日の気象状況によっては、局地的に積乱雲が発達して竜巻等の激しい突風の発生につながる場合がある。必ずしも、竜巻注意情報や雷注意報に先立って、予告的な気象情報が発表されるとは限らないということを知っておく必要がある。

- (2) 竜巻発生確度ナウキャストと竜巻注意情報（危険な状況を示す気象情報）
- 竜巻発生確度ナウキャストは常時提供される気象情報であるが、発生確度 1 や 2 は竜巻などの激しい突風が発生しやすい気象状況となった時点で現れる。
 - 発生確度 1 と 2 の違いは、竜巻などの激しい突風が発生するまでの時間的な切迫度を表現したものではなく、発生する可能性の程度の違いを示したものである。
 - 竜巻注意情報は発生確度 2 が現れた地域（県など）に発表される。
 - 竜巻発生確度ナウキャストでは 1 時間先までの移動予測も行うので、時間的に余裕を持った対策の検討に利用されることが期待される。発生確度の分布や今後の予測から注意を要する地域や時間を絞り込むことができる。

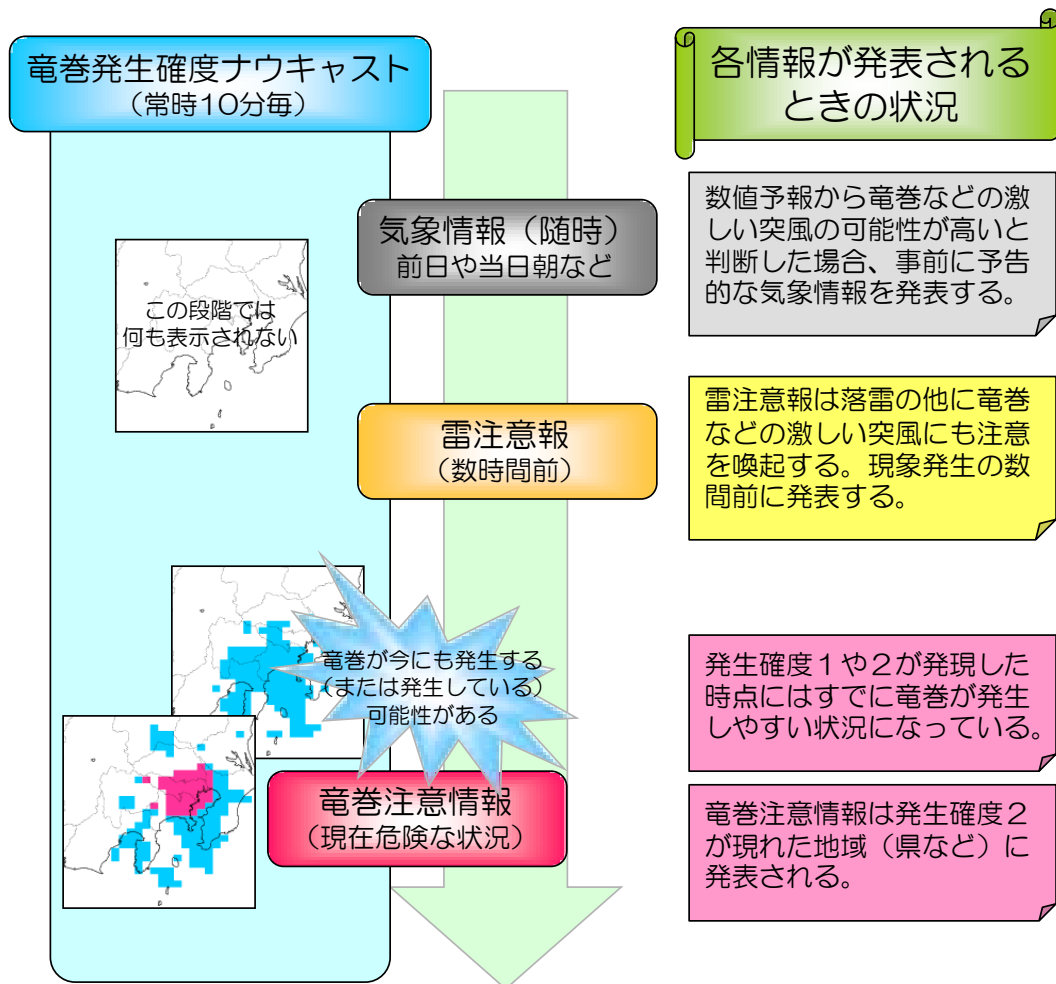


図 2-1 段階的に発表される各気象情報の関係と発表される時の状況

2-2 竜巻などの激しい突風に関する気象情報の基本的な利用方法

段階的に発表される予告的な気象情報、雷注意報、竜巻注意情報、及び常時提供される竜巻発生確度ナウキャストを組み合わせて利用し、突風発生までの時間や発生可能性の高まりに応じた対策を行う。

(1) 予告的な気象情報の発表

【 竜巻などの激しい突風の可能性がある半日～1日程度前に発表 】

- 半日～1日後には積乱雲が発達しやすい気象状況になり、落雷やひょう、急な強い雨に加えて、竜巻などの激しい突風が発生する可能性もあることを認識する。
- 行動計画の点検、もしもの場合に備えた危険回避行動策の検討などを行う。
- 今後の気象情報（雷注意報など）に注意する。

(2) 雷注意報の発表

【 竜巻などの激しい突風の可能性がある数時間前に発表 】

- 発達した積乱雲により、落雷やひょう、急な強い雨に加えて、竜巻などの激しい突風が発生する可能性がある時間帯が近づいていることを認識する。
- 安全確保に時間を要するような行動計画などについては、もしもの場合に備えた危険回避行動策の確認などを行う。
- 周辺の気象状況の変化や今後の気象情報（竜巻注意情報、竜巻発生確度ナウキャストなど）に注意する。

(3) 竜巻発生確度ナウキャストの発生確度1や2、および竜巻注意情報の発表

【 竜巻などの激しい突風が発生しやすい気象状況になった時点で発表 】

- 発達した積乱雲が発生しており、積乱雲の近辺では、落雷やひょう、急な強い雨に加えて、竜巻などの激しい突風が発生しやすい気象状況になっていることを認識する。
- 竜巻発生確度ナウキャストで、発生確度1や2となっている地域の詳細を把握する。
- 安全確保に時間を要するような場合には、1時間後までの予測も利用して、早めに危険回避準備を心がける。
- 周辺の気象状況の変化に注意し、積乱雲が近づく兆候がある場合には竜巻などの突風が発生する可能性があるため、危険回避の行動をとる。

各種気象情報を利用した各段階での基本的な対応を図2-2に示す。

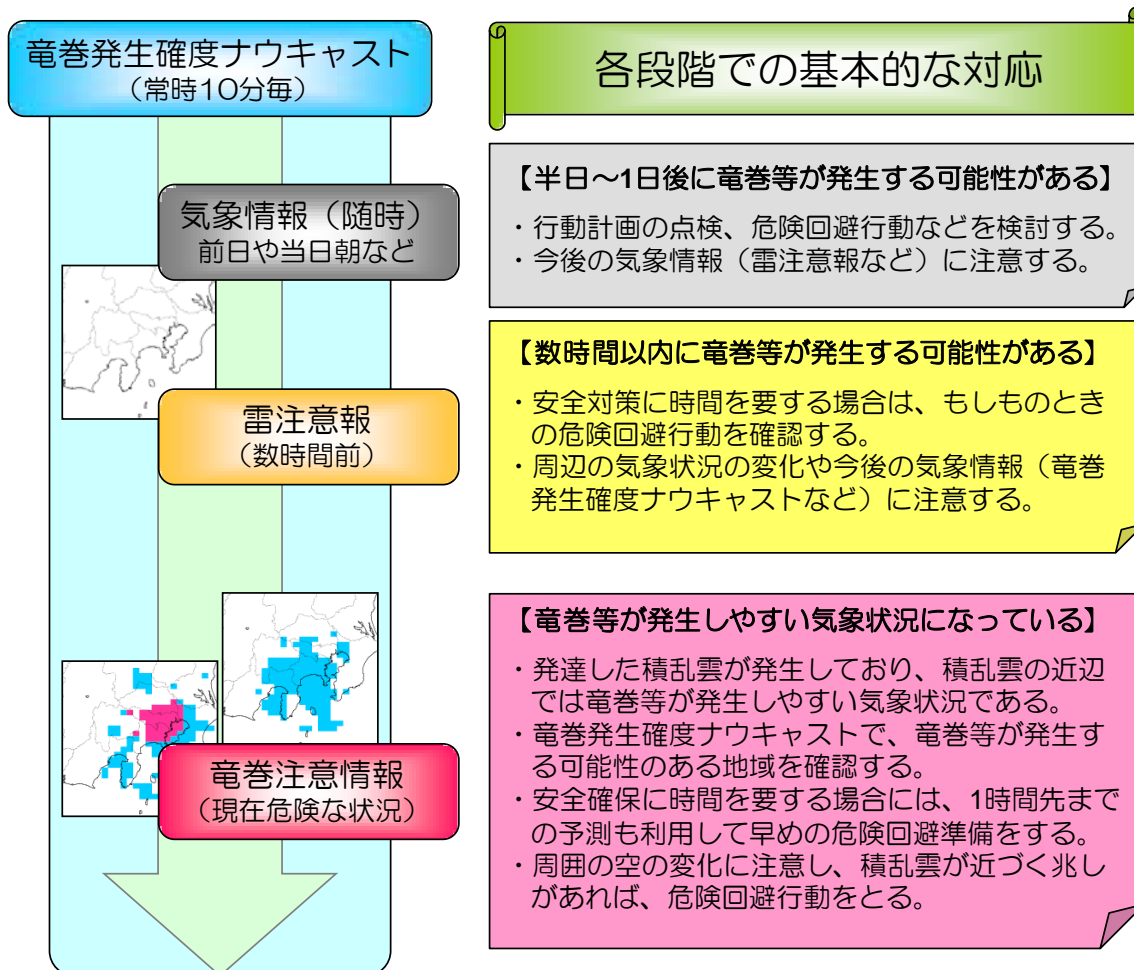


図 2-2 各種気象情報を利用した各段階での基本的な対応

2-3 各段階で発表される気象情報の精度

竜巻発生確度ナウキャストの発生確度 1 は、発生確度 2 に比べて発表回数が約 5 倍と多いため捕捉率は高いが適中率は低い。一方、発生確度 2 は、発表条件を厳しくして発表回数を抑えているため、発生確度 1 に比べて捕捉率は低いが適中率は高い。竜巻注意情報は発生確度 2 とほぼ同等の精度となっている。雷注意報は発生確度 1 より更に捕捉率が高いが、発表日数は約 2 倍になる。

竜巻などの激しい突風に関して、各段階で発表される気象情報の精度を、それぞれ特定の期間・地域で検証した結果を比較すると表 2-1 のようになる。

表 2-1 竜巻などの激しい突風に関する気象情報の精度の比較。

	予告的な気象情報	雷注意報	竜巻注意情報	竜巻発生確度ナウキャスト	
				発生確度 1	発生確度 2
発表地域の単位	県	2次細分区域*	県	10km格子	10km格子
突風発生時刻までの時間	半日～1日	数時間	0～1時間	0～1時間	0～1時間
情報の発表期間	約24時間	約12時間	1時間	1時間	1時間
発表期間内の適中率	24%	1.3%	7%	2.7%	6.1%
捕捉率	83%	87%	23%	62%	26%
年間発表日数 (東京都23区の例)	7日	66日	5日	37日	5日

* 平成22年5月からは市町村

表 2-1 のうち竜巻発生確度ナウキャストの検証は運用開始前のシミュレーションに基づいている。各情報の精度や発表日数は、以下に示すように期間や地域の異なる検証による結果である。

- ※ 予告的な気象情報は平成 18 年 10 月～19 年 9 月の 1 年間の関東地方 1 都 6 県を対象とした検証。
- ※ 雷注意報は平成 18 年 5 月～19 年 9 月の全国を対象とした検証。
- ※ 竜巻注意情報は運用開始後の平成 20 年 3 月～21 年 12 月の全国を対象とした検証。
- ※ 竜巻発生確度ナウキャストは平成 20 年 4 月～21 年 3 月の全国を対象とした検証。
- ※ 年間発表日数は平成 19 年 4 月～平成 20 年 3 月の東京都 23 区を対象とした検証。

この結果から読み取れる特徴は次の通りである。

- 予告的な気象情報は発表期間が約 24 時間と発表されている時間が長い、その間に竜巻等が発生する可能性（適中率）は 24%と比較的高く、事前準備の情報として効果的に利用できる。
- 竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストは発表期間が 1 時間と、注意すべき時間帯を絞り込んだ情報である。その中では、竜巻発生確度ナウキャストの発生確度 1 に比べて、発生確度 2 と竜巻注意情報の適中率が高い。
- 適中率を重視して発表条件を厳しくし発表回数を抑えると、見逃しが増え捕捉率が下がる。一方、捕捉率を重視して発表条件を緩め発表回数を増やすと、空振りが増え適中率が下がるという関係になる。この観点で見ると、
 - 竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストの発生確度 2 は適中率を重視しているので、適中率は 6~7%程度と発生確度 1 や雷注意報より高いが、捕捉率は低く、実際に発生する竜巻などの激しい突風全事例の内、予測ができるのは 2~3 割程度である。
 - 雷注意報や竜巻発生確度ナウキャストの発生確度 1 は、捕捉率を重視しているので捕捉率は高く、実際に発生する竜巻などの激しい突風全事例の内の 6~9 割程度を予測できるが、適中率は 1~3%程度と低い。
- 発生確度 1 の発表回数は発生確度 2 の約 5 倍（図 1-4）、雷注意報の発表回数は発生確度 1 の更に約 2 倍（図 1-6）となっており、雷注意報や発生確度 1 の利用にあたっては、空振りの回数が相当に多くなることに留意する必要がある。

2-4 予測精度の低い情報を利用する場合の留意点

竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストは、適中率が低く空振りが多くなるため、これらの発表と連動して負担（対策に要する時間や手間、及び対策の影響）の大きな対策を実施するのは難しいのが現状である。したがって、「空の様子に注意する」など、なるべく負担の小さな対策から実施するのが適当であり、負担の大きな対策の実施については、発生確度 1 や 2 の発表に現場の気象状況を加味して判断するのが現実的な利用方法といえる。

なお、竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストの発生確度 2 は捕捉率が低いので、捕捉率の高い雷注意報や発生確度 1 を含めた利用も検討する必要がある。

(1) 適中率の低い情報を利用する場合の留意点（発生確度 1・2 共通、竜巻注意情報）

竜巻などの激しい突風は、非常に規模が小さく稀な現象であるため、最新の技術を用いても予測は難しく予測精度は低いのが現状である。竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストの発生確度 1 や 2 が現れている場合には、通常に比べると竜巻などの激しい突風がはるかに発生しやすい気象状況であることは間違いないが、適中率を重視した竜巻注意情報や発生確度 2 でも適中率は低く、空振りが多いことを認識して利用する必要がある。

