

## 第3章 竜巻注意情報の改善\*

### 3.1 経緯

平成24年(2012年)5月6日に茨城県及び栃木県で被害を発生させた竜巻を受けて同年7月に取りまとめられた竜巻等突風予測情報改善検討会の提言(気象庁2012)では、竜巻注意情報の改善のために目撃情報を活用することとドップラー気象レーダーの高解像度化やメソサイクロン検出技術の高度化などの更なる技術開発を進めることが求められた。また、2012年5月6日の竜巻被害を受けて内閣府に設置された竜巻等突風対策局長級会議が、2013年9月2日に埼玉県越谷市等で竜巻とみられる突風により大きな被害が発生したことに鑑み、同年12月に取りまとめた「竜巻等突風対策局長級会議報告(竜巻等突風対策局長級会議2013)」では、竜巻注意情報を現在の府県単位から天気予報の発表単位である一次細分区域単位での発表とするよう提言がなされた。これらを受けて、2012年から2016年にわたり竜巻注意情報の精度向上に向けた技術開発や制度設計が行われた。この成果として、2014年9月2日より目撃情報を活用した竜巻注意情報の発表が開始され、2016年12月15日からは竜巻注意情報の一次細分区域単位での発表が開始された。

本稿では、2012年以降に行われた竜巻等突風の予測技術の開発をまとめた。内容は、以下の通りとなっている(2012年以前の開発については、海老原・瀧下(2007)、瀧下(2011)を参照)。

1. 目撃情報を活用した竜巻注意情報(3.2節)
2. 竜巻発生確度ナウキャスト Ver3.4(3.3節): 気象庁レーダー250m データを活用したメソサイクロン検出の高度化等を実施。2014年11月5日~2016年12月15日運用。
3. 竜巻発生確度ナウキャスト Ver4.0(3.4節): 国土交通省Xバンドマルチパラメータ(MP)レーダを用いたメソサイクロン検出の導入及び各種予測指数の改善を実施。2016年12月15日運用開始。
4. これらの改善を元にした竜巻注意情報の一次細分区域単位での発表(3.5節)

### 3.2 目撃情報を活用した竜巻注意情報

平成24年度に開催された竜巻等突風予測情報改善検討会では、竜巻注意情報の捕捉率が約30%、適中率が約5%であり、予測精度の向上が課題であることが指摘された(気象庁2012)。捕捉率と適中率はトレードオフの関係にあるが、捕捉率が不十分な当時の状況下では捕捉率を向上させることが必要であり、そのために目撃情報の活用が検討された。目撃情報を活用すれば捕捉率は向上するが、適中率が下がるようであれば、有用性が減ってしまう。目撃情報を活用した竜巻注意情報の適中率が突風判定と同等以上であれば、適中率は下がらず捕捉率が向上するため目撃情報は有用なものになる。また、2012年5月6日に茨城県と栃木県に大きな被害を生じさせた竜巻では、主要な被害が発生する約15分前に竜巻が目撃されており、同検討会で、目撃情報を後続の竜巻への注意喚起に活用できれば、被害を軽減できるのではないかとの意見が挙がり、目撃情報の活用について検討が始められた。

目撃情報の活用にあたって課題となったのは、目撃情報の信頼性についてであった。意図的に虚偽の情報が寄せられる可能性だけでなく、過去には煙突から排出された煙など竜巻でないものが竜巻と通報されるような事例もあった。そのため竜巻の目撃情報を活用するにあたり、信頼性確保のため、まずは公的機関の職員からの通報に限ることが検討された。また、当初は試行として開始し、目撃情報の有効性を評価することも必要と考えられた。このような検討を経て目撃情報を活用した竜巻注意情報は、2014年9月2日より気象

\*中里真久、西村建志、吉田公一(気象庁予報部予報課)、田中恵信(気象庁観測部計画課情報管理室)

