

竜巻などの激しい突風に警戒をよびかける
気象情報の利活用ガイドライン

(案)

気象庁

目 次

利活用ガイドライン作成の目的	3
----------------------	---

【 第一部 】 利用と留意点

1. 突風に関する気象情報の解説	
1-1 突風に関する気象情報において対象とする突風	5
1-2 突風に関する気象情報の種類	7
1-3 竜巻注意情報について	9
1-4 突風短時間予測について	11
1-5 突風短時間予測と各種気象情報の関係	14
2. 突風に関する気象情報の利用方法と留意点	
2-1 限られた精度の情報を利用するにあたっての留意点	16
2-2 突風に関する各種情報の主な入手方法	17
2-3 突風に関する気象情報の基本的な利用方法	19
《参考1》 竜巻注意情報の発表に際してとるべき行動	21
《参考2》 実際に竜巻が間近に迫った場合の身の守り方	22
3. 特定目的の事業者等による利用	
3-1 利用者（事業者）毎の具体的な行動・判断計画の作成	23
3-2 対策コストに応じた突風短時間予測の利用	24
3-3 必要に応じた突風短時間予測の高度利用	25
4. 報道機関や民間気象事業者による情報提供	
4-1 基本的な考え方	26
4-2 テレビ・ラジオによる情報提供	26

4-3	携帯電話による情報提供	27
4-4	インターネット（パソコン）による情報提供	28

【第二部】技術解説

1.	概要	29
2.	気象レーダーの基礎知識	30
3.	メソサイクロンの検出（気象ドップラーレーダー）	31
4.	突風ポテンシャル指数（数値予報）	33
5.	突風危険指数（数値予報＋気象レーダー）	34
6.	突風の危険域の解析・予測技術	35

【参考資料】

1.	竜巻などの激しい突風による被害の現状	38
2.	コスト／ロスを考慮した突風短時間予測のランク A と B の利用	51

利活用ガイドライン作成の目的

平成 22 年度の突風短時間予測の提供開始に向けて、新たな情報を利用する事業者、及び情報提供に協力をいただく報道機関・民間気象事業者等の利用準備のため、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。

【詳細】

(1) 突風短時間予測の提供の背景

近年、竜巻などの激しい突風による災害が相次ぎ、平成 18 年 9 月に宮崎県延岡市で、同年 11 月に北海道佐呂間町で発生した竜巻では、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 年度からは、竜巻などの激しい突風の危険度の分布と 1 時間後までの移動を予測する突風の短時間予測情報「突風短時間予測（仮称）」の提供開始を開始することとした。

(2) 利活用ガイドラインの目的

竜巻などの激しい突風は、発現時間が短く空間的にも極めて小規模な現象のため観測や予測が難しく、現状の予測技術を最大限に活かしても発表する情報の精度は必ずしも高くはない。しかし、今回提供を開始する予測情報を有効に利用すれば、被害を軽減し防災・減災の効果を挙げることが可能になる。そのためには、情報の精度を踏まえた利用方法や利用上の留意点等について、利用者に十分理解していただく必要がある。

突風短時間予測を含む突風に関する気象情報は、一般利用者は気象庁ホームページで知ることができるほか、テレビ・ラジオ等の報道を通じた情報提供も重要である。一方、特定目的での高度利用など多様な利用形態への対応には、民間気象事業者の協力をいただき、個々利用者のニーズに適った情報として加工して提供してもらうことが望ましい。こうした情報提供に関わる機関に対しても、事前に突風短時間予測を含む突風に関する気象情報の特徴などを示し、情報提供開始に向けた準備をしていただく必要がある。

本ガイドラインは、突風短時間予測が提供開始当初から様々な分野で速やかに利用できるよう、突風短時間予測の特徴や効果的な利用、および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。

(2) ガイドラインの対象と構成

本ガイドラインの内容は、屋外作業の安全確保など特定の目的で突風短時間予測を含む突風に関する気象情報を利用する事業者や、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。

本ガイドラインの構成は、第一部に、突風短時間予測を効果的に利用するための留意点や利用方法、および、報道機関や民間気象事業者を通じた情報提供の留意点など、特に理解していただきたい内容を示すので、突風に関する気象情報の利用に当たっては、まず第一部を読んでいただきたい。第二部では、突風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情報利用の考え方について収録している。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を解説したものであり、必要に応じて目を通していただきたい。

【 第一部 】 利用と留意点

1 . 突風に関する気象情報の解説

1 - 1 突風に関する気象情報において対象とする突風

突風短時間予測などの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」、「ダウンバースト」、「ガストフロント」による突風を対象とする。

【詳細】

突風短時間予測などの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一時的に風が強まる、いわゆる「風の息」の意味での突風や、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。

低気圧や台風は数百 km～数千 km と大きなスケールだが、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。寿命も数分から数十分と非常に短い現象だが、竜巻などの激しい突風は建物などに甚大な被害をもたらすだけでなく、不意に発生するため生命に関わる被害をもたらすこともある危険な現象である。

(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、低気圧や台風などにより継続的に吹く暴風（強風）を対象に発表される。

用語の定義 「竜巻などの激しい突風」

本ガイドラインにおいては、積乱雲に伴い発生する“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。

(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。移動スピードは時速数十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。

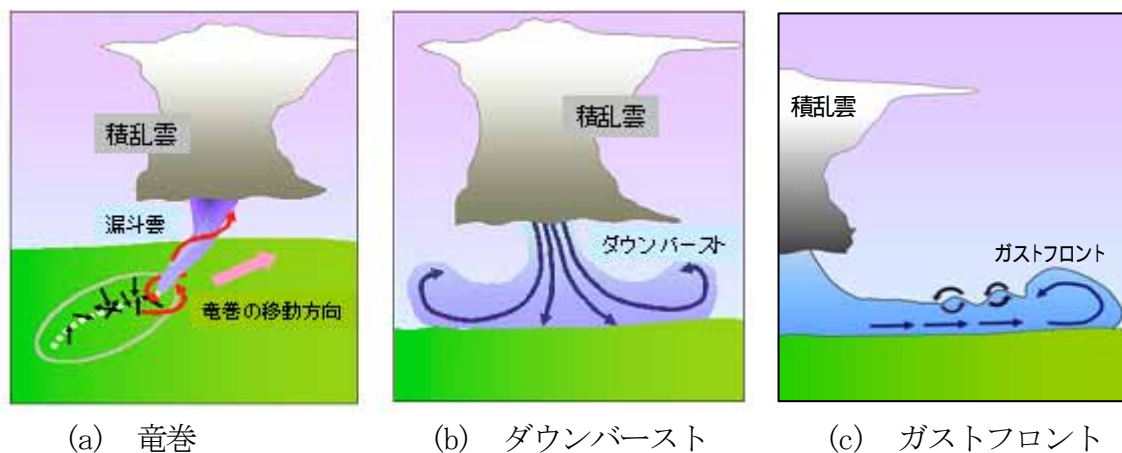


図 1-1 積乱雲に伴って発生する激しい突風をもたらす現象

※ 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 突風に関する気象情報の種類

竜巻などの激しい突風に注意を呼びかける気象情報には、予告的な「気象情報」、
「雷注意報」、「竜巻注意情報」、「突風短時間予測」がある。これらの気象情報は、時
間経過および発生可能性の高まりに応じて段階的に発表される。

【詳細】

竜巻などの激しい突風が予想される場合には、時間経過および現象の発生可能性の高まり
に応じて、以下のように段階的に各種の気象情報が発表される（図1-2）。

予告的な気象情報や雷注意報、竜巻注意情報は文章形式で随時に発表するが、突風短時
間予測は格子点データ（分布図）で10分毎に最新の情報を提供するという違いがある。

なお、事前の気象情報等で竜巻に関する注意がなくても、実況で竜巻の可能性が高まり
竜巻注意情報が発表される場合もある。

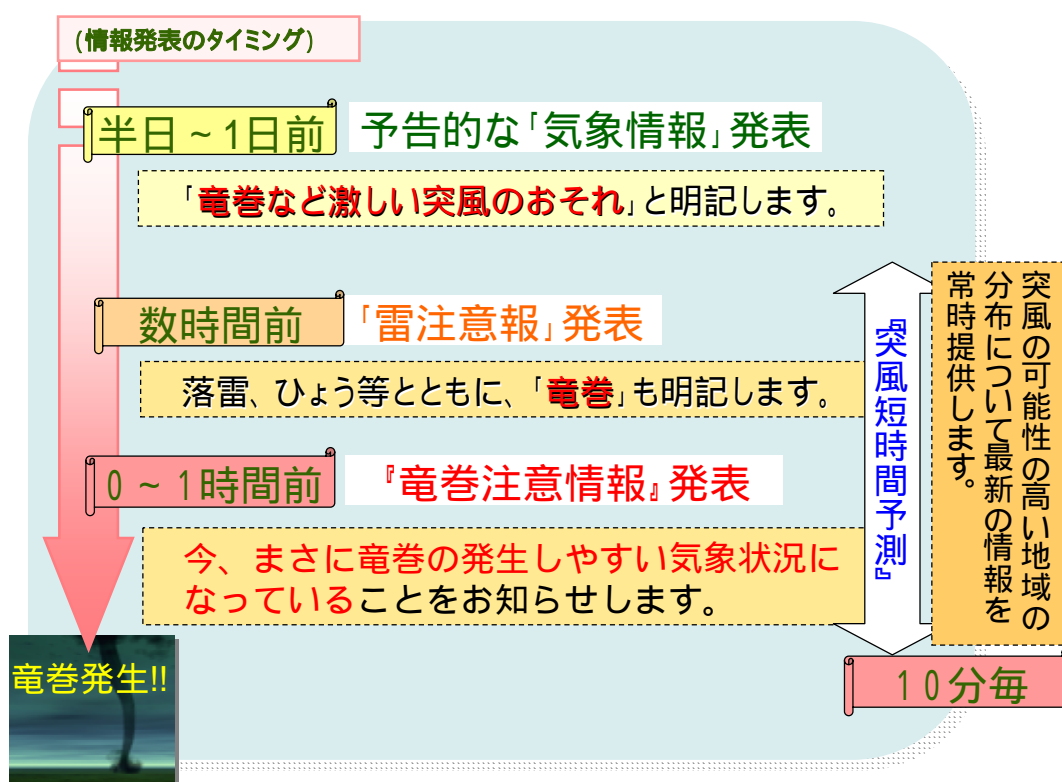


図1-2 竜巻などの激しい突風に注意を呼びかける気象情報

(1) 予告的に発表する気象情報

低気圧の発達などにより災害に結びつくような気象現象が予想される場合、半日から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測される場合には、「竜巻など激しい突風のおそれ」と明記して注意を呼びかける。

(2) 雷注意報

雷注意報は、落雷など積乱雲に伴う激しい現象の発生が予測される数時間前に発表される。雷注意報では、落雷に加えてひょうや突風についても注意が呼びかけられる。このとき、竜巻など激しい突風の可能性が高いと予測される場合には、注意報の本文中の付加事項欄に、「竜巻」と明記して注意を呼びかける。

(3) 竜巻注意情報

気象ドップラーレーダーによる観測などから、今まさに竜巻などの激しい突風が発生しやすい気象状態にあると判断された時に、竜巻注意情報が発表される。

なお、竜巻注意情報では、「竜巻」を名称に使っているが、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であるためである。竜巻注意情報は竜巻の他に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。

(4) 突風短時間予測

気象ドップラーレーダーによる観測などを利用して、竜巻などの激しい突風の可能性を10km 格子単位で解析し、その1時間後までの移動を予測したものである。格子点データ(分布図)で常時10分毎に最新の情報が提供される。

用語の定義 「突風に関する気象情報」

本ガイドラインにおいて「突風に関する気象情報」は、“予告的に発表する気象情報”・“雷注意報”・“竜巻注意情報”・“突風短時間予測”を総称している。

1 - 3 竜巻注意情報について

竜巻注意情報は、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高まっていると判断したときに、各地の気象台が発表する文章形式の気象情報である。適中率は10%程度、捕捉率は30%程度である。

【詳細】

(1) 竜巻注意情報の概要

雷注意報の発表中に、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の発生する可能性が高まっていると判断したときに、竜巻注意情報を発表する。竜巻注意情報は、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(概ね一つの県)を対象に文章形式で発表する(図1-3)。

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概ね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。

最後の「対象地域」の欄には、竜巻など激しい突風の発生しやすい対象地域として、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が表示される。

〇〇県竜巻注意情報 第1号
平成××年5月21日15時29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。

竜巻は積乱雲の周辺で発生します。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。

対象地域
中部、南部、東部

図1-3 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な現象であるため、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ると低く、これまでのところ適中率は概ね10%程度、捕捉率は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うち、実際に竜巻などの激しい突風による被害が発生した比率である。すなわち、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による被害が発生するが、残りの90回では発生しない（空振り）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による被害の回数に対して、竜巻注意情報を発表できた回数の比率である。すなわち、竜巻などの激しい突風による被害が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ない（見逃し）ということである。

(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（「竜巻」と明記していない場合も含めた全ての雷注意報）。すなわち、雷注意報を突風予測とした場合、捕捉率は100%に近いといえることができる。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、雷注意報は竜巻注意情報に比べ100倍以上の時間が発表されていることになり、空振りが多いといえる。

