
解 説

竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について — 突風に関する防災気象情報の改善 —

瀧下 洋一*

要 旨

平成 17 年～ 18 年にかけて、各地で竜巻などの激しい突風による甚大な被害が発生したことを受けて、気象庁は、平成 20 年 3 月から、竜巻注意情報の発表を開始した。竜巻注意情報は、竜巻などの激しい突風が発生する可能性が高くなった時点で、各地の気象台等が県などを対象に発表する。さらに、平成 22 年 5 月からは、現象の発生可能性を 10 分毎に分布図形式で提供する竜巻発生確度ナウキャストの発表を開始した。

竜巻などの激しい突風は、現象の規模が小さく、既存の観測網では現象を直接観測することは困難である。したがって、竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストでは、気象ドップラーレーダー観測による「メソサイクロン自動検出」やメソ数値予報モデル (MSM) による大気環境場の予測と気象レーダー観測データから計算する「突風危険指数」の 2 つの技術を組み合わせて総合的な判定を行い、観測された雨雲（積乱雲）が竜巻などの激しい突風を発生させるような状況になっているかどうかを解析する。

本稿では、突風に関する防災気象情報の改善、竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストの概要、予測技術、利用方法などについて紹介する。

1. はじめに

平成 17 年 12 月に山形県庄内町で発生した突風による羽越線列車脱線事故を契機として、気象庁は平成 22 年度をめどに、突風などの積乱雲に伴う激しい現象に関する気象情報として、ナウキャスト形式の情報提供を新たに開始する方針を決め、予測技術の開発を開始した。そうした中、平成 18 年 9 月には宮城県延岡市において竜巻が発生し、死傷者 146 名、住宅全壊 79 棟に及ぶ甚大な被害が発生した。さらに、同年 11 月には北海道佐呂間町において竜巻が発生し、工事現場の仮設建築物が吹き飛ばされるなどにより、死傷者 40 名、住宅全壊 7 棟に及ぶ甚大な被害が発生した。

このため、竜巻などの激しい突風に関する気象情報の改善が喫緊の課題となり、当時ドップラー化されていた東京・仙台・新潟・名古屋レーダーに加え、7 箇所の気象レーダー（釧路・函館・松江・室戸・福岡・種子島・沖縄）を新たにドップラー化し、開発中の技術を利用して、平成 19 年度内に突風に関する気象情報の発表を開始することとなった。これが、平成 20 年 3 月に発表を開始した竜巻注意情報である。竜巻注意情報は、竜巻などの激しい突風が発生する可能性が高まった時点で、各地の気象台等が県などを対象として随時に発表する文章形式の情報である。

さらに、平成 22 年 5 月には、当初の開発計画

* 予報部予報課

に沿った情報である竜巻発生確度ナウキャストの発表を開始した（同日、積乱雲に伴う激しい気象現象に関する気象情報として、雷ナウキャストの発表も開始した）。竜巻発生確度ナウキャストは、竜巻などの激しい突風の発生可能性の解析と1時間先までの予測を、分布図形式で10分ごとに提供する予報である。

2. 突風に関する防災気象情報の改善

突風に関する気象情報の改善については、竜巻注意情報の開始を含む各種気象情報の改善、及び竜巻発生確度ナウキャストの開始と2段階で実施した。

2.1 予測対象とする突風

突風に関する各種気象情報では、積乱雲に伴い発生する顕著な突風を対象としている。具体的には竜巻、ダウンバースト及びガストフロントによる突風であり、台風等で平均的に風が強い状況において時折瞬間的に風速が強まる、いわゆる「風の息」の意味の突風や、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。

なお、突風に関する防災気象情報では、積乱雲に伴う激しい突風を代表して情報の名称などに「竜巻」を使用している。これは、「激しい突風」をイメージしやすい言葉として「竜巻」を用いているが、ダウンバーストやガストフロントに対する注意も含まれている。

2.2 竜巻注意情報を含む気象情報の改善

（平成20年3月26日）

突風に関する防災気象情報について、次の改善を実施した。

（1）予告的に発表する気象情報の改善

低気圧の発達などに関して半日から1日程度前に発表する予告的な気象情報では、竜巻などの激しい突風が予測される場合に、「竜巻などの激しい突風のおそれ」といったキーワードを用いて注意を呼びかける。

（2）雷注意報の改善

雷注意報では、これまでも積乱雲に伴う「突風」

に対する注意を呼びかけていたが、竜巻などの激しい突風が予測される場合には、雷注意報の付加事項に「竜巻」を明示して特段の注意を呼びかける。

（3）竜巻注意情報の発表開始

「今まさに、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」と判断された時点で、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（おおむね一つの県）を対象に文章形式で発表する（第1図）。

また、竜巻などの激しい突風を発生させる積乱雲の寿命などを考慮して、竜巻注意情報では発表からおおむね1時間の有効時間を設けている。有効時間を超えて危険な気象状況が続く場合には、竜巻注意情報を再度発表する。

これらの情報を、時間経過及び現象の発生可能性の高まりに応じて段階的に発表することにより、竜巻などの激しい突風に対する注意を効果的に呼びかけることが可能となった。

2.3 竜巻発生確度ナウキャストの提供開始

（平成22年5月27日）

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を10km格子単位で解析し、1時間先まで10分単位の移動予測を行うものである。刻々と変化する状況に追隨できるよう、常時10分ごとに最新の情報を提供する（第2図）。

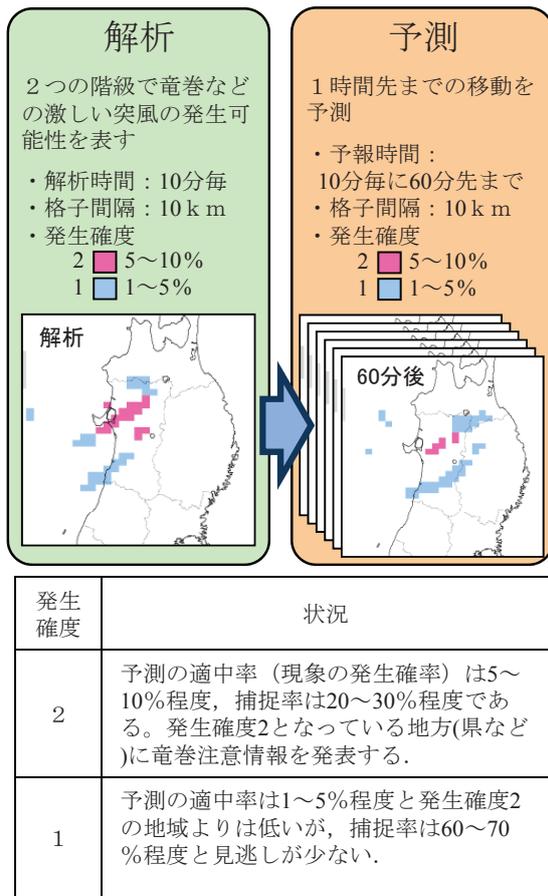
〇〇県竜巻注意情報 第1号
平成××年5月21日15時29分 △△地方気象台発表

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。

第1図 竜巻注意情報の文例



第2図 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が対象としている竜巻やダウンバーストなどの積乱雲に伴う激しい突風は、規模が小さく継続時間が短いため、現象の発生を直接観測したり、予測したりすることは困難である。このため、竜巻発生確度ナウキャストでは、気象ドップラーレーダー観測などの資料から「竜巻が今にも発生する（又は発生している）可能性の高さ」を推定し、発生確度1及び2の2つの階級で表す。

第2図の発生確度の説明において、「%」で示した数値は予報の適中率であるが、予報を発表したときの現象の発生確率に相当する（10km格子ごとの確率ではなく、発生確度1（2）となった範囲における値である）。発生確度1及び2には次のような特徴がある。

- ・発生確度2は、発生確度1に比べて適中率は高い（空振りは少ない）が、突風の捕捉率は低い（見逃しが多い）。
- ・発生確度1は、発生確度2に比べて突風の捕捉率は高い（見逃しは少ない）が、適中率は低い（空振りが多い）。

なお、竜巻発生確度ナウキャストの開始以降は、発生確度2となった県などに対して竜巻注意情報を発表しており、竜巻注意情報が発表された場合は、竜巻発生確度ナウキャストにより注意の必要な地域の詳細や刻々と変化する状況を把握するという利用方法を想定している。

3. 突風等短時間予測情報利活用検討会

竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストは、これまでの気象情報とは異なり、適中率や捕捉率が必ずしも高くない情報である。このような気象情報を有効に活用するための利用方法や留意点について、気象庁は、学識経験者、地方公共団体、報道機関など関係機関の有識者からなる「突風等短時間予測情報利活用検討会」を設置し、平成19年度から平成20年度の2年間にわたって検討を行い（合計6回開催）、以下のような結論を得た。

- ・竜巻などの激しい突風は、現象のスケールが小さく寿命も短いため、現状では高い精度で予測することは難しいものの、科学的に裏付けられた技術に基づき「竜巻注意情報」や「竜巻発生確度ナウキャスト」を発表して注意を呼びかけることには意義がある。
- ・まずは、一人でも二人でも人命が救えるよう、現段階で可能な技術によりこれらの気象情報の提供を始め、評価・改善を行いながら育てていく必要がある。
- ・竜巻などの現象、突風に関する気象情報の利用、予測の限界などについて理解を深めるための周知・広報活動が大切である。

突風等短時間予測情報利活用検討会では、最後に「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」を取りまとめ、気象庁ホームページで公開した。これは、事業者などの利用者や利用者への情報提供に協力を頂く報道機関・民間気象事業者などが、竜巻発生確度ナウキャストの提

供開始当初から速やかに利用できるよう、竜巻などの激しい突風に関する気象情報の特徴や精度、効果的な利用方法や利用にあたっての留意点などを示したものである。

(<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/toppuu/toppuuinfo-rikatsuyou.pdf>).

4. 突風をもたらす現象の理解と予測可能性

積乱雲に伴って突風をもたらす竜巻、ダウンバースト、ガストフロントについて、現状における現象の理解と予測可能性について示す。

4.1 竜巻

竜巻は、積雲や積乱雲などの対流性の雲によってつくられる鉛直軸をもつ激しい渦巻きで、しばしば漏斗状または柱状の雲を伴う。竜巻の主な発生メカニズムには次の2通りがあると考えられている。

①局地前線に伴って発生する地表付近の渦に、積乱雲に伴う強い上昇流が重なることにより渦管が引き伸ばされ、強い渦（竜巻）が発生する。

②スーパーセルと呼ばれる積乱雲に伴って竜巻が発生する。

スーパーセルは、水平風の鉛直シアが強い環境場で発達する単一上昇域をもつ強い積乱雲で、上昇域にメソサイクロン (10^{-2}s^{-1} 以上の鉛直渦度) を伴う。大きな被害をもたらす強い竜巻の多くは、スーパーセルによるものと考えられている。近年日本でも気象ドップラーレーダーによる解析を基にした竜巻の事例調査が進められ、顕著な竜巻の親雲となる積乱雲の多くがスーパーセルであったことが示されている。また、気象庁 (2007) による空港気象ドップラーレーダーを利用した総合的な調査では、1996～2006年にレーダーの探知範囲内で発生した26個の竜巻のうち、7割近くの竜巻で発生地点又は近傍の積乱雲の中にメソサイクロンに相当する渦が確認されている (第6.1節参照)。従来、日本では①の非スーパーセル型の竜巻が多いと考えられていたが、これらの調査の蓄積により、日本で発生する顕著な竜巻の多くがスーパーセルに関連して発生していることが分かってきた。

米国中西部のグレートプレーンでは、典型的なスーパーセルを親雲とした激しい竜巻が発生するが、McCaul (1987) はハリケーン周辺で発生する竜巻の親雲は、これに比べて水平・鉛直スケールが小さいスーパーセル (ミニスーパーセル) であることを示した。日本でも Suzuki *et al.* (2000) が、台風第9019号に伴い関東平野で発生した3個の竜巻について、気象ドップラーレーダー等を用いた詳細な解析を行い、このときの親雲が米国のハリケーンの場合と同様にミニスーパーセルであることを示した。ミニスーパーセルは、湿潤な大気中で下層に鉛直シアが集中しているような環境場で発生する。特に台風の進行方向を基準として右前方象限ではこのような環境場になりやすく、日本ではミニスーパーセルを親雲とした竜巻が比較的多い可能性があるとしている。

近年、可能になってきた高分解能な数値シミュレーションによる実験でも、竜巻の発生機構や構造の解明が進められている。新野・野田 (2005) は、米国の竜巻事例について水平解像度70mの数値モデルによるシミュレーションを行い、スーパーセル型の積乱雲中に現れるメソサイクロンに伴って竜巻が発生する過程を再現した。メソサイクロンと竜巻発生との関係については未解明な部分が多いが、新野・野田 (2005) は、スーパーセルに伴うガストフロント上に生成された渦が、メソサイクロンに伴う強い上昇流と重なって竜巻が発生したという計算結果を示した。

2006年に宮崎県延岡市や北海道佐呂間町で発生した竜巻についても、数値シミュレーションが行われている。坪木 (2007) は、延岡市の事例について水平解像度500mの数値モデルによるシミュレーションを行い、海上から延岡市に向かうレインバンド上に複数のスーパーセルとそれに伴うメソサイクロンを再現した。さらに、水平解像度を75mとした実験では、スーパーセルの詳細な構造と竜巻スケールの渦の再現にも成功し、竜巻周辺の風速分布には、竜巻自身の移動速度との関係で進行方向右側の風速が強くなる非対称性があることなどを示した。益子 (2007) も延岡市の事例について、水平解像度を250m及び50mとした実験でメソサイクロンと竜巻を再現し同様の結

果を得た。また、加藤・新野（2007）は、水平解像度 250m の数値モデルによるシミュレーションの結果から、佐呂間町に竜巻をもたらした積乱雲もスーパーセルであったと推測した。これらの数値シミュレーションの結果は、2007 年 1 月に気象庁で開催された竜巻シンポジウム（水野ほか、2007）でも紹介された。

現状では、計算機能力の制限などから現業運用の数値予報モデルで竜巻やスーパーセルを直接予測するのは不可能だが、その発生環境はある程度予測可能である。吉野ほか（2002）は、台風第 9918 号に伴い愛知県豊橋市で発生した竜巻事例について、水平解像度 9 km の数値予報モデルを用いて竜巻と関連のある指数（第 5.3 節で説明する EHI など）を計算した。この結果、第 3 図のとおりに EHI の分布は竜巻の発生場所と対応が良く、現業モデル程度の解像度でも、竜巻の発生環境が予測できる可能性があることを示唆する結果を得た。

このように、大きな被害をもたらす竜巻の親雲の多くはスーパーセルであり、スーパーセルの発生環境は予測できる可能性がある。本稿で紹介する竜巻の予測技術であるメソサイクロン、竜巻型

の突風危険指数、及び突風関連指数の多くは、スーパーセル型の竜巻を前提としている。

4.2 ダウンバースト

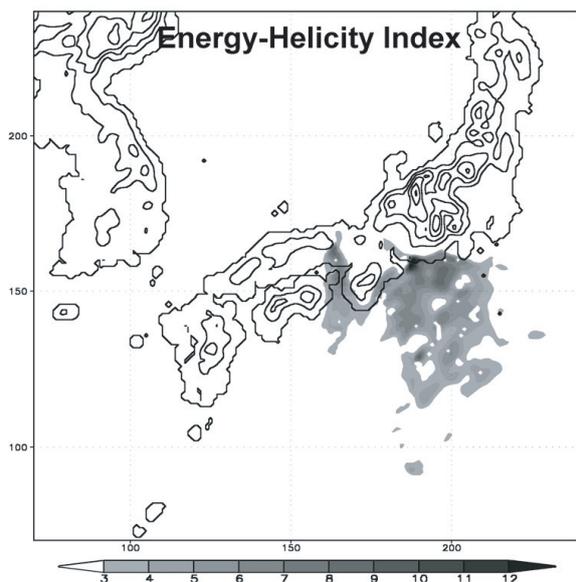
ダウンバーストは、積雲や積乱雲から生じる冷やされて重くなった強い下降気流のことで、地面に到達後激しく発散し、突風となって周囲に吹き出す。ダウンバーストが発生する環境としては、第 4 図のような 2 種類があると考えられている（Caracena *et al.*, 1990）。

①大気下層が乾燥し中層が湿潤な場合（乾いたダウンバースト）

②大気下層が湿潤でその上が乾燥している場合（湿ったダウンバースト）

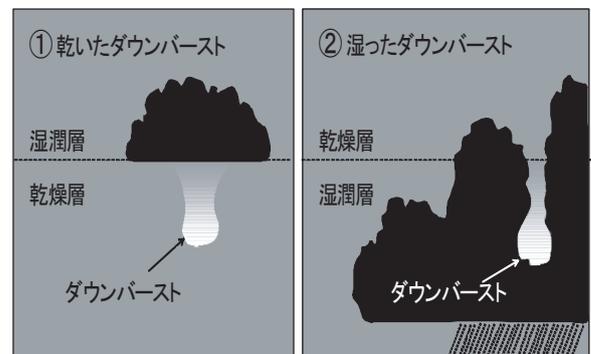
大野ほか（1996）は 1981～1994 年の 13 年間に日本全国で発生したダウンバーストについて調べた結果、すべてが湿ったダウンバーストであること、北海道から沖縄まで広く発生していること、月別の発生頻度は 6 月から 9 月に多く中でも 7 月に集中していること、発生時間帯は 11 時から 21 時までが多く 15 時と 18 時に発生頻度の極大があること、などの特徴があることを示した。

ダウンバーストは、顕著な竜巻を発生させるス



第 3 図 EHI の分布図

解像度 9km の数値予報モデルから計算した EHI の分布。豊橋市で竜巻が発生した時刻に相当する予測（吉野ほか, 2002）。



第 4 図 ダウンバーストの発生に適した気象条件

①乾いたダウンバースト、②湿ったダウンバースト（Caracena *et al.*, 1999）。

ーパーセルに伴って発生することがある。例えば、森・高谷 (2004) は、1996～2001 年にかけて関東地方で降ひょうや突風による被害が発生した 3 事例を解析し、これらの事例では、スーパーセルの中でダウンバーストが発生したことを示した。

このように、スーパーセルに着目することは、竜巻のみならずダウンバーストの予測にもつながるといえる。一方、スーパーセルに伴わないダウンバーストも相当数あると思われる。竜巻発生確度ナウキャストでは、ダウンバーストを対象とした突風危険指数も導入することで、予測精度が向上するようにしている (第 6.2.2 節)。

4.3 ガストフロント

ガストフロントは、積雲または積乱雲からの冷氣外出流の先端と周囲の空気との境界で、突風を伴うことから突風前線と呼ばれる。水平の広がりには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。