庁職員（航空気象官署及び航空気象観測所（委託観測所を含む））と関東地方の消防本部からの目撃情報に限定して試行という形で開始された。その後、全国の都道府県警察本部から寄せられた目撃情報を 2015 年 5 月以降準備のできたところから、また、全国の消防本部から寄せられた目撃情報を 2016 年 4 月以降準備ができたところから活用することになった（第 3.2.1 図）。



第 3.2.1 図 目撃情報を活用した竜巻注意情報

日本では竜巻の継続時間は平均 10 分程度であり（Niino et al. 1997）、目撃された竜巻に対して注意喚起することは多くの場合難しい。しかし、2000 年からの 12 年間に発生した竜巻に関する調査によれば、同一府県又は隣接府県で、最初の竜巻から 6 時間以内に後続の竜巻が発生した割合が約 3 割あることが明らかとなり（第 3.2.2 図）目撃された竜巻とは別の竜巻に対する注意喚起には効果的と考えられた。最初の竜巻の目撃情報に基づいて竜巻注意情報を発表し、積乱雲の状況に応じて竜巻の危険性がなくなるまで継続して発表した場合、後続の竜巻が捕捉できると考えられる。このときの適中率は約 15%と見積られた。目撃情報を活用する前の竜巻注意情報の適中率（3～5%）よりも大きく、目撃情報を活用した竜巻注意情報の発表は有用といえる。こうして、目撃情報を活用した竜巻注意情報は、目撃された竜巻そのものへの注意喚起を目的としたものではなく、同一府県又は隣接府県で発生する後続の竜巻の捕捉を目的としたものと位置づけられた。

目撃情報を活用した竜巻注意情報は、1) 陸上で竜巻の目撃情報があった場合、2) 沿岸 20 海里以内の海上で竜巻の目撃情報があった場合、3) 陸上及び沿岸 20 海里以内の海上で竜巻等の激しい突風による被害が確認された場合を対象とし（発表対象地域は府県天気予報に準拠）、レーダー等の観測データや気象状況から判断して竜巻が発生する可能性がある場合に発表する。漏斗雲が確認されたとの情報が得られた場合は、気象状況を検討した上で必要があれば通常の竜巻注意情報を発表する。通常の竜巻注意情報の発表後に目撃情報が得られた時も、目撃情報を活用した竜巻注意情報を発表する。目撃情報を活用した竜巻注意情報が発表された府県に隣接する府県の担当官署（隣接府県官署）には、隣接府県で目撃情報を活用した竜巻注意情報が発表されたことを伝える報知電文が自動で発信されるので、隣接府県官署では、この報知電文を受けて、担当府県でも竜巻注意情報を発表する必要があると判断した場合は、通常の竜巻注意情報を発表する。

目撃情報を活用した竜巻注意情報の情報文では、【目撃情報あり】という文言と竜巻が目撃された一次細分区域名を明記し、「竜巻などの激しい突風が発生したとみられます。（府県予報区名又は担当する一次細分区域名）は、竜巻などの激しい突風が発生するおそれが非常に高まっています。」との表現で一層の注意喚起を促す（第 3.2.2 図）。

目撃情報を活用した竜巻注意情報は、2016 年 10 月末までに計 30 回が発表された。そのうち、陸上で発生した竜巻の適中が 1 回（適中率 3%）、海上竜巻を含めると 3 回（適中率 10%）となっている。

## 災害情報等の伝達の在り方(目撃情報の活用による竜巻注意情報の精度向上)

1つの竜巻が発生した場合に、同一府県又は近隣の府県で他の竜巻が発生した複数竜巻の事例(2000年～2012年)