適中率が低く空振りが多い情報を利用する場合には、「空の様子に注意する」など、なるべく負担の小さな対策から実施するのが適当といえる。負担の大きな対策については、発生確度 1 や 2 の発表と連動して実施するのは難しいのが現状であり、発生確度 1 や 2 の発表に現場の気象状況を加味し、最終的な対策の要否を判断するのが現実的な対応といえる。現場の担当者が周辺の気象状況を監視できる場合には、「空が急に暗くなる、激しい雨やひょうが降る、雷が鳴る」など発達した積乱雲が近づいている兆候を認知した段階で、危険回避行動など負担の大きな対策を実施するのが現実的と考えられる。

なお、「竜巻の漏斗雲や突風により舞い上がる飛散物が見える」など実際に突風が発生していることを認知した場合には、速やかに避難するなどの行動が必要である。

(2) 適中率は低くても捕捉率の高い情報の利用（発生確度 1、雷注意報）

竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストの発生確度 2 は適中率を重視しているため、捕捉率は 20~30%と低く、突風の発生を見逃すことが多い。したがって、捕捉率が高く突風の発生を見逃すことの少ない雷注意報や竜巻発生確度ナウキャストの発生確度 1 も併せた利用を検討することが望ましい。これらは発生確度 2 などに比べて更に空振りの多い情報となるが、「空の様子に注意する」など負担の小さな対策であれば、対応できる場合も多いと考えられる。

《参考1》 竜巻による被害の例

竜巻は甚大な被害をもたらします。屋根が飛散したり、ときには自動車が飛ばされることもあります。特に、竜巻による飛散物は凶器となります。右下の写真のような建物への被害は止むを得ないとしても、身の安全を守るための対策は可能です。竜巻など激しい突風のスケールと被害との関係については、付録1を参照してください。

竜巻は甚大な被害をもたらします。
[地元気象台による現地調査写真など]



**建物等の被害は防げませんが、
身の安全を守るための対策は可能です!**

図2-3 竜巻による被害の例

《参考2》 竜巻注意情報の発表に際してとるべき行動

竜巻などの激しい突風は積乱雲に伴って発生しますので、竜巻注意情報が発表されたら、まず空の状態に注意を払ってください。何ものなければ特段の行動は不要ですが、積乱雲が近づく兆しを察知した場合には、近くの建物の中に入るなど身の安全を図ってください。

特に

- ・人が大勢集まる屋外行事
- ・テントの使用や、子供、高齢者を含む屋外活動
- ・高所、クレーン、足場等での作業

のように、安全確保に一定の時間を要する場合には、早めの避難開始を心がけてください。

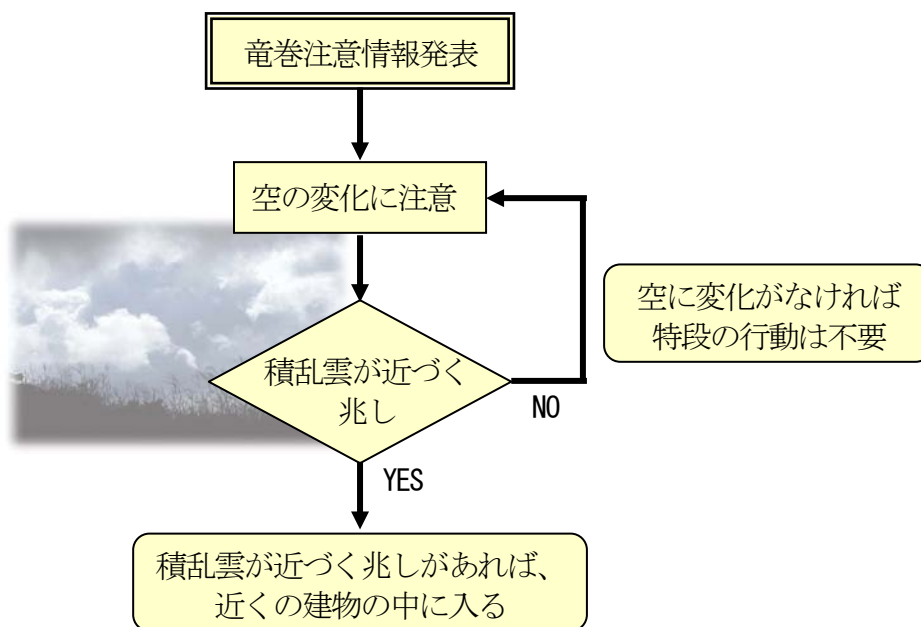


図 2-4 竜巻注意情報の発表に際してとるべき行動の流れ

《参考3》 実際に竜巻が間近に迫った場合の身の守り方

実際に竜巻が間近に迫った場合には、すぐに身を守るための行動をとる必要があります。竜巻では飛散物が凶器となりますので、飛散物から身を守ることを考えた行動をとることが大切です。

○ 竜巻が間近に迫った時の特徴

- 雲の底から地上に伸びる漏斗状の雲が目撃される。
- 飛散物が筒状に舞い上がる。
- ゴーというジェット機のような轟音がする。
- 気圧の変化で耳に異常を感じる。

○ 竜巻が間近に迫った場合の身の守り方

- 住宅内では
 - 窓から離れる。
 - 地下室か最下階へ移動する。
 - できるだけ家の中心部に近い窓のない部屋に移動する。
 - 顔を下に向け、できるだけ低くかがんで、両腕で頭と首を守る。
- オフィスビル・病院・高層ビルなどにいるときは
 - 窓のない部屋や廊下等へ移動する。ガラスのある場所からは離れる。
 - ビル内部の階段室も避難場所となる。その際、可能なら下の階へ移動する。
 - 顔を下に向け、できるだけ低くかがんで、両腕で頭と首を守る。
 - エレベーターは停止する恐れがあるので乗らない。
- 外にいるときは
 - 近くの頑丈な建物に避難する。
 - そのような建物が無ければ、飛散物から身を守れるような物陰に身を隠し、頭を抱えてうずくまる。
 - 強い竜巻の場合は、樹木や自動車などであっても飛ばされる恐れがあるので、自動車の中などでも頭を抱えてうずくまる姿勢をとることが必要である。

2-5 竜巻などの激しい突風に関する気象情報の入手方法

竜巻などの激しい突風に注意を呼びかける情報は、一般の利用者には、テレビ・ラジオ等による報道の他、一部自治体等の情報提供サービス、気象庁のホームページなどを通じて提供される。また、様々なニーズに対応した多様な利用形態への対応には、民間気象事業者などを通じた提供を想定している。

竜巻などの激しい突風に関する気象情報は、テレビ・ラジオ、気象庁ホームページなど様々なメディアを通じて入手可能である。一方、携帯電話を利用した情報提供など、利用者の要望に応じた加工情報の提供については、民間気象事業者などによるサービスに対する期待が大きい。竜巻発生確度ナウキャストの格子点データをコンピュータ処理するような高度利用をする場合には、(財)気象業務支援センターを通じて入手することになる。気象情報の主な入手方法は以下の通りである(図2-5参照)。

- 気象庁から直接入手する方法
 - 気象庁ホームページ
- 気象庁以外の機関等から入手する方法
 - テレビ・ラジオのニュース・天気予報での解説
 - テレビのテロップ、ラジオの速報(竜巻注意情報)
 - 携帯電話を利用した情報提供(自治体、民間気象事業者などによる)
- (財)気象業務支援センターを通して入手できる気象情報
 - 各種の文章型式の情報(予告的な気象情報、雷注意報、竜巻注意情報)
 - 計算機処理による加工に適したデータ(竜巻発生確度ナウキャストの格子点データ、雷注意報や竜巻注意情報のXML電文も予定)

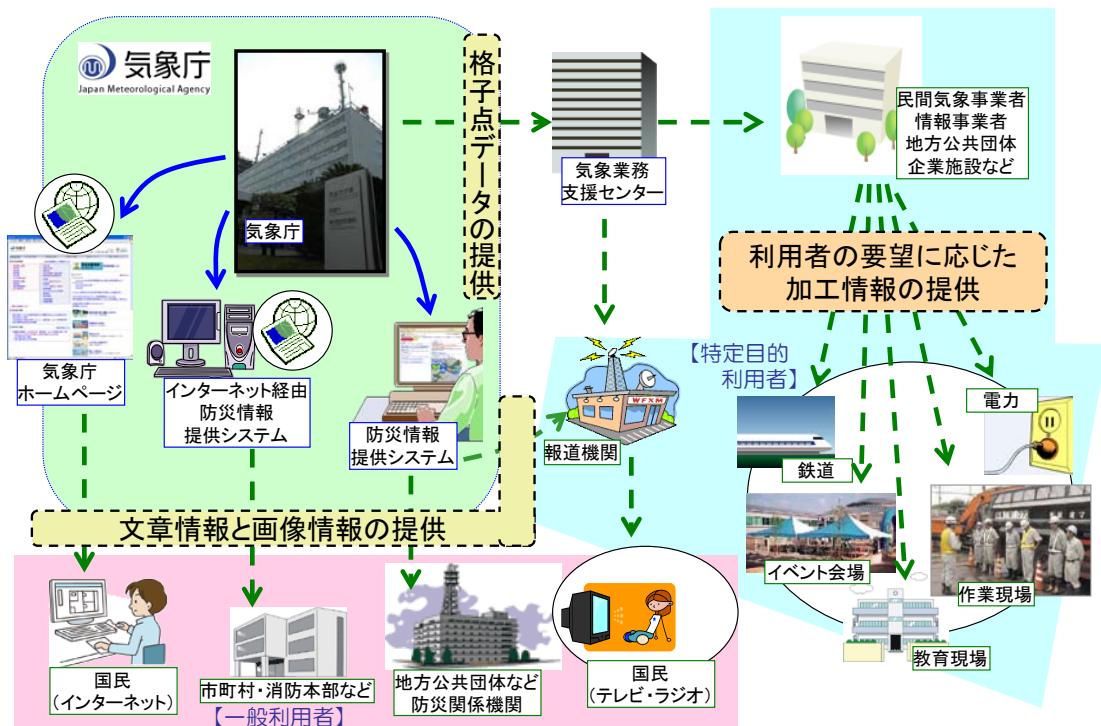


図 2-5 突風に関する気象情報の入手方法

用語解説 「気象業務支援センター」

(財) 気象業務支援センターは、官・民の役割分担による総合的な気象事業の展開を図るため、気象庁と民間気象事業を結ぶセンターとしての役割を担うべく設立された公益法人である。

気象庁の保有する各種気象情報のオンライン・オフラインによる提供、気象予報士試験の実施、測器検定事務に加え、各種講習会等の実施、関連図書の刊行等の事業を実施している。

3. 竜巻などの激しい突風に関する気象情報の想定利用例

3-1 対応計画の作成

竜巻などの激しい突風に関する気象情報の利用に当たっては、各利用者（事業者）における被害軽減・回避行動の判断基準、可能な対策などを、各段階で発表される気象情報の精度を勘案して、あらかじめ検討しておくことが効果的である。具体的な対策については利用者（事業者）によって環境や事業内容が異なることから、個別の事業形態に即して、図3-1のような対応計画を検討しておくことよい。

	利用者(事業者)	注意事項、参考となる情報等
①対象とする災害の想定	<ul style="list-style-type: none"> ・竜巻や突風、ダウンバースト等といった現象がどのような現象であるか、過去にどのような被害をもたらしたのかを把握する。 	気象庁ホームページから竜巻等の突風被害の解説ページ、過去の竜巻等による被害の統計値が参照可能。 本書の参考資料も参照。
	<ul style="list-style-type: none"> ・(利用者毎に)想定される被害の規模や形態を想定・把握 	
②被害軽減・回避行動の想定	<ul style="list-style-type: none"> ・(利用者毎に)被害を軽減・回避するための事前の対応策や行動等を想定・把握 	
③判断の材料となる情報とその入手手段の把握	<ul style="list-style-type: none"> ・突風に関する各種気象情報の種類・内容の把握 ・各種情報の精度の把握 	本書の第1章を参照。 資料毎の精度(適中率・捕捉率)や情報の対象範囲・有効時間についても把握する。 本書の第1章を参照。 個別の利用者毎の、情報の入手環境に則して検討する。
	<ul style="list-style-type: none"> ・予測情報等の入手手段の把握 	
④判断基準の策定	<ul style="list-style-type: none"> ・被害を軽減するための対策の検討 ・適中率と捕捉率を考慮して、各段階でとるべき対策と判断基準を策定 	考えられる対応策と各段階の情報の精度を勘案し、どの情報が発表された場合に、どのような被害軽減・回避行動をとるかを決めておく。 本書の第2章や3-2、および参考資料を参照。
⑤行動計画の決定・マニュアル化	<ul style="list-style-type: none"> ・行動計画のマニュアル化・運用準備 	

図3-1 竜巻などの激しい突風に対する『対応計画』の検討手順

3-2 屋外作業や行事における情報利用イメージ

- 想定する利用者の特徴
 - ・ 激しい突風が発生した場合、飛ばされるなどして人に影響を与えるような資機材、遊具やテントなどが屋外に仮設されているなど、突風の影響を受けやすい。
 - ・ 現場担当者が、気象情報と現場の気象状況を合わせた判断が可能である。
 - ・ 屋外で実施する工事、イベント、遊園地などが考えられる。
- ポイント
 - ・ 現場において気象情報を随時入手できる手段を確保する
 - ・ 安全確保に時間を要する場合は、段階的に実施できる安全対策を検討しておく。
 - ・ 最終的には現場担当者が周囲の気象状況を基に対策の実施を判断する。

(1) 竜巻などの激しい突風に関する気象情報利用の考え方

竜巻などの激しい突風に関する気象情報は、時間経過や可能性の高まりに応じて段階的に発表されるので、最新の気象情報を現場に周知して、安全確保に要する時間や各情報の精度に応じた利用を心がける。ここでは、現場の担当者が、気象状況を考慮して臨機応変に対応することが可能であると想定しているため、竜巻発生確度ナウキャストについては、次のような利用が考えられる。

- ・ 雷注意報が発表されたら、竜巻発生確度ナウキャストに着目する。
- ・ 発生確度1や2が現れた段階で、現場の気象状況の監視を強化する。
- ・ 最終的な危険回避対策の実施は、現場の担当者が気象状況の変化をみて判断する。
- ・ 安全確保に時間を要する場合には、竜巻発生確度ナウキャストの予測も考慮して、可能な範囲で早めに危険回避策を講じる。

なお、竜巻発生確度ナウキャストの適中率は低く、発生確度1や2となっても竜巻やダウンバーストなどに至らない場合も多いが、発達した積乱雲の下では、ある程度の強さの突風や急な強い雨、雷、ひょうなど激しい現象が発生する可能性が高い。こうしたことも考慮して必要な安全対策を検討する。

(2) 気象情報の入手手段の確保

現場において気象情報を適宜入手できる手段を確保しておくことが望ましい。気象情報の中央監視体制がある場合には、事前に現場との連絡系統を確認しておく。中央監視体制がない場合には、民間気象事業者等の携帯電話サービスにより気象情報発表の報知を受けたり、携帯電話の気象情報コンテンツを適宜参照することが考えられる。