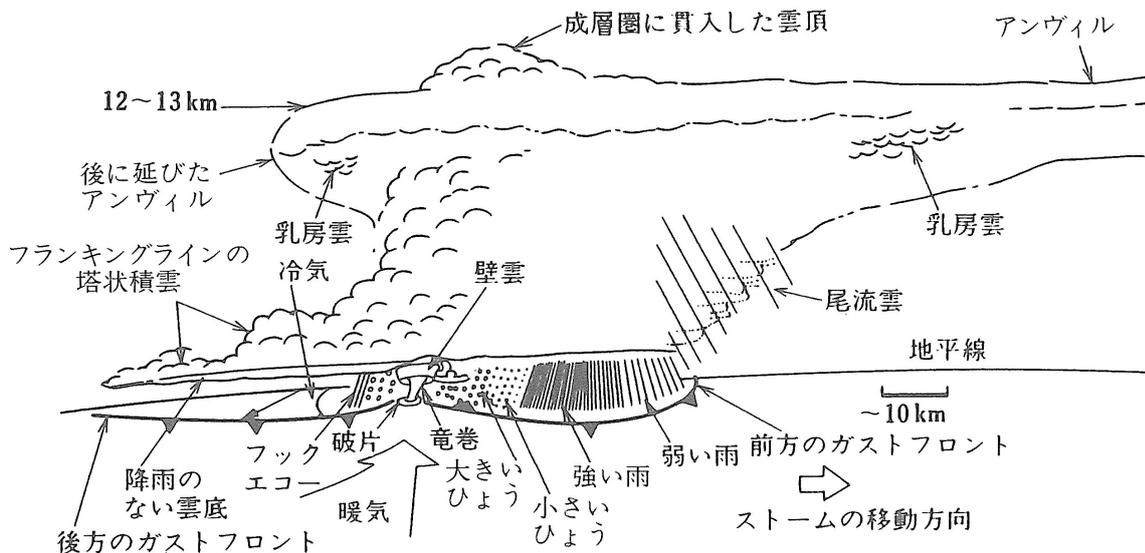
スーパーセルに伴う竜巻及びガストフロントの模式図を第 5 図に示す (小倉 1997)。この図では、

ダウンバーストは表現されていないが、スーパーセルに伴い竜巻とダウンバーストが共存して発生する場合があることも知られている。

5. 数値予報資料を利用した突風に関連する各種指数 (突風関連指数)

顕著な竜巻の発生と関係の深いスーパーセルは、通常の積乱雲に比べて寿命が長く、内部に直径数 km から十数 km のメソサイクロンを持つのが特徴である。スーパーセルの寿命が長いのは、上昇流で作られた雨粒やあられ・ひょうなどの降水粒子が、風が高度とともに変化しているため、上昇流域と異なるところから落下して上昇流を弱めないためと考えられている。したがって、スーパーセルが発達しやすい環境場として、大気の状態が不安定であること、鉛直シアーが大きいことが重要であり、米国では、これらを監視する指標として様々な指数が利用されている (National Weather Service Storm Prediction Center HP 参照: <http://www.spc.noaa.gov/sfcstest/help/begin.html>)。

突風に関する予報作業では、竜巻やダウンバースト



第 5 図 目視によるスーパーセル雷雨の概観図 (小倉 (1997) から引用: H.Bluestein の未印刷の論文による) 竜巻を伴いつつ北東方向に進行中のスーパーセル型ストームを南東の方向から目視した概観図。

ストなどの突風をもたらすスーパーセルのような積乱雲が発生しやすい環境場を検討するための資料として、第1表に示した11種類の突風に関連した各種指数（以後、「突風関連指数」と呼ぶ）を数値予報資料から計算している。これらの資料を利用して、竜巻やダウンバーストなどの激しい突風が発生する可能性があるかと予測される場合には、事前に発表する予告的な気象情報の中で竜巻などの激しい突風に対する注意を呼びかけている。

第1表 数値予報を用いた突風関連指数

変数名	説明	単位
EL	地上から高度500mまでを平均した気塊を持ち上げた場合の中立浮力高度。	hPa
CAPE	地上から高度500mまでを平均した気塊を持ち上げた場合のCAPE (Convective Available Potential Energy)。	J/kg
SReH	地上から高度3000mまでのSReH(Storm Relative Helicity)。ストームの移動速度は、Bunkers(2000)による。	m^2/s^2
EHI	Energy Helicity Index = CAPE × SReH / 160,000	—
VGP	Vorticity Generation Parameter = Msh × MLCAPE ^{1/2} Msh : 地上から高度4kmまでのシア平均 MLCAPE : 地上から高度1000mまでを平均した気塊のCAPE	—
DCAPE	相当温位が最小の高度の気塊が、地上へ下降するまでに得るエネルギー。	J/kg
SSI	Showalter's stability index	K
SWEAT	Severe Weather Threat Index	—
EPTdif	上層の相当温位最小値と下層の相当温位最大値の差	K
TVP	Tornado Velocity Parameter : 竜巻が発生した時の想定される竜巻渦の最大接線風速 (Nakazato et al.(2009))	m/s
VORsfc	地上の鉛直渦度	$10^{-6}/s$

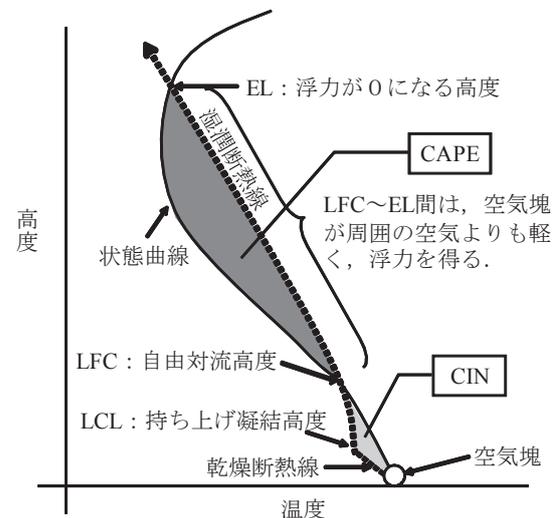
本稿では、これらの突風関連指数のうち、主な指数としてCAPE, SReH, EHIについて解説する。なお、第1表の指数の計算には、気象研究所から提供を受けたCAPE7m (Ver.7.95 : 気象衛星・観測システム研究部 鈴木 修, 台風研究部 楠 研一, 予報研究部 瀬古 弘 作成) を利用している。

5.1 CAPE

積乱雲を発生させる上昇流の強さの目安の1つにCAPE (Convective Available Potential Energy : 対流有効位置エネルギー) がある。

(1) CAPE の計算方法

ある高度の空気塊を上空に断熱的に持ち上げると、空気塊の温度は乾燥断熱減率線に沿って下降し飽和に達する。この高度をLCL (Lifting Condensation Level : 持ち上げ凝結高度) といい、おおむね雲底に相当する (第6図)。LCLよりも空気塊を更に持ち上げると、空気塊内の水蒸気は凝結を始めるため、乾燥断熱減率より温度減率が小さい湿潤断熱線に沿って気温が下降していく。やがて、持ち上げた空気塊の温度が周囲の



第6図 対流の発達に関する諸高度とCAPE

大気の温度と等しくなる高度 LFC (Level of Free Convection : 自由対流高度) を越えると空気塊の温度は周囲の温度よりも高くなり, 空気塊を強制的に持ち上げる力がなくても浮力のために空気塊は上昇を続けることが可能となる¹. このとき, 空気塊は周囲の大気より上向きの運動エネルギーを得ることになり, このエネルギーを LFC から EL (Equilibrium Level : 浮力のなくなる高度)² まで積算したもの (第 6 図の濃灰色の面積) が CAPE である (Moncrieff and miller, 1976). なお, LFC より低い高度では, 空気塊は下向きのエネルギーを得るので, 第 6 図の薄灰色の面積が大きいほど大気は安定で対流は起こりにくい. 薄灰色の面積の表すエネルギーを CIN (Convective Inhibition : 対流抑制) と呼んでいる.

CAPE の計算式

$$CAPE = \int_{LFC}^{EL} g \frac{T_v'(z) - T_v(z)}{T_v(z)} dz \quad (\text{単位 : J/kg})$$

T_v : 周囲 (状態曲線) の仮温度

T_v' : 空気塊が湿潤断熱線に沿って上昇した場合の仮温度

LFC における空気塊の上昇速度を 0m/s とすると, EL (雲頂付近) における最大上昇速度 w_{max} は, $w_{max} = \sqrt{2 \times CAPE}$ となる. 実際に観測される EL 付近の最大上昇速度は, w_{max} の半分以下である (Jorgensen *et al.*, 1985).

CAPE は, 大気の鉛直安定度を定量的に示す指標のひとつであり, 値が大きいほど大気の状態は不安定と考えられる. CAPE は下層に暖かく湿った空気が流入する台風の接近時や低気圧の暖域で大きな値となる.

ただし, 実際に対流が生じるためには, ア) 地面加熱による対流, イ) 地形による上昇気流, ウ) 大気下層での水平収束, エ) 前線による持ち上げなどのメカニズムにより, 地上付近の空気塊が

LFC まで持ち上げられる必要がある.

一方, 地表付近の空気塊を持ち上げても状態曲線と交わらない (LFC が存在しない) 場合がある. この場合は, 図から明らかなように CAPE は 0 となり, 自ら上昇することはできない安定した状態であることがわかる.

本稿で示す突風関連指数で利用している CAPE の計算は, 数値予報資料を利用して地上から高度 500m までを平均した空気塊を仮定し, 浮力の計算には水蒸気量も考慮した仮温度を用いて求めたものである³.

(2) CAPE の季節・地域的な特徴

CAPE の季節・地域的な特徴を見るため, 2004 年 4 月～2007 年 3 月の 3 年間の数値予報 (MSM) 資料から毎時の CAPE (50km 領域平均) を計算し, 日最大値を求めて月ごとに上位 25% を平均した分布図を作成した (第 7 図). 2 月は, 南西諸島や伊豆諸島で 500J/kg を超えているほかは, 小さな値となっている. CAPE が最も大きな値となる 8 月は, 南西諸島から九州南部や西部, 本州の南海上でも 2000J/kg を超える大きな値となっていることがわかる. 値は北へ行くほど小さくなり, 北海道東部では 8 月でも 500J/kg を下回る値となっている.

各月の値の変化を地点ごとに見たものが第 8 図である. 10 月～4 月にかけては, 那覇を除いて各地点とも小さな値となっており, 月別の明確な違いは見られない. 一方, 5 月～9 月は, 太平洋高気圧に覆われる 8 月を中心に値が大きくなっていることがわかる.

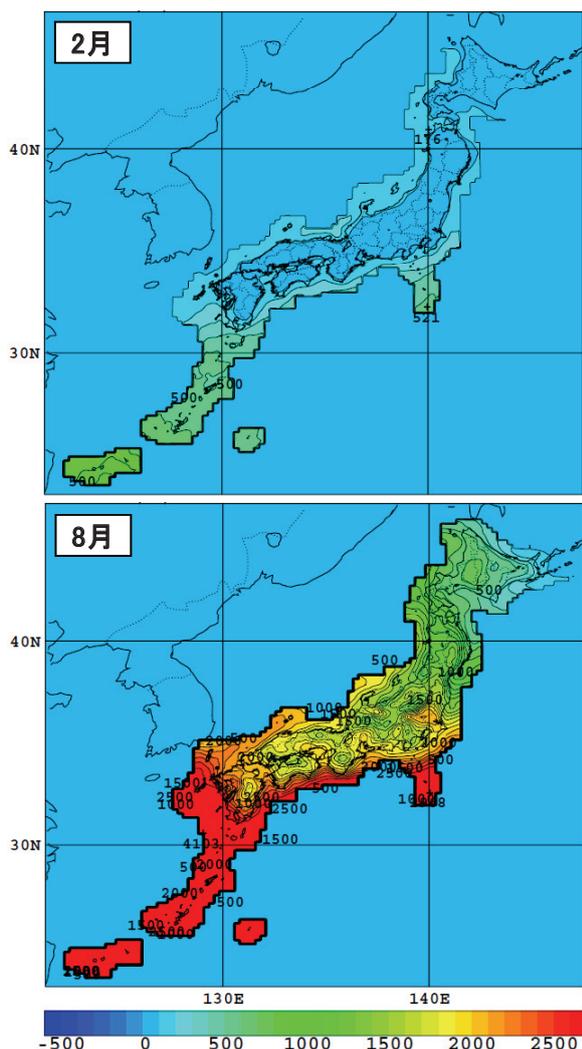
5.2 SReH

スーパーセルの形成には, 前述のとおり環境場の風が高度とともに大きく変化する鉛直シアが重要である. さらに, メソサイクロンの鉛直渦度 (鉛直軸まわりの回転) の起源は, 環境の風の鉛

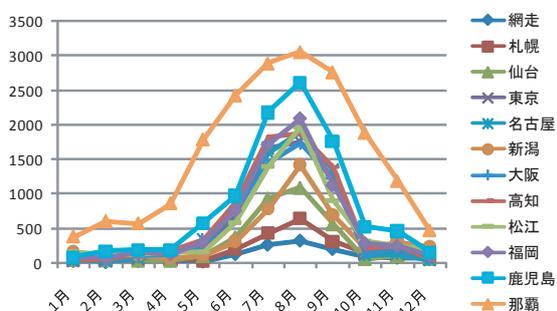
¹ 気温を用いて近似的に CAPE を計算しているものもあるが, 大気密度は水蒸気量にも依存するため, 浮力の正確な計算には仮温度を用いる.

² 浮力のなくなる高度を LNB(level of neutral buoyancy) と表現している文献もある.

³ CAPE の計算では, 持ち上げる空気塊の高度は任意であり, 地上付近に限らない.



第7図 CAPE 月別上位 25% 平均図
2004年4月～2007年3月の3年間の数値予報資料 (MSM) を利用して CAPE (50km 領域平均値) の日最大値を計算し、月毎に上位 25% を平均した分布図。



第8図 月別地点別 CAPE 上位 25% 平均値
統計期間や計算方法は、第7図に同じ。分布図の値を地点別にグラフにしたもの。

直シアーによる水平渦度 (水平軸まわりの回転) であり、この水平渦度が、積乱雲の中の上昇流で立ち上がり鉛直渦度になると考えられている。この観点から積乱雲が発生した場合、積乱雲がメソサイクロンを持つスーパーセルへと組織化するかどうかを診断する指標に SReH (Storm Relative Helicity : ストームに相対的なヘリシティ) がある。

(1) SReH の計算方法

水平風に鉛直シアーがあれば、水平渦度が存在する。回転のベクトル (水平渦度) ω_h (h は水平の意味) は、回転の大きさ $|V_2 - V_1| / dz$, 回転の方向は右ねじを回したときに右ねじが進む方向と定義される (第9図)。

積乱雲の移動ベクトルを C とし、大気下層の風を V とすると、 $(V - C)$ は、移動する積乱雲に吹き込む風を表す。積乱雲に吹き込む風が運ぶ水平渦度 ω_h は、 $(V - C)$ と ω_h の内積 $(V - C) \cdot \omega_h$ であらわすことができる (Davies-Jones *et al.*, 1990)。

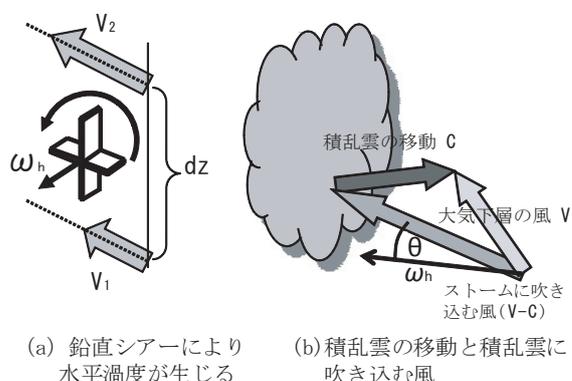
SReH の計算式

$$SReH = \int_{地上}^{高度3km} (V - C) \cdot \omega_h dz \quad (\text{単位: } m^2/s^2)$$

$$\omega_h = \left(-\frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} \right) : \text{鉛直シアーによる水平渦度}$$

$V = (u, v)$: 水平風ベクトル

C : 積乱雲の水平移動ベクトル



(a) 鉛直シアーにより水平渦度が生じる (b) 積乱雲の移動と積乱雲に吹き込む風

第9図 SReH の計算方法

積乱雲の移動速度 C の推定には様々な方法があるが、地上から高度10km程度までの風速を平均し、風速を70～85%の大きさとして、風向を右方向へ5～20度回転させたものなどを利用することが多い。これは、発達した積乱雲は一般風より右側へずれて移動することを考慮したものである。本稿では、積分範囲は地上から高度3kmまでとし、積乱雲の移動速度の推定に下層風と中層風のシアの大きさに応じて積乱雲の移動方向を一般風から右側へずらしたものをを用いて計算している (Bunkers *et al.*,2000)。

(2) SReHの季節・地域的な特徴

SReHの季節・地域的な特徴を見るため、前述のCAPEと同様に3年間の数値予報資料から毎時の値を計算し、日最大値を求めて月ごとに上位25%を平均した分布図を作成した(第10図)。SReHはCAPEとは逆に2月に大きく、8月に小さいという季節差があるが、CAPEに比べ地域差は小さいといえる。

各月の値の変化を地点ごとに見たものが第11図である。地点により多少のばらつきはあるが、太平洋高気圧に広く覆われ鉛直シアが小さくなる夏に値が小さくなる特徴がある。また、秋に比べ春の方が値はやや大きい。

5.3 EHI

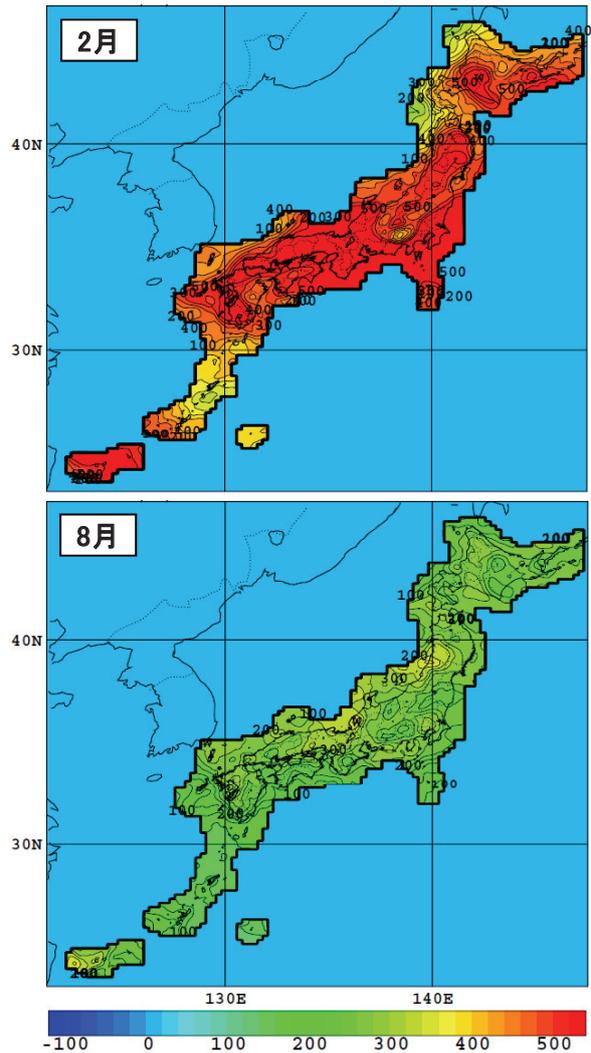
スーパーセルが発生する環境場として、積乱雲が発達するための成層不安定に加えて風の鉛直シアが必要である。これらを複合的に考慮した指数としてEHI (Energy Helicity Index) がある。