一方、竜巻注意情報は、捕捉率は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条件を絞っているため、竜巻注意情報発表中は雷注意報発表中に比べて突風発生の危険性ははるかに高い。竜巻注意情報運用開始前の地域・期間とも限定的な試算だが、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の突風危険性は雷注意報の30倍以上も高いという結果が出た。

1 - 4 突風短時間予測について

突風短時間予測は、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危険度を格子単位で解析し、60分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、10分毎に最新の情報を提供する。

【詳細】

(1) 突風短時間予測の概要

気象ドップラーレーダーの観測等に基づき、竜巻などの激しい突風の危険度を10km四方の格子単位で解析し、解析された危険域の60分先までの移動予測を行う。解析値（観測時刻時点）と予測値（10分後～60分後まで10分単位）を格子点データとして、10分毎に最新の情報を提供する（図1-4）。

解析する危険度はランクAとランクBの2通りである。ランクAは竜巻注意情報と同一の基準で危険度の判定を行う。したがって、ランクAの判定では竜巻注意情報と同様に捕捉率が低く（見逃しが多く）なるが、竜巻注意情報と同程度の適中率を確保している。一方、ランクBはランクAに比べ判定基準を低くして捕捉率を高めている（見逃しを減らす）ので、適中率はランクAより低い。

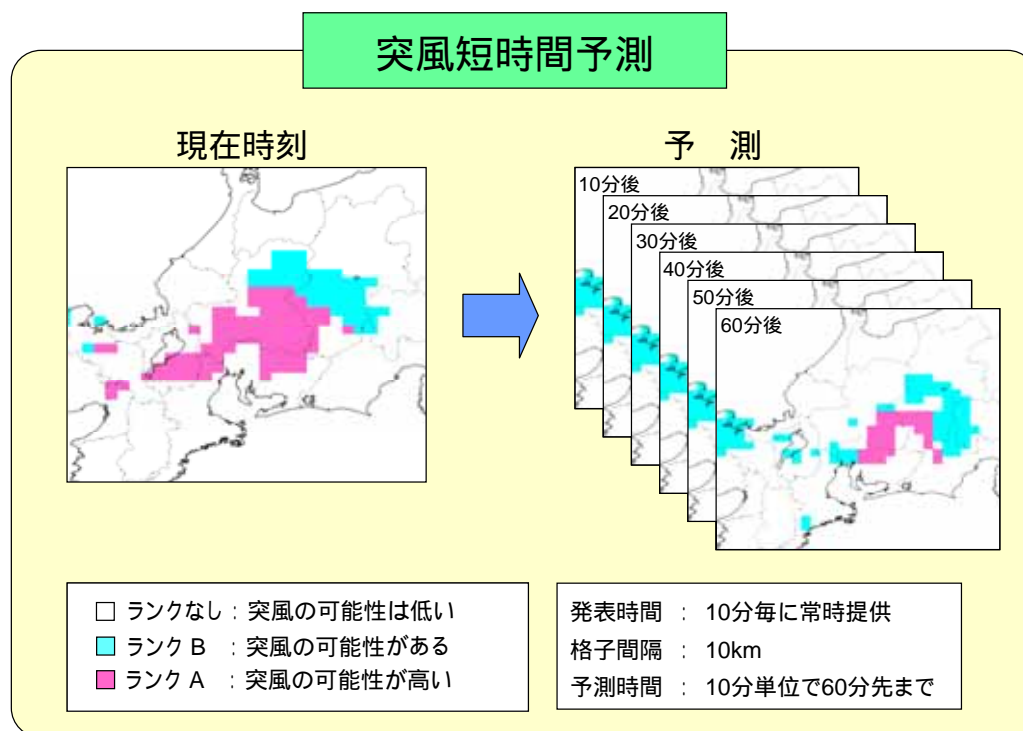


図 1-4 突風短時間予測の概要

(2) 突風短時間予測の精度

突風短時間予測については、開発段階での検証結果を図 1-5 に示す。検証方法等は以下の通りである。

- ・ 検証期間は、平成 19 年 4 月～平成 20 年 3 月の 1 年間である。
- ・ 検証地域は、この期間にドップラーレーダーの観測があった地域（東北地方南部から東海地方）である。
- ・ 10 分毎に発表する突風短時間予測の全てについて検証した。
- ・ 現在時刻から 60 分後までの予測の間にランク A (B) となった格子のどこかで突風が発生した場合に、この回の予測を適中とした。
- ・ ランク A (B) となる格子があり、それらの格子のいずれでも突風が発生しなかった場合は、この回の予測を空振りとする。
- ・ 適中回数と全予測回数（適中回数+空振り回数）の比率を適中率とした。
- ・ 予測が適中した突風事例数と突風事例の総数の比率を捕捉率とした。

ランク A の適中率は 6.5%、捕捉率は 26%と、竜巻注意情報の精度に近いものとなっている。一方、ランク B の適中率は 1.7%と低いが、捕捉率は 100%と見逃しのほとんどない情報となっている（限られた地域・期間の検証の結果なので捕捉率 100%を保証するものではない。実際には 90%前後を見込んで）。ランク B の見逃しが少ないのは発表回数が多いためであり、ランク B の発表回数はランク A の 15 倍以上も多いことに留意する必要がある。

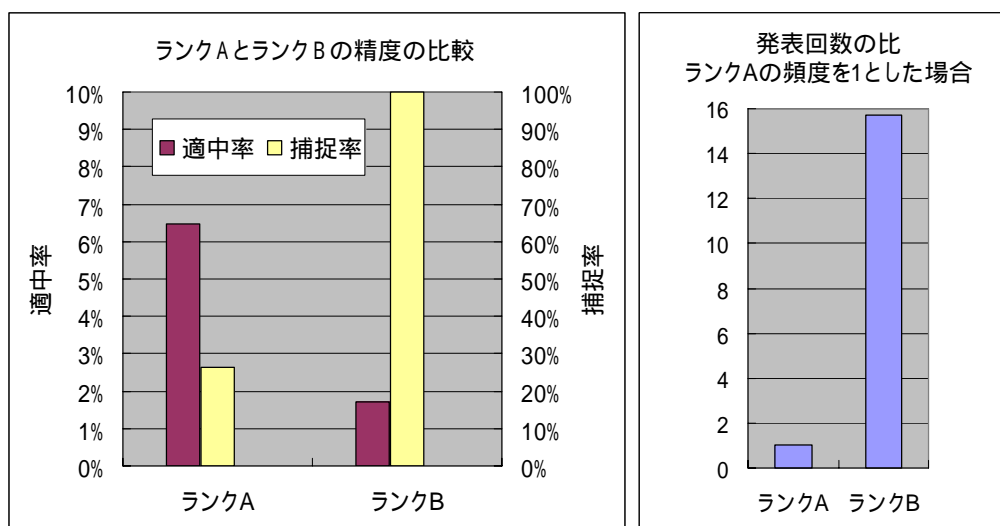


図 1-5 突風短時間予測の精度

(3) 突風短時間予測のランク A と B の出現回数

突風短時間予測の利用にあたっては、ランク A や B の出現回数がどの程度になるのかも問題になる。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ランク A と B の出現回数を調べた（図 1-6）。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。

突風短時間予測は 10 分毎に発表するので年間では 52560 の発表回数になる。出現回数とは、そのうちランク A や B が出現した回数である。関東地方では、ランク B が 1 格子当たり年間 200 回前後、ランク A が多い地域で 1 格子当たり 20～30 回程度出現している。

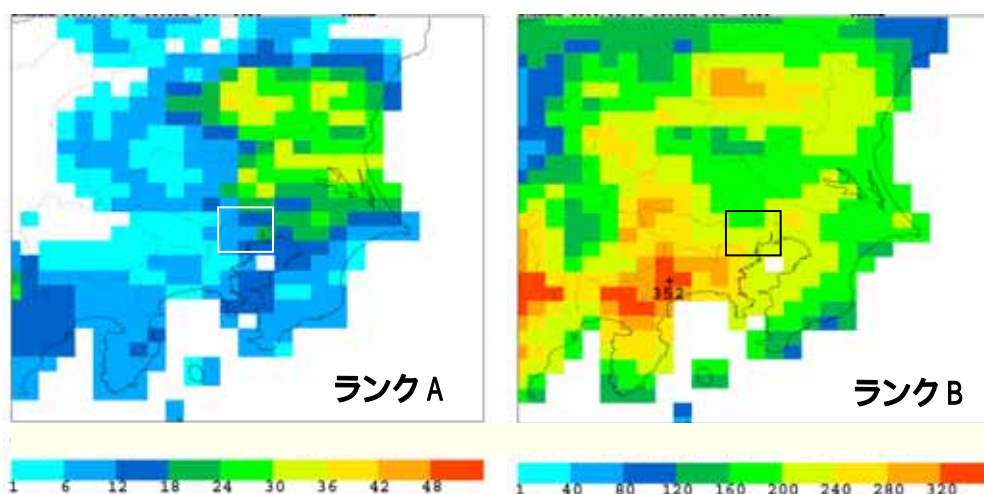


図 1-6 突風短時間予測のランク A と B の 1 年間の出現回数分布

東京 23 区を含む 9 格子（図 1-6 に示した枠内）で 1 格子でもランク A や B が出現した回数を集計すると表 1-1 の通りとなる。9 格子と範囲を広げているので、出現回数は 1 格子当たりの出現回数よりは多くなる。出現時間数とは各ランクが出現している延べ時間であり出現回数の 1/6 の数字となる。

出現日数とは各ランクが 1 回でも出現した日数である。各ランクが出現する日には、まとまった回数の出現があるので、出現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、ランク B が出現した日が 37 日、ランク A が出現した日が 5 日であった。

表 1-1 東京 23 区内における 1 年間のランク A と B の出現回数

東京23区内	ランクA	ランクB	1年間総数
出現回数	25	483	52560(10分)
出現時間数	4	80	8760(時間)
出現日数	5	37	365(日)

1 - 5 突風短時間予測と各種気象情報の関係

ランク A や B が出現する時には事前に雷注意報が発表されている。出現日数で見ると、ランク B は雷注意報発表日数の約半分、ランク A は 1/10 以下である。竜巻注意情報が発表されていても、ランクなしの地域では当面竜巻の可能性は低い。

【詳細】

(1) 出現日数から見た雷注意報と突風短時間予測の関係

表 1-1 では、東京 23 区で 1 年間にランク B が出現したのは 37 日、ランク A 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 1-7 である。通常、ランク A や B が出現するときには事前に雷注意報が発表されている。この 1 年間の東京 23 区では、ランク B の出現日数は雷注意報発表日数の約半分、ランク A は 1/10 以下であった。なお、ランク A が出現したときには竜巻注意情報が発表される。

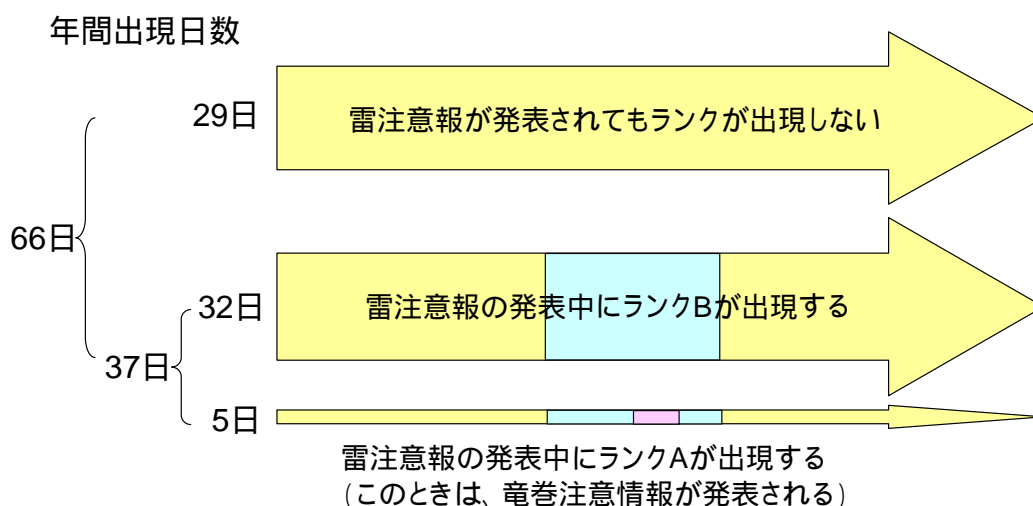


図 1-7 出現日数から見た雷注意報と突風短時間予測の関係
平成 19 年 4 月～20 年 3 月の 1 年間における東京 23 区の例。

(2) 竜巻注意情報と突風短時間予測のランクの関係

平成 22 年度の突風短時間予測開始時には、突風短時間予測を基に竜巻注意情報を発表する。突風短時間予測のランク A の判定基準は、現在の竜巻注意情報の判断基準と同等なので、1 時間後までの予測も含めてランク A が出ている地域（県など）に竜巻注意情報を発表することになる。