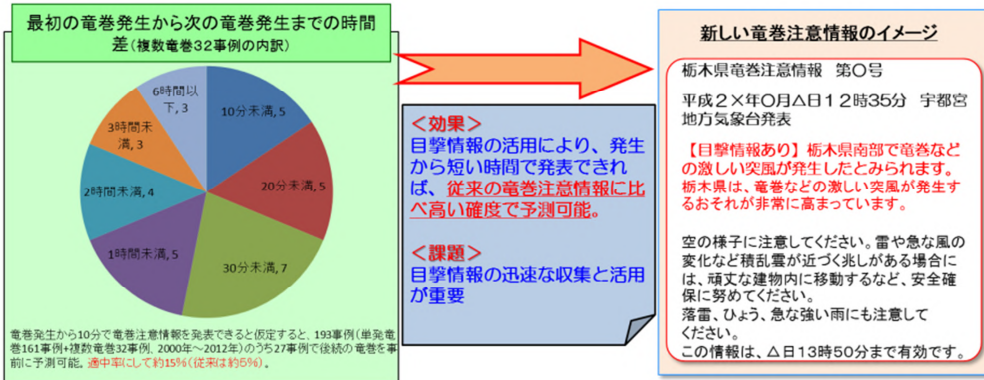
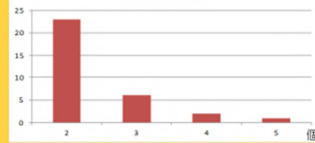
※集計対象: 同一府県又は隣接する府県で、最初の竜巻から6時間以内に別の竜巻が発生した場合

・32事例、計77個の竜巻  
→ 同期間中に確認した竜巻(238個)の約3割

竜巻の発生を覚知した場合、更なる竜巻発生の可能性が高まっている!

複数の竜巻が発生した事例における竜巻確認数の度数分布(2000～2012年)

確認事例数



第3.2.2図 目撃情報の活用による竜巻注意情報の精度向上

「竜巻等突風対策局長級会議」報告(2013)に掲載。

### 3.3 竜巻発生確度ナウキャスト Ver3.4 (2014年11月5日14:00JST～2016年12月15日11:50JST)

竜巻発生確度ナウキャスト Ver3.4(以下、「NOWC ver3.4」)では、気象庁レーダーの解像度を500mから250mに詳細化したデータを用いてメソサイクロン検出の品質管理を強化し、メソサイクロン検出の空振りを減少させた。また、一般気象レーダーのドップラー化によって新たにメソサイクロン検出が可能になったレーダーサイトが増加したことを踏まえ、ALL型とTR型(ALL型やTR型については瀧下(2011)を参照)の突風危険指数の説明変数候補として等高度面エコー強度と等温度面エコー強度を追加し、突風危険指数と突風総合判定基準の見直しを行った。

#### 3.3.1 気象庁レーダー250mデータを用いたメソサイクロン検出

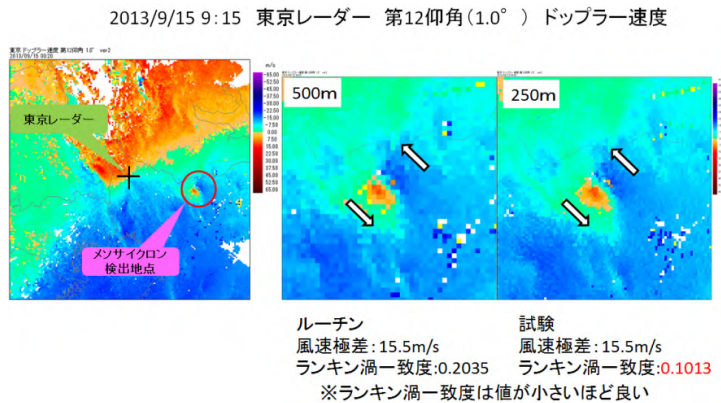
平成25年度より、気象庁レーダーの観測メッシュ(空間分解能)が500mから250mになった。NOWC Ver3.4ではメソサイクロン検出アルゴリズムを250mメッシュに対応させると共に、課題となっていたシークラッター対策が施された。また、2013年9月2日に越谷市等を襲ったF2竜巻の際に見られたグランドクラッター<sup>1)</sup>への対策となる改善も行われた。具体的な改善点は次の2点であり、メソサイクロンの誤検出の軽減及び早期検出によって竜巻注意情報の精度向上が図られた。

1. 250m分解能のレーダー観測データの利用
2. 品質管理の改善(主にクラッターによる影響の軽減)