(1) EHIの計算方法

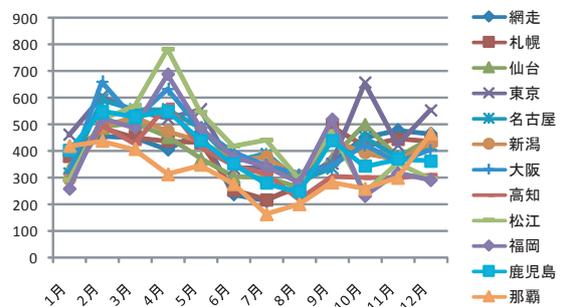
EHIは、次式のようにCAPEとSReHを用いて計算し、スーパーセルや竜巻の発生しやすさを経験的に指標化したもので、米国では、CAPE単独あるいはSReH単独に比べると、竜巻発生との相関関係が高いとされている。

EHIの計算式

$$EHI = \frac{CAPE \times SReH}{160,000}$$



第10図 SReH月別上位25%平均図
統計期間など計算値の取り扱い、第7図CAPEに同じ。



第11図 月別地点別SReH上位25%平均値
統計期間や計算方法は、第10図に同じ。分布図の値を地点別にグラフにしたもの。

(2) EHI の季節・地域的な特徴

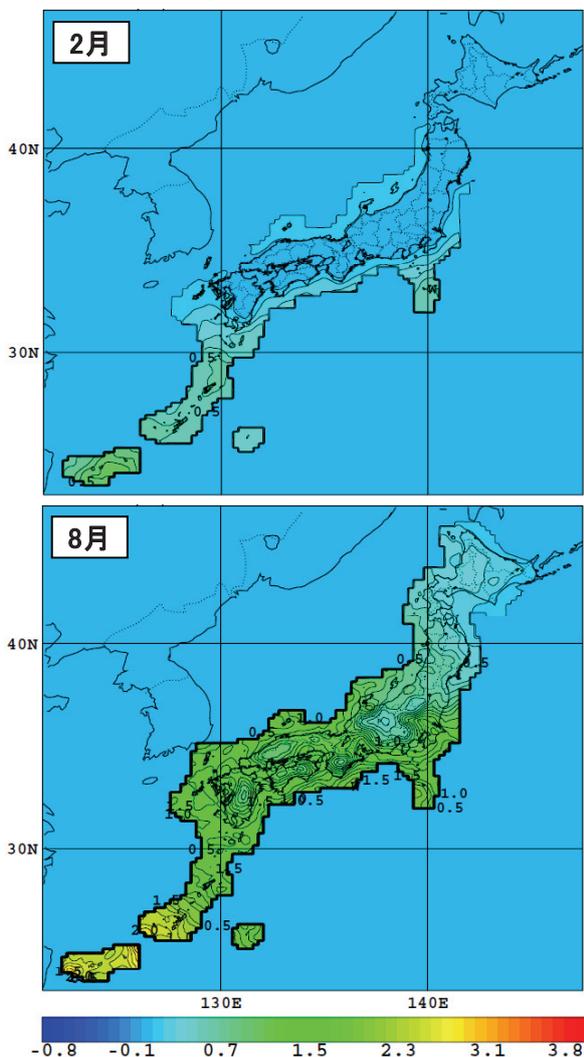
EHI の季節・地域的な特徴を見るため、前述の CAPE や SReH と同様に 3 年間の数値予報資料から毎時の値を計算し、日最大値を求めて月ごとに上位 25% を平均した分布図 (第 12 図) を作成した。これを見ると、2 月は、南西諸島で 0.5 程度である他は、どの地域も 0.5 未満の小さな値となっている。一方、8 月は、南西諸島では 2 を超えるなど高い値となっているが、北日本では 0.5 以下となっており地域差がやや大きい。各月の値の変化を地点ごとに見たものが第 13 図である。季節的な特徴として、各地点とも 7 月～9 月を中心に値が大きく、10 月～4 月は値が小さくなって

いる。また、地域的には、沖縄から西日本、東日本、北日本へと北へ行くほど値が小さくなる傾向がある。これらの特徴は、CAPE の季節的、地域的な特徴を反映している (第 8 図)。

5.4 竜巻発生時の CAPE, SReH, EHI の関係

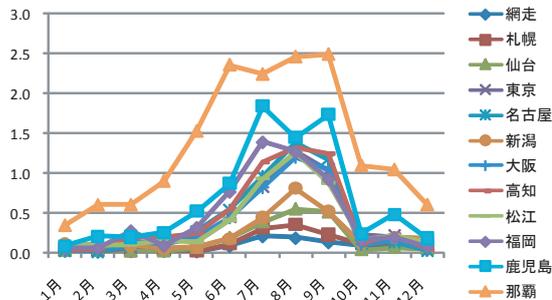
気象庁「竜巻等突風データベース (気象庁 HP 掲載)」から、2004 年 4 月～2007 年 3 月の 3 年間に発生した「竜巻」及び「ダウンバースト」について、数値予報資料から計算した CAPE, SReH, EHI との関係を図化したものが第 14 図である。

3 年間に発生した竜巻のうち、藤田スケール (以

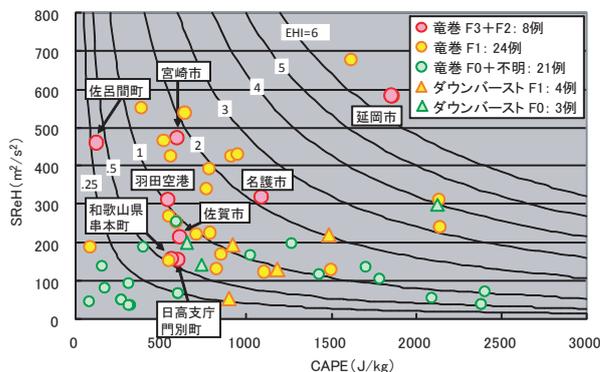


第 12 図 EHI 月別上位 25% 平均図

統計期間など計算値の取り扱いは、第 7 図 CAPE に同じ。



第 13 図 月別地点別 EHI 上位 25% 平均値分布図の値を地点別にグラフにしたもの。



第 14 図 竜巻及びダウンバースト事例における CAPE, SReH, EHI

発生時刻前後 1 時間内で発生地点を中心とする 50km 四方内の EHI 最大値と、その時の CAPE 及び SReH, F2 以上の事例には地名を付した。

下、Fスケール又は単にFと記述する)が1以上であった32個の竜巻のほとんどがEHI=0.5程度より大きな値の領域で発生している。しかし、最も強度が強かった佐呂間町におけるF3の竜巻は、EHIが比較的小さな(CAPE値が小さくSReHが比較的大きな)領域で発生しているなど、F1の竜巻とF2~F3の竜巻の分布には特段の違いは見られない。また、F0及びFスケールが不明な竜巻のほとんどでSReHが200以下の領域で発生しているものの、SReHが200以下の領域でもF1~2の竜巻も少なからず発生しており、CAPEやSReHの値のみから竜巻の強度を判断するのは困難であることがわかる。

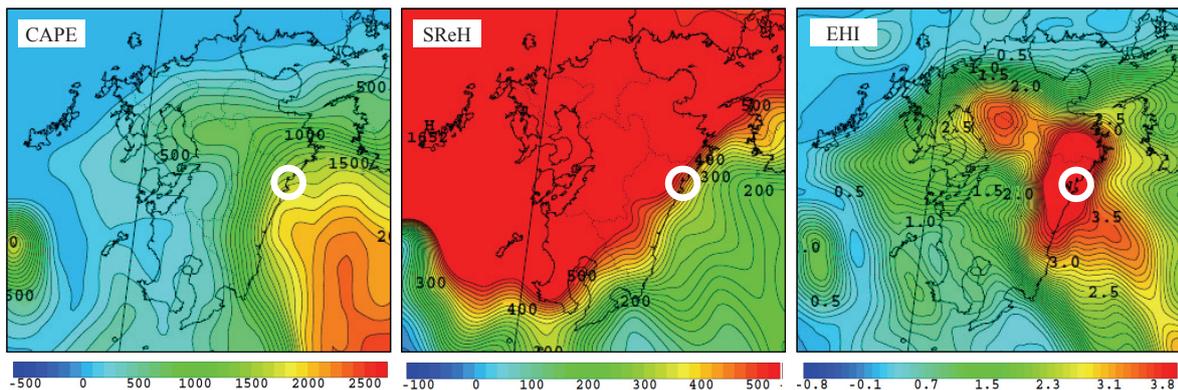
なお、EHIは高い値の発現頻度の地域差が大きく、例えば、EHIが0.5以上の頻度は、九州南部を1とすると関東甲信は1/3以下、北海道では1/40程度となっている(図表略)。しかし、実際の竜巻発生頻度は、そこまでの大きな違いはなく、突風の有無を判断するためのしきい値は地域により異なると思われる。これは、竜巻にはEHIだけでは表現できない発生要因があり、竜巻の発生しやすい季節や総観場の地域による違いや、地形などの地域性も関係しているためと考えられる。

5.5 竜巻発生時のCAPE, SReH, EHIの分布の特徴

過去の竜巻事例と第1表に示した11種類の突風関連指数の分布を比べたところ、竜巻の発生ポテンシャルを比較的良好に表している指数は、EHIであった。CAPE及びSReHは、竜巻の可能性の高い地域で高い値を取るが、それぞれ単独の分布では、広範囲に広がり地域の特定は難しい。一方、これらを掛け合わせたEHIは、両者が重なった部分のみが大きくなり、竜巻の可能性の高い地域をある程度絞り込むことができる。

2006年9月17日に宮崎県で発生した竜巻(F2)の事例を第15図に示す。南東海上から伸びる高いCAPE域は台風第13号のアウトバンドに対応している。一方、台風の北側から東側にあたる九州から対馬海峡にかけて広くSReHが高くなっているが、EHIの高い領域は、宮崎県から大分県を中心とした地域に限定されている。台風の北上に伴い高い値のEHI域も北上しており、追跡が可能な事例であった。なお、本事例は、2001年以降の竜巻事例の中でも特に高いEHI値となった事例である。

また、2006年11月7日に北海道佐呂間町で発



第15図 宮崎県延岡市で発生した竜巻(F2)の事例

2006年9月17日14時03分に発生。9月17日12時初期値、14時(2時間後)を予想した数値予報資料(MSM)を用いて計算したCAPE(左)、SReH(中)、EHI(右)。丸印は、竜巻被害の発生場所。

生した竜巻は、調査期間中の3年間で最も強いF3であった(第16図)。佐呂間町の南東側にあるSReHの極大域が数時間前から追跡できたのが特徴であり、EHIはやや高い程度であった。

5.6 ダウンバースト発生時のCAPE, SReH, EHI

前節では、竜巻発生時のCAPE, SReH, EHIの関係について見たが、第14図をダウンバーストに着目して見てみると、わずか7例ではあるが、1例を除き、EHIが0.5以上となっており、これらのダウンバーストがスーパーセルに関連して発生した可能性があることを示している。竜巻の場合と異なり図の左上象限(CAPEは小さいがSReHが大きくEHIが0.5以上となる)の事例がないのは、ダウンバーストが発生する場合は降ひょうを伴うような発達した積乱雲であり、ある程度大きなCAPEが必要なためと思われる。

5.7 CAPE, SReH, EHIの監視上の注意点と着眼点

CAPE, SReH, EHIを監視する場合は、次のことに注意する必要がある。

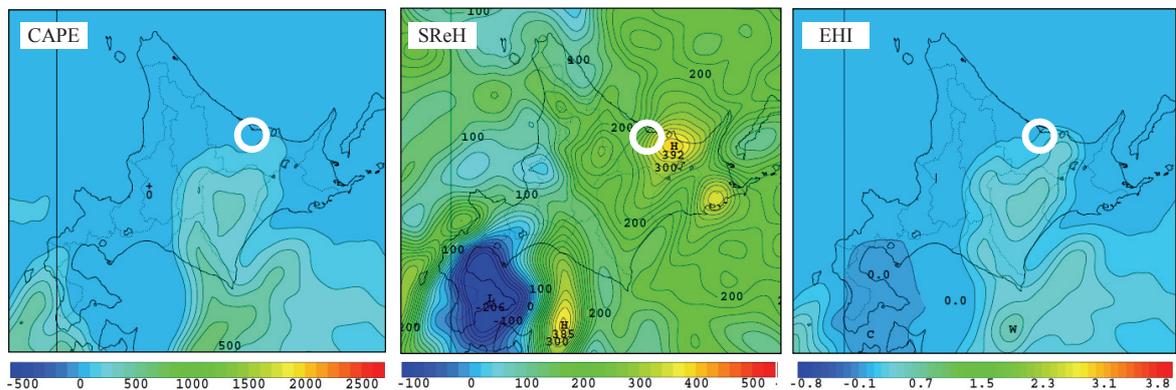
- ・数値予報モデルで降水を計算している場所では、対流不安定が解消されてCAPEなどの大気の安定度を示す指標がより安定な値となる場合があり、CAPEやEHIが小さく計算さ

れる場合がある。

- ・数値予報モデルでは、実際には存在しない小じょう乱が表現されることがあり、その場合はSReHやEHIが過大に計算される場合がある。

また、各指数を監視する際の着眼点は以下のとおりである。

- ・過去事例を見ると、竜巻は台風の進行方向を基準に右前方の象限、発達する低気圧の寒冷前線近傍や暖域、上空寒気などで発生することが多い。このため、予告的な気象情報において事前に竜巻の有無を検討する場合には、このような総観的パターンからみて竜巻が発生しやすい領域に着目して各指数の値を検討する。
- ・実況監視では、着目している領域の指数値が大きく(ポテンシャルが高く)、その領域に実際に積乱雲が発生したり、移動してくる場合に突風発生の可能性が高まると考える。
- ・竜巻については、EHIを中心に監視を行うことが有効であるが、EHIが大きな値になりにくい寒候期には、VGPの監視も有効な場合がある。
- ・スーパーセルは、ダウンバーストなど竜巻以外の突風も発生させることがあるので、竜巻以外の突風に対してもEHIの監視は有効と考えられる。



第16図 網走支庁佐呂間町で発生した竜巻(F3)の事例

2006年11月7日13時23分に発生。11月7日09時初期値、13時(4時間後)を予想した数値予報資料(MSM)を用いて計算したCAPE(左)、SReH(中)、EHI(右)。丸印は、竜巻被害の発生箇所。

6. 竜巻発生確度ナウキャストの予測技術

竜巻発生確度ナウキャストでは、レーダーで観測された雨雲が竜巻などの激しい突風を発生させる状態になっているかを解析する。この解析には、気象ドップラーレーダー観測による「メソサイクロンの自動検出」及び、突風関連指数と気象レーダー観測を基に計算する「突風危険指数」の2つの技術を組み合わせた「総合判定」を利用する(第17図)。

本節では、これらの技術の概要を解説するとともに、竜巻発生確度ナウキャストの発生確度1・2の解析手法、1時間先までの予測手法や精度、竜巻注意情報との関係について解説する。

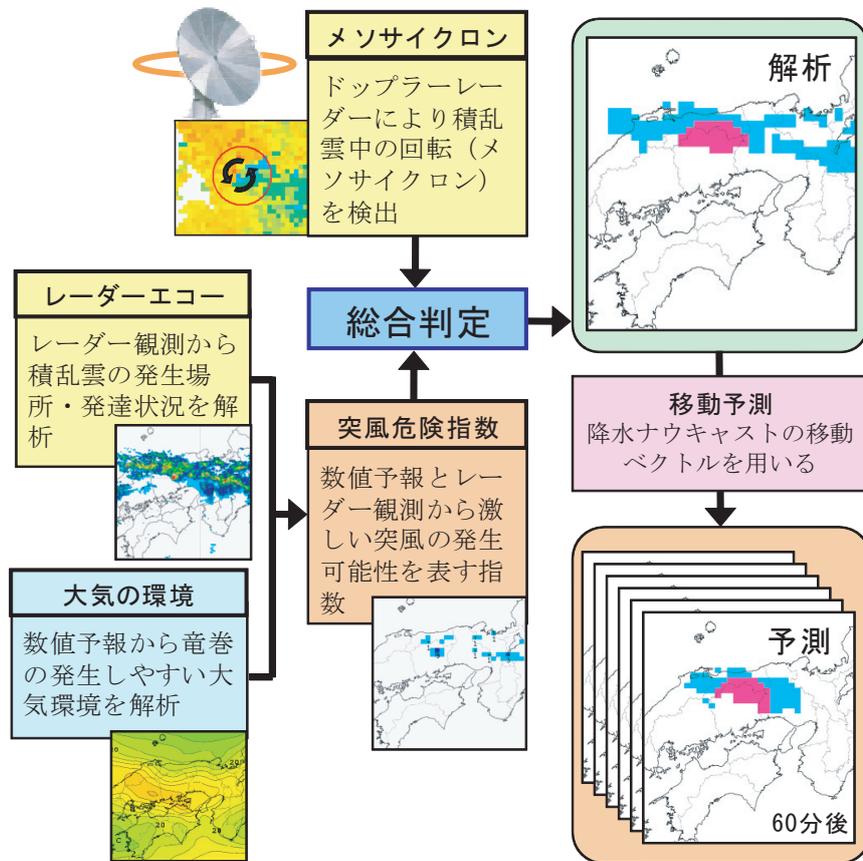
6.1 メソサイクロンの自動検出

(1) 気象ドップラーレーダーによるメソサイクロンの検出

気象レーダーは、電波を細くビーム状にして送

信し、雲の中の降水粒子(雨、雪、あられ、ひょう)に反射されて戻ってきた電波を受信することで降水や風の情報を得ることができる。動いている降水粒子から反射されて戻ってきた電波(受信波)の周波数は、送信した際の周波数からずれて観測される。受信波の周波数は、降水粒子がレーダーに近づくときには高くなり、逆に遠ざかるときには低くなる。この現象はドップラー効果と呼ばれ、周波数の変化から降水粒子のレーダービーム方向の速度を求めることが可能である。この速度をドップラー速度(単位はm/s)と呼ぶ。降水粒子は小さいので、風に流されて移動していると考え、「降水粒子の水平方向の動き」=「大気の水平方向の動き(=水平風)」と考えられるため、ドップラー速度から「風の情報」を得ることができる。

大気中に渦があった場合、ドップラーレーダーで見ると、レーダーから見て「近づく速度が大き



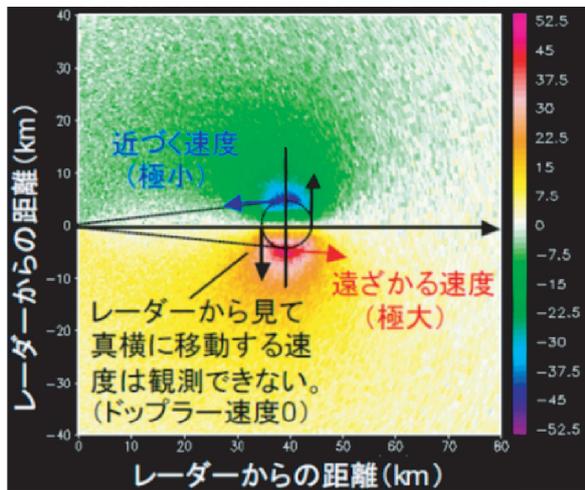
第17図 竜巻発生確度ナウキャストの解析・予測技術

い領域」と「遠ざかる速度が大きい領域」が、渦の回転中心を挟んで方位角方向に並ぶパターンとして観測される。これが、ドップラーレーダーで観測される「渦のパターン」である。例えば、レーダーから40kmの距離に、直径10kmで最大風速50m/sの渦があるとすると、観測されるドップラー速度のパターンは第18図のようになる。