県内に竜巻注意情報が発表されていても、ランクが出ている地域と出していない地域があるが、各地域の突風発生の可能性は以下の通りといえる。

◇ ランク A の地域

竜巻などの激しい突風が発生する可能性が高い。

◇ ランク B の地域

竜巻などの激しい突風が発生する可能性があるが、ランク A の地域に比べると可能性は下がる。

◇ ランクなしの地域

当面は竜巻など激しい突風可能性は低いが、今後の変化には留意する必要がある。

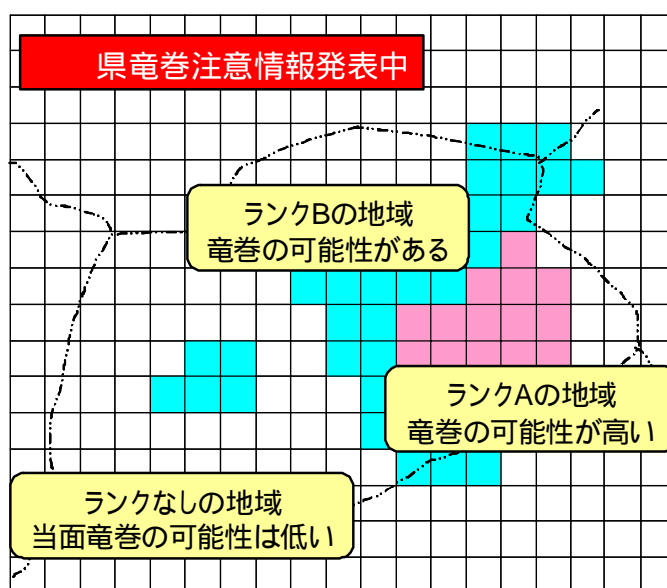


図 1-8 竜巻注意情報と突風短時間予測の関係

2．突風に関する気象情報の利用方法と留意点

2 - 1 限られた精度の情報を利用するにあたっての留意点

竜巻などの激しい突風は非常に規模が小さく稀な現象なため、最新の技術を用いても予測は難しい。このため、予測の精度が低いことを考慮した利用が必要であり、適中率と捕捉率を考慮して各種情報を併用することも重要である。

【詳細】

(1) 適中率が低い情報の利用

適中率が低く空振りが多い情報の場合には、高コストで万全の対策をとるのは現実的でない。できるだけ低コストで効果のある対策を検討することが必要である（コストとは、対策に要する費用で、対策により生じる利益の低下も含む）。

竜巻などの激しい突風に関しては、各種の気象情報から段階的に注意を高め、最終的には利用者自身が周辺の気象状況の変化から、突風の発生可能性の高まりを察知して行動するという対策が効果的と考えられる。このように、利用者自身が周囲の気象状況も含めて判断することで、対策をとる回数を減らしコストを少なくすることができる。

(2) 適中率重視と捕捉率重視の情報を併用

技術水準が一定ならば、適中率を上げようと発表基準を厳しくすると捕捉率は下がり（見逃しが増え）、捕捉率を上げようと発表基準を緩めると適中率は下がる（空振りが増える）。「竜巻注意情報」や「突風短時間予測のランク A」は適中率を重視した情報だが捕捉率は30%程度と低く、突風災害のうち70%程度は見逃してしまうことに留意する必要がある。一方、「雷注意報」や「突風短時間予測のランク B」は捕捉率を重視した情報であり、適中率は低いが捕捉率が90%以上と高い。

竜巻注意情報や突風短時間予測のランク A が発表されていなければ安全と考えるのは適当ではなく、捕捉率の高い情報である「雷注意報」や「突風短時間予測のランク B」も併用して突風災害に備える対応が必要である。

2 - 2 突風に関する各種気象情報の主な入手方法

突風に関する各種気象情報は、テレビ・ラジオや気象庁ホームページなどから入手可能である。突風短時間予測は、(財)気象業務支援センターから格子点データでも提供され独自の加工利用も可能である。

【詳細】

突風に関する各種気象情報は、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。突風短時間予測の格子点データをコンピュータ処理で高度利用する場合には、(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先は以下の通りである(図2-1参照)。

- 気象庁から直接国民へ周知される媒体を通じた入手
 - 気象庁ホームページ
- 気象庁以外の機関等により国民へ周知される媒体を通じた入手
 - 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、民間気象事業者による)
- 気象庁が発表する情報を(財)気象業務支援センターから直接入手

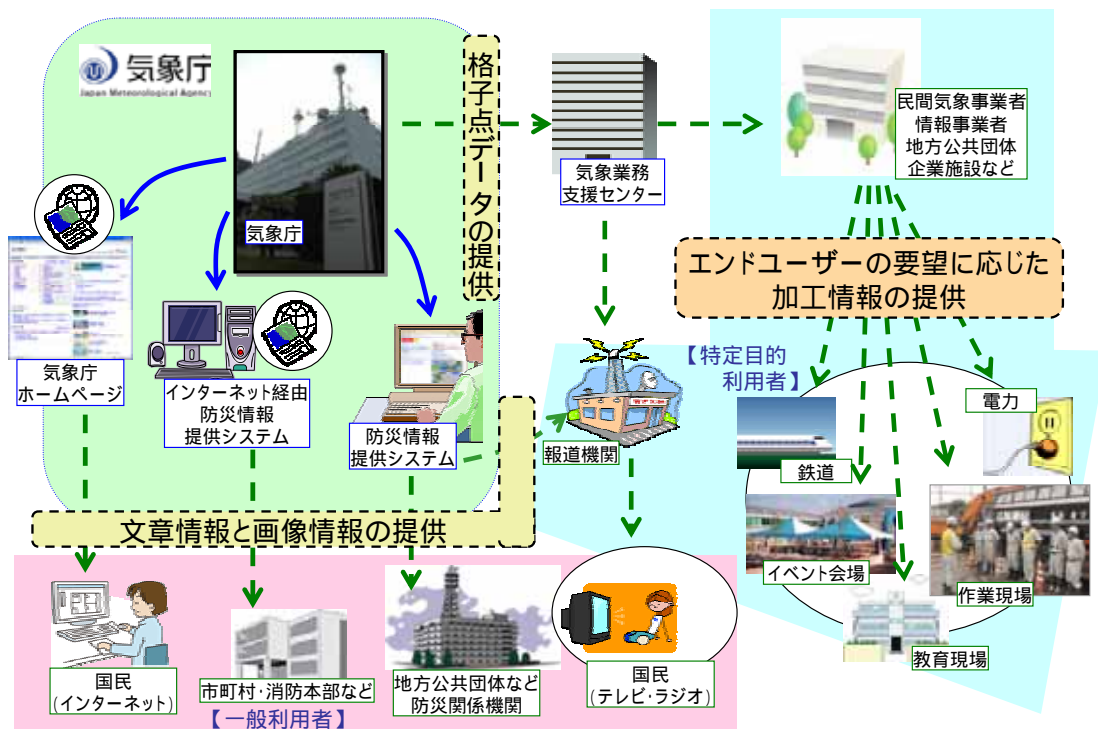


図 2-1 突風に関する各種気象情報の入手先

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。

2 - 3 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、竜巻注意情報を、時間経過と可能性の高まりに応じて利用する。これに、10分毎に最新の危険域の分布と1時間先までの予測を提供する突風短時間予測を効果的に組み合わせて利用する。

【詳細】

(1) 予告的な気象情報

半日～1日前に、「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、「竜巻など激しい突風のおそれ」と明記してある場合には、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ということを理解し、以下のチェックをする。なお、予告的な気象情報は、竜巻などの激しい突風の可能性が高いことが、数値予報などにより事前に予測された場合に限り発表される。

- ◇ 行動計画の見直しなどを検討する
- ◇ 突風に遭遇したときの対応を確認しておく
- ◇ 今後の雷注意報の発表に着目する

(2) 雷注意報

雷注意報は現象発生の数時間前に発表される。雷注意報の中に「竜巻」と明記してある場合には、通常の雷注意報発表時より竜巻などの激しい突風の可能性が高い状態であることを意味している。雷注意報が発表されたら天気の変化に注意し、可能であれば突風短時間予測の監視を行う。突風短時間予測が利用できない場合は、竜巻注意情報の発表に注意し、竜巻注意情報が発表されたら、(4)で示す対応をとる。

(3) 突風短時間予測

突風短時間予測は10分毎に最新の情報を提供しているので、雷注意報が発表されたときに、より詳しい状況を把握する手段として利用できる。

- ◇ 1時間先までの予測を含めてランクBになった場合には、竜巻注意情報の発表時に比べると確度は低いですが竜巻発生可能性がある。次のように安全の確保に時間を要する場合には、早めの対応に心がける
 - 人が大勢集まる屋外活動
 - テントや風に飛ばされやすい遊具の使用時
 - 高所作業やクレーンによる作業など、突風の影響を受けやすい作業時

- ◇ ランク A になった場合には、竜巻注意情報発表時と同様に突風の危険性が高い状況なので、(4) で示す対応をとる。

(4) 竜巻注意情報

竜巻注意情報が発表されたときには、発達した積乱雲の下では竜巻などの激しい突風が発生するおそれがある危険な状況となっていることを認識し、以下のチェックをする。

- ◇ 周囲の空の変化に注意し、身の安全を守るための行動につなげる《参考1》
- ◇ 実際に竜巻が間近に迫った場合には、すぐに身を守る行動をとる《参考2》
- ◇ 突風短時間予測には気象レーダーの観測値も加味されているが、突風短時間予測が入手できない場合には、気象レーダーで雨雲の状況（積乱雲の発達状況）を監視することも有効である。

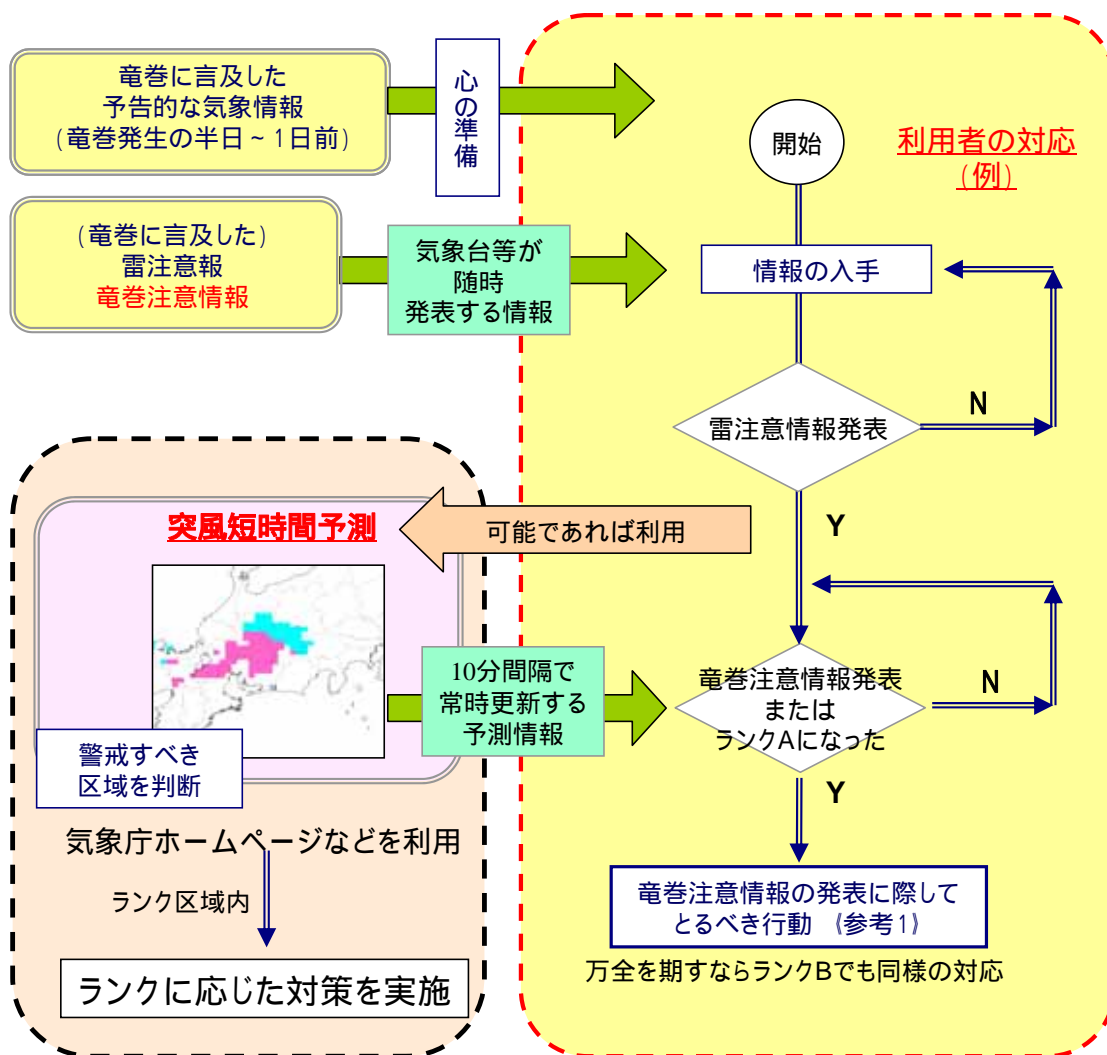


図 2-2 突風に関する各種気象情報と突風短時間予測を組み合わせた利用例

《参考1》 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するので、竜巻注意情報が発表されたら、まず空の状態に注意を払う。何もなければ特段の行動は不要だが、積乱雲が近づく兆しを察知した場合には、頑丈な建物に移動するなど身の安全を図る。