(3) 作業や行事を開始する前日～開始前における情報利用例

- テレビ・ラジオ、携帯電話、気象庁ホームページ等で気象情報を確認する。
- 1日～半日程度前に発表される気象情報で、「竜巻などの激しい突風」に対する注意が呼びかけられている場合
 - 大雨や落雷、突風などに関する気象情報の本文中に「竜巻などの激しい突風」に関する注意があるかどうか確認する。気象情報のタイトルに突風が含まれていなくても、本文中で「竜巻などの激しい突風」に関する注意を呼びかけている場合もある。
 - 「竜巻などの激しい突風」に関する注意が呼びかけられている場合、作業や行事の実施中に竜巻などの激しい突風が発生する可能性があることを認識し、実施計画の点検、及びもしもの場合の危険回避策などを検討・確認しておく。また、現場のミーティングなどにおいて、竜巻などの激しい突風が起きやすい気象状態が予想されていることを現場担当者に周知する。
- 作業や行事の開始時点までに雷注意報が発表されている場合
 - 気象情報で「竜巻などの激しい突風」に対する注意が呼びかけられていない場合でも、積乱雲が近づけば竜巻などの激しい突風が発生する可能性があることを認識し、いざという場合の危険回避策などについて確認しておく。

(4) 作業や行事を実施中の対応

- 雷注意報が発表されていない場合
 - 今後の雷注意報の発表状況に留意する。
- 雷注意報が発表されている場合
 - 中央監視体制がある場合は監視担当者が竜巻発生確度ナウキャストの監視を強める。中央監視体制がない場合には、現場担当者が携帯電話等により竜巻発生確度ナウキャストなどの気象情報を適宜監視することが考えられる。
 - 竜巻発生確度ナウキャストで発生確度1や2が現れるのが、竜巻などの激しい突風の発生に間に合わないこともあるので、現場担当者は天気急変に備えて周辺の気象状態の変化に注意をしておく。また、安全確保に時間を要する場合には、いざという場合の危険回避の手順を再確認しておく。
- 竜巻発生確度ナウキャストで発生確度1や2が現れた場合
 - 中央監視体制がある場合は、現場担当者に発生確度1や2が現れたことを通知する。
 - 発生確度1や2が現れたことを知った現場担当者は、竜巻などの激しい突風がいつ発生してもおかしくない気象状態であることを認識し、周辺の気象状況の変化を注意深く監視する。

- ▶ 安全確保に時間を要する場合は、予測を含めて発生確度1や2が現れた時点で、危険回避のための準備を開始する。
- ▶ 発生確度1や2が現れているときの積乱雲は、竜巻などの激しい突風を発生させやすい。真っ黒い雲が近づき周囲が急に暗くなる、雷鳴が聞こえたり、雷光が見えたりする、ヒヤッとした冷たい風が吹き出すなど、積乱雲が近づく兆しを認知した場合には、急な強い雨や落雷、ひょうなどとともに、竜巻などの激しい突風が発生する可能性があるため、資機材の養生や機具の運転停止など、危険回避のための対策をとる。
- ▶ 竜巻の漏斗雲や、突風で吹き上げられた飛散物などを確認した場合は、危険が間近に迫っているため、作業員や行事参加者に安全な場所に避難するよう呼びかけるなど緊急の危険回避対策を行う。

コラム 鉄道運行規制や道路交通規制などへの利用について

列車・自動車等の徐行・停止をとまなう規制は、乗客等の利用者に多大な影響がある。これに対して、竜巻発生確度ナウキャストは発生確度2であっても空振りが多いため、連動して列車・自動車の徐行や停止などの対策をとるという利用は難しいのが現状である。

基本的に列車・自動車等の徐行や停止をとまなう規制は、運転指令所などにより実施されるが、竜巻などの激しい突風に関する規制の判断については、例えば、竜巻発生確度ナウキャストと沿線の気象状況と組み合わせることで更に警戒すべき路線を時間的・空間的に絞り込むようにする必要がある。そのためには、適宜、突風災害等の専門知識を有する機関の助言を受けながら、それぞれの機関の利用レベルに合わせて判断手法・基準を策定するための調査・研究開発をすすめてゆくことが望まれる。

なお、このように時間的・空間的な絞り込みを行った状況では、竜巻などの激しい突風の発生が切迫した状態となっているため、列車・自動車の徐行や停止など現場の対策までに要する時間を出来るだけ短縮するルールを確立するなど、対応マニュアルの整備とセットで、利用に向けた準備をしてゆくことが望まれる。

4. 報道機関や民間気象事業者による情報提供

竜巻などの激しい突風に関する気象情報は、気象庁からホームページ等を通じて利用者に提供されるが、一般利用者への情報提供としては、テレビの文字スーパーやラジオによる速報、気象解説も大きな役割を果たしている。また、様々な利用ニーズへの対応に対しては、民間気象事業者などによる独自の携帯電話コンテンツサービス等に対する期待も大きい。

4-1 情報提供の基本的な考え方

突風に関する気象情報は、気象庁からホームページ等を通じて利用者に提供されるが、一般利用者への情報提供としては、テレビの文字スーパーやラジオによる速報、気象解説も大きな役割を果たしている。また、様々な利用ニーズへの対応に対しては、民間気象事業者などによる独自の携帯電話コンテンツサービス等に対する期待も大きい。

テロップや携帯メールなどの速報、音声や画像による詳細な解説、パソコン等の情報端末によるWEBコンテンツなど、各種メディアの特性を活かした情報提供が期待される。

また、竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストは、最新の情報を可能な限り速やかに利用することが重要であることから、利用者への提供にあたっては、その点に注意が必要である。

4-2 テレビ・ラジオによる情報提供

(1) 竜巻注意情報の速報

竜巻注意情報が発表されるときには、発達した積乱雲により、竜巻などの激しい突風だけでなく、急な強い雨、落雷、ひょうなどの可能性もある。竜巻注意情報は、このような激しい現象が発生しやすい気象状態になっていることを知らせるものであり、速報されることで意味を持つ気象情報である。この点を踏まえた上で、提供メディアの特性を生かした伝達のしかたを考える必要がある。

竜巻注意情報の一般への速報手段として、テレビの文字スーパーやラジオは、非常に有力であり、気象情報番組等でキャスターが直接注意を呼びかけることも、住民に危険性を意識させる非常に有力な手段であると考えている。

(2) 気象情報番組等におけるキャスターの解説例

気象情報番組等において、予告的な気象情報や竜巻注意情報が発表されている時には、竜巻などの激しい突風への注意の呼びかけや、危険回避のための具体的な行動について適宜解説していただきたい。さらに、竜巻発生確度ナウキャストの発生確度2の分布を参考にして、警戒すべき地域を絞り込んで解説することも効果的である。

(a) 予告的に発表する気象情報の段階での注意の呼びかけ

気象情報の中で「竜巻など激しい突風」に注意を呼びかけている場合には、通常より竜巻などの激しい突風が発生する可能性が高いことを意味している。気象情報番組などでは、「竜巻」という言葉を用いて特段の注意を呼びかける。

(例)

明日の午後には、発達した低気圧に伴う寒冷前線が△△地方を通過する見込みです。〇〇県では、・・・(大雨や落雷などの注意事項)・・・に対する注意が必要です。また、竜巻などの激しい突風のおそれもありますので、十分に注意してください。

(b) 竜巻注意情報が発表された段階での注意の呼びかけ

竜巻注意情報が発表された場合には、危険な状況が差し迫っていることを強調し、竜巻注意情報を受けた視聴者がとるべき行動を、次のように具体的に示すことが望ましい。

- ・ 屋外にいる場合や外出する場合には、空の状態に気をつけること。
- ・ 空が急に暗くなる、雷が鳴る、大粒の雨やひょうが降り出す、冷たい風が吹き出すなど、積乱雲が近づく兆しがある場合には竜巻が発生するおそれがあること。
- ・ このような場合には建物の中に入るなど、なるべく安全な場所に移動すること。

(例)

〇〇県には竜巻注意情報が発表されています。竜巻は積乱雲の下で発生します。空が急に暗くなる、雷が鳴る、大粒の雨やひょうが降り出す、冷たい風が吹き出すなど、積乱雲が近づく兆しがある場合には、近くの建物の中に入るなど身の安全の確保に努めてください

(c) 竜巻発生確度ナウキャストを利用した注意の呼びかけ

テレビでは必要に応じ、竜巻発生確度ナウキャストを分布図で示すなどして、次のように警戒すべき地域を絞り込んだ解説を行うことも効果的である。また、竜巻注意情報が発表された場合の例のように、視聴者がとるべき行動を具体的に示すことが望ましい。

- ・ 基本的には、発生確度2の地域を画面表示する。
- ・ 発生確度2の広がっている地域では竜巻が発生する可能性があることを説明する。
- ・ 現在は発生確度2となっていない地域でも、今後の状況の変化で可能性が高まる

こともあるので注意が必要であることも示す。

- 発生確度 1 の地域も画面表示する場合には、「発生確度 2 の地域より可能性は低いですが、発生確度 1 の地域でも竜巻などの激しい突風が発生することがある」と説明する。

(例)

(竜巻発生確度ナウキャストの図を示し) ○○県と□□県には竜巻注意情報が発表されています。赤(発生確度 2)で表示されている地域では竜巻が発生するおそれがあります。雷が鳴る、大粒の雨やひょうが降り出す、冷たい風が吹き出すなど、積乱雲が近づく兆しがある場合には、近くの建物の中に入るなど、身の安全の確保に努めてください。赤の表示がない地域でも、今後可能性が高まることがありますので、状況の変化には注意してください。

4-3 携帯電話による情報提供

携帯電話は特に屋外にいる利用者への情報提供手段として有効であり、次のような提供形態が想定される。これらの携帯電話のコンテンツサービスについては民間気象事業者などに対する期待が大きい。

- 竜巻注意情報が発表された地域の契約者にメールを送信する。
- 竜巻発生確度ナウキャストで発生確度 1 や 2 となった地域の契約者にメールを送信する。
- 竜巻発生確度ナウキャストを WEB コンテンツとして図情報で提供する。

4-4 ホームページ(インターネット)による情報提供

ホームページ(インターネット)は、竜巻発生確度ナウキャストの分布図を詳細に見るのに適している。竜巻発生確度ナウキャストは、雷注意報や竜巻注意情報を補完する情報なので、雷注意報や竜巻注意情報の発表状況を表示・リンクすることが望ましい。また、積乱雲に伴う激しい気象現象の予測として、竜巻発生確度ナウキャストに加えて、雷ナウキャストや降水ナウキャストを、切り替えて表示することなども効果的である。図 4-1 に気象庁ホームページで想定する表示のイメージを示した。

なお、竜巻発生確度ナウキャストの発生確度 1 や 2 は、竜巻などの激しい突風が発生しやすい地域を示しているものであるが、予測精度は低いので予測精度を踏まえた利用について「留意事項」として明記することを基本とする。

(留意事項の例)

竜巻は予測が難しい現象ですので精度の高い予測は難しく、発生確度 2 となっている範囲内でも 1 時間以内に竜巻が発生する可能性は 5~10%程度です。しかし、通常に比べるとはるかに竜巻が発生しやすい気象状況ですので、空が急に暗くなるなど発達した積乱雲が近づく兆候がある場合には、なるべく屋内に入るなど身の安全を確保するための行動を心がけてください。

発生確度 1 で竜巻が発生する可能性は更に低く 1~5%程度です。発生確度 2 に比べて頻繁に現れて空振りが多くなる代わりに、竜巻などの激しい突風の発生を見逃すことが少ない情報ですので、突風による影響が大きい作業や行事を行う場合には、発生確度 1 にも留意してください。

The screenshot shows the '竜巻発生確度ナウキャスト' (Tornado Occurrence Probability Nowcast) page. A map of the Tohoku region is displayed with color-coded areas indicating forecast probabilities. A legend indicates that pink areas represent a 5-10% probability (Category 2) and cyan areas represent a 1-5% probability (Category 1). A text box lists the affected prefectures: 滋賀県 (Shiga), 岐阜県 (Gifu), 愛知県 (Aichi), 三重県 (Mie), and 長野県 (Nagano). Red annotations highlight key features: a red box labeled 'イメージ' (Image) points to the navigation menu; a red box labeled '降水・雷・竜巻を切り替え表示' (Toggle precipitation, lightning, and tornado display) points to the map controls; a red box labeled '「竜巻注意情報」の発表状況を表示' (Show tornado warning status) points to the right-hand menu; and a red box labeled '留意事項を明記' (Note precautions) points to the explanatory text at the bottom of the map area.

図 4-1 気象庁ホームページにおける表示のイメージ

【 第二部 】 技術解説

1. 概要

(1) 竜巻などの激しい突風の発生地域の判定・予測の困難性

竜巻は水平規模が数十mから数百mと非常に小さいため、アメダスや気象ドップラーレーダーの観測網でも直接捉えることは困難である。このため、竜巻の発生状況を観測した結果を基に、竜巻などの激しい突風の発生地域を特定することはできない。

予測の面から見ても、このような規模の小さな現象の予測は難しい。通常天気予報に利用する数値予報は、低気圧や台風などを予測するのに非常に有効な手段であるが、竜巻やダウンバーストなどの現象は水平規模が小さいため発生を直接予測することはできない。竜巻やダウンバーストなどを発生させる発達した積乱雲でさえも、水平規模は10kmから数10km程度しかなく、数値予報で直接予測することは困難である。

(2) 竜巻などの激しい突風の可能性がある地域の判定・予測の方法

竜巻を発生させるような積乱雲の中には、水平規模が数kmの小さな低気圧（これをメソサイクロンと呼ぶ）が存在することが多い。積乱雲中の風の分布を観測できる気象ドップラーレーダーを利用しても、水平規模が100m前後しかない竜巻自体は検出できないが、メソサイクロンを検出することは可能である。したがって、気象ドップラーレーダーの観測でメソサイクロンを検出できれば、その付近で竜巻などの激しい突風の可能性があるという判断ができる（→第3節）。

一方、数値予報では、竜巻を発生させるような積乱雲の発生を直接予測することはできないが、そのような積乱雲が発生しやすい大気環境は予測可能である。この予測を利用すれば、1日程度前に発表する「予告的な気象情報」で竜巻などの激しい突風に対して注意を呼びかけることができる（→第4節）。また、このような大気環境の下で、気象レーダーで観測した雨雲の強さなどから積乱雲の発達が確認できれば、現在その積乱雲付近で竜巻などの激しい突風が発生しやすい状況となっているという判断が可能である（→第5節）。

竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストにおける、竜巻などの激しい突風の可能性がある地域の判定では、これらの技術を総合的に利用している（→第6節）。

2. 気象レーダーの基礎知識

レーダー (RADAR) という言葉は、現在では広く一般に使われているが、その語源は、Radio Detection And Ranging から来ている。レーダーとは、この語源からも明らかなように、電波を使って物体を検知し、その位置を測定する装置である。

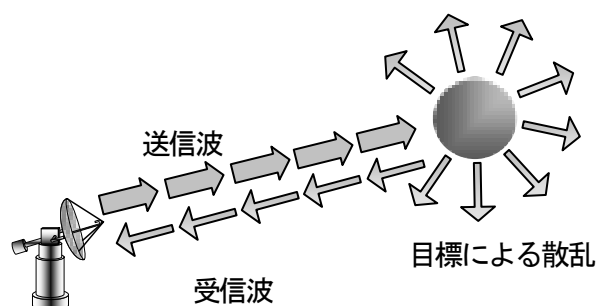


図 2-1 レーダー電波の散乱

レーダーの原理は、電波の「直進性」「等速性」「散乱性」を利用して、空中線からある方向に電波を送信し、目標で散乱されて戻ってくる電波を受信し、電波の往復に要する時間と空中線の向きから、目標までの距離と方位を測定するものである。気象レーダーの場合、さらに降水粒子の散乱特性を考慮し、散乱波の強さから、降水の強さに変換している。