メソサイクロンの自動検出では、このように局地的な領域内でドップラー速度の極大値と極小値を求め、2点の中間地点をメソサイクロン候補の推定中心、距離を直径として、極大値と極小値から渦度と発散を計算し、ランキン複合渦モデル(大野, 2001)への当てはまりの良さからメソサイクロン候補を抽出する。抽出されたメソサイクロン候補に対しては、以下の品質管理を行い、最終的にメソサイクロンとして検出している。

①高度制限

米国における調査(Trapp *et al.*, 2005)によれば、中層(高度3~7km)で検出されたメソサイクロンのうち竜巻と関係があるものは約15%で、下層(高度1km以下)で検出されたメソサイク



第18図 ドップラーレーダーで観測される渦のパターン

レーダーサイト(左端中央0kmの地点)から見て、近づく速度(青)と遠ざかる速度(赤)が対になって見える。

ロンのうち竜巻と関係があるものは40%以上であるとされている。このことから、メソサイクロンの自動検出では、メソサイクロン候補のうち、高度が300m~2,000mまでのものをメソサイクロンとして検出する。ただし、レーダービームの中心高度が2,000mを超えた場合でも、中心より低い高度のメソサイクロンを検出する可能性があるため、ビーム幅の半分は許容して検出する。

②レーダーサイトからの距離制限

レーダーサイト近傍は、レーダービームの地上からの高度が低いことから、地形エコーの影響や風の乱れの影響が大きく、ドップラー速度の品質が低下する。このため、メソサイクロン候補のうち、レーダーサイト近傍9km以内(2009年3月以前は10km以内としていた)のものについては候補から除外する。

③メソサイクロンの大きさ

メソサイクロン候補のうち、半径が250m~3,000mのものをメソサイクロンとして検出する。

④レーダーエコー強度

スーパーセルに伴う竜巻では、近傍に強いレーダーエコーを伴うことから、メソサイクロン候補のうち、中心から半径5km以内に40dBZ以上のエコーがあるものをメソサイクロンとして検出する。

⑤渦度

メソサイクロン候補のうち、渦度が $0.01s^{-1}$ 以上で、発散・収束よりも渦度の方が大きい正渦をメソサイクロンとして検出する。また、シアラインをメソサイクロンと誤検出する割合を減らすため、ランキン複合渦モデルへの当てはまりの良さに他に、シアラインモデルへの当てはまりの良さも計算し、よりランキン複合渦モデルに当てはまるものをメソサイクロンとして検出する。

⑥時間連続性

竜巻と関係があるメソサイクロンは、直線的に移動している場合が多いことから、メソサイクロンの移動速度を120km/h以下と仮定して、メソサイクロン候補のうち時間的に継続しているものをメソサイクロンとして検出する。

検出したメソサイクロンをランキン複合渦モデルへの当てはまりの良さ、及び極大速度と極小速

度との差から得られた速度差を用いて4つの階級に区分している。

◇ランキン複合渦モデルへの当てはまりが若干悪いもの

- ・ランク0：5m/s < 風速差

◇ランキン複合渦モデルへの当てはまりが良いもの

- ・ランク1：5m/s < 風速差 ≤ 8m/s
- ・ランク2：8m/s < 風速差 ≤ 10m/s
- ・ランク3：10m/s < 風速差

なお、平成21年7月のレーダーエコー強度観測の5分化に対応して観測シーケンスの見直しを行い、竜巻発生確度ナウキャストの開始からは5分ごとの検出結果を利用している。

(2) 竜巻とメソサイクロンの関係と自動検出技術の精度

気象庁(2007)は、竜巻が発生した場合にメソサイクロンが検出された比率とメソサイクロン自動検出技術の精度を見るため、全国8カ所の空港気象ドップラーレーダーのデータを用いて、1996年から2006年の間に探知範囲内(レーダーから半径120kmの範囲内)で発生した竜巻及び竜巻とは判断されていないが、被害地域が線上である等から竜巻の可能性が高いと考えられる事例26例について調査した。

竜巻の発生場所・時刻においてメソサイクロンが自動検出されたのは、26例中11例で全体の42%であった。竜巻発生場所・時刻の対応を少し緩めて、発生地点の周囲30km及び発生時刻を含む前後20分間という範囲内でメソサイクロンが自動検出されたのは、26例中18例で全体の69%であった。

この結果から、竜巻が発生する場合は、その周囲も含めると約70%の比率でメソサイクロンが検出される可能性があることが分かった。

一方、自動検出技術の精度を見ると、竜巻発生場所・時刻の対応を緩めた場合で、ドップラー速度場を人が精査し、渦パターンの有無や速度場の特徴(シア成分の強さなど)、レーダー反射強度分布の特徴(フックエコーの有無など)から抽出した21事例のうち18事例を自動検出しており、

メソサイクロンが存在すれば、自動検出技術で検出される可能性が高いということが分かった。ただし、実際の運用では検出される渦候補の中にシアの強い領域を捉えているなど、メソサイクロンでないものも含まれることがあり、誤検出に注意が必要である。

(3) メソサイクロンの自動検出事例

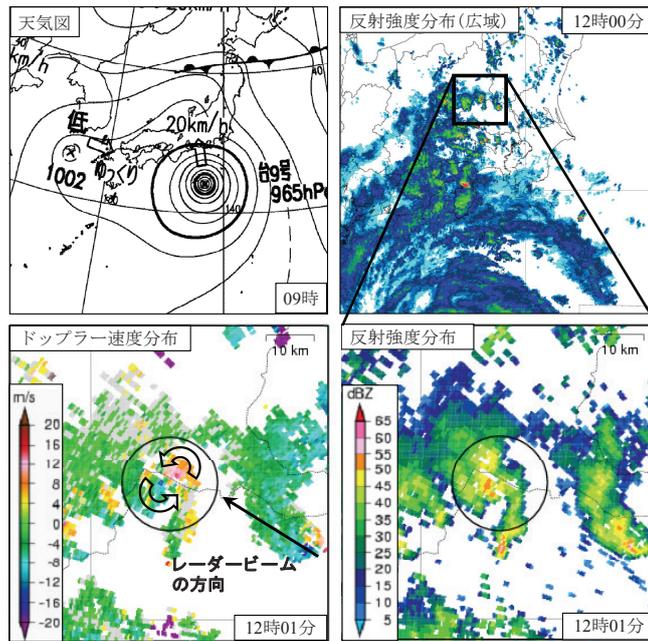
気象ドップラーレーダーで観測されたメソサイクロンの例として、2007年の台風第9号の北上に伴い、9月6日12時頃に埼玉県深谷市で発生した竜巻の事例を第19図に示す。東京レーダーの反射強度から、深谷市上空を発達した積乱雲が通過していたことが分かり、ドップラー速度から前述の品質管理を経てメソサイクロンが検出された。

竜巻の発生時刻・地点と自動検出されたメソサイクロンの通過時刻・地点がほぼ一致することから、今回の竜巻はこのメソサイクロンを伴うスーパーセルによって発生したと考えられる。

6.2 突風危険指数

突風関連指数の大きな値が計算されている領域で積乱雲が発達している場合、その領域では竜巻等の激しい突風が発生する危険が高まっていると考えられる。このような考えに基づき、レーダー観測による実況を反映したリアルタイムの突風発生ポテンシャルとして、新たに開発したのが「突風危険指数」である。突風危険指数の予測式は、「MSMによる突風関連指数及びレーダーエコー観測値」を説明変数、「突風発生の有無」を目的変数として統計的手法により作成される。

平成20年3月に竜巻注意情報の発表を開始した時点では、竜巻やダウンバーストなどの現象の違いに関わらず、突風被害発生の有無を目的変数として作成した1種類の突風危険指数を利用していた。しかし、積乱雲内の強い上昇流により発生する竜巻と、強い下降流により発生するダウンバーストは、現象の発生メカニズムが異なることから、竜巻とダウンバーストを区別して独自の予測式を作成すれば、より適切な予測が可能になると考えられる。そこで、平成22年5月から開始し



第 19 図 東京レーダーによる反射強度分布とメソサイクロンの自動検出例

2007 年 9 月 6 日 12 時頃、埼玉県深谷市で発生した竜巻の事例。ドップラー速度分布は、メソサイクロンの速度分布に相対的な値。

た竜巻発生確度ナウキャストでは、従来の現象を区別しない突風危険指数に加えて、新たに「竜巻型」と「ダウンバースト型」の突風危険指数も作成し、3種類の突風危険指数を利用することとした。

6.2.1 レーダーエコーの特徴を基にした現象の分類

現象別の突風危険指数の予測式を作成するには、過去の突風事例を竜巻型とダウンバースト型に分類する必要がある。現地調査で現象の種類が特定されているのは約半数であり、残りの半数は「その他（不明を含む）」となっている。予測式の作成では、それぞれの型に分類される突風事例が可能な限り多いことが望ましいことから、「その他（不明を含む）」の事例についてもレーダーエコーの特徴を基に作成した判別式により、竜巻型とダウンバースト型に分類して利用することにした。

なお、この判別式は突風事例の分類のみでなく、予測式作成時の全サンプルを、突風の有無にかかわらず竜巻型とダウンバースト型に分類するのに

も利用しており、今回の現象を層別化した予測式作成では重要な役割を果たしている。

(1) 竜巻及びダウンバーストとレーダーエコー指数の関係

積乱雲に伴う激しい突風の全事例を、レーダーエコーの特徴から竜巻型とダウンバースト型に分類する。突風の型の分類には、積乱雲の発達過程の監視に適したレーダーエコー指数を利用している（第2表）。

まず、レーダーエコー指数が利用可能な2006年～2008年の3年間のデータを用いて、気象庁の「竜巻等の突風データベース」に収録された突風事例のうち、積乱雲に伴う突風として、突風発生時のレーダーエコー強度が30mm/h以上でエコー頂高度が5km以上のものを抽出した（165事例）。このうち、現地調査から推定された現象ごとの事例数は、竜巻65事例（39%）、ダウンバースト21事例（13%）、その他（ガストフロントを含む）79事例（48%）であった。

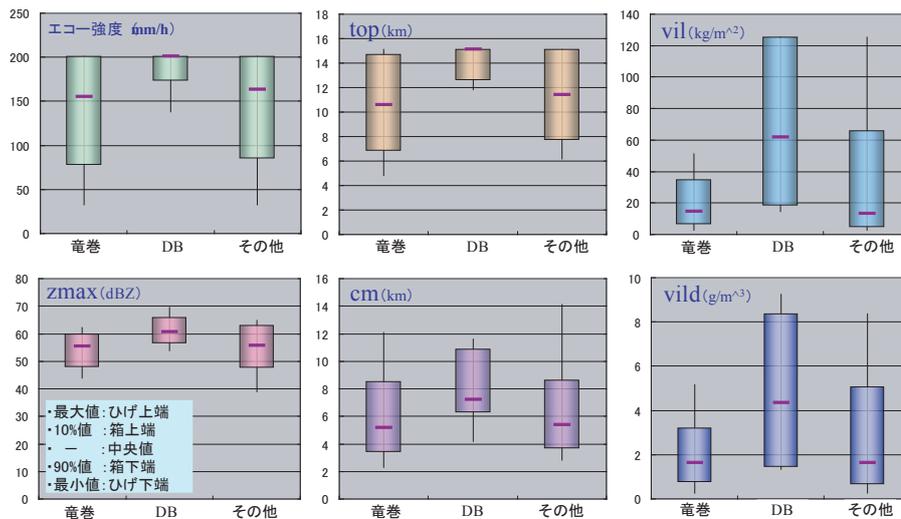
第20図は、突風が発生した時刻に対応するレーダーエコー強度及び各種レーダーエコー指数

第2表 レーダーエコー指数

指数名	説明	単位
vil	鉛直積算雨量	kg/m ²
top	頂高度	km
zmax	最大反射強度	dBZ
cm	重心高度	km
vild	鉛直積算雨量の密度	g/m ³

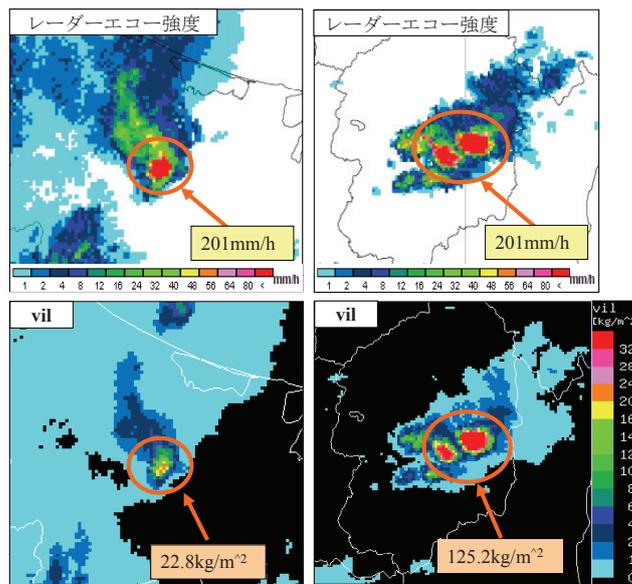
(vil, top, zmax, cm, vild) を現象別に比較したものである。いずれの指数値もダウンバースト発生時の方が大きい傾向にある。

レーダーエコー指数の一例として、竜巻とダウンバースト発生時のレーダーエコー強度と vil を第21図に示す。レーダーエコー強度の最大値で比較すると竜巻の事例もダウンバーストの事例



第20図 突風発生時のレーダーエコー指数 (箱ひげ図)

2006～2008年の3年間における突風事例 (竜巻65事例, ダウンバースト21事例, その他突風79事例)。レーダーエコー強度及び各レーダーエコー指数値は、竜巻に比べダウンバーストの方が大きい傾向がある。



第21図 竜巻とダウンバースト発生時のレーダーエコー強度と vil

左：竜巻 (F3)：北海道佐呂間町 2006年11月7日13時20分

右：ダウンバースト (F1)：栃木県高根沢町 2006年7月3日13時00分

も 201mm/h であるが、vil で比較すると竜巻に比べダウンバーストの方が数倍大きな値となっている。この事例のように、ダウンバーストではレーダーエコー強度とともに、vil のように下層から上層まで積算した指標が大きな値となることから、ダウンバーストは、十分に発達した積乱雲に伴って発生していることが示唆される。

(2) 竜巻型とダウンバースト型の分類

前節で調べた突風事例 (165 事例) について、現地調査から現象が特定されている竜巻 65 事例とダウンバースト 21 事例を用いて、竜巻とダウンバーストを判別する線形判別式を作成した。

判別式の説明変数の候補としては、レーダーエコー強度・頂高度、第 2 表のレーダーエコー指数 (vil,zmax,top,cm,vild) の 7 種類を用意した。変数増減法を用いた判別式の作成では、これらの説明変数候補から vil,zmax,vild が説明変数として選択され、従属資料による検証では、94% (=81/86) が適正に判別された。

この判別式を用いて「その他 (79 事例)」を含む全 165 事例を、竜巻又はダウンバーストのどちらの特徴を持つのか分類し、それぞれを竜巻型 (以後 TR 型と呼ぶ)、ダウンバースト型 (以後 DB 型と呼ぶ) とした。その結果、TR 型は 123 事例 (全事例のうち 75%)、DB 型は 42 事例 (全事例のうち 25%) であった。

このように、現象を区別しないで突風の有無のみを目的変数とする場合 (以後 ALL 型と呼ぶ) の他に、レーダーエコーの特徴から突風事例を現象別に分類して、TR 型と DB 型に層別化した 3 つの突風危険指数の予測式を作成した。

6.2.2 突風危険指数の予測式

(1) 計算格子

竜巻などの激しい突風をもたらす積乱雲の水平スケールが 10 ~ 30km 程度であることから、突風危険指数の値は 10km の緯経度格子単位で計算することとした (以下、「10km 格子」という)。この 10km 格子は、第 2 次地域区画 (昭和 48 年 7 月 12 日行政管理庁告示第 143 号を参照) と一致している。

突風の発生頻度は非常に小さいため、これらの格子単位 (あるいは複数の 10km 格子をまとめた地域単位) で統計処理を行って予測式を作成することは困難である。このため、全国を対象に 1 つの予測式を作成し、その予測式を全 10km 格子に適用することとした。

(2) 統計モデル

突風危険指数の予測式作成には、統計モデルとして、現象の有無を表現するのに適しているロジスティック回帰分析を用いた。

ある現象の発生する確率 (割合) p を、その現象の生起を説明するために観測された変数群 $x = (x_1, \dots, x_r)$ で説明しようとする場合、 $x = (x_1, \dots, x_r)$ という状態のもとで現象が発生するという条件付き確率を $p(x)$ で表し、これを

$$p(x) = P_r\{\text{発生} \mid x_1, x_2, \dots, x_r\} = F(x_1, \dots, x_r)$$
 という関数 F を用いてモデル化することが多い。ここで、

① r 個の変数の影響を線形な合成変数

$$Z = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_r X_r$$

② 関数 F に Z のロジスティック関数

$$F(Z) = \frac{\exp(Z)}{1 + \exp(Z)} = \frac{1}{1 + \exp(-Z)}$$

としたモデル

$$p(x) = P_r\{\text{発生} \mid x_1, x_2, \dots, x_r\} \\ = \frac{\exp(Z)}{1 + \exp(Z)} = \frac{1}{1 + \exp(-Z)}$$

…①式

がロジスティック回帰モデルである。

つまり、①式は第 22 図に示すように、 $(-\infty \sim \infty)$ の変動範囲を持つ説明変数の合成変数 Z と範囲 $(0, 1)$ に値をもつ発生確率 $p(x)$ とを結合させたモデルである。①式を変形すると

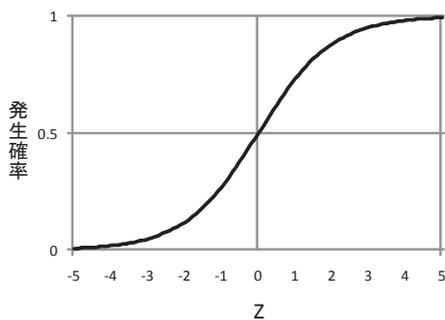
$$\log \frac{p(x)}{1 - p(x)} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_r x_r$$

…②式

となり、見掛け上、線形重回帰モデルのような式が現れる。②式左辺の $p(x)/(1 - p(x))$ は、現象

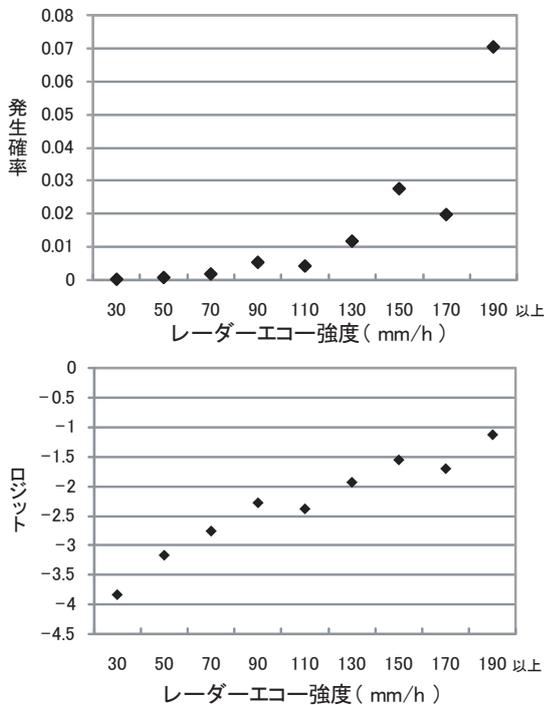
が発生する確率と発生しない確率の比で「オッズ」と呼び、 $\log(p(x)/(1-p(x)))$ は、確率 $p(x)$ の「ロジット」と呼ぶ。