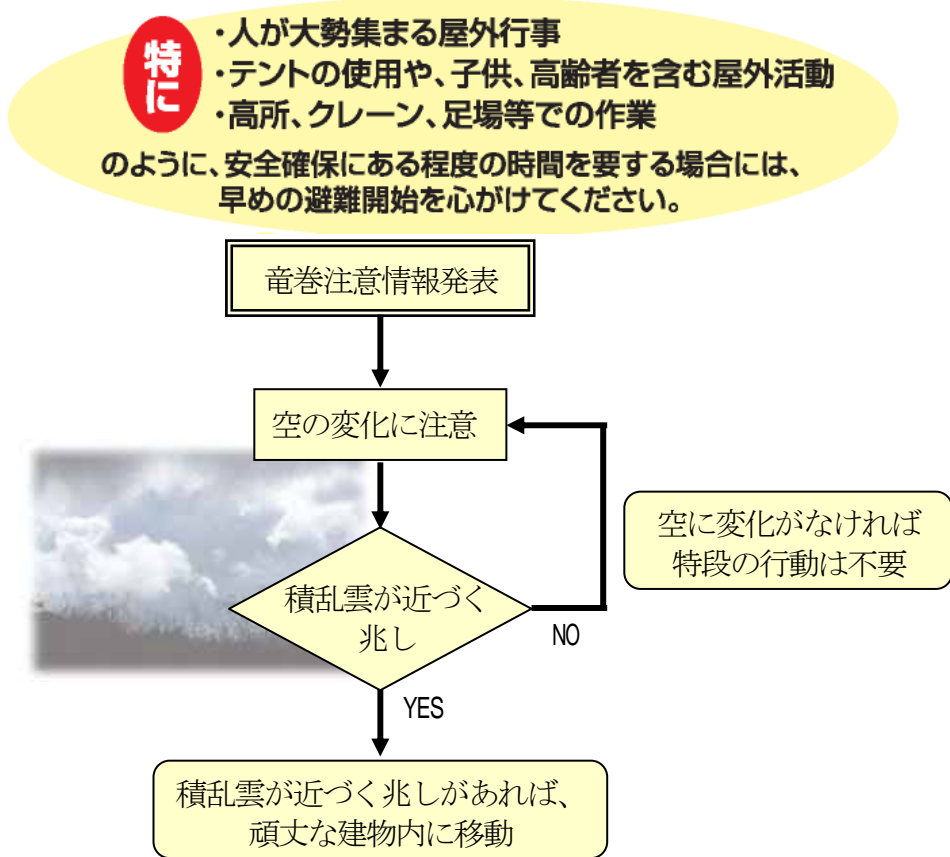


図 2-3 竜巻注意情報の発表に際してとるべき行動の流れ



図 2-4 積乱雲が近づく兆し

《参考2》 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る。



『竜巻』が間近に迫ったときの特徴

- ◇ 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。

図2-5 竜巻が間近に迫った場合の身の守り方

3 . 特定目的の事業者等による利用

3 - 1 利用者（事業者）毎の具体的な判断・対応計画の作成

各利用者（事業者）が個別の事業実態や想定される被害に即して、竜巻や突風等の激しい気象現象に対する具体的な判断・対応計画を作成することにより、被害の軽減・回避を図る。

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、図 3-1 のように個別の実態に即して検討する必要がある

	利用者（事業者）	注意事項、参考となる情報等
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。 ・（利用者毎に）想定される被害の規模や形態を想定・把握 	<ul style="list-style-type: none"> ← 気象庁ホームページには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。 本ガイドライン（参考資料）も参考。
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 	
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 ・予測情報等の入手手段の整理・把握 	<ul style="list-style-type: none"> ← 本ガイドライン第1章を参考。 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整理・把握する。 ← 本ガイドライン第1章を参考。 個別の利用者毎の、情報の入手環境に則して検討する。
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 ・対策と損失に係るコスト/ロスによる対策の有効性の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ← 考えられる対応策と、予測情報等の精度を勘案し、被害軽減・回避行動と、それに結びつける情報を決める。 ← 本ガイドラインの2 - 5や参考資料を参考。
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・突風等の激しい気象現象に対する『対応計画』の検討手順

3 - 2 対策コストに応じた突風短時間予測の利用

突風短時間予測のランク A と B の精度（捕捉率・適中率）を考慮して利用する。可能性の高まりに応じて、負担（コスト）の小さな対策から段階的に対応をとることにより、早めの対策から直近の対策まで効率的な対応が可能となる。

気象台が発表する 気象情報	突風 短時間予測	対 策
予告的な気象情報 (半日～1日程度前) 雷注意報 (数時間前) 竜巻 注意情報 (直前～ 1時間前) 雷注意報解除		朝礼やミーティングなどで、現場管理者が作業者に注意喚起
	10分毎に最新の情報 を常時提供	現場に雷注意報の発表を周知 ・突風短時間予測の監視を開始 ・空の状態も監視
	ランク B	・コスト小の対策があれば、ランク B の段階で実施 対策担当者の配置・監視強化 飛散すると危険なものの片付けなど ・コストが中・大の対策の場合は、積乱雲の接近を察知したら実施
	ランク A	・コスト中の対策があれば、ランク A の段階で実施 安全確保に時間を要する施設の休止準備など ・コストが大の対策の場合は、積乱雲の接近を察知したら実施 作業休止など
	ランク B	
雷注意報解除	突風短時間予測を利用すれば、対策の負担（コスト）に応じた段階的な対策が可能。	

図 3-2 時間経過と可能性の高まりに応じた各種情報の利用

コストが大・中・小の3段階の対策がある場合について、突風短時間予測の効果的な利用を中心に記述した。詳細な費用対効果の検討については、参考資料 2「コスト／ロスを考慮した突風短時間予測のランク A と B の利用」を参照。

3 - 3 必要に応じた突風短時間予測の高度利用

屋外作業では、携帯端末等により速やかに各種情報を入手する手段を講じる。可能な場合には、上部組織が詳細な情報を入手し現場の判断を支援する。更なる高度利用として、突風短時間予測の格子点データを独自に加工することも可能。

(1) メール通知等の既存汎用サービスの契約

- ◇ 各作業現場（地域）が対象となる気象情報、雷注意報、竜巻注意情報の発表を現場へ自動通知し、「行動のトリガー」として利用する。
- ◇ 現場で見られる突風短時間予測の画像情報（携帯端末など）も利用する。

(2) 本社・自治体など、上部機関による情報支援

- ◇ 上部機関がインターネット等から得られる各種情報を総合して詳細な状況を把握し、注意段階に応じて「各段階での現場判断」を支援する。

(3) 独自の情報加工・作成

- ◇ 突風短時間予測の格子点データを入手し、各事業者がとるべき対策に適合した判断基準により自動的にアラームを出すようなシステムを構築する。
- ◇ 現場周辺の独自の観測データを利用し、突風短時間予測の格子点データと組み合わせることで独自の情報を作成する。

4 . 報道機関や民間気象事業者による情報提供

報道機関や民間気象事業者は、利用者への情報提供において大きな役割を果たす。テロップによる速報や詳細な分布図表示など、提供メディアの特性を活かした情報提供をお願いしたい。最新の情報を可能な限り速やかに提供することが重要である。

4 - 1 基本的な考え方

竜巻注意情報や突風短時間予測は、気象庁からホームページ等を通じて利用者に提供するが、報道機関による情報提供や解説も大きな役割を果たしており、民間気象事業者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。

テレビのテロップ表示やラジオによる竜巻注意情報の速報は今後も有効な手段である。屋外の利用者への速報としては携帯電話が有効であり、竜巻注意情報や突風短時間予測のランクの出現状況のメール通知などが考えられる。また、具体的な注意の呼びかけには、テレビやラジオの気象情報番組でのキャスターによる解説が適している。一方、インターネットを利用したホームページでは突風短時間予測の分布図に各種情報を組み合わせた多様な情報提供が可能であり、携帯電話のWEB コンテンツでも突風短時間予測の分布図の提供が可能である。これら各種メディアの特性を活かした情報提供を進めて行く。

竜巻注意情報や突風短時間予測は、最新の情報を可能な限り速やかに提供することが重要であり、情報提供に当たってはこの点にも十分留意していただきたい。

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

テレビのテロップ表示やラジオの速報は、竜巻注意情報の有力な速報手段である。竜巻注意情報は、今後はXML形式でも提供する予定なので発表地域の抽出など（！！発表地域の細分は未定！！）自動処理が可能になる。XML型式電文を加工することにより、竜巻注意情報が発表されたら速やかにテロップで表示するなどの速報ができる対応をとることが望ましい。可能な場合には、放送中に情報文を読み上げるなどの対応をとっていただくと防災効果が大きい。

(2) 気象情報番組等におけるキャスターの解説

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。突風短時間予測を分布図も参考にして、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。

◇ 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ので、「竜巻」という言葉を用いて特段の注意を呼びかける。

◇ 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、次のように情報を受けた視聴者がとるべき行動を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、強い雨やひょうが降り出すなど、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、頑丈な建物の中に移動するなど、身の安全を確保すること。

◇ 突風短時間予測を利用した注意の呼びかけ

テレビなどでは必要に応じ、突風短時間予測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、上記のように、視聴者がとるべき行動を具体的に示すことが望ましい。

- ランク A の広がっている〇〇県南部を中心に竜巻の発生する可能性が高い。
- ランク B となっている〇〇県中部でも竜巻が発生する可能性がある。
- 〇〇県には竜巻注意情報が発表されているが、県北部では当面は竜巻が発生する可能性が低い。

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に対する期待も大きい。

- ◇ 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。
- ◇ 突風短時間予測でランク A（または、ランク B）となった地域の契約者にメールを送信する。
- ◇ 突風短時間予測を WEB コンテンツとして図情報で提供する。

4 - 4 インターネット（パソコン）による情報提供

インターネット（パソコン）等の情報端末は、基本的には必要なときに参照する利用形態なので、危険性を即時的に知らせるのには適していないが、雷注意報や竜巻注意情報入手した利用者が、次の段階として突風短時間予測による危険域の分布図など最新の詳しい情報入手するのに適している。突風短時間予測に加えて、雷短時間予測や降水ナウキャストの重ね合わせ、雷注意報や竜巻注意情報の発表状況を合わせて表示することも可能である。図4-1には気象庁ホームページで想定する表示例を示した。

イメージ

「竜巻注意情報」の発表状況を表示

降水強度と重ね合わせた表示

竜巻注意情報発表中
岐阜県、愛知県、長野県、静岡県

- 竜巻の可能性のある格子
 - : ランクB
 - : ランクA
- 降水強度
 - 40mm以上
 - 30～40mm
 - 20～30mm
 - 10～20mm
 - 5～10mm
 - 1～5mm
 - 1mm未満
 - なし

留意事項を明記

竜巻等突風の発生する可能性のある格子の注意や危険は、気象ドップラーレーダーによるメソサイクロン解析結果に加え、数値予報資料から算出した大気安定度などの資料及び気象レーダーで観測した結果を組み合わせ、竜巻の発生に繋がるような発達した積乱雲の存在しうる気象状況であるかを判断したものです。竜巻の発生そのものを予想しているわけではないので、……(中略)……
このため、個々のメッシュの位置や警戒程度ではなく、大きな警戒度の面的な広がり具合とその形状に着目してご利用ください。

図4-1 ホームページにおける情報提供例

【 第二部 】技術解説

1 . 概要

(1) 突風解析・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、激しい突風の危険域を解析するということはできない。

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規模が小さすぎて予測できない。竜巻やダウンバーストなどの発生基となる発達した積乱雲でも、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できない。

(2) 突風に関する気象情報における突風解析・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したら、その付近で竜巻などの激しい突風の可能性が高いと判断することができる（→第3節）。

一方、数値予報では、竜巻を発生させるような発達した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、今現在、その積乱雲の付近で竜巻などの激しい突風の可能性が高いという判断が可能である（→第5節）。

竜巻注意情報の発表判断や突風短時間予測の危険域の判定では、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。

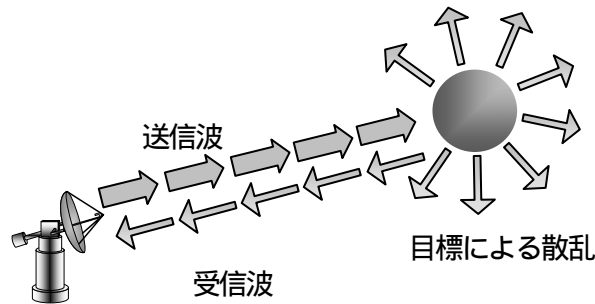


図 2-1 レーダー電波の散乱

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、散乱波の強さから対象物の強さを求め、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たると、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。