具体的な観測手順は次の通りである。

ア) 極めて短い時間、パルスの形で鋭い指向性をもった電波を断続的にアンテナから送信する。

イ) 送信された電波が、経路の途中にある目標にあると、そのエネルギーはあらゆる方向に散乱される。

ウ) このうち、もとのアンテナ方向に散乱（後方散乱）されたエネルギーを同じアンテナを使用して受信する。この受信信号をエコー (Echo=こだま) という。

エ) 電波を送信してから受信するまでの時間差 Δt を測定する。目標までの距離を r とすると、 Δt は電波が r を往復するのに要した時間であるから、電波の伝搬速度 (光の速度) を用いて目標までの距離が求められる。

オ) アンテナの向きによって、目標の方位や高さが求められる。

カ) 検出した信号の強さや性質によって、目標の性質が推定できる。

観測できる範囲は、パルスの間隔に依存し、パルス間隔が長いほど遠くまで観測できるが、地球の曲率があるため、遠方になるほど観測高度は高くなる。

3. メソサイクロンの検出（気象ドップラーレーダー）

（1）風を観測する原理

気象ドップラーレーダーは、降水の位置や強さの他に、降水粒子の移動を電波のドップラー効果を用いて測定することができるレーダーである。降水粒子等の目標に対して送信周波数 f_t （波長 λ ）の電波を発射した時、目標がアンテナに対して移動していない場合は受信周波数も f_t となるが、移動している場合ドップラー遷移が起こり $f_t + f_d$ （或いは $f_t - f_d$ ）の受信周波数となる（図3-1）。この f_d をドップラー周波数と言い、 $v = -\lambda \times f_d / 2$ で与えられる v をドップラー速度という。

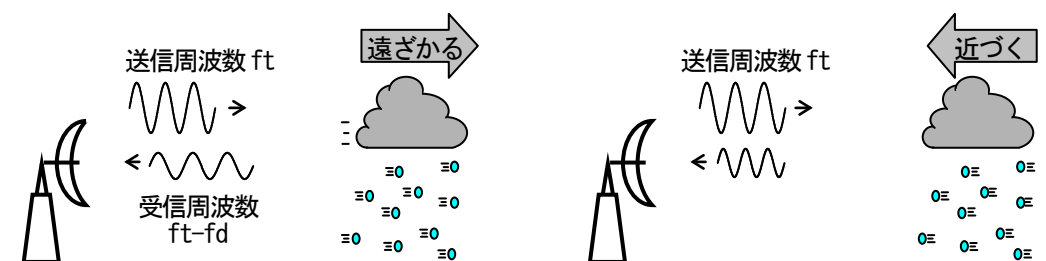


図3-1 ドップラー観測

ドップラーレーダーはドップラー効果を用いて、レーダーに対して近づいてくる風と遠ざかっていく風を判別することができる。風がレーダーに対して斜めに吹いている場合は、レーダーに対する方向の成分がドップラー速度として観測される（図3-2）。

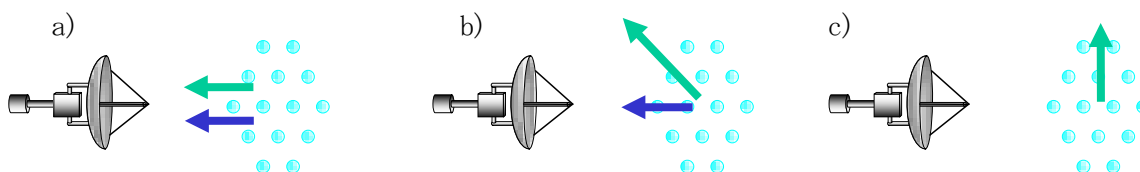


図3-2 ドップラー速度

緑の矢印が目標の移動速度で青がドップラー速度。a) では移動速度＝ドップラー速度。b) では移動速度のアンテナ方向成分がドップラー速度。c) ではドップラー速度は0になる。

ドップラーレーダーで観測できるドップラー速度は、パルスの間隔に依存する。パルスの間隔が小さいほど観測できるドップラー速度が大きくなる。一方、レーダーで観測できる範囲はパルスの間隔が大きいのほど広がる。パルスの間隔は、これらの条件をふまえて決定する。

(2) 風の見分け方

強い風の発散・収束域、渦、シヤアがある場合は、ドップラー速度のパターンから見分けることができる (図3-3)。

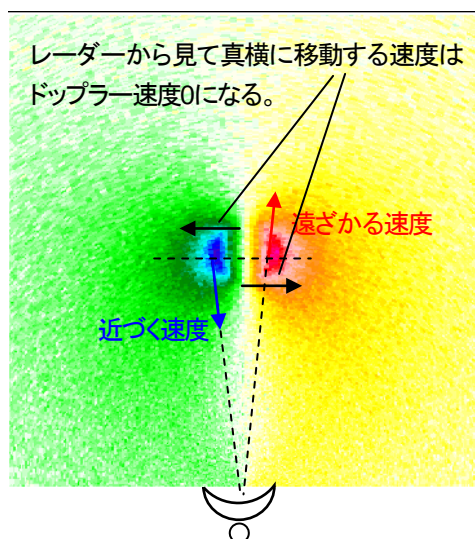


図3-3 ドップラー速度のパターン
顕著な渦があるときのドップラー速度のパターン。青色の濃いところが近づく速度が速いところで、赤色の濃いところが遠ざかる速度が速いところ。顕著な渦の場合は青色の濃い領域と赤色の濃い領域がレーダーから見て左右に並んで見える。

(3) メソサイクロンの検出

竜巻は直径が数10mから数100mしかなく、気象ドップラーレーダーで観測されるドップラー速度の解像度では検出できないが、竜巻をもたらす発達した積乱雲の中にある直径数kmのメソサイクロンは検出することができる (図3-4)。観測されたドップラー速度に図3-3のようなパターンが検出できた場合には、メソサイクロンが存在すると判定して突風の危険域の解析・予測に利用する。

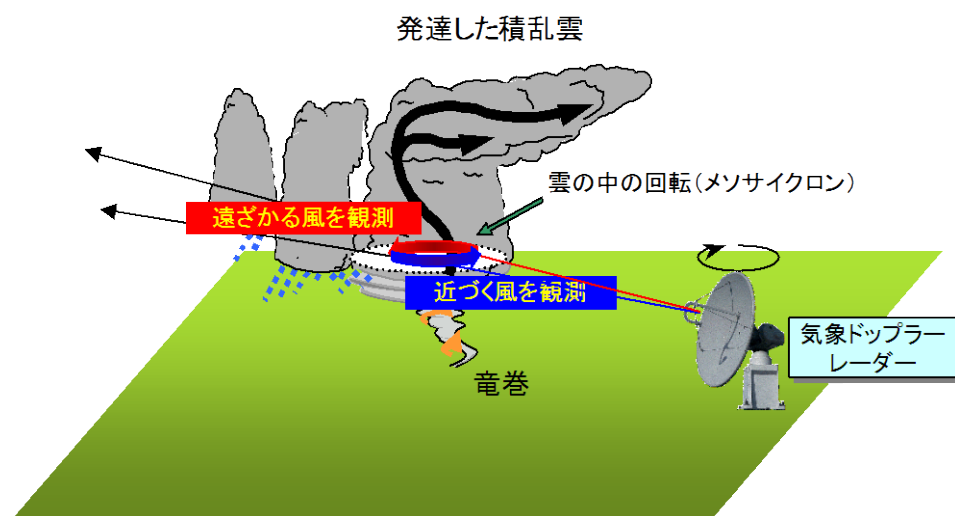


図3-4 気象ドップラーレーダーによる積乱雲中のメソサイクロンの検出

4. 突風ポテンシャル指数（数値予報）

数値予報は、大気の状態を風、気温、気圧などの物理量で表し、その変化を物理法則に基づいて計算し、大気の状態を予測する方法である。数値予報では、格子状に配置された点の値を解析・予測しており、格子の大きさが小さいほど（解像度が高いほど）詳細な大気現象を表現できるが、解像度を高くすると計算に長い時間が必要となる。

近年、計算機の発達により解像度の高い数値シミュレーションが可能となり、実際に発生した竜巻やダウンバーストなどの現象の再現実験が行われ、竜巻などの発生メカニズムが次第に明らかとなってきた。しかし、現状では計算機能力の制限などから、日々の天気予報で用いている数値予報では、竜巻やダウンバーストおよびそれらをもたらす積乱雲の発達を直接予測することはできない。

一方、強い竜巻やダウンバーストはスーパーセルと呼ばれる発達した積乱雲の下で発生するが、このような積乱雲の発達には、大気の状態が不安定であること、鉛直方向の風向・風速の変化が大きいことが重要である。このような大気環境と竜巻発生との関係は米国における竜巻監視でも利用されており、突風の発生に関係する幾つかの指数（以下、突風ポテンシャル指数と呼ぶ）が考案されている。

このような大気環境は数値予報でも予測が可能であり、数値予報結果から突風ポテンシャル指数を計算することにより（図4-1）、事前に竜巻の発生する可能性を予測して、1日程度前に発表する気象情報の中で注意を呼びかけることができる。

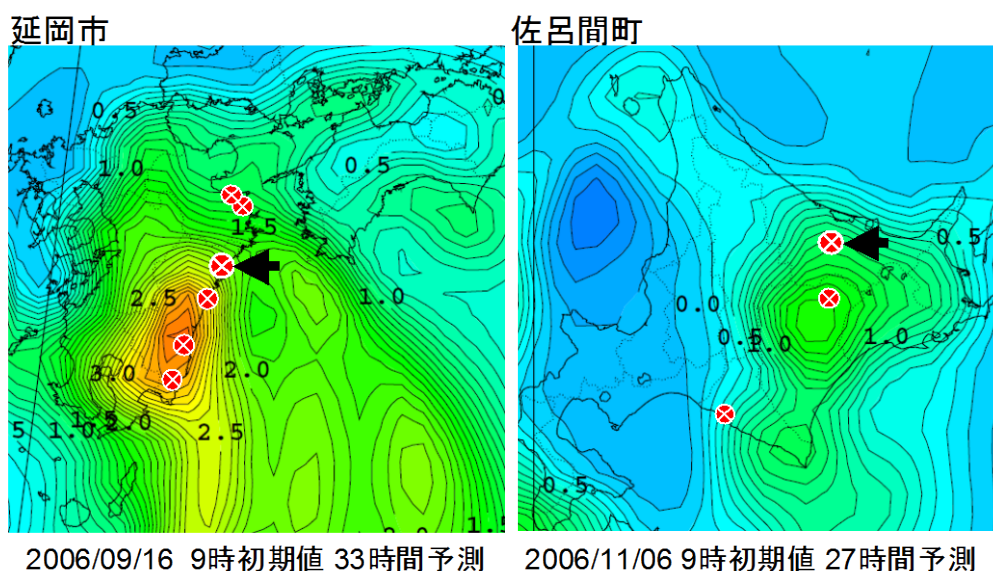



図4-1 突風ポテンシャル指数の予測例

平成18年9月の延岡市竜巻と11月の佐呂間町竜巻について、1日前に数値予報から突風ポテンシャル指数を予測した例。これらの事例では、で示した地点で突風が発生している。左図の矢印は延岡市竜巻、右図の矢印は佐呂間町竜巻の発生地点である。

5. 突風危険指数（数値予報+気象レーダー）

突風ポテンシャル指数の値が大きな領域で積乱雲が発達している場合には、その場所で竜巻などの激しい突風が発生する可能性が高まっていると考えることができる。このようなことを客観的に推定するため、数値予報による突風ポテンシャル指数と5分毎に得られる気象レーダーの観測値から、現時点における突風発生の可能性を推定する「突風危険指数」を計算する。積乱雲の水平スケールが10~30km程度であることから、突風危険指数は10km格子単位で計算する。図4-2には平成18年の延岡市竜巻を例に、突風ポテンシャル指数と気象レーダー観測による雨雲の強さ（積乱雲の発達程度）、および、これらから計算した突風危険指数を示した。

この突風危険指数は、次の6章で示すように気象ドップラーレーダー観測によるメソサイクロンの検出と組み合わせて、突風の可能性がある地域の判定・予測に利用する。

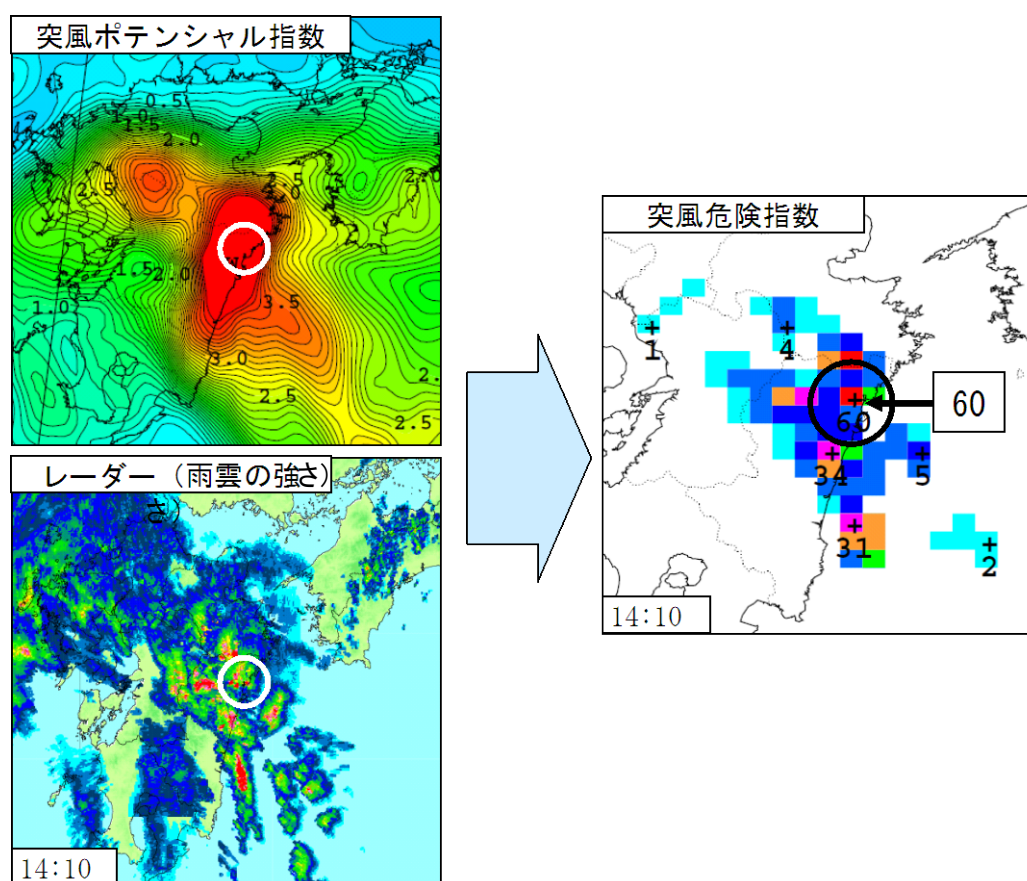


図4-2 突風ポテンシャル指数と気象レーダーから突風危険指数が算出される様子

6. 竜巻などの激しい突風の可能性のある地域の判定技術

(1) 2つの技術を用いた突風の有無判定

「現在竜巻などの激しい突風の可能性が高まっている状況である」ことを判定する（以後、これを「突風の有無判定」という）技術として、これまでに示した気象ドップラーレーダーによる「メソサイクロンの検出」と、数値予報と気象レーダーによる「突風危険指数」の2つがあるが、いずれも単独で利用するには精度に課題がある。