<sup>1)</sup>本事例では、台風前面や台風の北側に位置する前線によって竜巻とは別の場所で突風判定が沢山立ち、竜巻が発生した場所では判定が立たないという状況となった。調査の結果、山岳地域でグランドクラッター(強度データはクラッター対策されていたが、速度データにノイズが乗ったままであった)によるメソサイクロンの誤検出が頻発する一方、平野部ではwarm rainにより比較的背の低い降水となり突風危険指数が上昇しなかった。

### 3.3.1.1 250m 分解能のレーダー観測データの利用

メソサイクロン検出アルゴリズムは、ドップラー速度の観測結果とランキン渦が作るドップラー速度分布の類似性を最小自乗法で定量化することで行っている。500m データから 250m データに変更して従来通り計算すると、速度分布が急峻になるので、より小さいスケールの渦を検出することが可能となったが(第 3.3.1 図) 誤検出も増えるため品質管理の改善を図った。

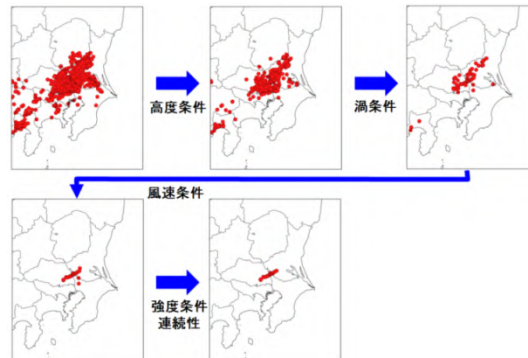


第 3.3.1 図 500m データと 250m データによる検出結果の比較

同じアルゴリズムで検出すると 250m データでは渦周辺の速度分布が明瞭になるため、メソサイクロン検出の精度が高くなる。

### 3.3.1.2 品質管理の改善

メソサイクロン候補の品質管理は、第 3.3.2 図に示すように高度条件、渦条件、風速条件、強度条件、時間連続性について行っている。NOWC Ver3.4 で改善した部分は、高度条件、風速条件、及び強度条件である。この中で、新しく追加した高度条件について以下に記述する(他の変更点は主に数値の変更であり従来どおりの品質管理方法を維持)