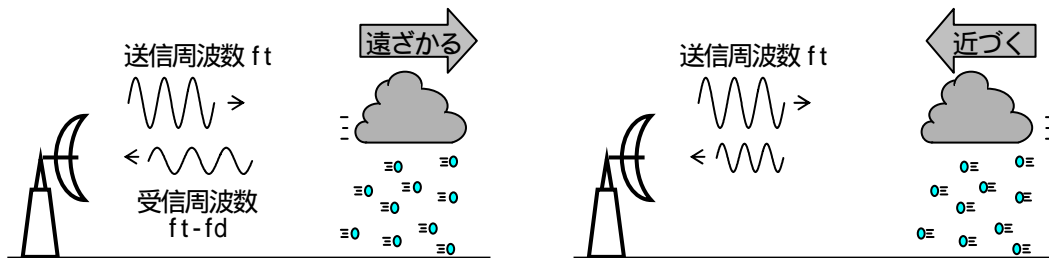


図 3-1 ドップラー観測

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)。

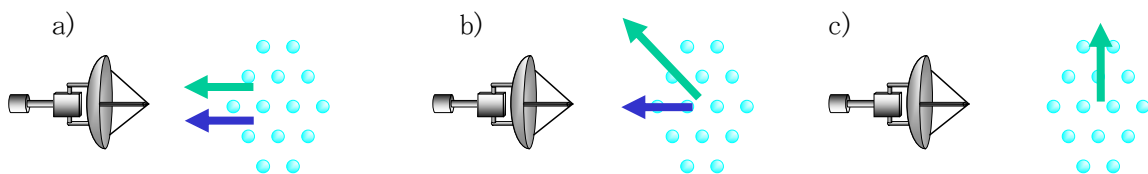


図 3-2 ドップラー速度

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、シヤーがある場合は、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)。

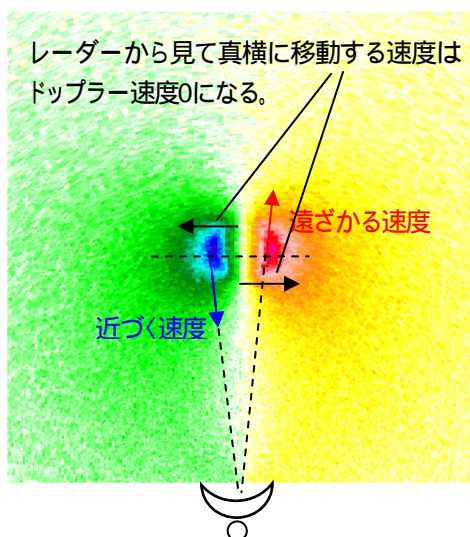


図3-3 ドップラー速度のパターン
顕著な渦があるときのドップラー速度のパターン。青色の濃いところが近づく速度が速いところで、赤色の濃いところが遠ざかる速度が速いところ。顕著な渦の場合は青色の濃い領域と赤色の濃い領域がレーダーから見て左右に並んで見える。

(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。

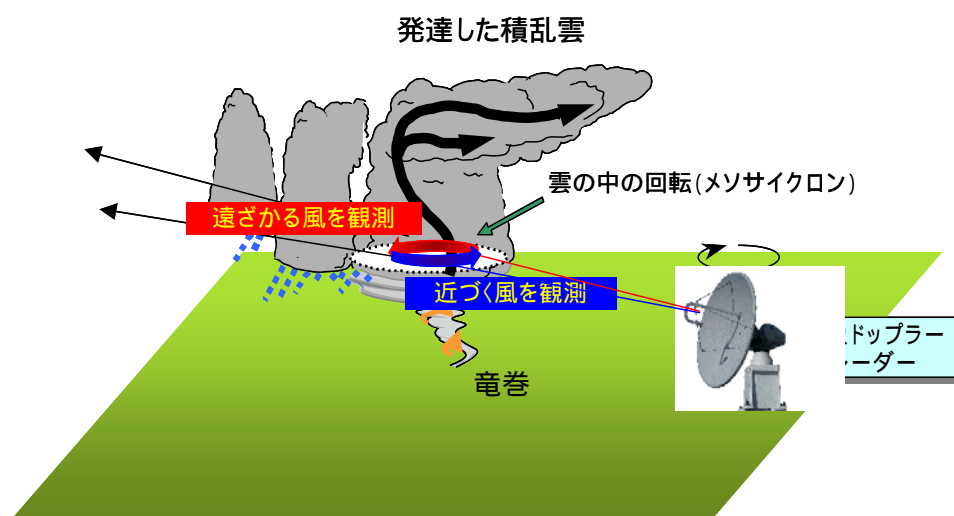


図3-4 気象ドップラーレーダーによる積乱雲中のメソサイクロンの検出

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不可能である。

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（突風ポテンシャル指数）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。

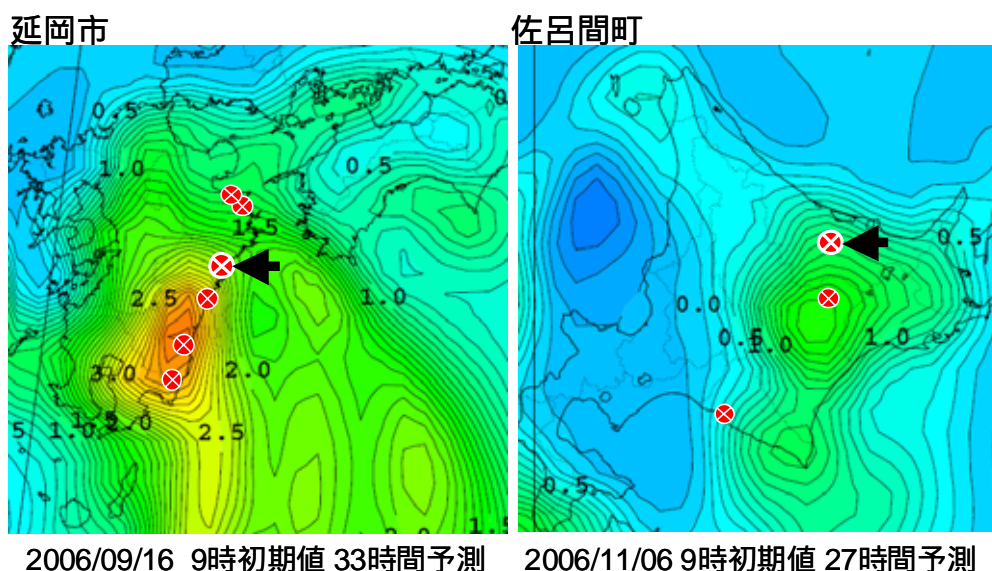


図4-1 突風ポテンシャル指数の予測例

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。矢印は左から延岡市竜巻、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 10 分毎に得られる気象レーダーの観測値から、「今現在」の突風が発生する可能性の大きさを推定する「突風危険指数」を新たに開発した。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積乱雲の発達程度 (気象レーダー観測) から突風危険指数が算出される過程を示した。

この突風危険指数は、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、突風の危険域の解析・予測に利用する。

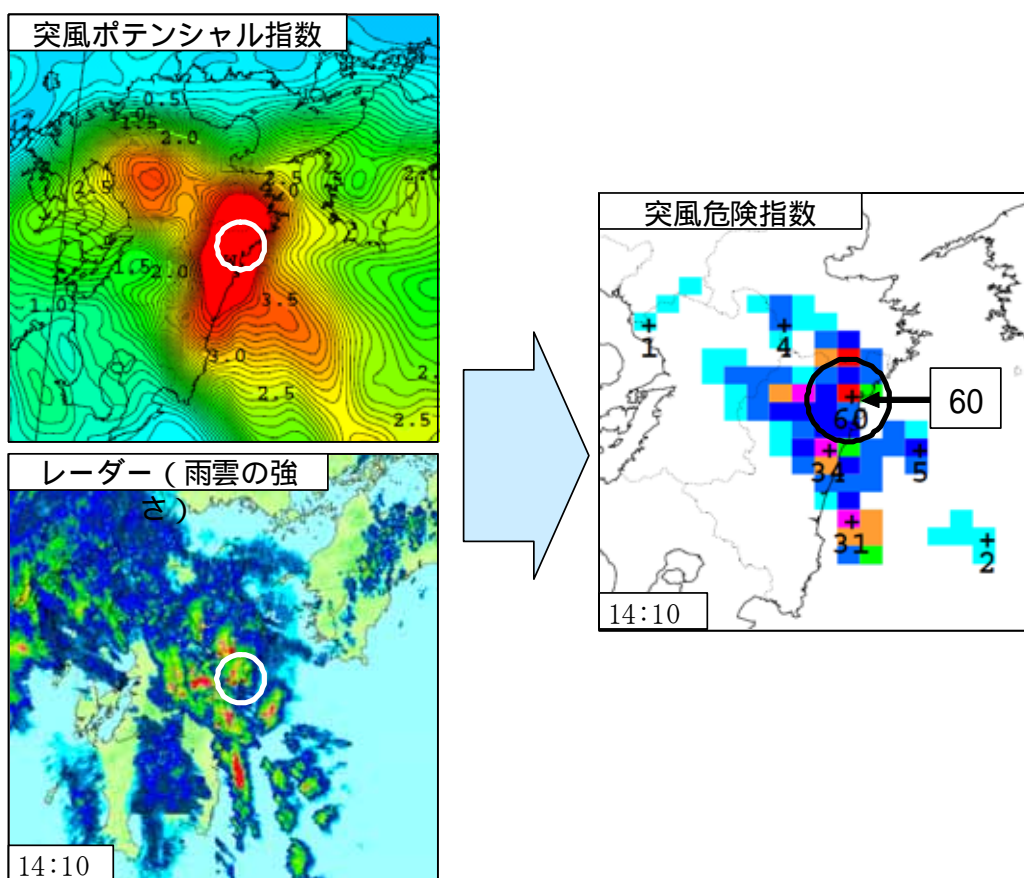


図 4-2 突風ポテンシャル指数と気象レーダーから突風危険指数が算出される様子

6．突風の危険域の解析・予測技術

(1) 2つの技術を用いた突風の有無判定

「今現在、竜巻などの激しい突風の危険性が高い」ことを判定する（突風の有無判定）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、竜巻などの激しい突風が発生する可能性が高いといえることができるが、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すると、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)条件を使う手法を開発した。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、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加えている。

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、突風短時間予測では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)条件も利用することとした。

(2) 竜巻注意情報の発表基準

竜巻注意情報は、突風短時間予測のように「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、あまりに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、AND条件が成立した10km格子を含む予報区域（基本的に県単位）に対して竜巻注意情報を発表することとした。

なお、平成22年度の突風短時間予測の開始時点には、同じくAND条件を前提とする突風短時間予測のランクA格子を含む予報区域に対して竜巻注意情報を発表するように変更する予定である。

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．

(3) 突風短時間予測における危険格子の解析

突風短時間予測では、竜巻などの激しい突風の危険域を 10km 格子単位で解析する。図 4-3 に危険域の解析過程を示した。まず、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**可能性が高い**」領域と考える。これを「ランク A 背景」と呼ぶ（a の赤色領域）。さらに、「メソサイクロン検出」または「突風危険指数」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「ランク B 背景」と呼ぶ（a の水色領域）。これらと気象レーダー観測による雨量強度（b）を重ねて、雨量強度の強い格子をランク A 格子またはランク B 格子と解析する（c）。A+、B+ と細分したランクも解析するが、ランク A と B では適中率や捕捉率の特性に大きな差があり、A+（B+）は雨量強度による細分だけである。「B+ は A より少しだけ精度が低い」という意味ではないことに留意されたい。このような誤解を避けるため、通常は第一部で示したようにランク A、ランク B の 2 ランクに分類して表示する。

◇ ランク A+（B+）：**すでに** 積乱雲が発達しており、**今まさに** 竜巻などの激しい突風が発生する可能性が高い（可能性がある）。雨量強度 90mm/1h 以上の格子。

◇ ランク A（B）：**今後 1 時間内に** 積乱雲が発達すると、竜巻などの激しい突風が発生する可能性が高い（可能性がある）。雨量強度 20mm/1h 以上 90mm/1h 以下の格子。

（注意：ここで示した閾値等の数値は今後の調査で変更されることもある）

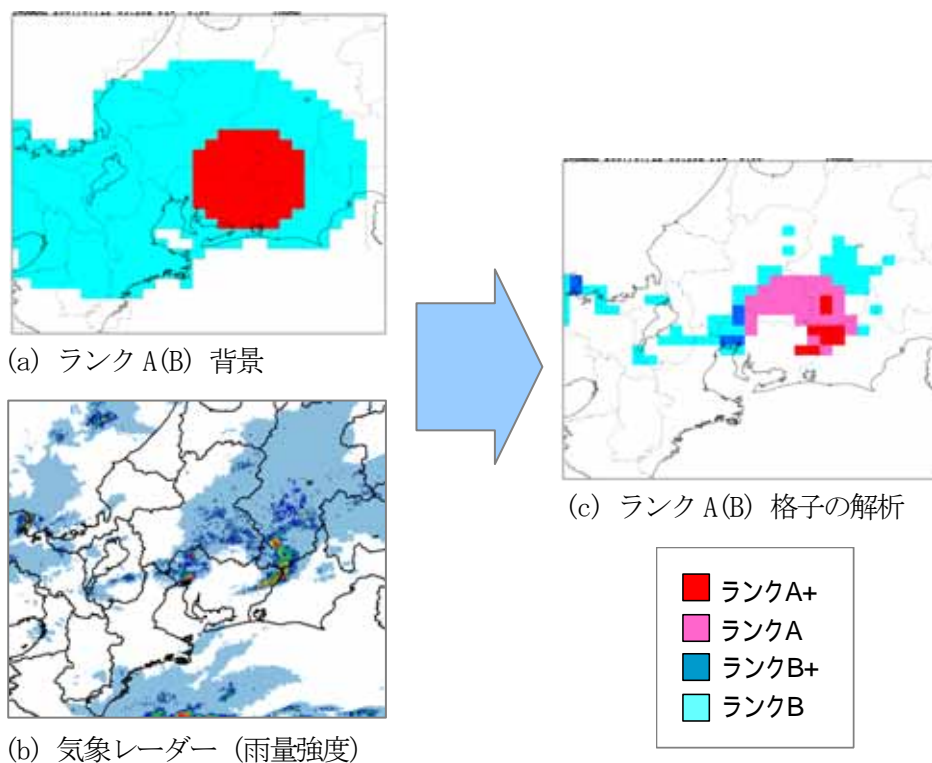


図 4-3 ランク A (B) 背景と雨量強度からランク A (B) 格子を解析する過程

(2) 移動予測

ランク A などの危険な状態が「新たに出現する」という予測は困難であるため、突風短時間予測では「解析された突風の危険性の高い状態は1時間程度継続する」と仮定し、以下のように危険域の移動を中心とした予測を行う。