気象ドップラーレーダーでメソサイクロンが検出されれば、その付近で竜巻などの激しい突風が発生する可能性があるといえるが、メソサイクロンが検出されても竜巻やダウンバーストが発生しないことも多いこと、また、メソサイクロンの検出結果には誤検出も含まれることから、メソサイクロンの検出だけで突風の有無判定をすると、空振りが相当に多くなってしまう。一方の突風危険指数も、ある程度の捕捉率を確保するように閾値を設定して突風の有無判定を行うと、空振りが非常に多くなってしまう。

そこで、突風の有無判定の空振りを減らして適中率を高めるため、「メソサイクロンの検出」と「突風危険指数」をいずれも満たす(AND)条件を使う手法を採用した。突風の有無判定は10km格子単位で行うが、格子や時刻を厳密に対応させるとAND条件はほとんど成立しないので、竜巻発生確度ナウキャストでは時間的・空間的にある程度幅を持たせた上でAND条件を求めるなどの工夫を行い、発生確度2に対応する突風の有無の判定を行っている。

一方、AND条件のように判定条件を厳しくすると、空振りは減るが逆に見逃しが増える（捕捉率が下がる）ため、捕捉率を高める対策として、「メソサイクロンの検出」と「突風危険指数」のいずれかを満たす(OR)条件を利用して発生確度1に対応する突風の有無の判定を行っている。

(2) 竜巻注意情報の発表基準

竜巻注意情報は、竜巻発生確度ナウキャストのように「常時提供する情報」ではなく、各地の気象台が「随時に発表する情報」なので、あまり頻繁に発表して空振りが非常に多くなるような運用は適切でない。このため、発表基準を厳しくして発表回数を抑え、適中率を重視した情報としており、平成20年3月に運用を開始した竜巻注意情報では、「メソサイクロンの検出」と「突風危険指数」のAND条件が成立した10km格子を含む地域（県など）に対して竜巻注意情報を発表することとした。

平成22年5月における竜巻発生確度ナウキャストの開始からは、竜巻発生確度ナウキャストの発生確度2格子を含む地域（県など）に対して竜巻注意情報を発表するように変更する。発生確度2もAND条件を用いた判定なので、竜巻注意情報の特性に大きな変化はない。

(3) 竜巻発生確度ナウキャストにおける発生確度1と2格子の判定

竜巻発生確度ナウキャストでは、竜巻などの激しい突風の可能性がある地域を10km格子単位で判定する。図4-3に危険域の判定過程を示した。まず、「メソサイクロン検出」または「突風危険指数の基準」を満たした(OR条件)格子の周辺100km範囲は「積乱雲が発生すれば突風の可能性がある」領域と考える。これを「発生確度1背景」と呼ぶ(aの水色領域)。さらに、「AND条件を満たした格子の周辺40km範囲は「積乱雲が発生すれば突風の可能性が発生確度1背景より高い」領域と考える。これを「発生確度2背景」と呼ぶ(aの赤色領域)。これらと気象レーダー観測による降水強度(b)を重ねて、降水強度の強い格子を発生確度1格子または発生確度2格子と判定する(c)。

実際に竜巻やダウンバーストが発生するときには積乱雲が発達しており、降水強度は弱くても50mm/h程度はあり、100mm/h以上に達することが多いが、すでに発達した積乱雲のみに着目していると、急に発達する積乱雲から発生する竜巻など激しい突風を見逃してしまう。このため、発生確度1や2の格子と判定する降水強度の閾値は20mm/hとやや低めに設定している。発生確度1や2と判定された地域では、積乱雲の急な発達や発達した積乱雲の接近の兆候を捉えたら、竜巻など激しい突風への対策を行うというのが適切な対応といえる。気象レーダーを常時監視し降水強度の変化に対して迅速な対応ができる場合には、特に強い降水強度の場所や、降水強度が強まりつつある場所に注目して、「竜巻の可能性の高い場所」を更に絞り込んだ対策も可能である。

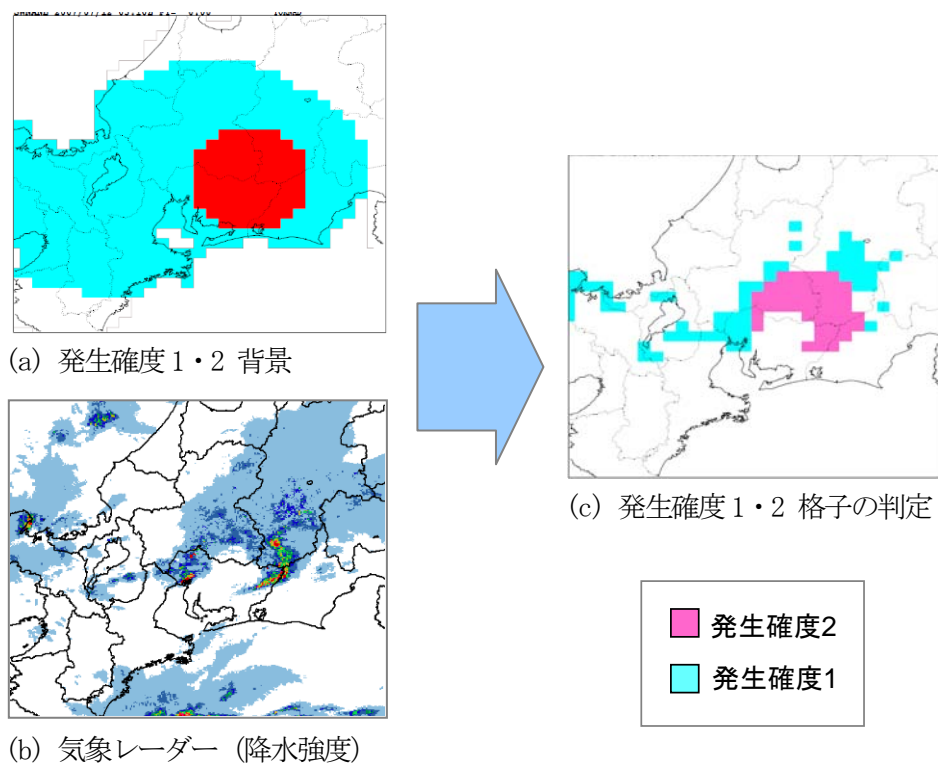


図4-3 発生確度1・2背景と降水強度から発生確度1・2格子を判定する過程

(4) 移動予測

予報期間内に発生確度 1・2 背景の状態が変化するという予測は困難であるため、竜巻発生確度ナウキャストでは「発生確度 1・2 背景の状態は移動せず判定から 1 時間継続する」と仮定し、その中を移動する雨雲の降水強度から発生確度 1 や 2 の分布を予測する。

- 判定で用いた発生確度 1・2 背景は移動せずに 1 時間先まで固定とする。
- 但し、発生確度 1・2 背景の有効時間は 1 時間とし、判定された時刻から 1 時間経過したら消滅させる。
- 発表時刻の降水強度の分布について 1 時間後までの移動を予測する。
- 1 時間後までの各 10 分の予想降水強度、及び各時刻の発生確度 1・2 背景から発生確度 1・2 格子を判定する。このようにして予測された結果（ある時刻の竜巻発生確度ナウキャスト）を図 4-4 に示す。

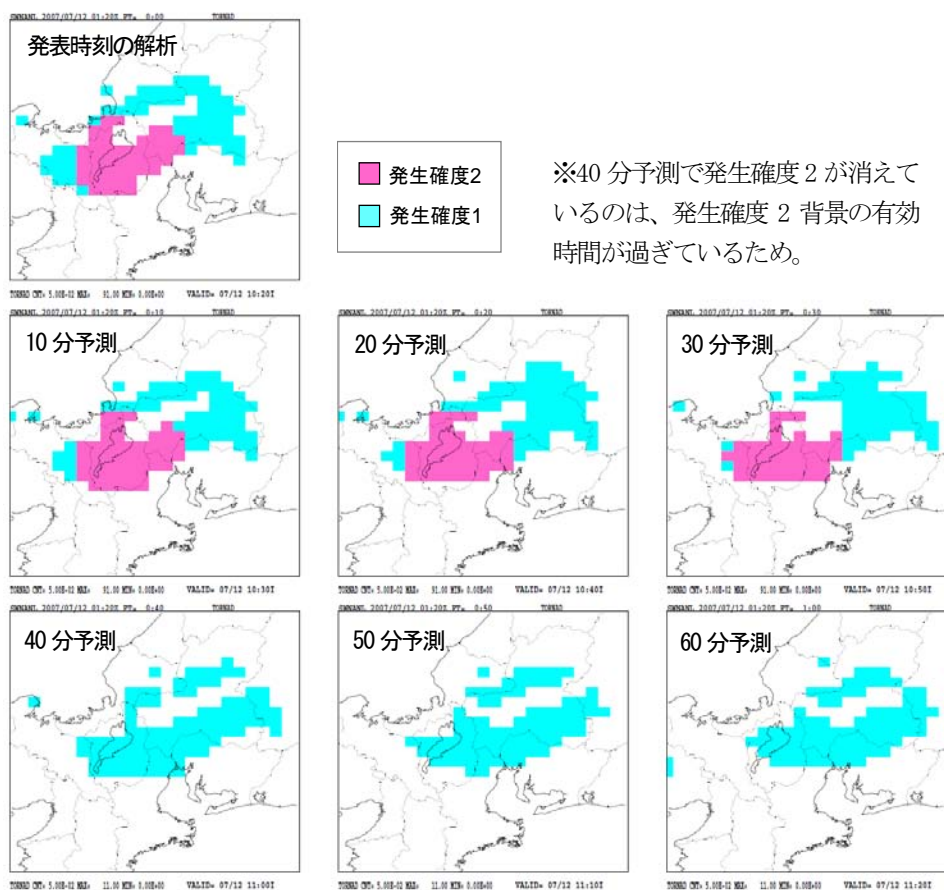


図 4-4 竜巻発生確度ナウキャストの発表例

参考文献

- 海老原智, 瀧下洋一 2007: 突風予測技術. 平成 19 年度量的予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-16.
- 瀧下洋一 2010: 竜巻発生確度・雷ナウキャストの技術. 平成 21 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部.

【 参考資料 】

1. 竜巻などの激しい突風による被害の現状

わが国における、竜巻、ダウンバースト、ガストフロントなどの突風の実情を、過去の事例の集計結果をもとに述べる。

以下、気象庁が把握している突風事例^{*1}のうち、1991年1月から2008年12月までの期間における「塵旋風」及び「漏斗雲」を除く事例の現状を示す。なお、特に断らない限り水上で発生しその後上陸しなかった事例（いわゆる海上竜巻など。以下、海上事例と言う。）は除いている。

（1）突風の年間発生確認数

1991年～2008年までの18年間に陸上及び沿岸で確認した、突風（竜巻、ダウンバースト、ガストフロントなど）を図1-1に示す。竜巻（ただし、調査の結果から竜巻か漏斗雲かを特定できなかったものを含む）を赤で、ダウンバーストやガストフロントを青で、突風による被害は確認されたものの、現象の特定には至らなかった不明な事例を緑でプロットしている。

地域により発生確認数の違いはあるものの、北海道から沖縄にかけて広く突風が確認されており、集計期間が短いことやすべての突風の確認ができるわけではないことを考えると、日本のいずれの場所でも突風発生の可能性はあると考えられる。

なお、竜巻は沿岸部で多く確認される傾向がみられるが、ダウンバーストやガストフロントにはそのような傾向はみられない。

*1 竜巻以外は藤田スケールでF0に満たないと推定した事例は除いている。また、2006年までのガストフロント、その他の突風については、竜巻、ダウンバーストの事例を集約する過程で把握できたもののみである。

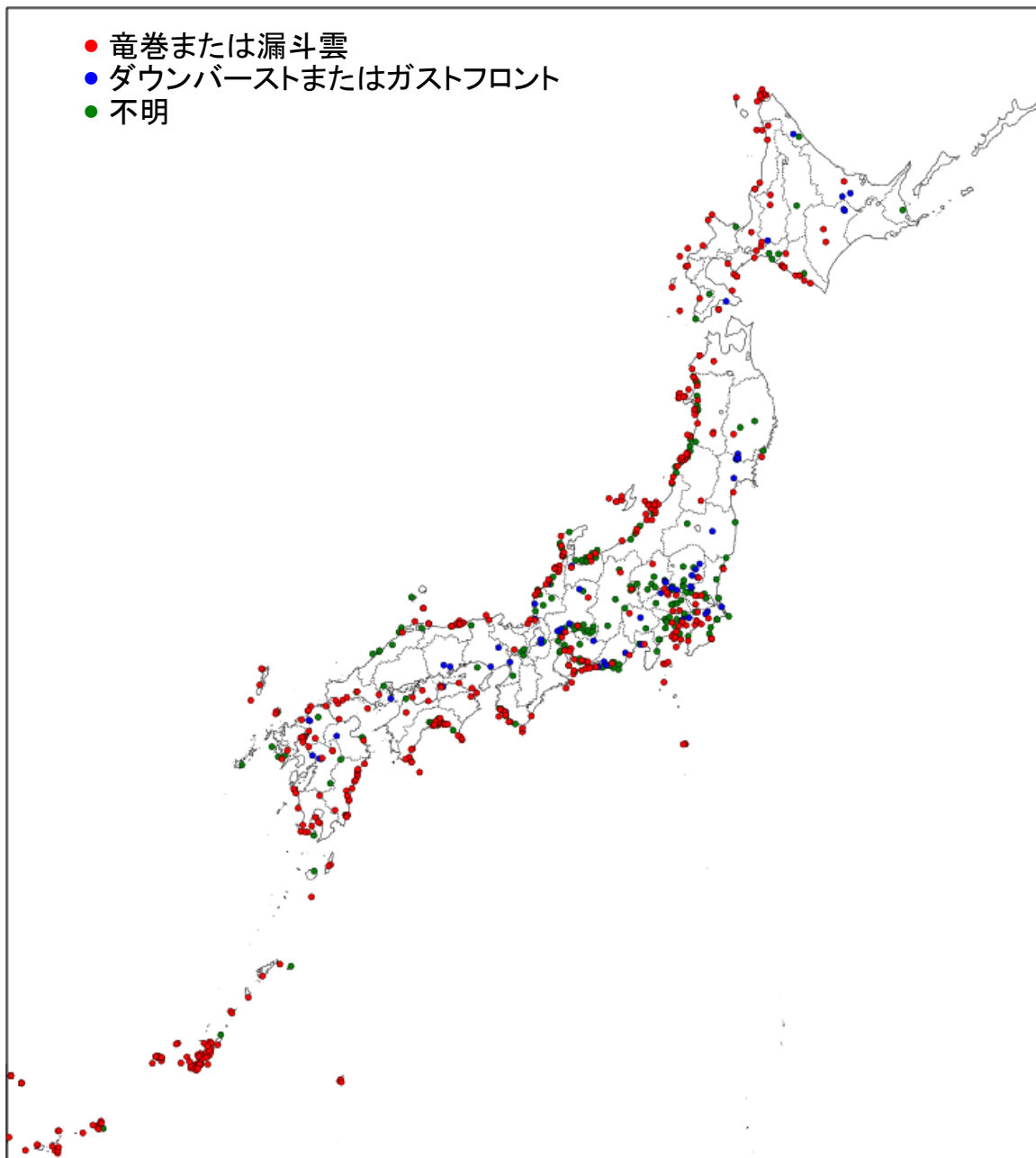


図 1-1 1991 年～2008 年に確認した突風の分布

1991 年～2008 年に確認した突風は全部で 508 件であり、そのうち竜巻と評定したものは 240 件と約半数を占めている。

また、1 年あたりの発生確認数（1991 年～2006 年の平均[※]）は、突風全体で 24.3 件/年、「竜巻」および「竜巻またはダウンバースト」では 12.8 件/年である。