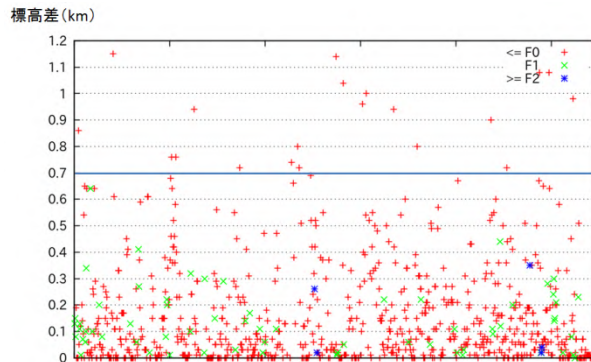
第 3.3.2 図 メソサイクロン候補の品質管理の概要

検出高度、ランキン渦一致度、渦度、風速極差等について経験的に閾値条件を決めて品質管理を行っている。

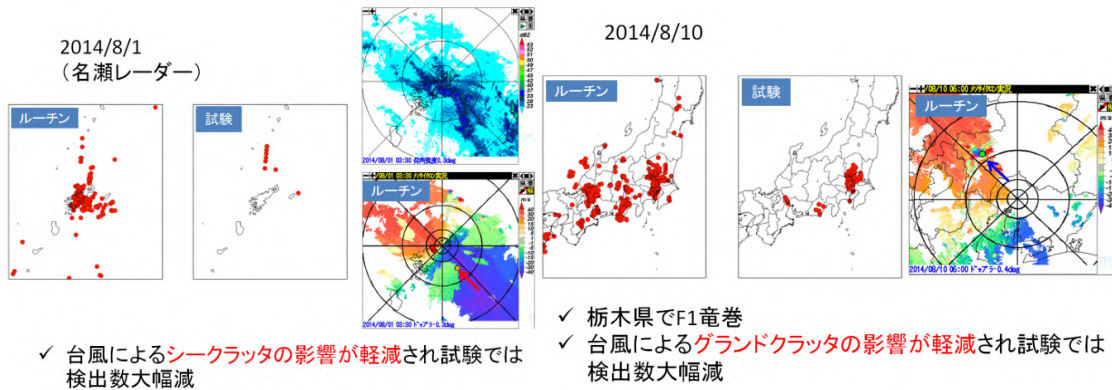
クラッターの影響を受けた格子点のみを速度データから削除することは難しいため、クラッターの影響を受ける高度にある格子は全て検出に利用しないこととする改善を行った。この具体的方法として、従来の高度条件(ア)に、新しい条件として、急峻な山岳地域にある尾根線や孤立峰によるグランドクラッターを除く条件である(イ)と、シークラッターを除く条件である(ウ)を追加し、すべての条件を満たす速度データをメソサイクロンの検出に使用する。

- (ア) メソサイクロン検出高度 > 検出場所周辺の最大標高 + ビーム幅の半分 + (300m)
- (イ) 検出場所から 4km 以内の最大標高差 < 700m
- (ウ) 海上では、仰角 1.0 度以上のデータのみを利用する。

(イ) の条件を課した根拠として、竜巻が発生した地点周辺 4km 以内の標高差 (最大標高 - 最小標高) を調査した結果を第 3.3.3 図に示す。標高差 700m 以上の急峻な地域で起きた突風事例 ( 図中青色の線以上のデータ点 ) は、全体の 2.3% ( 26/1095 ) で全事例とも F0 以下だった。(イ) の条件で本物のメソサイクロンが排除される割合は小さいことが分かる。



第 3.3.3 図 2007 年～2013 年の竜巻発生地点周辺の標高差



第 3.3.4 図 クラッター対策で改善される事例

左)シークラッターによる影響を軽減できた事例( 2014 年 8 月 1 日 )、右)グラウンドクラッターによる影響を軽減できた事例( 2014 年 8 月 10 日 )。赤色の点がメソサイクロンの検出場所。降水強度とドップラー速度の観測データも示している。

以上の条件を取り入れてメソサイクロンの検出実験を 2013 年のデータについて行ったところ、ルーチンに比べ大幅に検出数を削減できた。第 3.3.4 図にシークラッター、及びグラウンドクラッターの改善例を示す。

### 3.3.2 突風危険指数と突風総合判定基準の改善

NOWC Ver3.4 では、突風危険指数の統計予測式の見直し、及び突風総合判定基準の変更を行った。

2008 年 1 月から 2012 年 12 月の 5 年間のデータを元に突風危険指数の統計予測式を作成した。<sup>1)</sup>ALL 型突

<sup>1)</sup> NOWC Ver3.4 の開発期間はドップラーレーダーの整備が進行中であり (平成 24 年度に整備完了) 年が進むにつれて統計データが多くなっている。気象レーダーのドップラー化の前後ではスキャンシーケンス等が異なるため、速度データだけでなく降水強度についても整備前より整備後の方が現在のデータの特性に近く、後になるほど統計利用に適している。

風危険指数とTR型突風危険指数では説明変数候補としていなかった、等高度面エコー強度 dbz1,dbz2,...と等温度面エコー強度 pzt10,pzt20,...も候補に入れ、ステップワイズ法<sup>1)</sup>による説明変数の選択を行った結果、-10 面エコー強度などを説明変数に採用した。この結果、突風危険指数の重回帰式の係数は第3.3.1表のとおりとなった。

次に、突風危険指数の重回帰式の係数更新に伴い、突風総合判定の閾値を見直した。竜巻注意情報の発表回数、適中率、及び捕捉率のバランスを考慮し、メソサイクロンと突風危険指数の複合判定(瀧下 2011)と単独判定の閾値の最適な組み合わせを見出すことで閾値を決定した。

社会からは適中率の向上が求められていることを踏まえて、総合判定では捕捉率を多少犠牲にしても適中率の向上を重視した。総合判定で採用した閾値は第3.3.2表のとおりである。