- ◇ 解析で用いたランク A 背景とランク B 背景は移動せずに1時間先まで固定とする。
- ◇ 但し、ランク A 背景とランク B 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。
- ◇ 解析時刻のレーダーエコーについて1時間後までの移動を予測する（これは降水の短時間予測である「降水ナウキャスト」に相当する）。
- ◇ 1時間後までの各10分の予想雨量強度、及び各時刻のランク A (B) 背景からランク A (B) 格子を判定する。

このようにして予測された結果（ある時刻の突風短時間予測）を図4-4に示す。

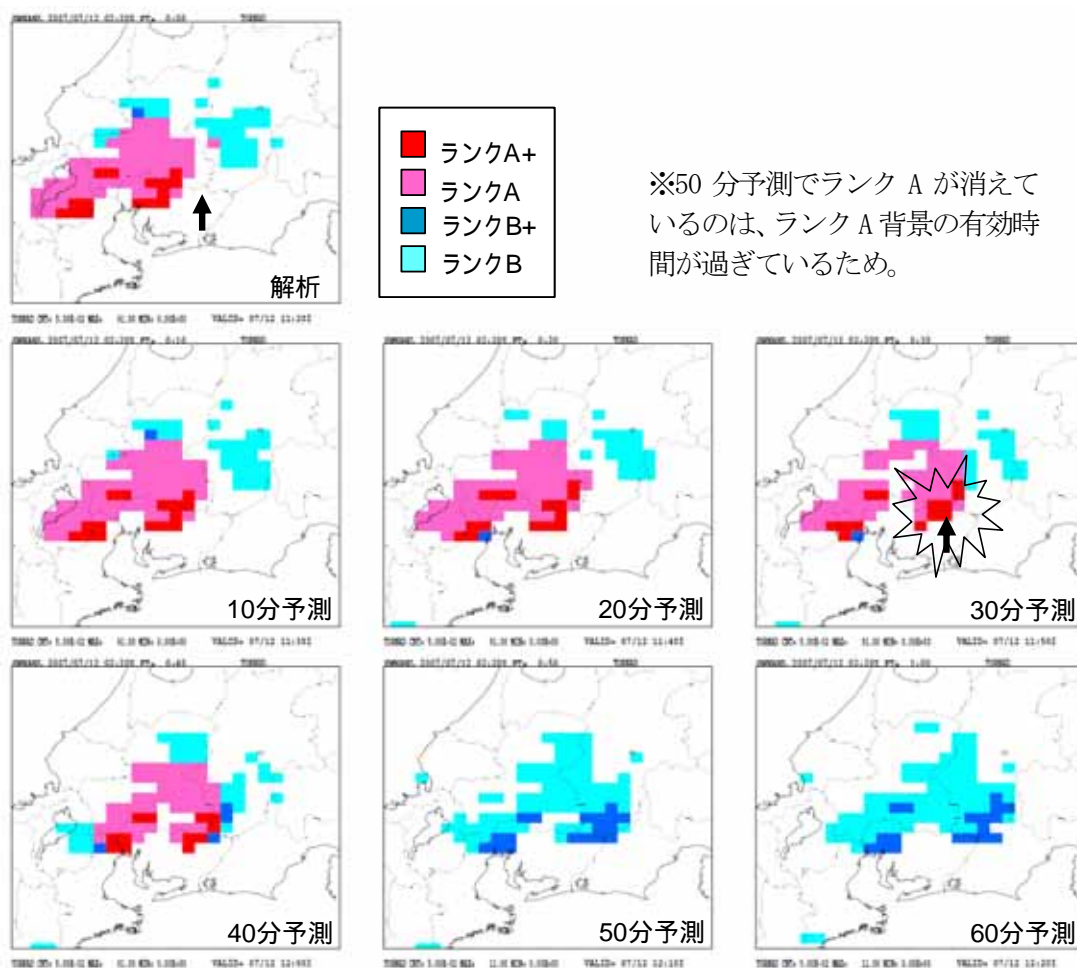


図4-4 平成19年7月12日11時20分を初期時刻とした突風短時間予測
この事例では、30分後（11時50分）に矢印の場所で突風が発生した。

【 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7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。

(1) 突風の年間発生数

1991年～2008年7月までの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、不明な事例は緑でプロットしている。なお、竜巻またはダウンバーストは、竜巻かダウンバーストか特定できなかったことを示している。

地域により発生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、竜巻の発生は沿岸部で多い傾向がみられるが、ダウンバーストやガストフロントの発生地域にはそのような傾向はみられない。

*1 竜巻以外は地上に被害をもたらした事例のみである。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。

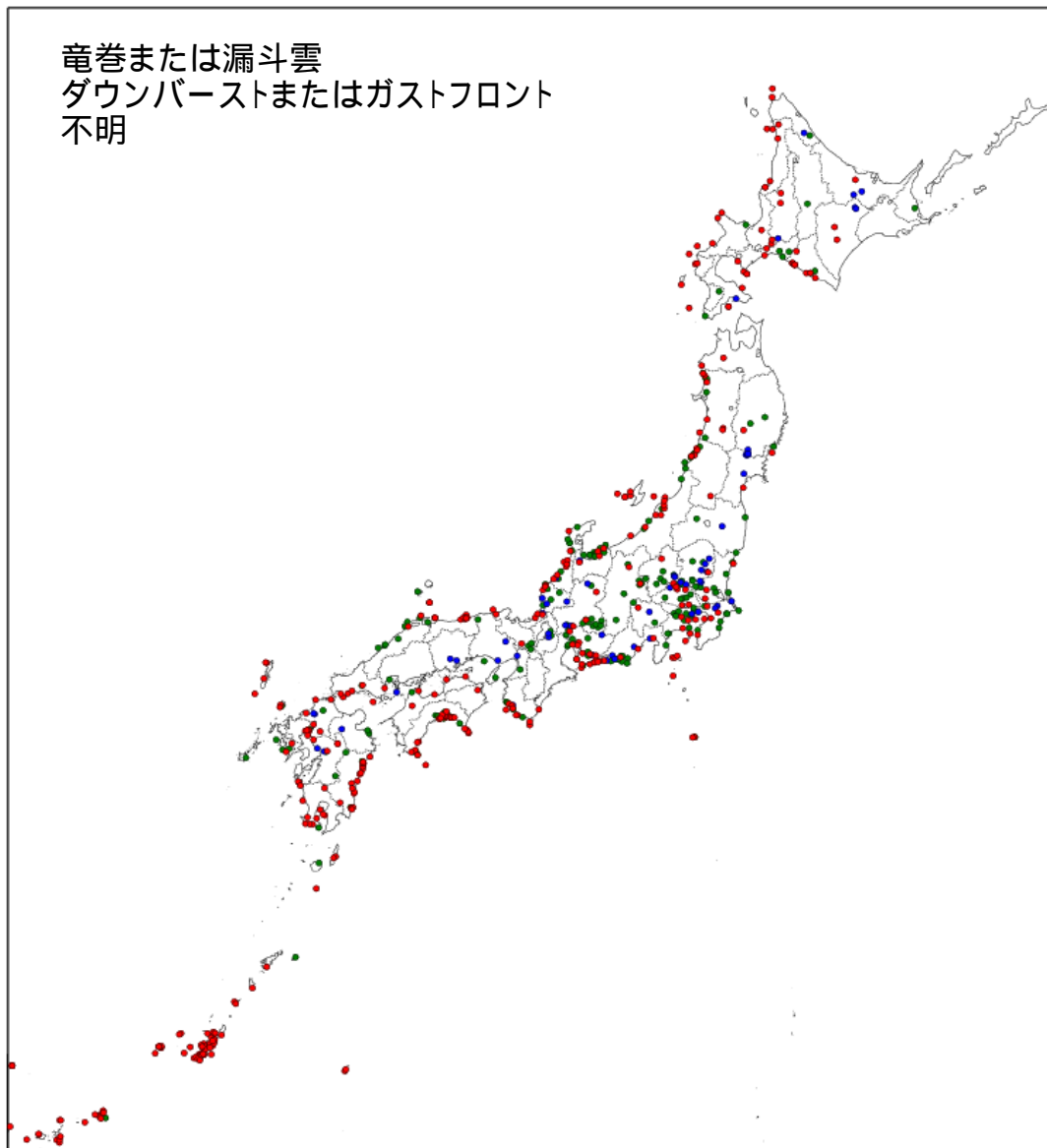


図 1-1 1991 年～2008 年 7 月に確認した突風の分布

1991年～2008年7月に確認した突風は全部で636件であり、そのうち竜巻と確認したものは338件と約半数を占めている。

年間の発生数は、突風全体で36.1件/年、竜巻では19.2件/年である。

表1-1 1991年～2008年7月に確認した突風の総数及び年間平均発生数

現象の種類	事例数	1年あたり
竜巻	338	19.2
竜巻または漏斗雲	14	0.8
竜巻またはダウンバースト	6	0.3
ダウンバースト(マイクロバーストも含む)	49	2.8
ダウンバーストまたはガストフロント	4	0.2
ガストフロント	12	0.7
不明	213	12.1
総数	636	36.1

(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、実際にはどの程度の可能性があるのかを他の事例と比較した。このため、突風の発生確率は国内で等しいと仮定して、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）を以下に示す。

1991年～2008年7月までに確認した突風636件のうち、陸上の被害面積が推定できているものは295件あり、その被害面積の合計は1年あたり約42.5km²である。日本全国の面積は約364000km²であるから、1年あたりの遭遇確率は約0.012%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8000年に1度程度といえることができる。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0.0045%^{*2}であることから見れば、その2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。

アメリカでの竜巻の発生数と比較しても、日本での竜巻の発生は決して少なくはない。1991年～2008年7月までに確認した突風636件事例のうち陸上に被害をもたらした竜巻は年間約11件である。一方、アメリカでの竜巻の発生数が年間約800件であり、発生数で比較すると相当少ないが、10,000km²あたりで見ると、我が国では約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。

*2 警察庁交通局「平成19年中の交通事故の発生状況」の交通事故の死者数(5,744人)を総務省統計局「人口推計」の平成19年10月1日現在の総人口(1億2777万1千人)で除したものである。

(3) 地域による発生頻度の違い

突風の発生率が都道府県によりどの程度違うのかを見る。

1991年～2008年7月までに確認した突風636件のうち、陸上に被害をもたらした突風472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、北陸地方で発生頻度が高い傾向が見られる。

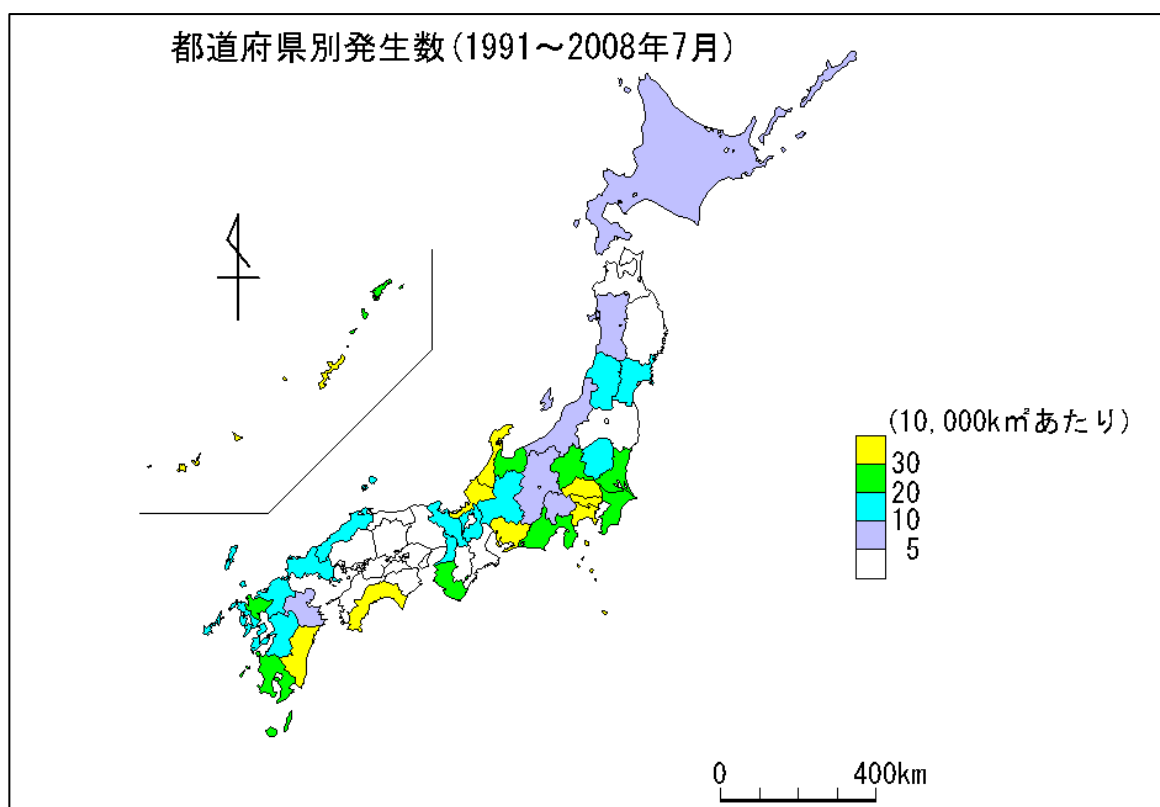


図1-2 都道府県別の突風発生数(1991～2008年合計、10,000km²あたり)