第 23 図に、次節以降で述べる突風危険指数を作成するためのサンプリングデータのうち、ALL型のデータにおけるレーダーエコー強度と突風の発生確率及びロジットを示す。



第 22 図 ロジスティック関数 ; $F(Z)=1/(1+\exp(-Z))$

ロジスティック回帰モデルは、 $(-\infty \sim \infty)$ の変動範囲をもつ説明変数の合成変数 Z と、範囲 $(0,1)$ に値をもつ発生確率 $p(x)$ とをロジスティック関数で結合させたモデルであることがわかる。



第 23 図 レーダーエコー強度と突風発生確率及びロジット

レーダーエコー強度と発生確率（上段）のロジット（下段）は、線形に近い関係であることがわかる。

ロジットを見ると、レーダーエコー強度との関係が線形に近くなっている。通常、現象の発生確率と説明変数は線形関係となりにくいですが、ロジスティック回帰分析ではロジットと説明変数が線形に近い関係にあるので、説明変数の情報を有効に取り出すことができる。

(3) 回帰分析におけるデータのサンプリング

突風危険指数の作成にあたっては、以下のように統計式を作成する際のデータ数を絞り込むことで、相対的に「突風有り事例」の比率が大きくなるようにしている。

①陸上の 10km 格子 4645 格子のうち、2006 年～2008 年の 3 年間に突風被害が発生した 146 格子のみを対象としてデータを抽出（以下、サンプリング格子という）し、突風被害の発生していない格子のデータは除外する。

②レーダーエコー強度 30mm/h 未満又はエコー頂高度 5km 未満のデータは除外する。

現象の継続期間を 1 時間以内と考え、1 つのサンプリング格子について、1 時間ごとに目的変数（突風被害の有無：有り=1，無し=0）と説明変数候補で 1 組のデータとなるようにサンプリングを行う。

(4) 回帰分析における説明変数

突風危険指数の説明変数の候補として、レーダー観測から得られるレーダーエコー強度・頂高度、第 2 表で示したレーダーエコー指数、数値予報 (MSM) を用いて計算した第 3 表に示す突風関連指数を説明変数の候補とした。説明変数の値は、10 km格子単位で作成する。回帰分析で使用する説明変数は、次のように作成する。

(ア) レーダーデータ

レーダーデータ（エコー強度及びレーダーエコー指数は 1km 格子，エコー頂高度は 2.5km 格子）は、まず 10 分ごとに 10km 格子内の最大値を求める。突風事例「有り」の場合は、突風が発生した 10km 格子を中心として周囲 8 格子を含め、突風が発生した時刻の前後 10 分間（9 格子×30 分間=10km 格子 27 個の内）の最大値を対応させる。これは、突風をもたらす積乱雲の移動速度が

60km/h を超える場合は、10 分単位で見ると 10km 以上移動するため、突風が発生した 10km 格子のみに着目すると、突風をもたらした積乱雲に対応するエコー域が当該格子から外れてしまい、突風の有無とレーダーデータとの対応が悪くなるためである。突風事例「なし」の場合は、サンプリング格子の 1 時間内（1 格子×60 分間=10km 格子 6 個の内）の最大値とする。

(イ) 突風関連指数

数値予報 (MSM) から計算される突風関連指数は、サンプリング格子の南北方向に±3 格子、東西方向に±2 格子（7×5=35 格子）内の最大値 (SSI, PLCL, PLFC については最小値) を求める。さらに、対応する予報時刻の±1 時間内の最大値 (最小値) を求めている。MSM は最新の計算値を利用するので、例えば、03UTC には、00UTC

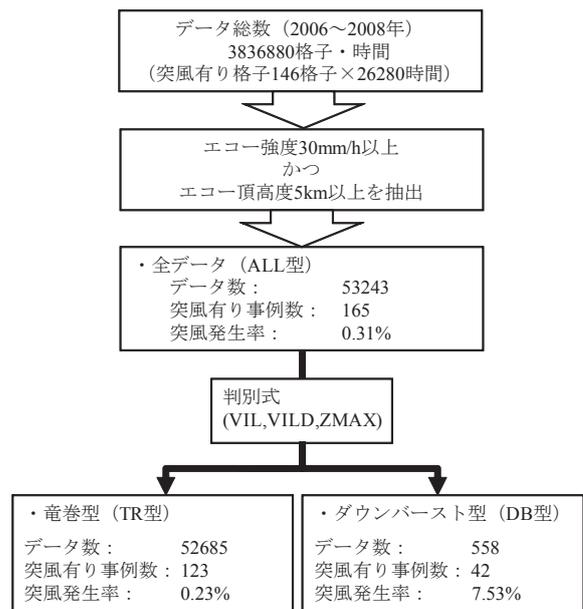
初期時刻の FT=02 ~ 04 内の最大値 (最小値) を対応させる。

(5) 層別化

現象による層別化は、第 6.2.1 節で説明したとおり、ALL 型に加えて、竜巻・ダウンバーストの判定式を使って TR 型、DB 型に層別化し、それぞれで予測式を作成する。各予測式作成時のデータ数を第 24 図に示す。DB 型と判別されるのは全データの 1/100 程度と少ないが、データ数に占める突風有り事例数の割合 (突風発生率) を見ると、他の型に比べて桁違いに高くなっている。今回の判別式を利用した場合、DB 型と判別されただけでも激しい突風が発生する可能性が高い状態であるといえる。

第 3 表 説明変数の候補 (MSM を用いた突風関連指数)

変数名	説明
SSI	Showalter's stability index
TTI	Total totals index
PLCL	地上から高度 500m までを平均した気塊を持ちあげた場合の持ち上げ凝結高度 (hPa)
PLFC	自由対流高度 (hPa)
PEL	中立浮力高度 (hPa)
CAPE	CAPE
NCAPE	CAPE を高度差 (EL-LFC) で割った値
MLCAPE	地上から高度 1000m までを平均した気塊の CAPE
MLCAPE3	高度 3000m まで積分した CAPE
SREH10	地上から高度 1000m までの SReH。ストームの移動速度は、Bunkers(2000) による。
SREH30	地上から高度 3000m までの SReH。ストームの移動速度は、Bunkers(2000) による。
Msh	地上～高度 4000m までのシアア平均
BRNsh	高度 500m と高度 6000m のシアア (バルクリチャードソンシアア)
V _{RM}	ストームの移動速度。Bunkers(2000) による。
EHI	CAPE × SREH30 / 160,000
VGP	Msh × MLCAPE ⁻²
TVP	Tornado Velocity Parameter: 竜巻が発生した時の想定される竜巻渦の最大接線風速 (Nakazato et al., 2009)
TVP0	TVP の計算において、鉛直シアアによる渦管の引き延ばしを考慮しない。
DCAPE	相当温位が最小の高度の空気塊が地上へ下降するまでに得るエネルギー
EPTdif	上層の相当温位最小値と下層の相当温位最大値の差



第 24 図 突風危険指数 (ALL 型, TR 型, DB 型) のサンプリングデータ数

ALL 型 (全事例型) から判別式で TR 型 (竜巻型), DB 型 (ダウンバースト型) に判別を行う。DB 型に判別されるだけで、突風発生率が高いことがわかる。

(6) 予測式の作成

前節までのように抽出・層別化したデータを基に統計処理を行い、突風危険指数の予測式を作成した。ALL型、TR型、DB型それぞれで、説明変数の候補から変数増減法による変数選択を行い、説明変数と係数を求めた。各型の突風危険指数で選択された説明変数は、第4表のとおりである。選択された突風危険指数の説明変数の中で最も寄与が大きいものは、レーダーエコー強度である。

なお、ここに挙げた説明変数は本稿執筆段階の

ものであり、予測式は更に改良を行っていく。

突風危険指数の予測式は、突風の発生確率を計算する形式であり、0～100の数値で表現されるが、予測式作成時のデータサンプリングにおいて、相対的に「突風有り事例」の比率が大きくなるようにデータの抽出を行っていることから、計算される数値は実際の「確率」よりかなり高い値となる。また、全国一律の予測式であることから地域差も表現されていない。このように、この予測式による計算値には「確率」の意味はなく、「突風が発生する可能性の大小」という意味で利用すべきものである。このため、この計算値の名称には「確率」は用いず「突風危険指数」とした。

第4表 突風危険指数の説明変数

種別	変数名	突風危険指数の説明変数		
		ALL型	TR型	DB型
レー ダ ー	エコー強度	○	○	○
	頂高度	○	○	
	vil	○		
	zmax	○	○	
	top			○
	cm			
	vild			○
M S M 突 風 関 連 指 数	SSI			○
	TTI	○	○	
	PLCL		○	
	PLFC		○	
	PEL			
	CAPE			
	NCAPE			
	MLCAPE			
	MLCAPE3			
	SREH10			
	SREH30			
	Msh	○		○
	BRNsh	○	○	
	V _{RM}		○	○
	EHI			
	VGP			
	TVP			
TVP0	○	○		
DCAPE				
EPTdif				

6.2.3 突風危険指数の地域的な特徴と補正の検討

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こと（突風の有無）を判定するために、気象ドップラーレーダーによるメソサイクロン検出と3つの突風危険指数を用いる。3つの型の突風危険指数のしきい値は全国一律に設定するため、まず、ALL型、TR型、DB型それぞれについて地域的な偏りの有無がないか調べた。第25図は、2006年4月～2009年3月までの3年間における各型の突風危険指数の履歴1位値の分布図である。

(a) ALL型は、全国的に見て竜巻等の発生が多い地域に高い値が分布している。第6.3.3節で述べる複合判定における突風危険指数の判定しきい値である7以上の分布も全国的に偏りがなく広がっている。九州西部はやや少ないが、これは2007年11月に福岡レーダーが更新される前の特性（エコー強度が弱め）が影響しているためと考えられる。

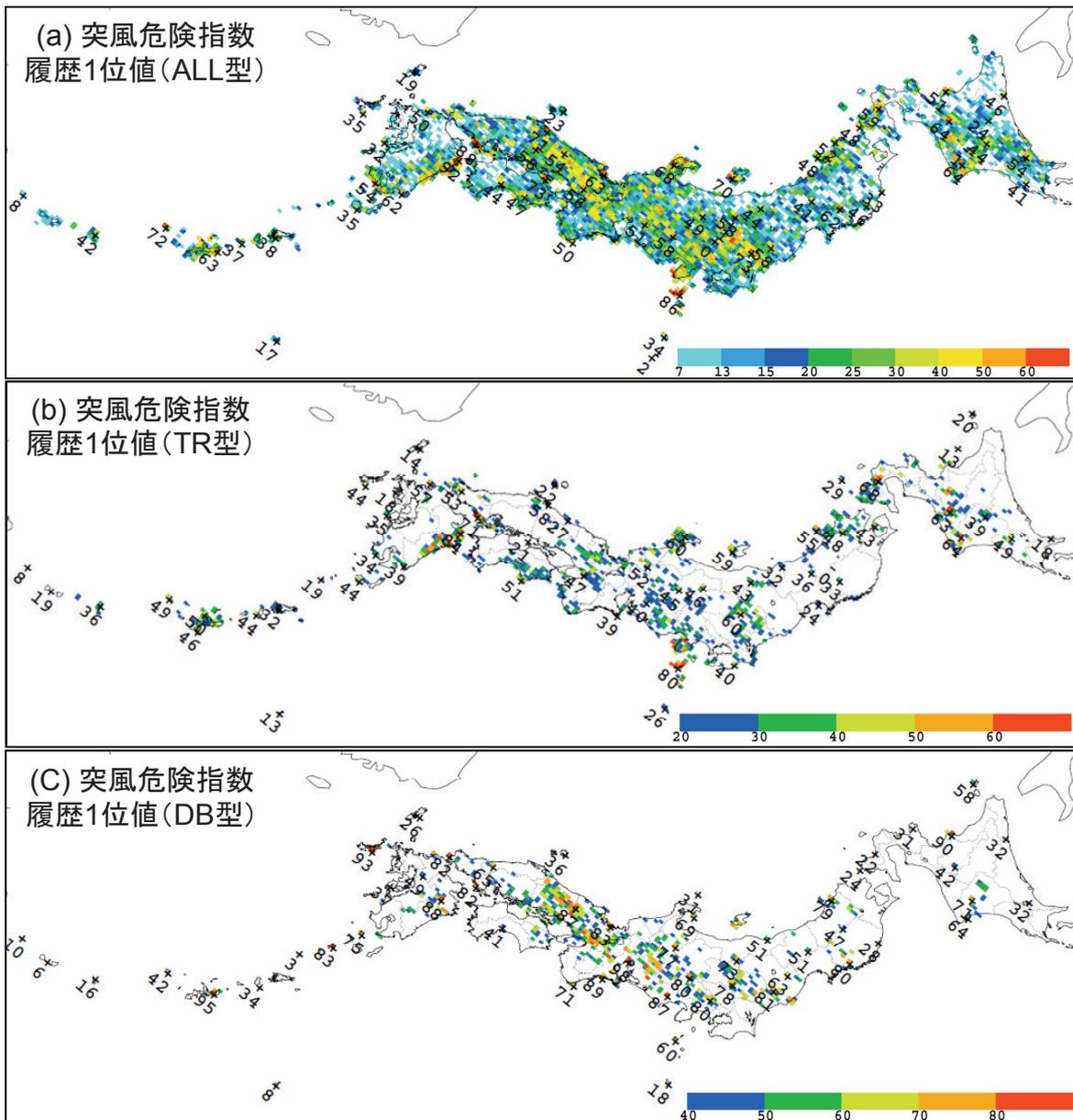
(b) TR型で、第6.3.4節で述べる突風危険指数による単独判定のしきい値とした20以上の分布でも、全国的に見て地域的な偏りはない。特に沿岸部に多く分布しており、沿岸部で竜巻の発生が多いという特徴と矛盾しない。

(c) DB型で、単独判定のしきい値とした40以上の分布でも、全国的に見て地域的な偏りはない。比較的内陸部に多く分布しており、内陸部で

ダウンバーストの発生が多いという特徴と矛盾しない。

このように、新しく作成した突風危険指数(ALL型, TR型, DB型)の履歴1位値の分布は、全国的に見て地域的な偏りはなく、竜巻やダウンバ

ースト発生 の地域的な特徴とも矛盾のない分布をしている。したがって、突風の有無を判定するための突風危険指数のしきい値を、全国一律に設定することとした。



第25図 突風危険指数履歴1位値の分布図 (2006年4月～2009年3月)

6.2.4 突風危険指数の事例

① 2006年9月17日：宮崎県で発生した竜巻(F2)の事例(第26図)

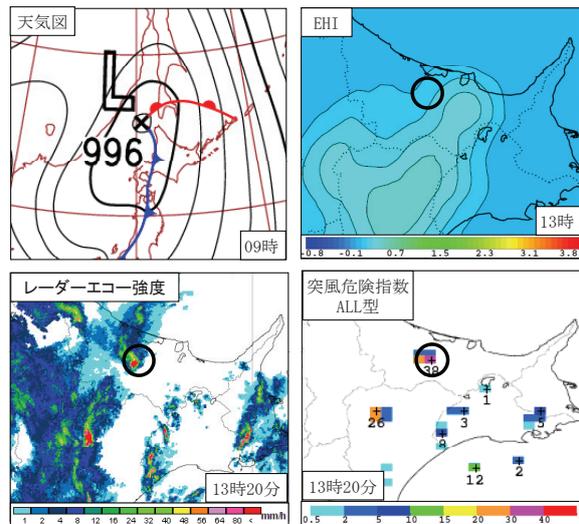
EHIが高い領域と台風のアウターバンドに伴う強いエコーが重なった場所で、高い突風危険指数値(ALL型)が計算されており、延岡市付近では最大57となっている。また、TR型でも延岡市周辺で67と高い値となっている(図略)。

② 2006年11月7日：北海道佐呂間町で発生した竜巻(F3)の事例(第27図)

竜巻を発生させた積乱雲に対応する強いレーダーエコーの場所で突風危険指数値(ALL型)38が計算されている。また、TR型でも単独判定しきい値(20)を超える25となっている(図略)。

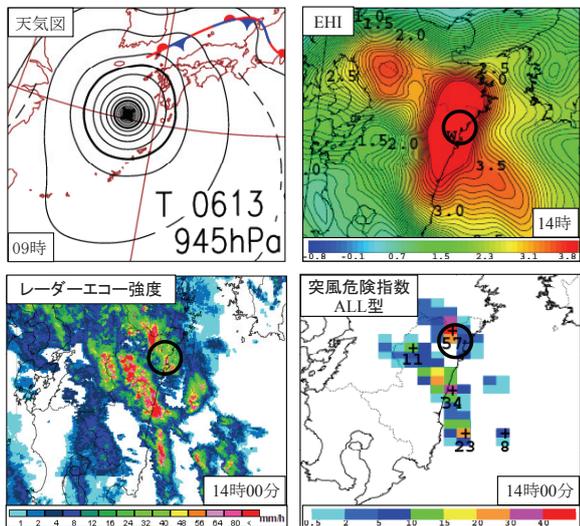
③ 2006年7月3日：栃木県高根沢町で発生したダウンバースト(F1)の事例(第28図)

EHIが相対的に高い領域で強いエコー強度が観測されており、突風危険指数(DB型)は単独判定しきい値(40)を超える70が計算されている。(この事例では東京レーダーでメソサイクロンが検出されている。)



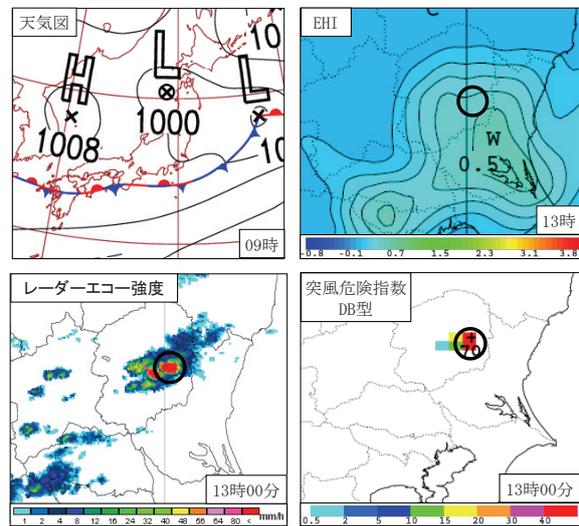
第27図 2006年11月7日13時23分 網走支庁佐呂間町 竜巻(F3)の事例

天気図(左上), EHI(右上: MSM 09時初期値 FT=04により計算), レーダーエコー強度(左下), 突風危険指数 ALL型(右下). 丸印は、竜巻発生地点.



第26図 2006年9月17日14時03分 宮崎県延岡市 竜巻(F2)の事例

天気図(左上), EHI(右上: MSM 12時初期値 FT=02により計算), レーダーエコー強度(左下), 突風危険指数 ALL型(右下). 丸印は、竜巻発生地点.



第28図 2006年7月3日13時00分頃 栃木県高根沢町 ダウンバースト(F1)の事例

天気図(左上), EHI(右上: MSM 09時初期値 FT=04により計算), レーダーエコー強度(左下), 突風危険指数 DB型(右下). 丸印は、ダウンバースト発生地点.