第3.3.1表 ALL型及びTR型突風危険指数の説明変数の改善前後の比較

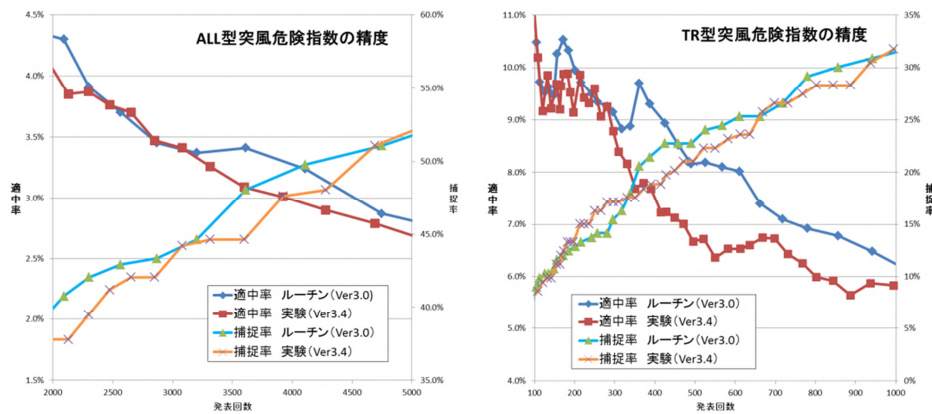
突風危険指数(ロジスティック関数)は $F(Z)=1/\{1+\exp(-Z)\}$ で表される。ここで、ロジットZは表中の値を係数とする説明変数の一次結合である。

説明変数	変数名	ALL型突風危険指数		TR型突風危険指数		備考
		実験	ルーチン	実験	ルーチン	
切片	(Intercept)	-19.3779	-18.55	-20.7139	-19.4764	
エコー強度	iemx	0.02343	0.02576	0.022455	0.024882	
頂高度	hemx	0.139244	0.2318	0.203789	0.125473	
最大反射強度	zmax	-	0.05698	0.066241	0.119466	
最大反射強度高度	zmaxh	-	-	-	0.185984	
鉛直積算雨量	vil	-	0.02654	0.027451	-	
鉛直積算雨量密度	vild	0.383035	-	-	-	
周辺内1mm/h以上の個数	k01r7	0.011698	-	-	0.015582	半径7km以内1mm/h以上の個数
高度2km面反射強度	dbz2	0.056917	-	-	-	
高度14km面反射強度	dbzE	0.040897	-	-	-	
-10 面エコー強度	pzt10r	-	-	0.03116	-	-10 面エコー強度の周囲4km平均
中立浮力高度	EL	-	-	-	-0.00435	地上から高度500mまでを平均した空気塊を持ち上げた場合の中立浮力高度
持ち上げ凝結高度	LCL	0.010943	0.009308	0.010768	-	地上から高度500mまでを平均した空気塊を持ち上げた場合の凝結高度
自由対流高度	LFC	-0.01662	-0.01471	-0.01408	-0.00989	地上から高度500mまでを平均した空気塊を持ち上げた場合の自由対流高度
Showalter's stability index	SSIm	0.278878	0.1561	0.276693	0.306812	ショワルターの安定指数
Total total index	TTIm	0.172746	0.1656	0.153399	0.189247	トータルトータルインデックス
ストームに相対的なヘリシティ	SREH	-	0.001491	-	-	高度3000mまでのSReH(ストーム移動:Bunkers)
シアア平均	Msh	-	-165.4	-	-	地上~高度4kmまでのシアア平均
バルクリチャードソシアア	BRNsh	0.098642	0.1318	0.109226	0.133235	高度500mと高度6kmのシアア(バルクリチャードソシアア)
EHI	EHI	0.285716	-	0.337365	-	Energy Helicity Index = (CAPE x SReH) / 160,000
Tornado Velocity Parameter	TVP	0.03265	0.06225	0.033019	0.051101	竜巻風速パラメータ (Nakazato et al. 2009)
従属資料期間		2008.03-2012.12	2006.01-2010.12	2008.03-2012.12	2006.01-2010.12	