(4) 季節による発生数の違い

1991年～2008年7月までに確認した突風636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、突風の発生数は7月から10月にかけて多く、この4ヶ月で年間発生数の約60%を占めているなど、突風の発生数には季節による違いが見られる。

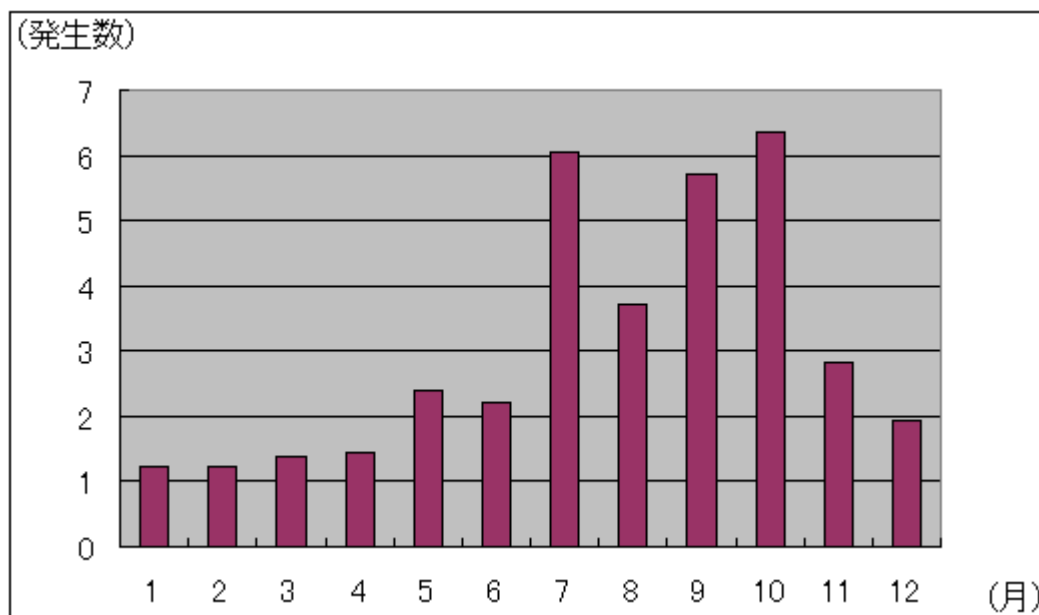
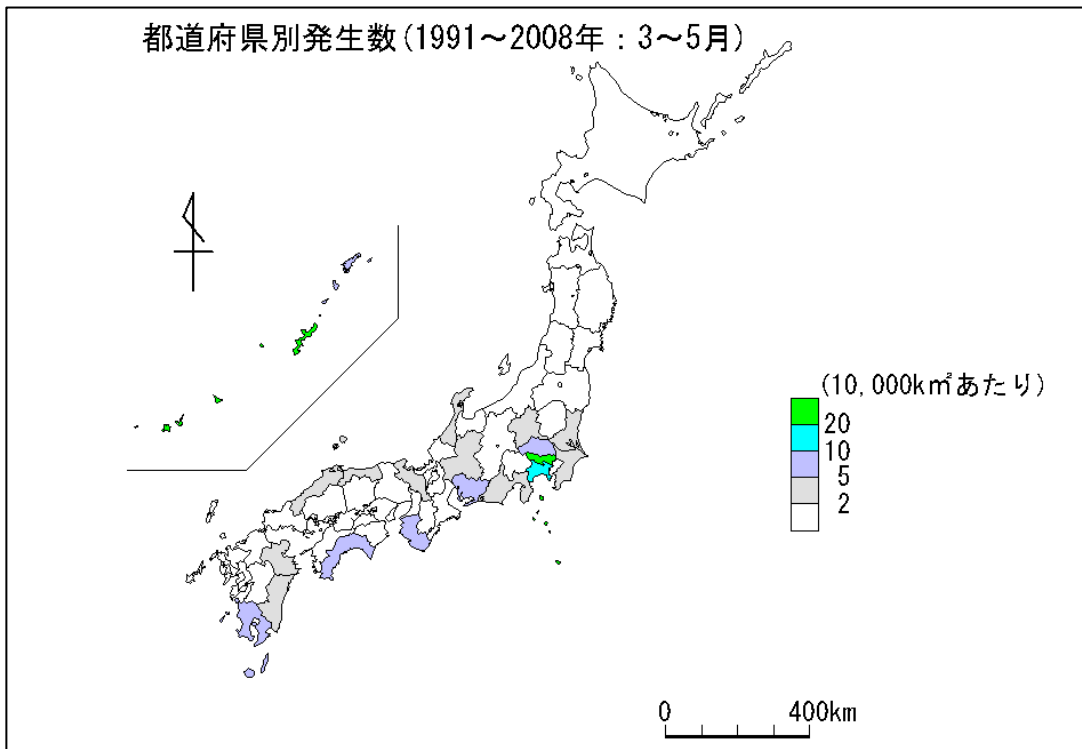


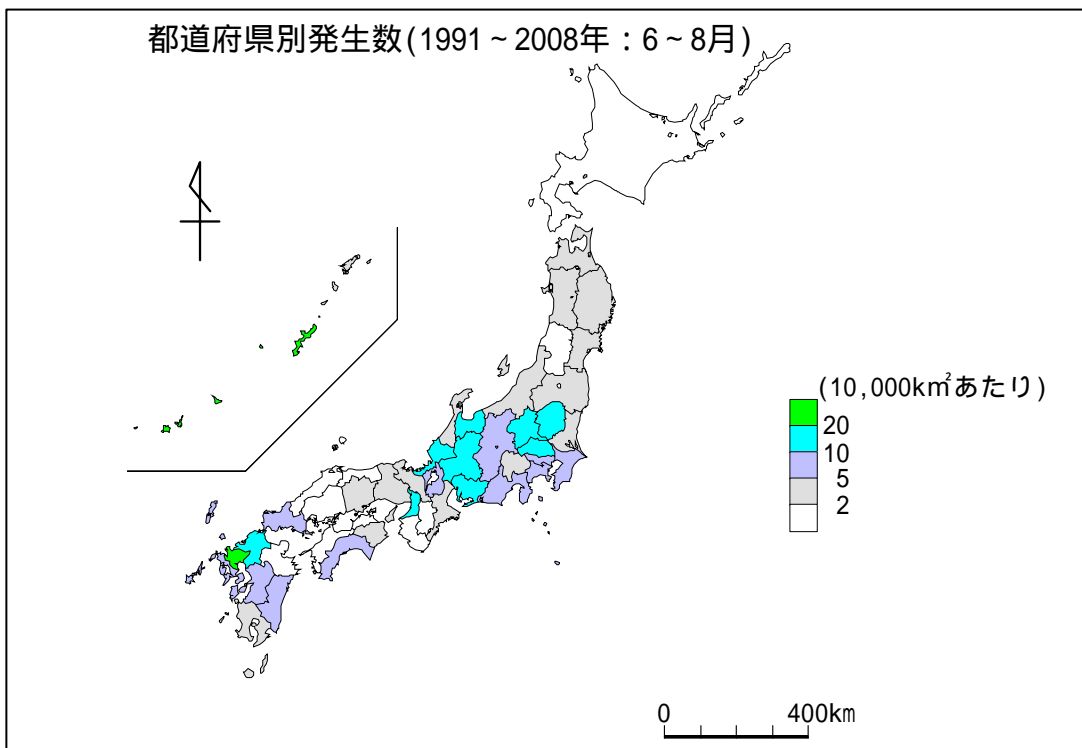
図1-3 突風の月別件数（1年あたり、1991年～2008年7月までに確認したもの）

陸上に被害をもたらした472件について、都道府県別の10,000km²あたりの事例数を季節別に示す（図1-4）。以下のように、発生頻度の地域差にも季節による違いが見られる。

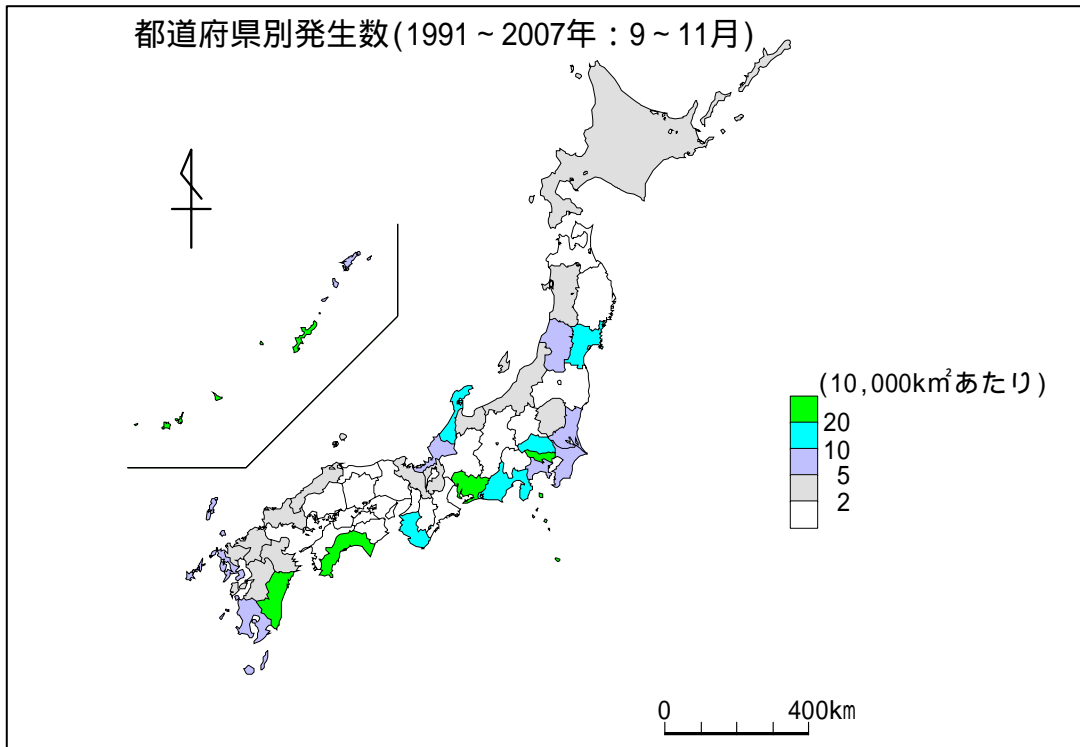
- ・ 春（3～5月）は、関東以西の特に太平洋側で多く発生している。
- ・ 夏（6～8月）は、全国的に発生しているが、特に関東以西で多く発生している。
- ・ 秋（9～11月）は、沿岸部を中心に多く発生している。
- ・ 冬（12月～2月）は、秋と同様に沿岸部を中心に多く発生しているが、日本海側でやや多い傾向が見られる。



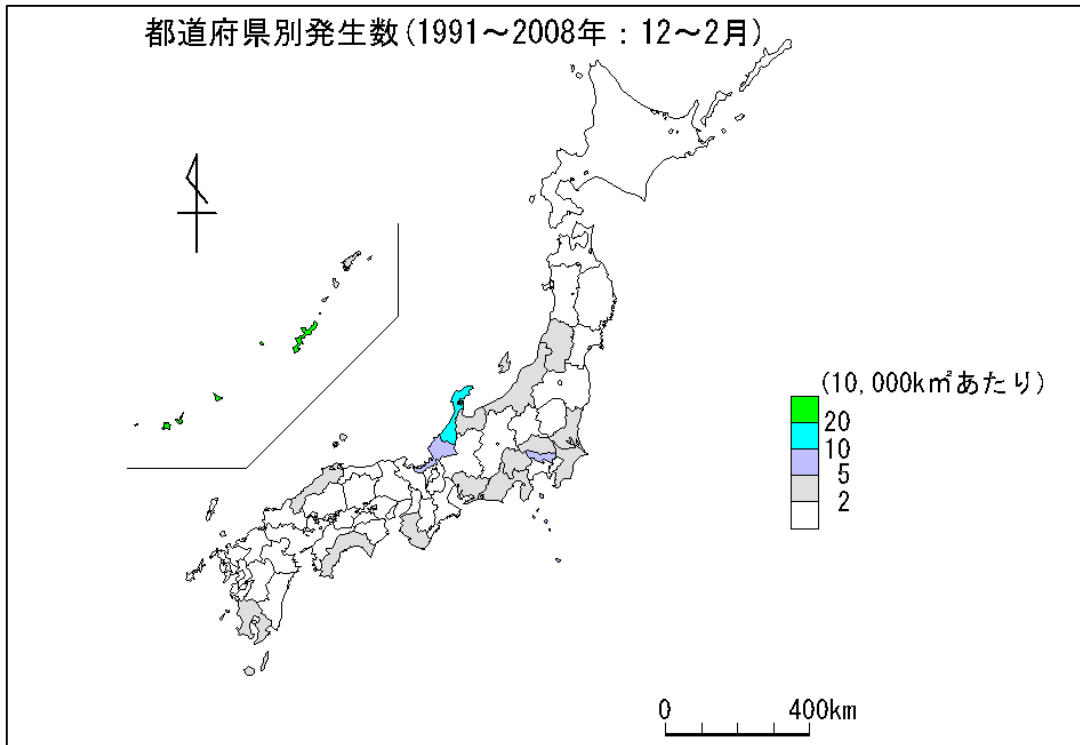
(a) 春 (3~5月)