④ 2010年9月28日：静岡県焼津市で発生した竜巻(F0)の事例(第29図)

前述の3事例の突風危険指数は従属資料によるものであるが、この事例は、独立資料によるものである。焼津市で竜巻が発生する35分前に、付近の海上で突風危険指数値(TR型)28が計算されており単独判定しきい値を超えている。

6.3 メソサイクロンと突風危険指数を利用した突風発生の有無の総合判定

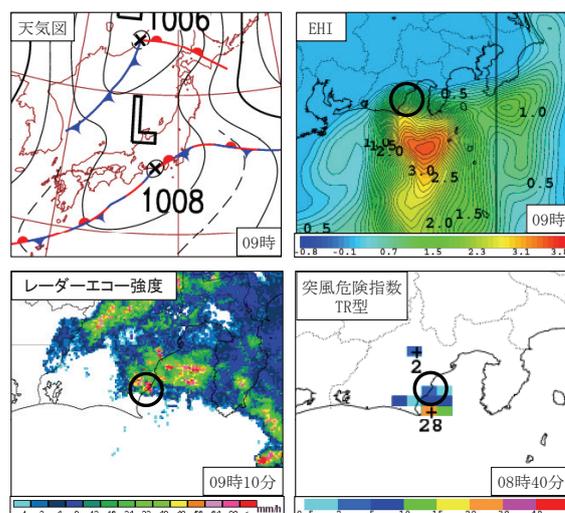
6.3.1 複合判定と単独判定

メソサイクロンと突風危険指数を利用して、竜巻注意情報の発表基準となる「突風の有無」判定を行う(実際には、「突風の有無」の判定結果は、竜巻発生確度ナウキャストの発生確度2格子の解析に利用し、発生確度2の分布から竜巻注意情報を発表する府県を決めている)。

メソサイクロンが存在しても、竜巻やダウンバーストが発生しない場合も多い。また、メソサイクロンの自動検出ではシアアの強い部分などをメソサイクロンと誤検出してしまう場合もある。このため、メソサイクロンの自動検出のみで突風の有無を判定すると空振りが多くなってしまう。一方、突風危険指数も一定の捕捉率を確保するようにしきい値を設定して突風の有無を判定すると、空振りが多くなってしまう。

しかし、メソサイクロンの自動検出と突風危険指数を組み合わせて総合的な判定を行うと、一定の捕捉率を確保した上で空振りを減らすことが可能になる。この二つの技術を組み合わせて突風の有無を判定する手法を「総合判定」と呼ぶ。このうち、両者のAND条件を用いた判定を「複合判定」、一方のみによる判定を「単独判定」と呼ぶ。

メソサイクロンと突風危険指数による複合判定では、第6.1節で述べたメソサイクロンのランクは考慮せず、検出の有無のみを利用し、ALL型の突風危険指数と組み合わせた判定を行う。また、突風危険指数については、TR型とDB型のそれ



第29図 2010年9月28日09時15分頃 静岡県焼津市 竜巻(F0)の事例

天気図(左上), EHI(右上:MSM 06時初期値FT=03により計算), レーダーエコー強度(左下), 突風危険指数TR型(右下:竜巻発生35分前)。丸印は、竜巻発生地点。

ぞれに単独判定の基準を設定するが、メソサイクロンによる単独判定は行わない⁴。

6.3.2 各条件の設定における検証範囲

「突風の有無」の判定条件の設定には、竜巻注意情報の適中率や突風事例の捕捉率に加え、発表回数も考慮した。判定条件の設定に使用したデータ期間は、単独判定が2006年5月～2009年3月(この期間の突風事例は85事例)、複合判定は2007年4月～2009年3月(この期間の突風事例数は80事例)である。ドップラーレーダーの整備状況に合わせて、検証範囲、検証方法は以下のとおりとした。

- ・2006年5月～10月(関東地方のみ)
- ・2007年3月～2008年2月(東北地方南部～東海地方)

⁴ 竜巻注意情報開始時には、メソサイクロンのランクを考慮した複合判定を行っていたが、竜巻発生確度ナウキャスト開始に当たっての判定条件の再検討では、その効果が小さかったため、ランクは廃止した。また、メソサイクロンによる単独判定も十分な精度が得られなかった。

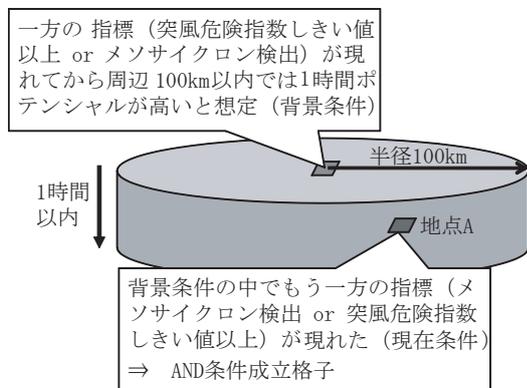
- ・2008年3月～2009年3月（全国）
- ・府県単位に発表を行う竜巻注意情報を想定した検証では、対象地域を府県の代わりに総合判定で突風有りとした10km格子の周囲50kmとし、発表から1時間後までにこの範囲で突風が発生した場合を適中とした。
- ・再発表は、1つ前の竜巻注意情報発表の40分後から可能として、竜巻注意情報発表開始時の運用に合わせて検証を行った。

6.3.3 メソサイクロンと突風危険指数による複合判定

(1) 複合判定の考え方

複合判定は、メソサイクロンの自動検出と突風危険指数しきい値以上のAND条件が成立したときに「突風有り」と判定することにより条件を絞り込み、空振りを減らすことを目的としている。しかし、それぞれが基準に達した場所と時刻を厳密に対応させるとAND条件が成立する場合が非常に少なくなり、ほとんどの突風事例が見逃しになってしまう。このため、次のように時・空間的にある程度幅を持たせた上でAND条件を考えることとした（第30図）。

- ・ある時刻・場所で突風危険指数が一定のしきい値を超えた場合は、その後しばらくはその周辺で、竜巻などの激しい突風が発生するポテンシャルが高いとみなし、これを「背景条件」と呼ぶ。



第30図 突風の複合判定の考え方

- ・背景条件が有効な状態でメソサイクロンが検出された場合（これを「現在条件」と呼ぶ）には、その場所・時刻でAND条件が成立したと考える。
 - ・上記の説明で、突風危険指数とメソサイクロンを入れ替えた場合も同様に扱う。
- 具体的には、以下の2通りのAND条件のいずれかが成立した時刻・地点で「突風有り」と判定する。

①背景条件を突風危険指数とした場合

突風危険指数がしきい値を超えた地点の周辺100km・1時間以内の時空間内で、時刻Tに地点Aでメソサイクロンが検出された場合、時刻Tに地点AでAND条件が成立したとする。

②背景条件をメソサイクロンとした場合

メソサイクロンが検出された地点の周辺100km以内・1時間以内の時空間内で、時刻Tに地点Aで突風危険指数がしきい値を超えた場合、時刻Tに地点AでAND条件が成立したとする。

なお、背景条件の「継続時間1時間」、「影響範囲100km」は、竜巻注意情報の発表を想定して、最も捕捉率・適中率が高くなるよう設定した値である。

(2) メソサイクロンを背景条件として利用することの効果

ドップラーレーダーからの距離が遠くなると、ドップラー速度観測の解像度が低下し、メソサイクロンを検出しにくくなる。このため、メソサイクロンの検出を現在条件としてのみ利用すると、第31図の地点Aのように周辺のレーダーから遠い地域では「突風有り」判定の頻度が低下することが懸念される。しかし、前述のAND条件②のようにメソサイクロンの検出を背景条件としても利用すると、地点Aの100km範囲内において周辺のレーダーでメソサイクロンが検出されれば地点Aに「突風有り」判定を出すことができる。これにより、ドップラーレーダーから離れた地域における「突風有り」判定の頻度の低下を抑えることができる。

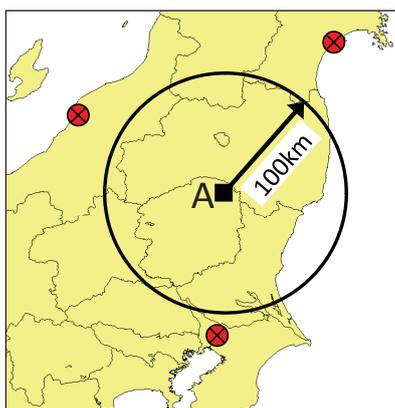
(3) 複合判定のしきい値

①現在条件を突風危険指数とした場合

背景条件となるメソサイクロンが検出されている状態で、現在条件となる ALL 型の突風危険指数 (TP) のしきい値を変化させて捕捉率と適中率を調べた (第 5 表)。バランスが最も適当と思われるしきい値は 8 であるが、独立資料での捕捉率の低下を避けるためしきい値は 7 とした。このときの捕捉率は、15.00%、適中率は 5.90%であった。

②現在条件をメソサイクロンとした場合

現在条件であるメソサイクロンが検出されている状況で、背景条件となる ALL 型の突風危険指



第 31 図 メソサイクロンを背景条件とした場合の効果
地点 A と 100km の範囲を示す。丸印は、地点 A 周辺のレーダーサイト

第 5 表 現在条件を突風危険指数とした場合の評価

TP	発表数	適中数	捕捉数	適中率	捕捉率
≧1	989	34	20	3.44	25.00
≧2	689	28	17	4.06	21.25
≧3	552	25	15	4.53	18.75
≧4	452	23	15	5.09	18.75
≧5	372	19	14	5.11	17.50
≧6	320	17	13	5.31	16.25
≧7	271	16	12	5.90	15.00
≧8	225	16	12	7.11	15.00
≧9	195	14	10	7.18	12.50
≧10	179	14	10	7.82	12.50
≧11	158	14	10	8.86	12.50
≧12	142	12	9	8.45	11.25
≧13	125	11	9	8.80	11.25

数 (TP) のしきい値を変化させて捕捉率と適中率を調べた (第 6 表)。しきい値を前述の①と同じ 7 とすると適中率が 3.24% と低くなる。適中率が①と同等となるしきい値は 16 程度だが、①と同様に考えしきい値は 13 とした。このときの捕捉率は 6.25%、適中率は 4.20%であった。

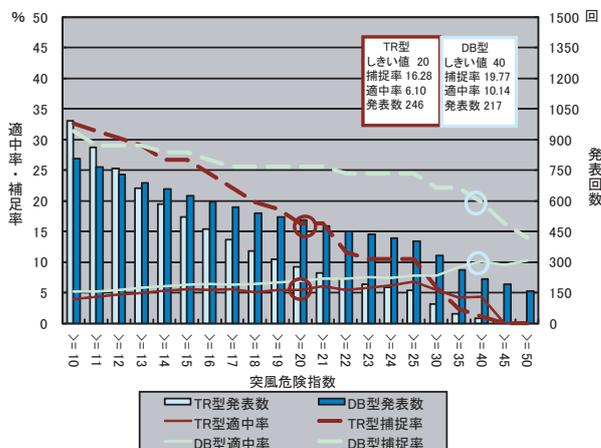
6.3.4 突風危険指数による単独判定

(1) 単独判定のしきい値

単独判定には、TR 型と DB 型の突風危険指数を利用する。これらの指数のしきい値を変化させて、それぞれの指数単独の判定で竜巻注意情報を発表した場合の精度を第 32 図に示す。この結果から、捕捉率、適中率、発表回数のバランスを考

第 6 表 現在条件をメソサイクロンとした場合の評価

TP	発表数	適中数	捕捉数	適中率	捕捉率
≧1	866	19	12	2.19	15.00
≧2	633	17	11	2.69	13.75
≧3	521	15	9	2.88	11.25
≧4	446	12	8	2.69	10.00
≧5	370	11	7	2.97	8.75
≧6	327	9	7	2.75	8.75
≧7	278	9	7	3.24	8.75
≧8	244	8	6	3.28	7.50
≧9	218	8	6	3.67	7.50
≧10	197	7	6	3.55	7.50
≧11	181	7	6	3.87	7.50
≧12	162	7	6	4.32	7.50
≧13	143	6	5	4.20	6.25
≧14	126	6	5	4.76	6.25
≧15	116	6	5	5.17	6.25
≧16	108	6	4	5.56	5.50



第 32 図 TR 型と DB 型突風危険指数の単独判定の精度

慮して、TR型の単独判定しきい値を20、DB型の単独判定しきい値を40とした。

TR型のしきい値を20として単独判定した場合捕捉率は16.28%、適中率は6.10%、発表回数は246回であった。DB型のしきい値を40として単独判定した場合の捕捉率は19.77%、適中率は10.14%、発表回数は217回であった。

両者を組み合わせ、突風危険指数の単独判定でTR型20以上又はDB型40以上として判定したところ、捕捉率は30.23%、適中率は7.22%、発表回数は457回であった。両者を個別に評価した

場合の発表回数の合計は246+217=463回であり、組み合わせて判定した場合に重複するのは、その差である6回に過ぎず、両者の単独判定はほぼ独立に近い。この点からも、突風危険指数をTR型とDB型に分けて単独判定することには意味があるといえる。

(2) 突風事例における単独判定結果

2006年5月～2008年12月の突風事例について、TR型とDB型の単独判定を適用した結果を第7表に示す。全86事例の内、TR型単独判定で

第7表 突風事例における単独判定結果

「現地」は、現地調査による現象の判定であり、TRは竜巻、DBはダウンバースト(又はガストフロント)、XXは不明。「判定」は、第6.2.1節の判別式による判定。「TR型」はすべての事例に使用し、「DB型」は判別式でDB型と判別された場合のみ使用する。大きな赤枠内は竜巻注意情報発表期間で、黄色の事例は竜巻注意情報発表開始当時の判定手法で、事前に竜巻注意情報を発表した事例。TR型の赤色の事例は、TR型の突風危険指数による単独判定で突風有りとして判定された事例。DB型の緑色の事例は、判別式でDB型と判別され、DB型の突風危険指数による単独判定で突風有りとして判定された事例。

番号	年	月	日	県	市町村	現地	判定	TR型	DB型	番号	年	月	日	県	市町村	現地	判定	TR型	DB型
1	2006	5	20	埼玉県	坂戸市	XX	DB	10	15	44	2008	7	27	福井県	敦賀市	DB	DB	5	60
2	2006	6	28	群馬県	館林市	DB	DB	1	10	45	2008	7	27	福井県	大野市	DB	DB	5	56
3	2006	7	3	栃木県	高根沢町	DB	DB	32	70	46	2008	7	27	岐阜県	飛騨市	DB	DB	21	64
4	2006	7	15	東京都	昭島市	XX	DB	2	65	47	2008	7	27	長野県	岡谷市	DB	DB	7	29
5	2006	7	15	山梨県	峡東地域	DB	DB	25	50	48	2008	7	27	長野県	佐久市	DB	DB	8	16
6	2007	3	12	福島県	南相馬市	XX	TR	0	0	49	2008	7	27	長野県	小諸・佐久	DB	DB	6	7
7	2007	4	13	静岡県	掛川市	XX	TR	33	0	50	2008	7	27	群馬県	富岡市	DB	DB	2	10
8	2007	4	28	東京都	江戸川区	DB	DB	27	8	51	2008	7	28	静岡県	浜松市浜北	DB	DB	2	58
9	2007	5	10	群馬県	渋川市	XX	DB	22	1	52	2008	7	28	兵庫県	神戸市	DB	DB	32	82
10	2007	5	31	千葉県	富津市	TR	DB	5	1	53	2008	7	28	愛知県	蒲郡市	DB	DB	15	87
11	2007	6	10	千葉県	白井市	TR	TR	5	0	54	2008	8	8	八重山支庁	石垣市	TR	TR	0	0
12	2007	7	12	滋賀県	彦根市	DB	TR	16	0	55	2008	8	8	岐阜県	岐阜市	XX	DB	2	44
13	2007	7	12	愛知県	豊田市	DB	DB	7	21	56	2008	8	9	神奈川県	清川村	XX	DB	19	40
14	2007	7	14	千葉県	匝瑳市	XX	TR	5	0	57	2008	8	12	福岡県	福津市	TR	DB	2	46
15	2007	8	6	富山県	高岡市	DB	DB	4	26	58	2008	8	14	栃木県	都賀	XX	DB	3	3
16	2007	8	20	栃木県	宇都宮市	DB	DB	8	40	59	2008	8	15	鳥取県	鳥取市	XX	DB	26	13
17	2007	8	22	福島県	いわき市	XX	DB	3	72	60	2008	8	16	千葉県	千葉市	TR	TR	1	1
18	2007	9	5	東京都	調布市	XX	TR	0	0	61	2008	8	28	茨城県	つくば市	TR	TR	2	0
19	2007	9	6	埼玉県	深谷市	TR	TR	5	0	62	2008	8	28	茨城県	土浦市	TR	TR	2	3
20	2007	9	6	千葉県	匝瑳市	XX	TR	0	0	63	2008	9	21	徳島県	鳴門市	TR	DB	11	26
21	2007	12	1	山形県	酒田市	TR	TR	1	0	64	2008	9	21	香川県	多度津	DB	DB	19	64
22	2007	12	20	石川県	志賀町	XX	TR	3	0	65	2008	9	27	沖縄県	国頭村	XX	TR	0	0
23	2008	3	14	静岡県	袋井市	XX	TR	18	0	66	2008	10	7	沖縄県	久米島	TR	TR	0	0
24	2008	3	27	鹿児島県	いちき串木	TR	TR	12	0	67	2008	10	7	沖縄県	名護市	TR	TR	2	0
25	2008	3	27	鹿児島県	垂水市	TR	DB	38	7	68	2008	10	10	沖縄県	糸満市	TR	TR	0	0
26	2008	4	7	高知県	土佐清水市	TR	TR	21	0	69	2008	10	10	檜山支庁	江差町	TR	TR	2	0
27	2008	4	9	鹿児島県	枕崎市	TR	TR	0	0	70	2008	10	15	新潟県	新潟市	TR	TR	1	0
28	2008	4	23	愛知県	豊橋市	TR	TR	0	0	71	2008	10	23	三重県	志摩市	TR	TR	0	0
29	2008	5	1	鹿児島県	中種子	TR	TR	1	0	72	2008	10	26	秋田県	にかほ市	XX	TR	2	0
30	2008	5	28	岐阜県	羽島市	XX	TR	0	0	73	2008	10	26	山形県	遊佐町	XX	TR	3	0
31	2008	6	1	秋田県	八峰町	XX	TR	6	0	74	2008	10	26	新潟県	新潟市	TR	TR	1	0
32	2008	6	13	青森県	板柳町	TR	TR	3	0	75	2008	10	26	新潟県	上越市	XX	TR	17	0
33	2008	6	28	高知県	安芸市	TR	TR	43	0	76	2008	10	30	鳥取県	岩美町	TR	TR	0	0
34	2008	7	5	網走支庁	北見市	DB	DB	5	8	77	2008	11	2	秋田県	秋田市	XX	TR	26	0
35	2008	7	6	栃木県	さくら市	XX	DB	4	7	78	2008	11	6	秋田県	秋田市	XX	TR	3	0
36	2008	7	8	富山県	高岡市	TR	TR	0	0	79	2008	11	6	日高支庁	様似町	TR	TR	13	0
37	2008	7	12	東京都	目黒区	DB	DB	2	9	80	2008	11	20	石川県	志賀町	XX	TR	1	0
38	2008	7	22	沖縄県	与那原	TR	TR	0	0	81	2008	11	23	石川県	志賀町	TR	TR	0	0
39	2008	7	23	岩手県	陸前高田市	XX	DB	0	7	82	2008	11	29	秋田県	秋田市	XX	TR	8	0
40	2008	7	25	群馬県	邑楽町	XX	DB	16	38	83	2008	12	5	東京都	品川区	TR	TR	7	0
41	2008	7	25	群馬県	みどり市	DB	DB	17	47	84	2008	12	5	静岡県	富士市	XX	TR	11	0
42	2008	7	27	福島県	郡山市	DB	DB	1	13	85	2008	12	5	神奈川県	横浜市	TR	TR	13	0
43	2008	7	27	石川県	小松市	DB	DB	5	39	86	2008	12	5	静岡県	掛川市	XX	TR	21	0