第3.3.2表 Ver3.4で検討した突風総合判定の設定

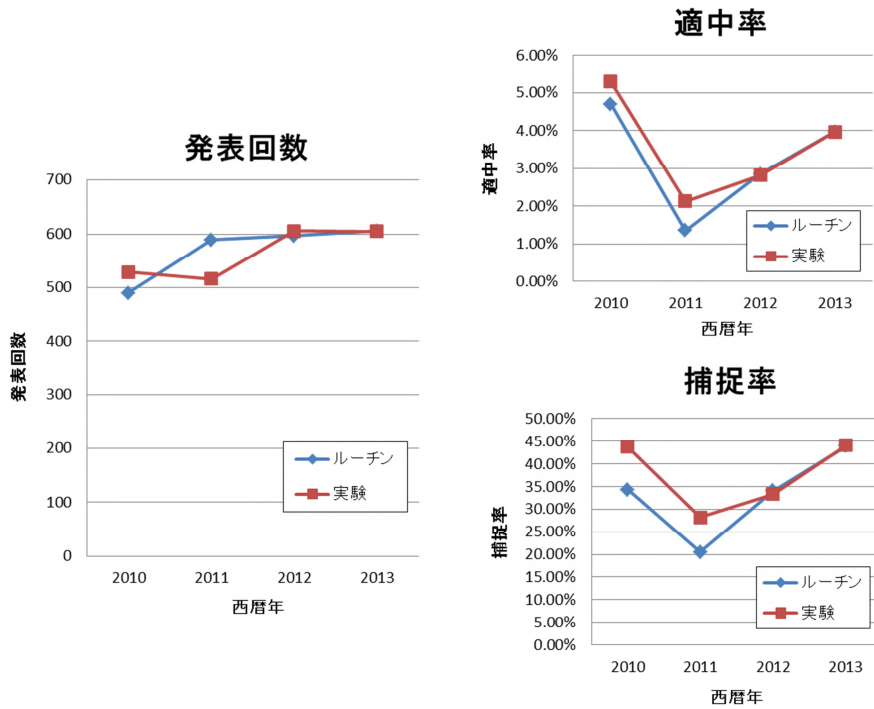
		ルーチン	実験
設定閾値	複合判定 指数背景→MC現在	10	16
	ALL型 MC背景→指数現在	8	14
	単独判定TR型	31	31
結果概要	発表回数	-	微増
	捕捉数	-	増
	適中率	-	微増
	捕捉率	-	増

1) 重回帰分析において、多数の説明変数の中から最適な組み合わせを探る方法。



第 3.3.5 図 ALL 型及び TR 型突風危険指数の精度

横軸は、発表回数、縦軸は適中率及び捕捉率を表す。



第 3.3.6 図 突風危険指数と総合判定基準見直しによる竜巻注意情報の予測精度

2010 年から 2013 年の年毎の発表回数、適中率、捕捉率をルーチンと実験で比較。

第 3.3.5 図に ALL 型と TR 型の突風危険指数による予測精度を示す（以下の予測精度評価はいずれも従属資料に基づく）。ALL 型では、発表回数 2500～3000 となる閾値で、開発時にルーチンとして稼働していた竜巻発生確度ナウキャスト Ver3.0（以下、「NOWC Ver3.0」）の適中率を維持し、捕捉率は若干の低下に留まった。TR 型では、発表回数 200～300 となる閾値で適中率を維持できる。総合判定を NOWC ver3.0 と比較すると、2010 年以降の発表回数はほぼ同じで、適中率と捕捉率はどちらも概ね改善という結果が得られ、個別事例でも改善例が多かった（第 3.3.6 図、第 3.3.3 表）。