(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数(1991～2008年合計、10,000km²あたり)

(5) 時刻による発生数の違い

1991年～2008年7月までに確認した突風636件のうち、発生時刻が判明している605件について、発生した時刻別の件数を図1-5に示す。

突風は夜間よりも昼間に多く発生しており、14時から16時の間に発生のパークが見られる。

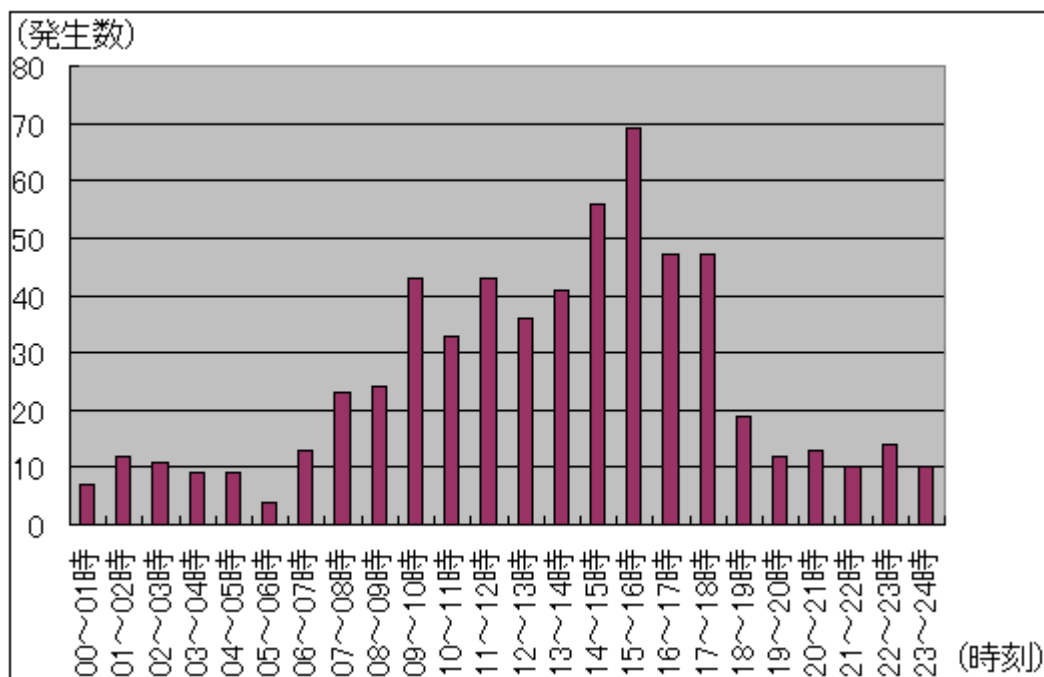


図1-5 突風の発生時刻別件数（1991年～2008年7月までに確認したもの）

(6) 突風が発生したときの気象要因

台風や前線など、どのような気象要因のもとで多く発生しているかを見た。

1991年～2008年7月までに確認した突風636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での発生が多く全体の約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。

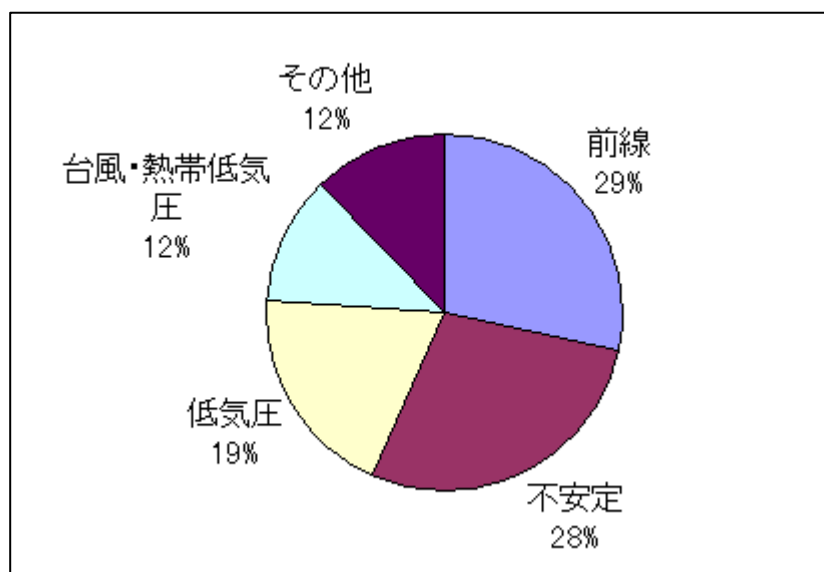


図1-6 突風発生時の気象要因（1991～2008年7月）

(7) 発生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、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ため、藤田スケール (Fスケール) が考案された。藤田スケールは、シカゴ大学の藤田哲也博士により1971年に考案されたものである。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F 4以上の竜巻は観測されていない (【付録1】参照)。

1991年～2008年7月までに確認した突風636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368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169件、F0は176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。

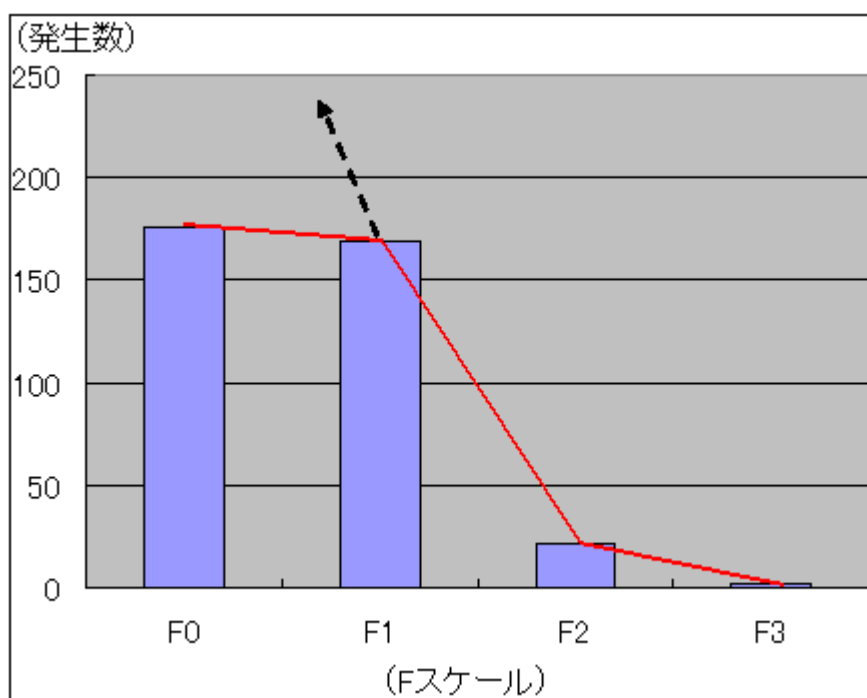


図1-7 藤田スケール別の突風件数 (1991～2008年7月)

(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、又は藤田スケール F3 の突風を表 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)	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 時頃	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/ロスを考慮した突風短時間予測のランク A と B の利用

突風短時間予測では2種類の予測（ランク）を表示するが、「ランク A は適中率が高いが捕捉率は低い」、「ランク B は適中率が低い捕捉率が高い」という特性の違いがある。この2種類の予測については、どちらの精度が高いと一概にはいえず、利用場面に応じてランク A が適している場合、あるいはランク B 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、ランク A(B) の適中率をランク A(B) 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、ランク A とランク B を効果的に使い分けるための参考にしていただきたい。

(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）。

ランク A と B 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
- ◇ ランク A の適中率(P)は0.04
- ◇ ランク A の捕捉率(H)は0.3
- ◇ ランク B の適中率(P)は0.02
- ◇ ランク B の捕捉率(H)は0.9

このとき、突風短時間予測のランク A と B のどちらの予測を利用するのが効果的かを見るために、ランク A と B について、E と C の関係を示したのが図 2-1 である。

ランク A では対策費が400円以下、ランク B では対策費が200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ということに対応する。

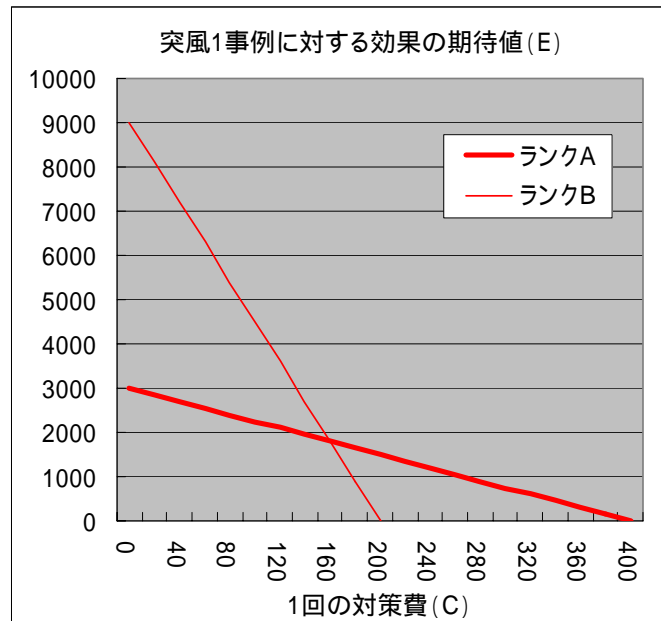


図 2-1 対策による被害軽減額が 10000 円の場合、ランク A とランク B の利用効果（期待値）を、対策費（C）の違いに応じて見たグラフ。それぞれのグラフには、各ランクの適中率・捕捉率が加味されている。

ランク A とランク B 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ランク B 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 円の場合にはランク A 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理解す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る被害軽減額の増大の効果の方が大きいので、捕捉率の高いランク B 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）ランク A の利用が効果的である。

(2) 複数の対策がある想定される場合のランク A とランク B の効果的な使い分け

ここまでは、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、ランク A とランク B で対策費の異なる対策をとるという方法で、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、ランク A とランク B の適中率と捕捉率は図 2-1 と同じと仮定している。

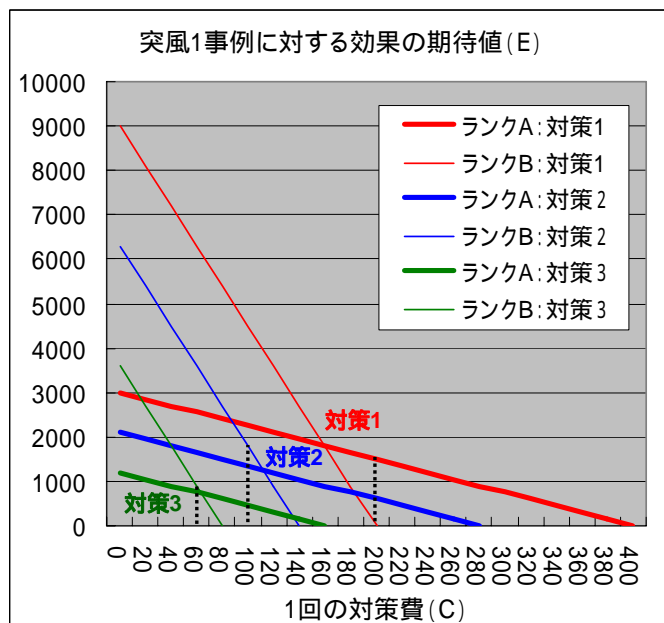


図 2-2 説明は図 2-1 と同じ。ただし、対策による被害軽減額は、対策 1 が 10000 円、対策 2 が 6000 円、対策 3 が 4000 円としている。縦の破線は今回想定した各対策の対策費を示している。

対策 1 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。

- ◇ 対策 1 しか存在しない場合、対策費 200 円ではランク B の期待値は 0 円、ランク A の期待値は 1500 円なので、ランク A の利用が効果的である。
- ◇ 対策 1 と対策 3 が存在する場合、ランク A 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。この他にランク B 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、ランク B の時には対策費の小さな対策 3 をとっておき、ランク A 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、ランク B 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ランク A 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。