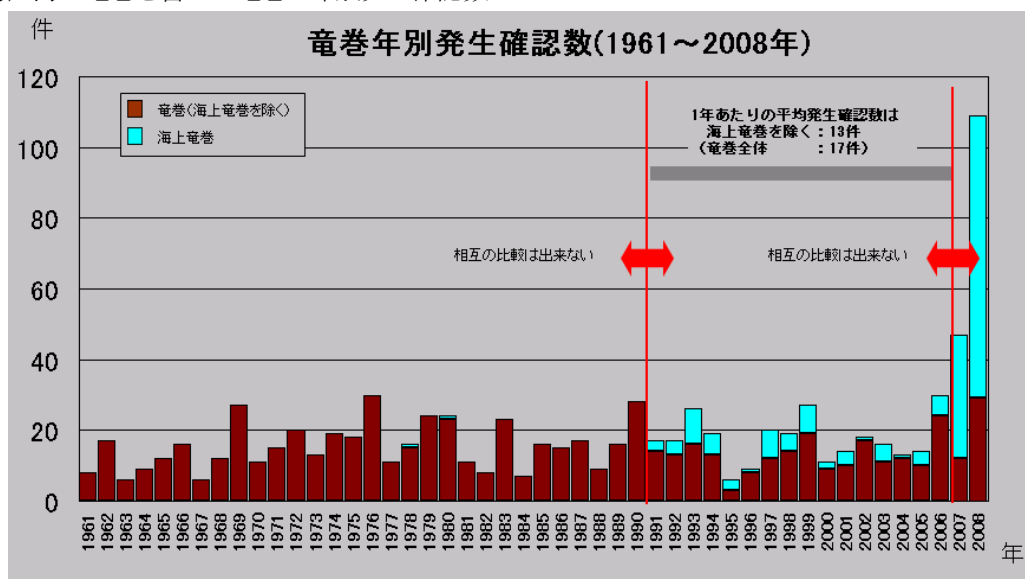
表 1-1 突風の発生確認数及び年間平均発生確認数

現象の種類	1991～2008年	1991～2006年	
	発生確認数	発生確認数	1年あたり
竜巻	240	199	12.4
竜巻または漏斗雲	5	0	0.0
竜巻またはダウンバースト	6	6	0.4
ダウンバースト(マイクロバーストも含む)	50	37	2.3
ダウンバーストまたはガストフロント	4	0	0.0
ガストフロント	11	5	0.3
不明	192	141	8.8
総数	508	388	24.3

*2 気象庁が把握している突風事例は、年代により収集方法に以下の違いがあり、これらの期間をまたいで事例数の増減を比較することは出来ないため、1年あたりの平均発生確認数は1991年～2006年までの期間を対象として算出している。また、陸上の突風事例と違い、海上竜巻などの海上事例は被害をもたらさないことがほとんどであるため、突風事例数の集計対象から除外している。

- 1961年～1990年：竜巻の発生確認数は、当時から気象庁が竜巻として公表していたものに、災害報告、調査・研究報告、新聞などの資料からあらためて収集した事例のうち一定規模以上のものから、気象庁が竜巻と評定したものを加えた数（当時存在が明らかでなかったダウンバーストも竜巻の発生確認数に含まれている可能性がある）。この中には被害のない海上竜巻は含まれない。塵旋風やガストフロント、その他の突風の発生確認数は、上記の事例を集める中で把握できたものに限られる。
- 1991年～2006年：竜巻の発生確認数は、災害報告、調査・研究報告、新聞などの資料からあらためて収集した全ての事例から、気象庁が竜巻と評定したものの数。この中には被害のない海上竜巻も含むが、目撃情報のうち集約できているものは一部に限られる。塵旋風やガストフロント、その他の突風の発生確認数は、上記の事例を集める中で把握できたものに限られる。
- 2007年以降：竜巻の発生確認数は、報道や目撃情報等も含めた広範な情報源から収集した事例から、気象庁が竜巻と評定したものの数（気象庁が突風事例の調査体制を強化したことに伴い、評定の精度も向上している）。幅広く情報を入手していることから、海上竜巻の発生確認数が格段に増加している。

(参考) 海上竜巻を含めた竜巻の年別発生確認数



(2) 突風の被害に遭う確率（遭遇確率）

一般的には突風に遭遇することは稀であると思われがちだが、国内の任意の場所で1年間に突風に襲われる可能性のある確率（遭遇確率）を他の事例と比較することでその高低を示す。

1991年～2008年までに確認した突風508件のうち、陸上の被害面積が推定できているものは341件あり、その被害面積の合計は1年あたり約40.0km²である。日本全国の面積は約378000km²であるから、突風の発生確率が国内で等しいと仮定すると、1年あたりの遭遇確率は約0.011%となる。言い換えれば、任意の地点で突風に遭遇するのは約9000年に1度程度ということが出来る。これは確率としては小さいように思われるかもしれないが、一年のうちに交通事故により死亡する確率が約0.0040%^{*3}であることから見れば、その約3倍にあたり、決して無視することのできない数字といえる。

アメリカで1年あたり約800件の竜巻が確認されていることと比べると、わが国の12.8件は少なく感じられるが、10,000km²あたりでみると、わが国では約0.3件、アメリカでは約0.8件となり、単位面積あたりでは両国の間で極端な違いはない。同様に、ドイツが約1.0件、イギリスが約0.6件、イタリアが約0.3件、フランスが約0.1件であり、これらとも極端な違いはない。

*3 警察庁交通局「平成20年中の交通事故の発生状況」の交通事故の死者数（5,155人）を総務省統計局「人口推計」の平成20年1月1日現在の総人口（1億2773万5千人）で除したものである。

(3) 地域による発生確認数の違い

1991年～2008年までに確認した突風508件について、都道府県別に10,000km²あたりの数を算出した(図1-2)。

集計期間が短いことや、すべての突風を必ずしも確認できていないことを考慮しても、全体的な傾向としては、東日本と西日本の太平洋側の地方、そして沖縄・奄美、北陸地方で多い傾向が見られる。

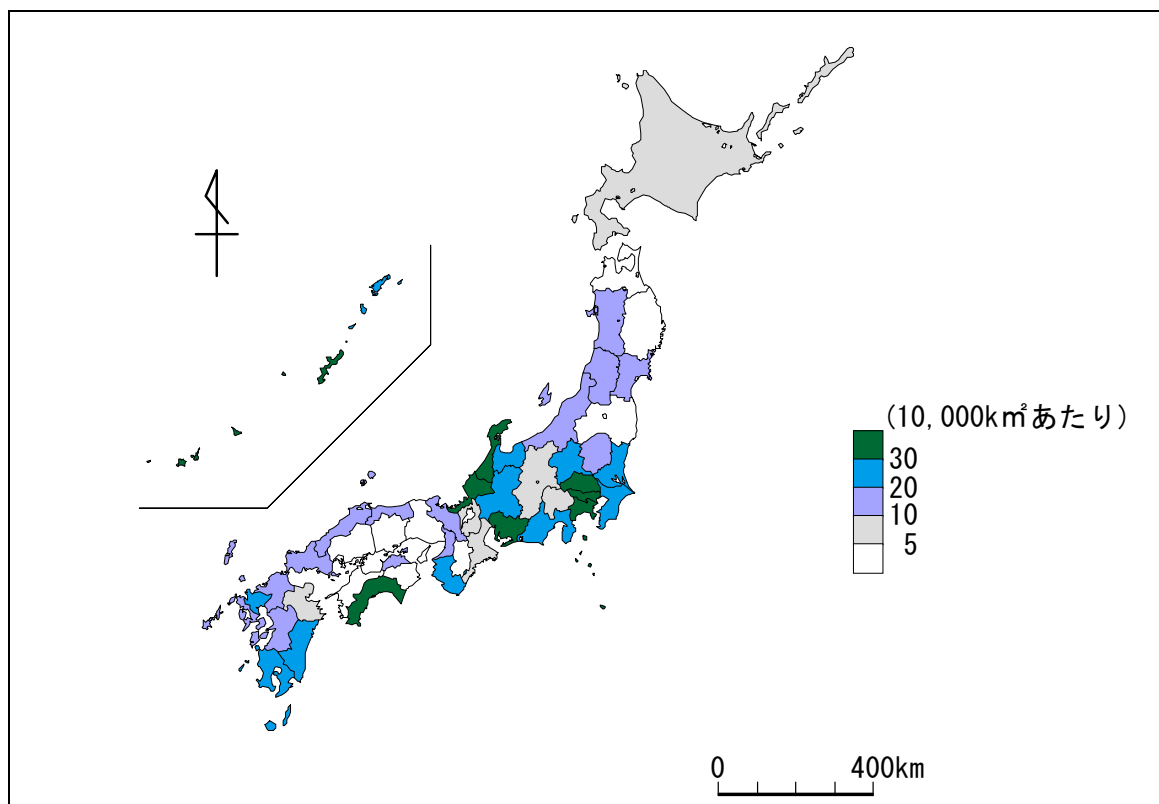


図1-2 都道府県別の突風発生確認数(1991年～2008年合計、10,000km²あたり)

(4) 季節による発生確認数の違い

1991年～2008年までに確認した突風508件について、月別の集計結果を図1-3に示す。前線や台風の影響および大気の状態が不安定となりやすいことなどにより、突風の発生確認数は7月から10月にかけて多く、この4ヶ月で全体の約60%を占めているなど、季節による違いが見られる。

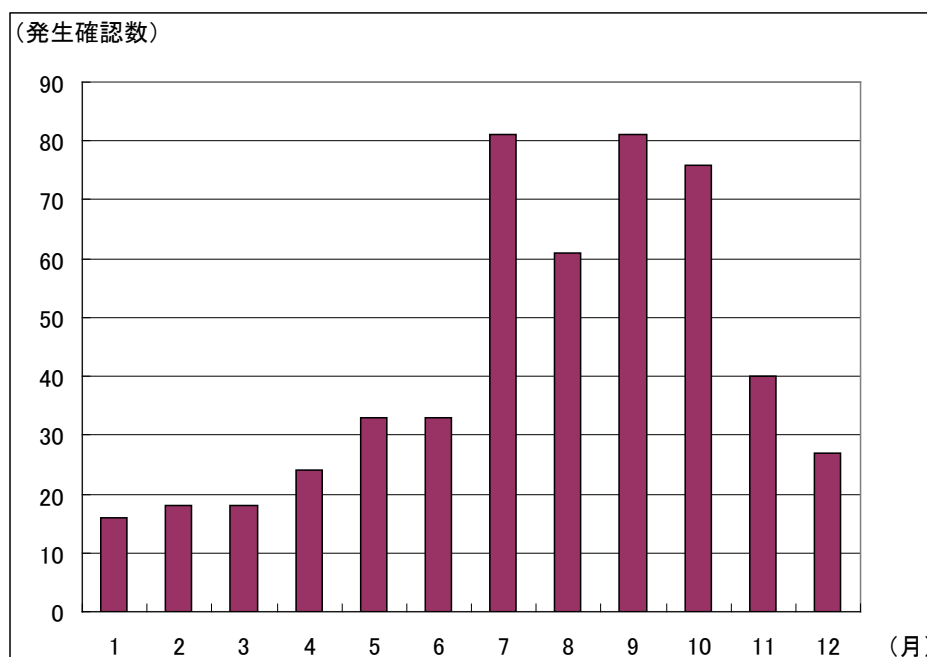
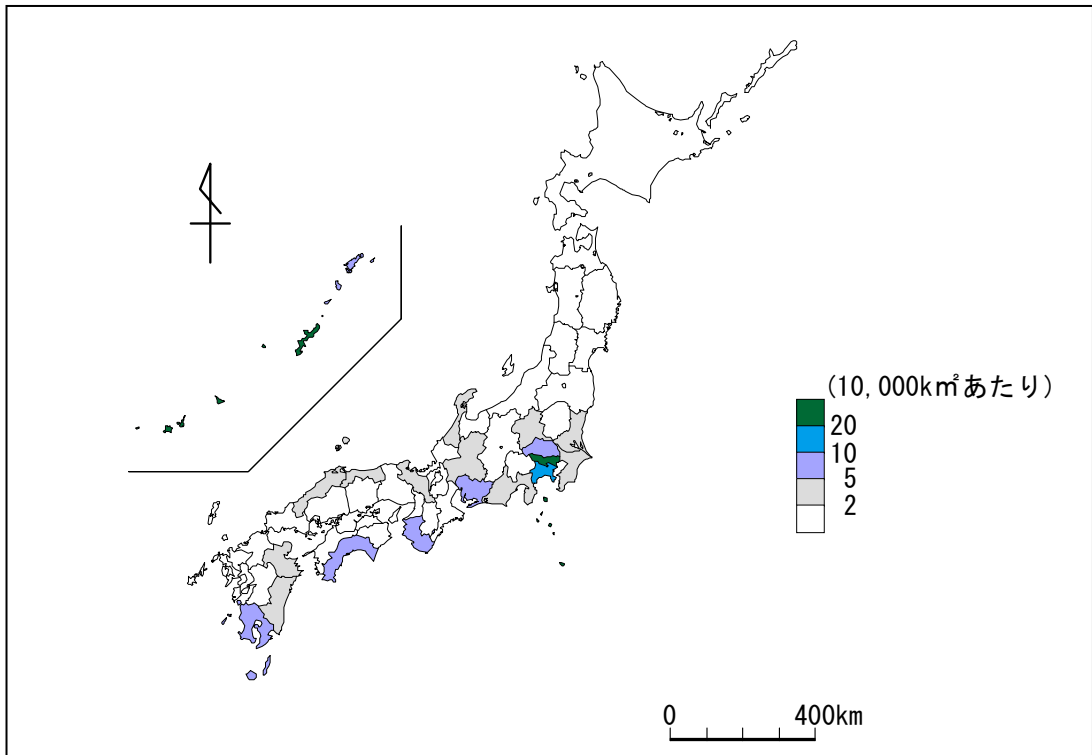