13 事例，DB 型単独判定で 16 事例が判定されている。TR 型又は DB 型の判定は 25 事例であり，重複は 4 事例であった。竜巻注意情報の発表開始（2008 年 3 月 26 日）以降（赤枠内），黄色で示した 11 事例については，事前に竜巻注意情報を発表している。事例番号 26，41，44，51，52，56，57，64，77，の 9 事例については，今回の突風危険指数による単独判定の拡充により，新たに竜巻注意情報が発表可能となり捕捉率が向上する。

なお，この 9 事例のうち 7 事例はダウンバーストであることが特筆される。従来の予測技術は主に竜巻を対象とするもので，ダウンバーストについては，竜巻が発生する条件ではダウンバーストも発生することがあるという程度であった。今回の DB 型突風危険指数の導入により，ダウンバーストの予測が強化されたといえる。

また，突風危険指数による単独判定を拡張したことにより，総合判定の中で単独判定の比率が増え，ドップラーレーダーから遠い地域でも突風の発生を予測できる機会が増えたといえる。

6.3.5 総合判定のアルゴリズム

前節までの突風の有無判定条件を整理すると，突風の有無を判定するための「総合判定アルゴリズム」は次のとおりとなる。

(1) メソサイクロンと突風危険指数の複合判定

【背景条件】

【現在条件】

①メソサイクロン検出 突風危険指数 ≥ 7

②突風危険指数 ≥ 13 メソサイクロン検出

・突風危険指数は ALL 型を利用する

・背景条件は半径 100km 以内で 1 時間有効

・メソサイクロンのランクは考慮しない

(2) 突風危険指数による単独判定

③竜巻型 (TR 型) 突風危険指数 ≥ 20

④ダウンバースト型 (DB 型) 突風危険指数 \geq

40

上記①～④の判定条件のいずれかを満たした 10km 格子を「突風有り」と判定する。

6.4 竜巻発生確度ナウキャストの作成方法

竜巻発生確度ナウキャストでは，竜巻などの激しい突風が発生する可能性の高さ（発生確度）に

応じて，「発生確度 1」及び「発生確度 2」の分布を解析する。このうち，発生確度 2 は竜巻注意情報の判定条件と同等の発生確度に設定する。また，発生確度 1 は，発生確度 2 と比べて確度をやや低く設定して解析する。

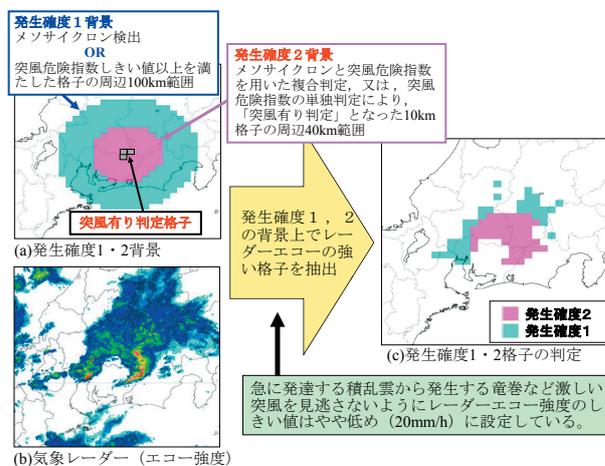
6.4.1 発生確度 2 の分布の解析方法

第 33 図 a の桃色領域で示すように，第 6.3 節の総合判定で「突風有り」と判定された 10km 格子の周辺 40km 範囲内では積乱雲が発生すれば突風の可能性が高いと考え，これを「発生確度 2 背景」とする。発生確度 2 背景となっている状態で，気象レーダー観測によるエコー強度が 20mm/h 以上の格子を，第 33 図 c の桃色領域のように発生確度 2 として解析する。

実際に竜巻などの激しい突風が発生する時は積乱雲が発達しており，エコー強度は 100mm/h 以上になっていることが多いが，既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，エコー強度のしきい値は 20mm/h とやや低めに設定している。

6.4.2 発生確度 1 の分布の解析方法

発生確度 2 の判定条件とした「総合判定」では，メソサイクロン検出と突風危険指数しきい値以上の AND 条件などにより条件を絞り込んだが，発



第 33 図 竜巻発生確度ナウキャストの発生確度 1・2 の解析方法

生確度1では判定条件を緩め、「総合判定」で利用したすべての判定項目のOR条件とする。判定条件を緩めることにより、発生確度2より発表回数は多くなるが、より多くの突風事例を捕捉することが可能となる。

◇発生確度1のOR条件に利用する判定項目

- ・突風危険指数 (ALL型) ≥ 7
- ・突風危険指数 (TR型) ≥ 20
- ・突風危険指数 (DB型) ≥ 40
- ・メソサイクロン検出

第33図aの水色領域で示すように、上記のOR条件を満たした格子の周辺100km範囲内では、積乱雲が発生すれば突風の可能性がやや高いと考え、これを「発生確度1背景」とする。発生確度2を求めたのと同様に、発生確度1背景となっている状態で、気象レーダー観測によるエコー強度が20mm/h以上の格子を、第33図cの水色領域のように発生確度1として解析する。

6.4.3 1時間先までの予測

発生確度1(2)背景は、現在時刻の観測に基づく「突風が発生しやすい状態」の解析であり、1時間以内に新たな状態に変化するという予測はできない。このため、竜巻発生確度ナウキャストでは発生確度1(2)背景という「突風が発生しやすい状態」は判定から1時間持続するとし、これに降水強度の移動予測結果を重ねて、1時間先までの発生確度1(2)の分布を作成する。具体的な1時間先までの予測の作成方法は次のとおりである。

- ・発生確度1(2)背景は、そのままの位置で判定時刻から1時間後まで持続させる。その間に再び判定がない場合は、判定後1時間で消滅させる。
- ・現在時刻における発生確度1(2)背景には、現在時刻の判定だけでなく、過去1時間以内の判定が含まれている。例えば、現在時刻の発生確度1(2)背景の中で、10分前に判定されて継続している部分は、50分後の予測では判定から1時間が経過したため消滅するので、必ずしも現在時刻の発生確度1(2)背景が同じ範囲のまま1時間継続するわけ

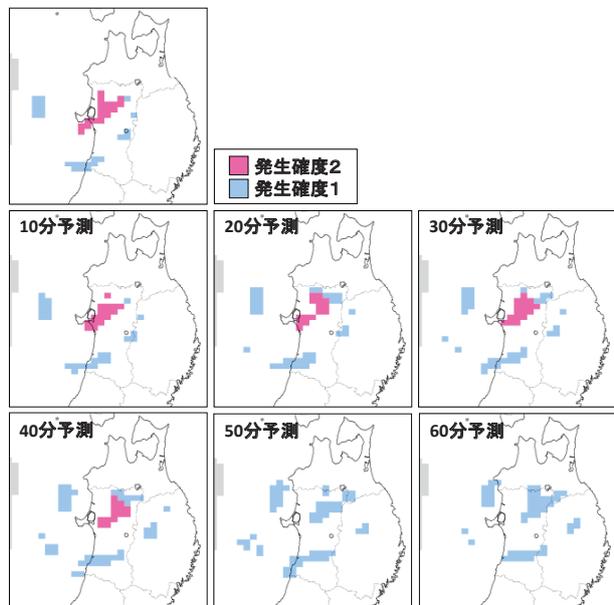
はない。

- ・現在時刻の降水強度の分布を、降水ナウキャストの移動ベクトルを用いて1時間先まで10分間隔で移動予測を求める。
- ・1時間後までの各10分ごとの予想降水強度、及び各時刻の発生確度1(2)背景から、発生確度1(2)格子を決定する。

以上の作成方法を実際の事例に適用すると、第34図のようになる。

6.4.4 竜巻発生確度ナウキャストの評価

2007年4月～2009年3月の2年間(この期間の突風事例数は80)について、発生確度1及び2の精度を検証した。2007年4月～2008年3月は、4つの気象ドップラーレーダーの範囲(東北南部～東海地方)を、また、2008年4月～2009年3月は、11レーダーがドップラー化されたことから全国を検証範囲とした。竜巻発生確度ナウキャストでは、発生確度1(2)背景に一度判定されると、以後60分間はエコー強度が強い格子で発生確度1や2が解析される。本検証では、この



第34図 竜巻発生確度ナウキャストの予測事例(2010年11月12日12時20分初期時刻)

50分予測で発生確度2が消滅しているのは、発生確度2背景の判定がでてから1時間が経過したため。

60 分間に発生確度 1 や 2 となった範囲内のどこかで竜巻などの激しい突風が発生すれば適中としている（格子単位の検証ではなく、発生確度 1 や 2 となった範囲の検証である）。このように、10 分ごとに判定した 6 回分の判定を 1 回の発表と見なして適中率を計算しているため、適中率は（適中事例数／判定回数）ではなく、（適中事例数／（判定回数／6））としている。これは、県単位で発表し、有効時間を 1 時間としている竜巻注意情報の精度検証に近い検証方法である。

(1) 発生確度 2 の判定回数の内訳と精度

竜巻発生確度ナウキャストで、発生確度 2 と判定された回数の内訳の特徴は次のとおりである（第 8 表）。

- ・ 単独判定と複合判定の回数は、それぞれ 1454 回、1519 回と同程度であるが、捕捉率、適中率は単独判定の方がやや高い。
- ・ 単独判定のうち、TR 型と DB 型の判定回数や精度は同程度と良い。
- ・ TR 型と DB 型の判定回数の単純合計は 1631 (874+757) 回であり、単独判定の回数 1454 回との差は 177 回と少なく、両者はほぼ独立して判定されている。これは、捕捉事例数についても言え、捕捉事例数の重複は 2 (9+11 - 18) 事例のみである。
- ・ 複合判定の回数は、突風危険指数 (TP) を現在条件とした場合の方が多く、その分、捕捉事例数も多くなっているが、適中率はメソサイクロンを現在条件とした場合とほぼ同じである。
- ・ 別途個別のデータを調べると、総合判定で捕捉した 24 事例のうち複合判定と重複せずに

第 8 表 発生確度 2 の判定回数の内訳と精度

	総合判定	単独判定	TR型	DB型	複合判定	MC 現在	TP 現在
回数	2382	1454	874	757	1519	884	1386
捕捉数	24	18	9	11	13	7	11
適中率	6.1	7.4	6.2	8.7	5.1	4.8	4.8
捕捉率	30	22.5	11.3	13.8	16.3	8.8	13.8

単独判定のみで捕捉したものが 11 事例あり、その内訳は、ダウンバースト又はガストフロントが 5 事例、竜巻が 2 事例、その他が 4 事例であった。突風危険指数の単独判定によって増える捕捉事例はダウンバーストやガストフロントが多く、突風危険指数を現象別の型で分類した効果が出ていると考えられる。

(2) 発生確度 1 の判定回数の内訳と精度

竜巻発生確度ナウキャストで、発生確度 1 と判定された回数の内訳の特徴は次のとおりである（第 9 表）。

- ・ 発生確度 1 は、メソサイクロン検出により判定される回数の方が多いが、捕捉事例数は突風危険指数で判定した場合より少なく、適中率も低い。
- ・ ただし、第 9 表の内訳には現れない特徴として、寒候期などで突風危険指数が高い値となりにくい場合の突風でも、メソサイクロン検出により発生確度 1 を発表できるという利点がある。
- ・ 突風危険指数は、ALL 型の他に TR 型や DB 型でも数多く判定されているが、TR 型（しきい値 20）や DB 型（しきい値 40）で判定される場合の多くは、ALL 型（しきい値 7）でも判定されていると考えられる。

(3) 発生確度 1 と 2 の精度比較

発生確度 1 と 2 の精度を比較した特徴は以下のとおりである（第 35 図）。

- ・ 発生確度 2 の適中率は約 6%であり、捕捉率は約 30%である。
- ・ 発生確度 1 の適中率は約 2.5%であり、捕捉

第 9 表 発生確度 1 の判定回数の内訳と精度

	総合	MC検出	ALL型	TR型	DB型
回数	13600	9466	6926	1126	925
捕捉数	56	22	44	13	17
適中率	2.5	1.4	3.8	6.9	11
捕捉率	70	27.5	55	16.3	21.3

率は約 70%と、発生確度 2 に比べて適中率は低いが捕捉率は高い。

- ・発生確度 1 と 2 の出現回数の比率は、6 対 1 程度である。

6.4.5 発生確度 1 と 2 の出現頻度分布

2008 年 4 月～2009 年 3 月の 1 年間について、発生確度 1 と発生確度 2 の全国的な出現回数を分布図で示す。

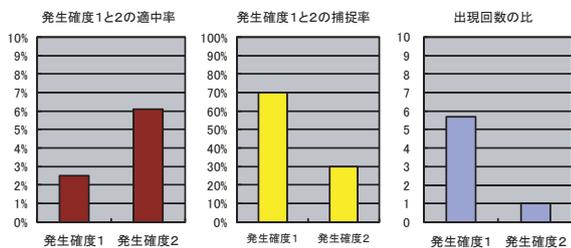
発生確度 1 (第 36 図), 発生確度 2 (第 37 図) とともに, 東北地方～北海道では, 関東地方以西に比べて出現回数が少ないという特徴がある。発生確度 1 で四国南部や九州南部の他, 新潟県, 沖縄県など数カ所で周辺より多い地域があるのは, 気象ドップラーレーダー周辺地域で, メソサイクロンによる発生確度 1 が出現しやすいことに対応している。

発生確度 2 では, 発生確度 1 に比べて地域的な偏りが小さい。発生確度 2 は, 気象ドップラーレーダーの配置に依存しない突風危険指数による単独判定が半数以上を占めることが, 出現頻度の地域的な偏りを小さくしているといえる。

6.4.6 竜巻発生確度ナウキャストの事例

実際に竜巻などの激しい突風が発生した事例について, 竜巻発生確度ナウキャストの解析結果の時系列を示す。

- ① 2010 年 11 月 1 日：千葉県九十九里町で発生した竜巻 (F0) 及びその他突風 (F0), 山武市で

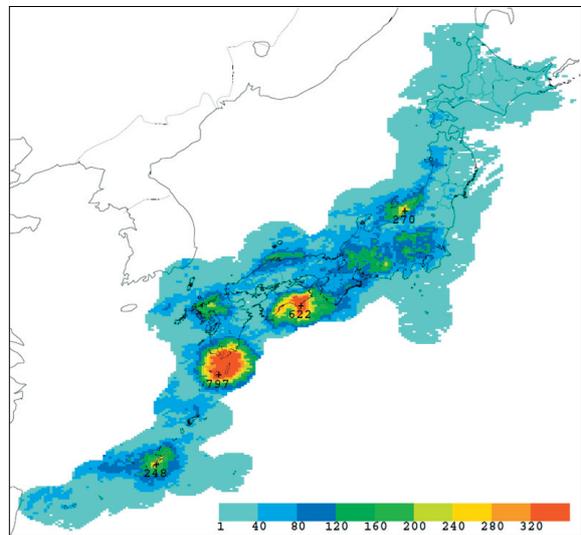


第 35 図 竜巻発生確度ナウキャストの精度検証
期間は, 2007 年 4 月～2009 年 3 月の 2 年間。2007 年度は, 4 つのドップラーレーダーの範囲 (東北南部～東海地方) を, 2008 年度は全国を検証範囲としている。

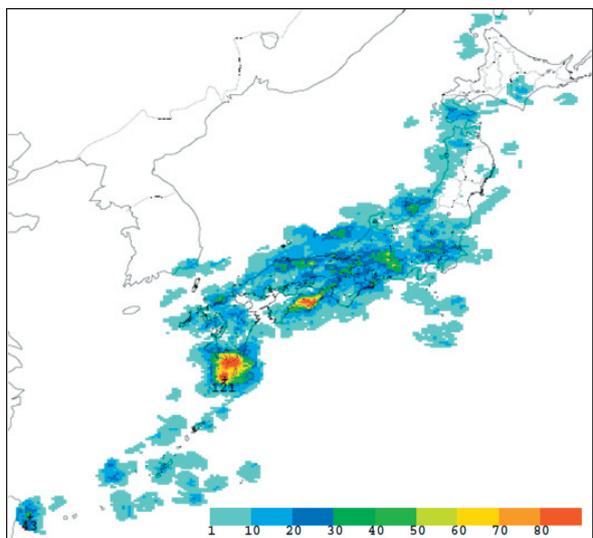
発生したその他突風 (F0) の解析事例 (第 38 図)

これは, 突風が発生する前に発生確度 2 が解析された事例である。関東沿岸を低気圧が北東進し, 関東南部から南西に強いエコー域が帯状に伸びている。強いエコー域の東進に伴い, 発生確度 2 も房総半島を東へ移動している。房総半島に発生確度 2 が解析された約 40 分後～50 分後に突風被害が発生した。

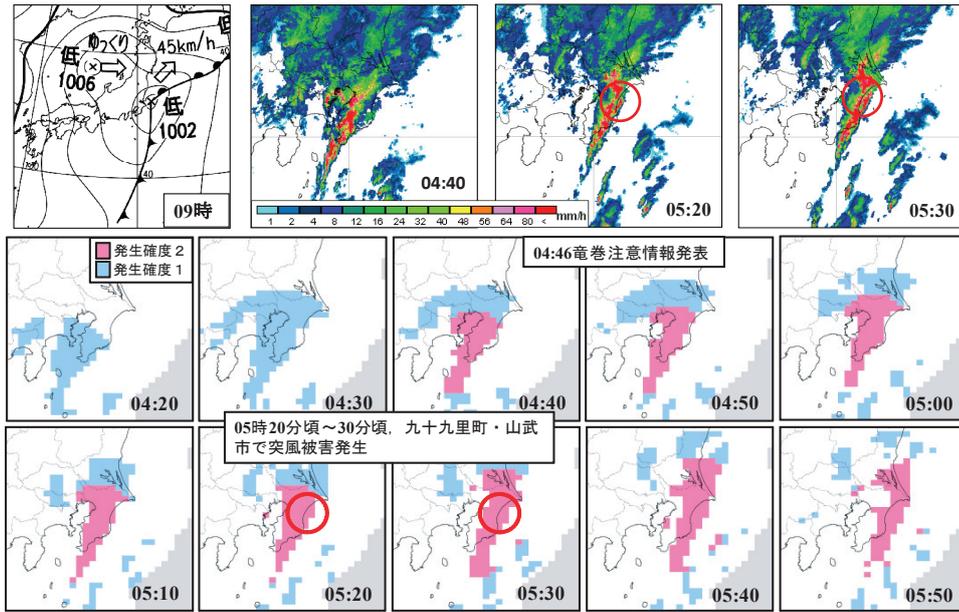
- ② 2010 年 10 月 17 日：秋田県八峰町で発生した竜巻 (F0) 及びその他突風 (F0 以下), 潟上市



第 36 図 発生確度1の出現回数分布 (2008 年 4 月～2009 年 3 月)