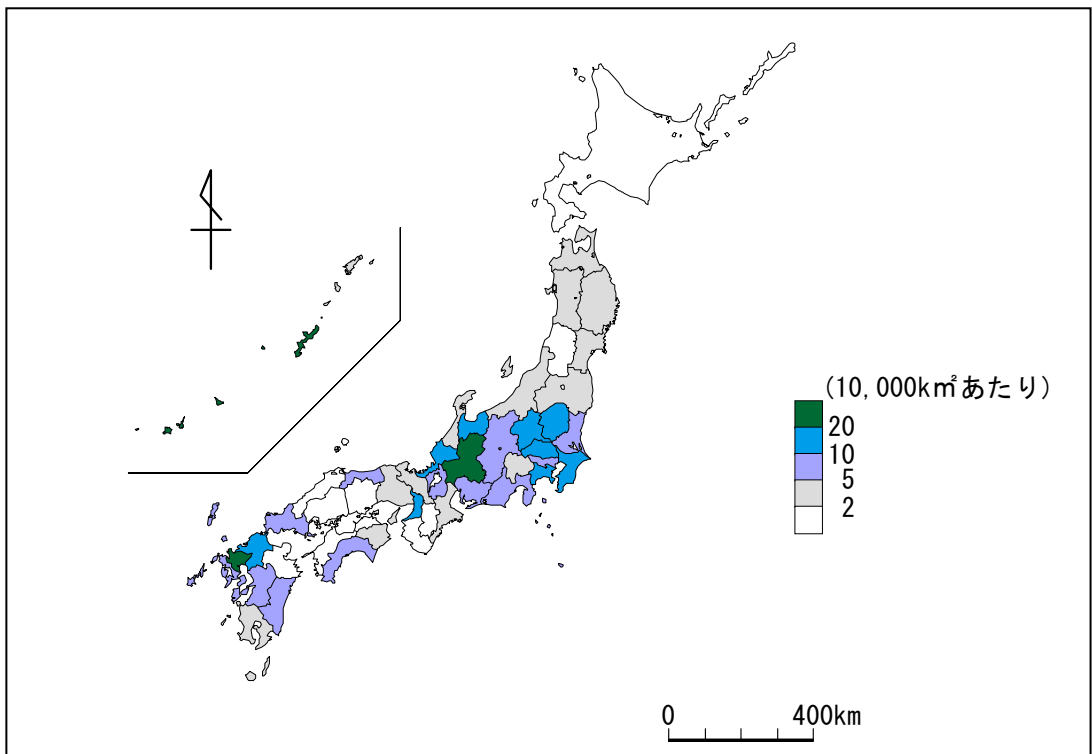
図1-3 突風の月別発生確認数（1年あたり、1991年～2008年までに確認したもの）

また、都道府県別の10,000km²あたりの発生確認数を季節別に示す（図1-4）。以下のよう
に、季節による違いが見られる。

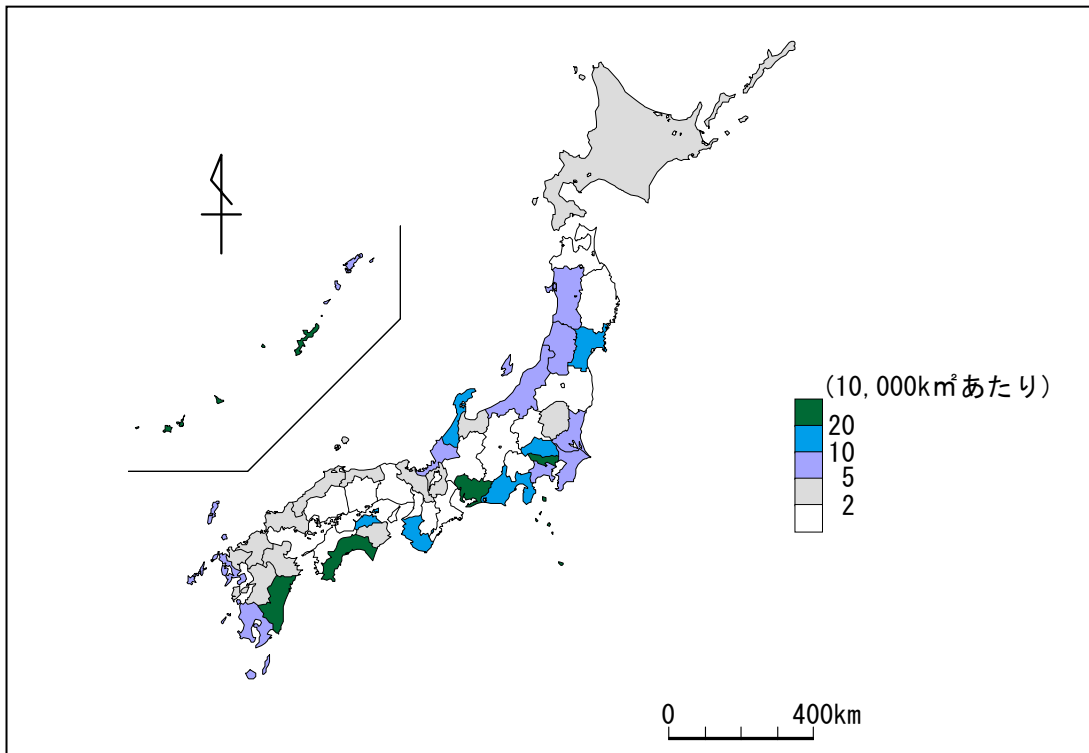
- ・ 春（3～5月）は、関東以西の特に太平洋側が多い。
- ・ 夏（6～8月）は、全国的に発生が確認されているが、特に関東以西が多い。
- ・ 秋（9～11月）は、沿岸部を中心に多い。
- ・ 冬（12月～2月）は、秋と同様に沿岸部を中心に多いが、日本海側でやや多い傾向が見られる。



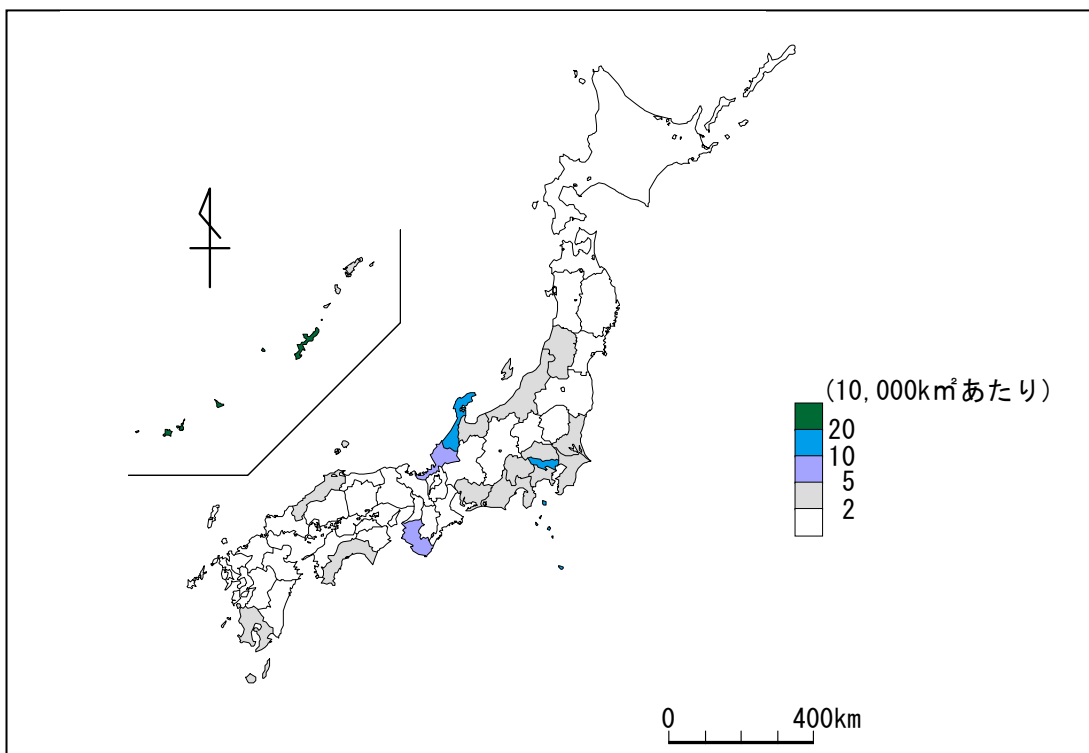
(a) 春 (3~5月)



(b) 夏 (6~8月)



(c) 秋 (9~11月)



(d) 冬 (12~2月)

図1-4 (a) ~ (d) 季節ごとの都道府県別の突風発生確認数 (1991年~2008年合計、10,000 km²あたり)

(5) 時刻による発生確認数の違い

1991年～2008年までに確認した突風508件のうち、発生時刻が判明している484件について、発生した時刻別の件数を図1-5に示す。

突風の発生は夜間よりも昼間に多く確認されており、14時から17時の間にピークが見られる。

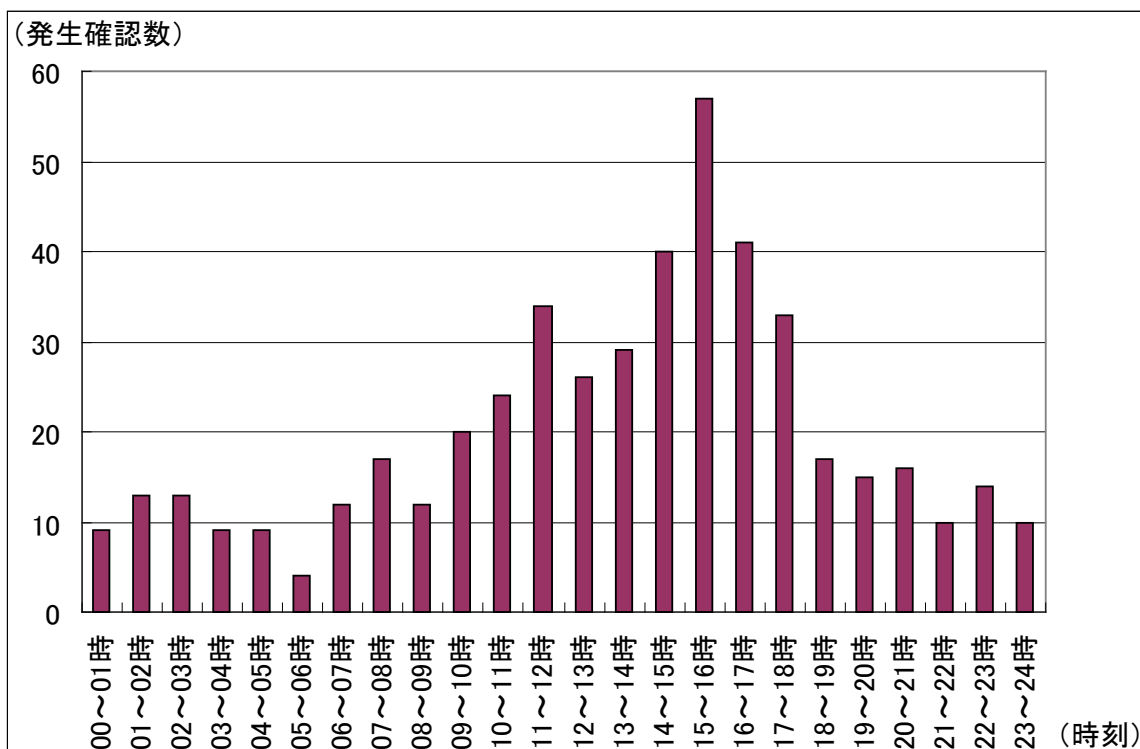


図1-5 突風の発生時刻別確認数（1991年～2008年までに確認したもの）

(6) 突風の発生が確認されたときの気象要因

1991年～2008年までに確認した突風508件について、発生時の気象要因別の件数を図1-6に示す。

突風ごとに要因となった総観規模の現象を選び出し、複数の要因が考えられる場合には、以下の優先順で1件につき1つのみを選択し集計した。

- 優先順位：1 台風、熱帯低気圧
- ：2 低気圧
- ：3 前線
- ：4 不安定（寒気や暖気の移流など）
- ：5 その他（気圧の谷など）

前線、寒気や暖気の移流等による不安定な気象要因下が多く全体の約60%を占める。次いで、低気圧や台風・熱帯低気圧が要因として続く。

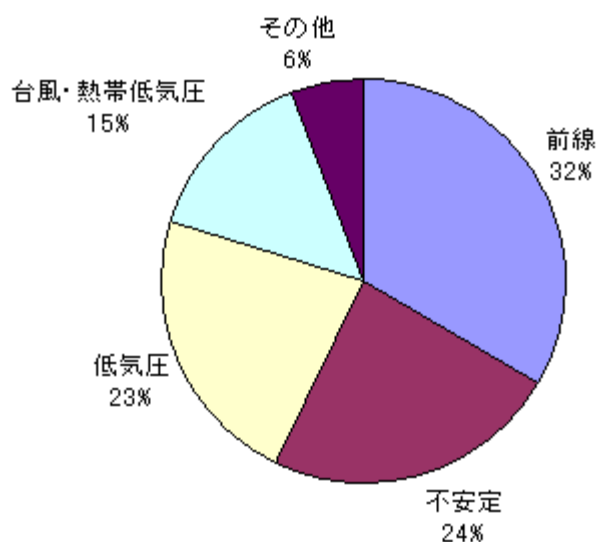


図1-6 突風発生確認時の気象要因（1991年～2008年）

(7) 確認した突風の藤田スケール (Fスケール)

竜巻などの激しい突風をもたらす現象は水平規模が小さく、既存の風速計から風速の実測値を得ることは難しい。このため、1971年にシカゴ大学の藤田哲也博士により、竜巻やダウンバーストなどの突風により発生した被害の状況から風速を大まかに推定する藤田スケール (Fスケール) が考案された。被害が大きいほどFの値が大きく、風速が大きかったことを示す。日本ではこれまでF4以上の竜巻は観測されていない【付録1】参照。

1991年～2008年までに確認した突風508件のうち、突風の強度を表す藤田スケールを地上に被害が発生するF0以上と推定した397件について、Fスケール別の件数を図1-7に示す。なお、FスケールをF0～F1のように幅をもって推定した事例は、最も小さいFスケール (この場合はF0) とした。

この期間、住家の倒壊が発生するようなF3と推定した突風は2件 (2006年の北海道での竜巻、1999年の愛知県での竜巻) である。また、住家の屋根がはぎとられるようなF2と推定した突風は21件である。一方、屋根瓦が飛散するようなF1の突風は格段に多くなり180件、F0は194件である。なお、F0とF1の件数はほぼ同数だが、F0の突風は覚知するに至らなかったものもあると考えられ、実際にはこれより多いものとみられる。

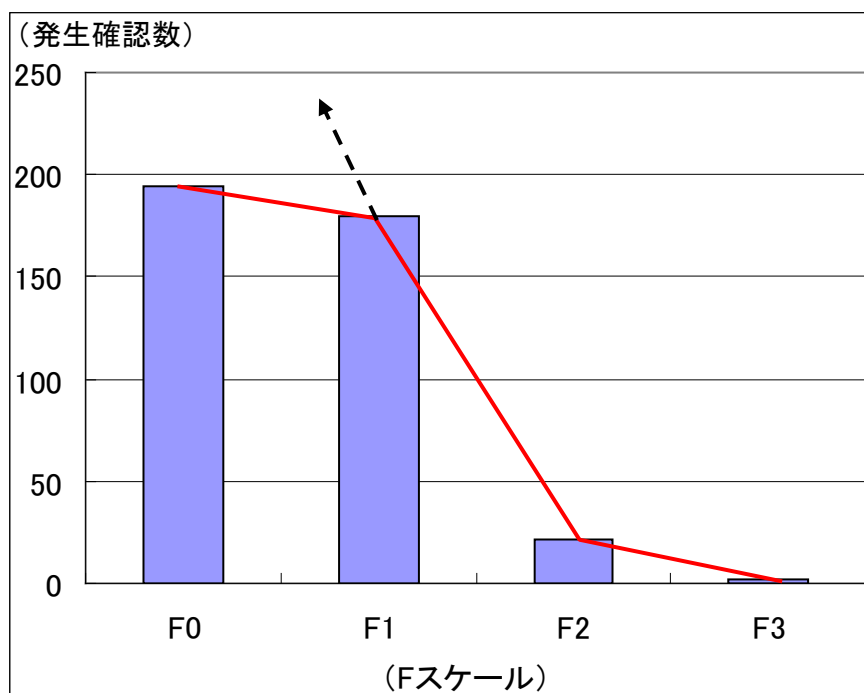


図1-7 藤田スケール別の突風発生確認数 (1991年～2008年)

(8) 過去の主な事例

気象庁が把握している突風被害のうち、1981年以降について、死者1名以上、または藤田スケールF3の事例を表1-2に示す。

表 1-2 突風被害の主な事例

現象区別	発生日時	発生場所	藤田スケール	死者	負傷者	住家全壊	住家半壊
ガストフロント	2008/07/27 12:50 頃	福井県 敦賀市	F0	1	9	0	0
竜巻	2006/11/07 13:23	北海道 佐呂間町	F3	9	31	7	7
竜巻	2006/09/17 14:03	宮崎県 延岡市	F2	3	143	*79	*348
その他(不明を含む)	2005/12/25 19:10 頃	山形県 酒田市	F1	5	33	0	0
その他(不明を含む)	2004/10/09 16:00 頃	静岡県 伊東市	不明	*5	*100	*165	*244
ダウンバースト	2003/10/13 15:30 頃	茨城県 神栖町	F1~F2	2	7	不明	不明
竜巻	1999/09/24 11:07	愛知県 豊橋市	F3	0	415	40	309
竜巻	1997/10/14 13:45	長崎県 郷ノ浦町	F1~F2	1	0	0	0
ダウンバースト	1996/07/15 14:50	茨城県 下館市	F1~F2	1	19	1	69
竜巻	1991/02/15 11:00 頃	福井県 (湖上)	F1	*1	*5	*1	0
竜巻	1990/12/11 19:13	千葉県 茂原市	F3	1	73	82	161
竜巻	1990/02/19 15:15 頃	鹿児島県 枕崎市	(F2~F3)	1	18	29	88

被害数の「*」は、他の気象現象による被害数を含む

藤田スケールの括弧は、文献等からの引用または被害のおおまかな情報から推定したもの

【付録 1】 藤田スケール (F スケール)

各スケールと被害との対応は次のとおり。

F0	17～32m/s (約15秒間の平均)	テレビアンテナなどの弱い構造物が倒れる。小枝が折れ、根の浅い木が傾くことがある。非住家が壊れるかもしれない。
F1	33～49m/s (約10秒間の平均)	屋根瓦が飛び、ガラス窓が割れる。ビニールハウスの被害甚大。根の弱い木は倒れ、強い木は幹が折れたりする。走っている自動車が横風を受けると、道から吹き落とされる。
F2	50～69m/s (約7秒間の平均)	住家の屋根がはぎとられ、弱い非住家は倒壊する。大木が倒れたり、ねじ切られる。自動車が道から吹き飛ばされ、汽車が脱線することがある。
F3	70～92m/s (約5秒間の平均)	壁が押し倒され住家が倒壊する。非住家はバラバラになって飛散し、鉄骨づくりでもつぶれる。汽車は転覆し、自動車はもち上げられて飛ばされる。森林の大木でも、大半折れるか倒れるかし、引き抜かれることもある。
F4	93～116m/s (約4秒間の平均)	住家がバラバラになって辺りに飛散し、弱い非住家は跡形なく吹き飛ばされてしまう。鉄骨づくりでもペシャンコ。列車が吹き飛ばされ、自動車は何十メートルも空中飛行する。1トン以上ある物体が降ってきて、危険この上もない。
F5	117～142m/s (約3秒間の平均)	住家は跡形もなく吹き飛ばされるし、立木の皮がはぎとられてしまったりする。自動車、列車などがもち上げられて飛行し、とんでもないところまで飛ばされる。数トンもある物体がどこからともなく降ってくる。

【付録2】 竜巻などの現象に伴って見られることの多い主な特徴

	(a) 竜巻	(b) ダウンバースト	(c) ガストフロント
現れ方	<ul style="list-style-type: none"> ・回転を伴う突風 ・1 か所での突風の継続時間は短い ・雲の底から地上に伸びる漏斗状の雲や、砂塵や飛散物などで地上の付近の渦が目撃される場合がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・発散性の突風 ・1 か所での突風の継続時間は短い ・強雨やひょうをとまなうことが多い 	<ul style="list-style-type: none"> ・ほぼ一定方向の突風 ・1 か所での突風の継続時間は比較的長い(数分から数10分) ・降水を伴うこともある
被害分布	<ul style="list-style-type: none"> ・線状または帯状 	<ul style="list-style-type: none"> ・円や楕円形など広がりを持つ 	<ul style="list-style-type: none"> ・形は明瞭ではなく広がりを持つ ・点在する場合もある
一地点での気温や気圧、風の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・気圧のV字状の急下降 ・渦の通過を示す風向の変化、風速の急変 	<ul style="list-style-type: none"> ・露点温度がV字状の下降する場合がある ・気温や気圧は、上がる場合も下がる場合もある ・比較的継続時間が短いほぼ一定の風向の突風 	<ul style="list-style-type: none"> ・気温の急下降 ・気圧の急上昇 ・風速の急増とその後の緩やかな減少、風向の急変
音や体感	<ul style="list-style-type: none"> ・「ゴー」というジェット機のような轟音が、突風の前後に聞こえる ・気圧の変化で耳に異常を感じる 	<ul style="list-style-type: none"> ・音は特にないか、風切り音などが突風とほぼ同時に聞こえる 	<ul style="list-style-type: none"> ・音は特にないか、風切り音などが突風とほぼ同時に聞こえる

2. コスト／ロスを考慮した

竜巻発生確度ナウキャストの発生確度1と2の利用

竜巻発生確度ナウキャストでは、発生確度1及び発生確度2と2階級の予測をするが、「発生確度2は適中率が高いが捕捉率は低い」、「発生確度1は適中率が低いが捕捉率が高い」という特性の違いがある。この2種類の予測については、利用場面に応じて発生確度2が適している場合、あるいは発生確度1が適している場合がある。

どちらの予測を利用すると効果的なのかを客観的に示すには、1回の対策費（コスト：対策により生じる利益の低下を含む）と対策による被害軽減額（ロス）を見積もり、予測を利用して対策を行った場合の効果を算出する方法がある。これは、確率予報の利用で用いられるコスト／ロスモデルの考え方によるものだが、発生確度1や2の適中率を発生確度1や2が予測されたときの発生確率と考えれば、今回の問題にも応用できる。

以下では、コストやロスを適当な値に仮定して話を進める。実際にコストやロスを正確に見積もるのは難しいので、この方法を利用できない場合も多いと考えられるが、発生確度1と発生確度2を効果的に使い分ける場合の参考としていただきたい。

(1) 適中率と捕捉率を考慮した予測の利用効果の比較

ある予測を利用して対策を立てた場合の効果は、式1のように記述できる。

$$\text{効果} = \text{総被害軽減額} - \text{総対策費} \quad (\text{式1})$$

式1を、突風被害1事例に対する効果の期待値(E)として記述すると式2のようになる。

$$E = H \times (L - C/P) \quad (\text{式2})$$

ここで、Hは予測の捕捉率、Pは予測の適中率、Lは対策による1事例当たりの被害軽減額、Cは1回の対策費である（式の導出過程は省略）。

発生確度1と2の適中率や捕捉率などを以下のように仮定して式2を評価する。

- ◇ 1事例当たりの被害軽減額(L)は10000円
- ◇ 発生確度1の適中率(P)は0.02
- ◇ 発生確度1の捕捉率(H)は0.9
- ◇ 発生確度2の適中率(P)は0.04
- ◇ 発生確度2の捕捉率(H)は0.3

このとき、竜巻発生確度ナウキャストの発生確度1と2のどちらの予測を利用するのが効果的かを見るために、発生確度1と2について、EとCの関係を示したのが図2-1である。発生確度1では対策費が200円以下、発生確度2では対策費が400円以下、であれば、予測を利用して対策をした場合の期待値がプラスとなり、予測の利用価値があるといえる。これは、コスト／ロスモデルで、 $C/L < P$ の場合に予測の利用価値があることに対応する。

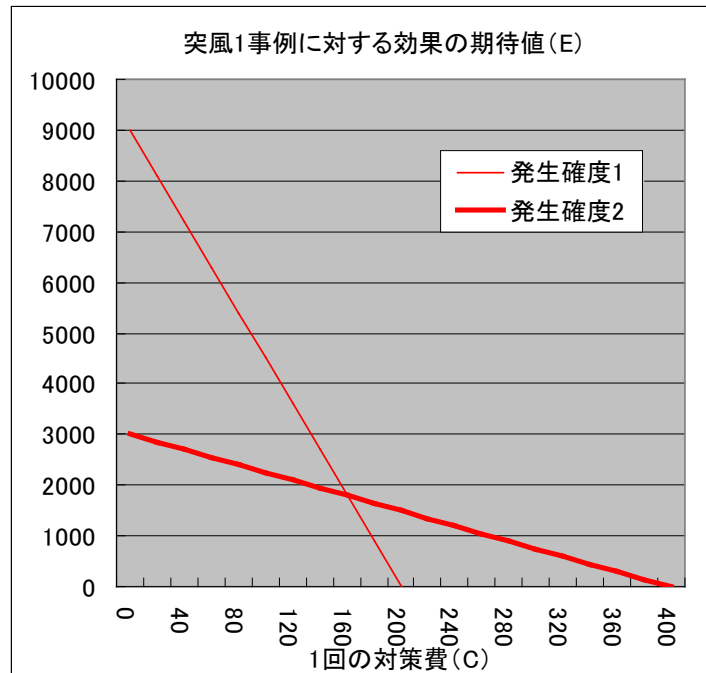


図 2-1 対策による被害軽減額が 10000 円の場合、発生確度 1 と発生確度 2 の利用効果（期待値）を、対策費（C）の違いに応じて見たグラフ。それぞれのグラフには、各ランクの適中率・捕捉率が加味されている。

発生確度 1 と 2 のグラフは対策費 160 円のところで交差している。これは、対策費が 160 円以下と小さい場合には発生確度 1 の予測で対策をとる方が予測の利用効果が高く、対策費が 160 円～400 円の場合には発生確度 2 の予測で対策をとる方が予測の利用効果が高いということを意味する。この想定の場合、対策費が 400 円以上かかる場合には、いずれの予測も利用効果がないことになる。

以上の話を定性的にまとめると次のようになる。

- ◇ 対策費が小さい場合には、空振りが多いことによる対策費の増大より、多くの事例を捕捉できることによって被害軽減額が増大する効果の方が大きいので、捕捉率の高い発生確度 1 の利用が効果的である。
- ◇ 対策費が大きい場合には、空振りが多いことによる対策費の増大が無視できないので、補足できる事例は少なくとも適中率の高い（空振り率が低い）発生確度 2 の利用が効果的である。

(2) 複数の対策が想定される場合の発生確度 1 と 2 の効果的な使い分け

ここまででは、対策による被害軽減額が 10000 円となる対策が唯一つだけあると想定した話であったが、実際には対策費とその被害軽減額が異なる複数の対策が存在することも想定される。この場合、発生確度 1 と 2 で対策費の異なる対策をとるという方法により、単

独の予測を利用するより利用効果が上がる場合がある。

いま、1 事例当たりの被害軽減額 (L) が、10000 円の対策 1、6000 円の対策 2、4000 円の対策 3 があると想定し、それぞれの E と C の関係を図 2-2 に示す。なお、発生確度 1 と 2 の適中率と捕捉率は図 2-1 と同じと仮定している。

対策 1 の対策費 200 円、対策 2 の対策費は 100 円、対策 3 の対策費は 60 円と想定すると、以下のことがわかる。

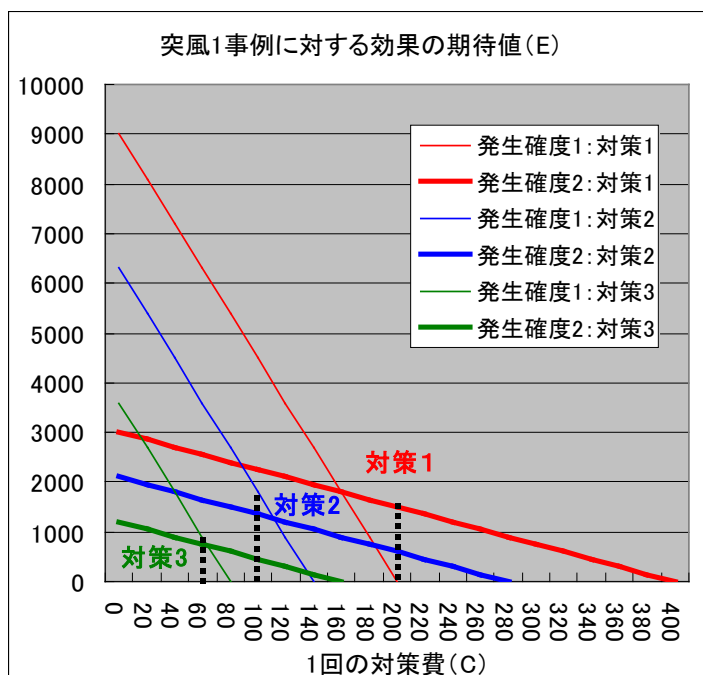


図 2-2 説明は図 2-1 と同じ。ただし、対策による被害軽減額は、対策 1 が 10000 円、対策 2 が 6000 円、対策 3 が 4000 円としている。縦の破線は今回想定した各対策の対策費を示している。

- ◇ 対策 1 しか存在しない場合、対策費 200 円では発生確度 1 の期待値は 0 円、発生確度 2 の期待値は 1500 円なので、発生確度 2 の利用が効果的である。
- ◇ 対策 1 と対策 3 が存在する場合、発生確度 2 で対策費 200 円の対策 1 をとると期待値 1500 円で最も効果が高い。この他に発生確度 1 で対策費 60 円の対策 3 をとると期待値 900 円が得られる。すなわち、発生確度 1 の時には対策費の小さな対策 3 をとり、発生確度 2 のときだけ対策費の大きな対策 1 をとるというように、使い分けるとより高い利用効果が得られる。
- ◇ 全ての対策が存在する場合、発生確度 1 で対策 2 をとるのが期待値 1800 円で最も効果が高い。このような場合には発生確度 2 を利用する必要がない。

このように、対策費と被害軽減額が異なる様々な対策を想定し、最も予測の利用効果が高くなる利用法を採用するという考え方ができる。