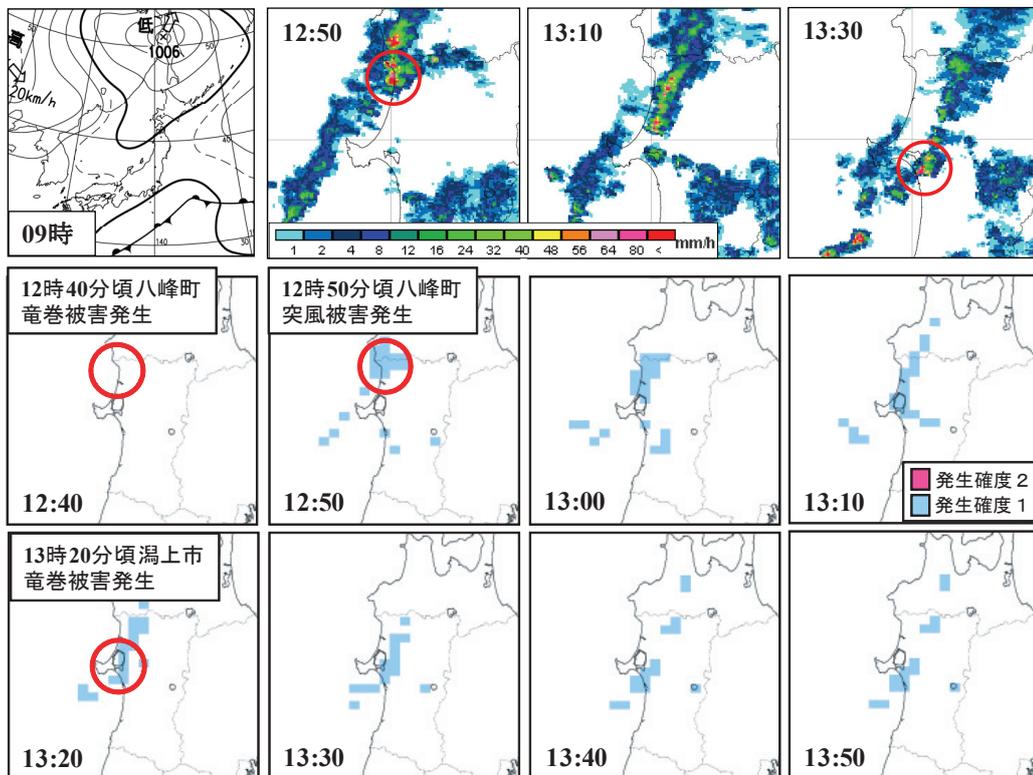


第 37 図 発生確度2の出現回数分布 (2008 年 4 月～2009 年 3 月)



第 38 図 2010 年 11 月 1 日千葉県で発生した突風の解析事例

上段左：09 時天気図，上段中～右：全国合成レーダーエコー強度，中下段：竜巻発生確度ナウキャスト（解析）．突風被害が発生する 40 分前の 04:40 に発生確度2が解析され，千葉県に竜巻注意情報発表．強いエコー域の東進に伴い，発生確度2も東へ移動している．



第 39 図 2010 年 10 月 17 日秋田県で発生した突風の解析事例

上段左：09 時天気図，上段中～右：全国合成レーダーエコー強度，中下段：竜巻発生確度ナウキャスト（解析）．12 時 40 分頃～50 分頃，八峰町で竜巻被害が発生．竜巻発生確度ナウキャストでは，被害発生と前後して発生確度1が解析されている．

で発生した竜巻 (F0) の解析事例 (第 39 図)

これは、突風発生とほぼ同時刻のタイミングで発生確度 1 が解析された事例である。

秋田県八峰町で 12 時 40 分 ~ 50 分にかけて相次いで竜巻やその他突風による被害が発生した。竜巻発生確度ナウキャストでは、突風被害と前後して発生確度 1 が解析されている。このように、突風発生直前やほぼ同時のタイミングで発生確度 1 や 2 が解析される場合もある。一方、潟上市では、竜巻被害が発生する約 30 分前に発生確度 1 が解析された。

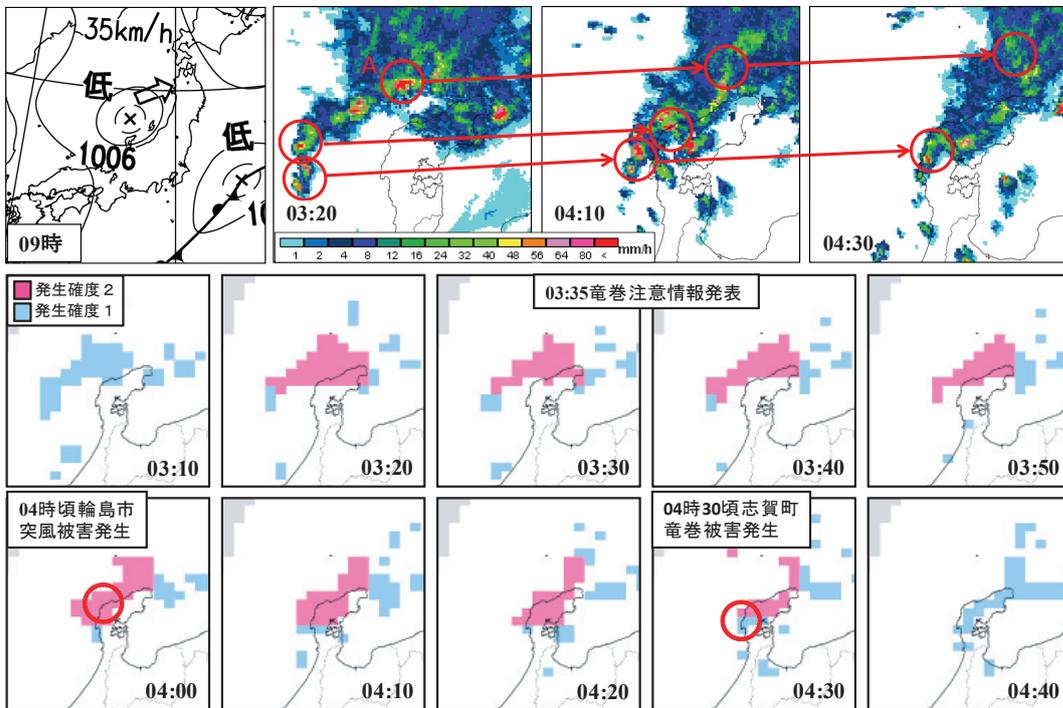
③ 2010 年 10 月 15 日：石川県輪島市で発生したその他突風 (F0) 及び志賀町で発生した竜巻 (F0) の解析事例 (第 40 図)

03 時 20 分には、能登半島の北海上にあるレーダーエコー A に対応して、メソサイクロンが検出されるとともに、突風危険指数値 (ALL 型) が 9 となり、総合判定の複合判定で突風有り と判定された。突風危険指数 9 を計算した格子の半径

40km 以内である能登半島は発生確度 2 背景に入り、エコー強度の強い地域 (20mm/h 以上) では発生確度 2 が解析された。能登半島の北海上の強いエコー域 A は、東進しながら衰弱したが、能登半島の西海上から発達しながら進んできたエコーにより、輪島市や志賀町で突風被害が発生した。「突風有り」と判定された 10km 格子や既に発達した積乱雲のみを対象とするのではなく、「突風有り」と判定された 10km 格子の周辺のある程度広い範囲を発生確度 2 背景として、その中で発達しつつある積乱雲も含めて発生確度 2 と判定する、竜巻発生確度ナウキャストの判定手法が効果を発揮した事例といえる。

6.4.7 竜巻発生確度ナウキャストと竜巻注意情報の関係

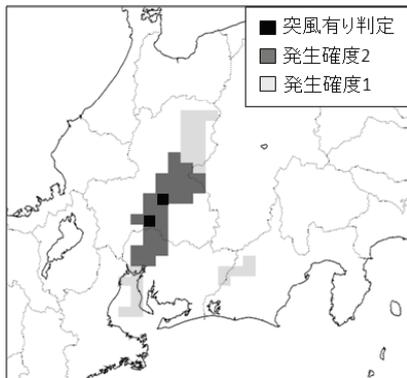
平成 20 年 3 月の竜巻注意情報開始当初は、第 6.3 節の突風の総合判定で述べた「突風有り」と判定された 10km 格子が含まれる県などに対して



第 40 図 2010 年 10 月 15 日石川県で発生した突風の解析事例

上段左：09 時天気図，上段中～右：全国合成レーダーエコー強度，中下段：竜巻発生確度ナウキャスト (解析)．03 時 20 分にレーダーエコー強度図の A のエコーに対応して、メソサイクロンと突風危険指数の AND 条件が成立し、発生確度 2 が解析された。しかし、実際に突風をもたらしたエコーは、A の南西側のもの。判定格子 A の周辺も突風発生直前のポテンシャルが高いとしたことで、事前に予測できた事例である。

竜巻注意情報を発表していたが、平成22年5月の竜巻発生確度ナウキャストの開始からは、「突風有り」判定を基に解析する発生確度2の分布から竜巻注意情報を発表することとした。例えば、第41図では、突風有り判定格子（黒色の格子）が含まれる県は岐阜県のみであるが、発生確度2（濃い灰色部分）がかかる県は岐阜県、愛知県、長野県となり、これら3つの県に竜巻注意情報を発表する。



第41図 発生確度2と竜巻注意情報の関係

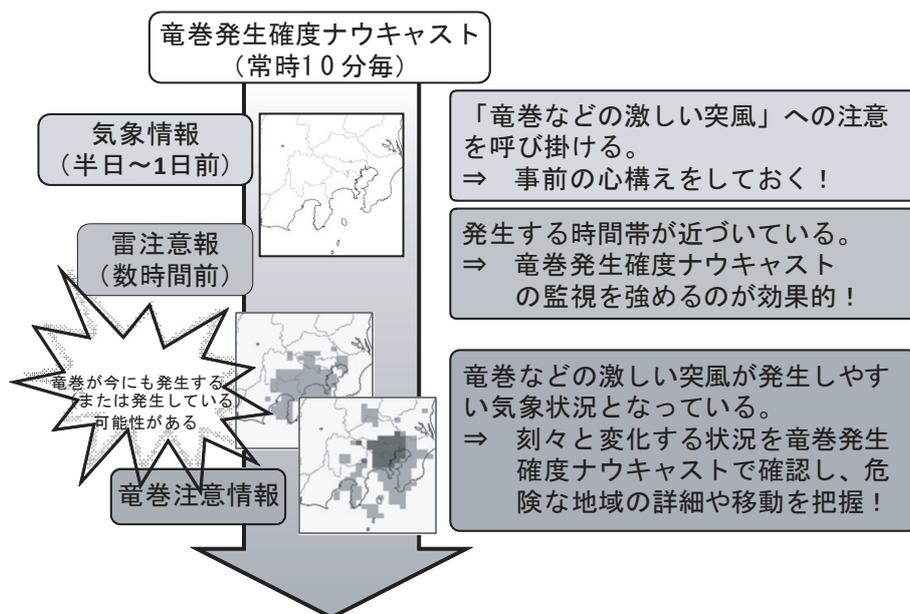
7. 突風に関する気象情報の利用

7.1 竜巻発生確度ナウキャストを含めた突風に関する気象情報の利用

突風に関する各種気象情報の発表タイミングや利用方法について、第42図に示す。

発達した低気圧などにより大雨などの災害が予想される場合、通常半日～1日程度前に、県などを対象に予告的な気象情報（例えば、大雨と雷及び突風に関する〇〇県気象情報）を発表する。このとき、竜巻などの激しい突風も予想される場合には、「竜巻などの激しい突風に注意」という言葉を用いて特段の注意を呼びかける。予告的な気象情報が発表された場合は、事前に行動計画の点検を行い、危険回避行動などを検討しておく。また、今後の気象情報（雷注意報など）に注意する。

雷注意報では、積乱雲に伴う激しい現象（落雷・ひょう・急な強雨・突風）に対して数時間前に注意を呼びかけるが、竜巻などの激しい突風が予想される場合には、「竜巻」を明記して注意を呼びかける。安全対策に時間を要する場合は、危険回避行動を確認する。周辺の気象情報の変化に注意するとともに、竜巻発生確度ナウキャストの監視を強化するのが効果的である。



第42図 突風に関する気象情報の利活用

竜巻発生確度ナウキャストは、10分ごとに常時提供される情報である。発生確度2が現れた県などには竜巻注意情報が発表される。竜巻注意情報が発表された場合は、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移動を把握し、刻々と変化する状況を監視するのが効果的である。

7.2 竜巻発生確度ナウキャスト及び竜巻注意情報の利用上の留意点

竜巻などの激しい突風を精度良く予測することは、現在の技術では困難なため、竜巻発生確度ナウキャストや竜巻注意情報は空振りの多い情報となる。したがって、発生確度1や2の出現、あるいは竜巻注意情報の発表に連動して、直ちに作業の中止や避難などを実施するのは難しいのが現状である。竜巻などの激しい突風は積乱雲に伴って発生することから、まずは周辺の空の状況に注意を払い、例えば「真っ黒い雲が近づき、周囲が急に暗くなる」、「雷鳴が聞こえたり電光が見えたりする」、「ヒヤッとした冷たい風が吹き出す」、「大粒の雨やひょうが降り出す」など、発達した積乱雲が接近する兆候を確認した段階で、現場作業の中断や避難などの行動に踏み切ることが現実的である。

なお、捕捉率の高い発生確度1でも、突風の発生を見逃すことがあるので、発生確度1や2が出ていなくても積乱雲の周辺で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。

8. おわりに

積乱雲がもたらす局地的な大雨や落雷、竜巻などの激しい突風は、現状の技術では高い精度で予測することは難しい。したがって、竜巻などの激しい突風から身を守るには、現象の特徴や気象情報の利用方法について理解を深め、段階に応じて発表される気象情報を有効に利用することが重要である。

気象庁では、積乱雲がもたらす災害から身を守るための知識の普及を目的として、リーフレットを作成

(<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nowcast3/index.html>)するとともに、竜巻発生確度ナウキャストの解説や竜巻などの激しい突風の特徴、突風に関する各種気象情報の利用方法などについての解説を気象庁ホームページに掲載している

(<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/toppuu/tornado0-0.html>)。

これらの解説や竜巻注意情報、竜巻発生確度ナウキャストを、竜巻などの激しい突風災害から身を守るために役立ていただきたい。

謝 辞

竜巻などの激しい突風に関する予測技術の開発にあたり、平成18年に予報部・観測部・気象研究所を中心とした「レーダープロダクト開発プロジェクトチーム」が設置された。予報部予報課では、海老原智、笠原真吾（平成19年～）、瀧下洋一が担当し、突風関連指数の調査、突風危険指数の開発、総合判定手法の開発を行った。気象研究所には、メソサイクロンの自動検出技術や突風関連指数のプログラムを提供していただき、開発の折に触れて技術的なアドバイスをいただいた。観測部にはメソサイクロンの自動検出技術の改良とメソサイクロン自動検出の業務運用を担当していただいた。

竜巻注意情報など新しい情報の提供に当たっては、「突風等短時間予測情報利活用検討会」での議論を経て業務を開始した。田中淳座長（東京大学）を始めとする各委員の皆さまには、大変有意義な意見をいただいた。また、業務開始に向けた様々な準備では、予報部業務課を始め情報通信課及びデータネットワーク管理室、観測部計画課、観測課観測システム運用室のご協力をいただいた。

以上の関係者の方々のご協力に心からお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- Bunkers, M. J., B. A. Klimowski, J. W. Zeitler, R. L. Thompson, and M. L. Weisman (2000) : Predicting supercell motion using a new hodograph technique. *Wea. Forecasting*, 15, 61-79.
- Caracena, F., R.L. Holle, and C.A. Doswell III (1999) : *Microbursts A Handbook for Visual Identification*. US Government Printing Office, 35pp.
- Davies-Jones, R. P., D. W. Burgess, and M. Foster (1990) : Test of helicity as a tornado forecast parameter. *Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms*, Kananskis Park, Alberta, Canada, Amer. Meteor. Soc., 588-592.
- 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.
- Jorgensen, D.P., et al. (1985) : Vertical motions in intense hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, 42, 839-856.
- 加藤輝之, 新野宏 (2007) : 2006 年 11 月 7 日北海道佐呂間町で観測された竜巻の発生環境～雲解像モデルによるスーパーセルの再現結果から～. 気象学会 2007 年春季大会講演予稿集, 92.
- 気象庁 (2007) : 竜巻等による突風災害対策に関する調査報告書. 平成 18 年度災害対策総合推進調整費, 118pp.
- 気象庁観測部観測課観測システム運用室 (2007) : 新しいレーダー観測資料の利用に関する検討—平成 18 年度観測データ高度利用技術担当者会議におけるレーダー三次元データと関連プロダクトの検討結果—. *測候時報*, 74, 35-92.
- 気象庁 (2009) : 竜巻等の激しい突風に関する気象情報の利活用について. 63pp.
- 益子涉 (2007) : 雲解像モデルによる T0613 号に伴う竜巻の再現実験. 気象学会 2007 年春季大会講演予稿集, 90.
- McCaul, E. W., Jr. (1987) : Observations of the hurricane "Danny" tornado outbreak of 16 August 1985. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1206-1223.
- 宮城仁史, 枝元勝悟, 萩尾公一 (2009) : メソサイクロン検出に関する技術情報の共有. *測候時報*, 76, 95-105.
- 水野孝則, 新野宏, 小林文明, 鈴木修, 加藤輝之, 坪木和久, 田村幸雄, 赤枝健治, 海老原智 (2007) : 「竜巻シンポジウム」報告. *天気*, 54, 889-898.
- Moncrieff, M. W. and Miller, M. J. (1976) : The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 373-394.
- 森真理子, 高谷美正 (2004) : 関東地方で発生した降ひょう・ダウンバーストを伴ったスーパーセルの事例解析. *天気*, 51, 568-581.
- Nakazato, M., O. Suzuki, K. Kusunoki, H. Yamauchi and H. Inoue (2009) : Possible stretching mechanisms producing the tornado vortex in the mid-level. *13th Conf. on Mesoscale Processes*, P1.7.
- 新野宏, 野田暁 (2005) : 竜巻の数値シミュレーション: 現状と課題. 第 54 回理論応用力学講演会講演論文集, 54, 57-60.
- 大野久雄 (2001) : 雷雨とメソ気象. 東京堂出版, 309pp.
- 大野久雄, 鈴木修, 楠研一 (1996) : 日本におけるダウンバーストの発生の実態. *天気*, 43, 101-112.
- Suzuki, O., H. Niino, H. Ohno and H. Nirasawa (2000) : Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 1868-1882.
- 瀧下洋一 (2009) : 突風に関する防災気象情報の改善. *天気*, 56, 167-175.
- 瀧下洋一 (2010) : 竜巻発生確度・雷ナウキャスト. 平成 21 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 106-115.
- 瀧下洋一 (2010) : 竜巻発生確度ナウキャストの提供開始. *天気*, 57, 805-810.
- Trapp, R. J., G. J. Stumpf, and K. L. Manross (2005) : A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones. *Wea. Forecasting.*, 20, 680-687.
- 坪木和久 (2007) : 台風に伴う竜巻をもたらす降雨帯の雲解像モデルを用いた数値シミュレーション. 京都大学防災研究所一般共同研究成果報告書, 課題番号 17G-C1.
- 吉野純, 石川裕彦, 上田洋匡 (2002) : 台風 9918 号により東海地方にもたらされた竜巻に関する数値実験. 京都大学防災研究所年報, 45, 369-388.