### 第3.3.3表 突風総合判定のパラメータ選定実験による個別事例の予測結果

表中の記号の意味は次のとおり。：情報の有効期間内に突風が発生（捕捉）：情報の有効期間外に突風が発生、：情報未発表。橙色が改善、水色が改善。

#### 2011年(結果が異なる事例のみ抜粋)

月日	時刻	県	市町村	ルーチン	実験	藤田スケール	現象
1月5日	18時50分頃	石川県	志賀町	▼	△	0	その他
2月11日	00:20頃	沖縄県	沖縄県豊見城市・南風原町	△	▼	0,0	竜巻、その他
4月25日	13:10頃	千葉県	柏市、鎌ヶ谷市	△	▼	0,0	竜巻
	13:15頃	茨城県	取手市	△	▼	0	ガネフロント
6月21日	17:20頃	栃木県	足利市	△	○	0	ダウンハネ
6月25日	19:00頃	鹿児島県	南九州市	○	○	0	その他
7月11日	17時頃	長野県	長野市	▼	○	0	その他
7月18日	19:10頃～19:30頃	三重県	津市、亀山市	△	△	1,0	竜巻
7月19日	10時頃	栃木県	矢板市	▼	▼	1	竜巻
8月14日	15:20頃～15:40頃	長野県	長野市	▼	△	0,0	その他
8月21日	05:10頃	長崎県	平戸市	△	○	0,0	竜巻、その他
	06:10頃～06:41頃	福岡県	久留米市、福岡市	○	○	0,1	竜巻
	18時頃	和歌山県	印南町	△	○	0	その他
9月7日	11:00頃	渡島支庁	函館市	▼	△	0	その他
9月21日	12:30頃	埼玉県	さいたま市	○	△	0	竜巻
9月23日	17:40頃	秋田県	能代市	△	△	0	その他
10月7日	01:10頃	秋田県	秋田市	△	▼	0	その他

#### 2012年(結果が異なる事例のみ抜粋)

月日	時刻	県	市町村	ルーチン	実験	藤田スケール	現象
2月1日	03時～04:15頃	島根県	出雲市	○	▼	0,0	竜巻、その他
7月5日	17:00頃	青森県	弘前市	▼	○	1	竜巻
7月6日	20:25頃	徳島県	美馬郡つるぎ町	○	○	0	その他
7月7日	05時頃	宮崎県	日南市	○	○	0	その他
7月12日	05:00頃	高知県	芸西村	▼	△	0	竜巻
8月6日	15:30頃	愛知県	春日井市	△	○	0	ガネフロント
8月24日	17時頃	福島県	河沼郡湯川村	△	○	0	その他
9月18日	09時頃	三重県	津市	○	○	0	竜巻
9月18日	17:00頃	岐阜県	海津市	△	▼	0	竜巻
9月25日	17:24	渡島・檜山地方	山越郡長万部町	○	○	0～1	竜巻
9月25日	02時頃	新潟県	佐渡市	▼	△	0	その他
10月5日	08:15頃	秋田県	にかほ市	△	▼	0	竜巻
10月17日	22:30頃	静岡県	藤枝市	○	○	0	その他
10月18日	00時頃	千葉県	長生郡長生村	○	▼	0	その他
10月21日	01:05頃	石狩・空知・後志地方	寿都郡寿都町	○	▼	0	その他
10月23日	00:00頃	高知県	安芸郡奈半利町	○	○	0	竜巻

#### 2013年(結果が異なる事例のみ抜粋)

月日	時刻	県	市町村	ルーチン	実験	藤田スケール	現象
12月10日	10日06時頃	岐阜県	中津川市	△	△	0,0	その他
11月30日	30日20:50頃	新潟県	佐渡市	▼	△	0	その他
12月6日	6日07:00頃	石川県	羽咋市	○	△	0	その他
11月10日	10日17:30頃	東京都	大島町	○	▼	0	その他
11月10日	10日16時頃	東京都	大島町	△	▼	0	その他
10月30日	30日16:45前	新潟県	村上市	△	△	0	その他
9月16日	16日15:30過ぎ	宮城県	石巻市	△	▼	0	その他
8月31日	31日17時頃	石川県	能美市、加賀市	△	○	1,0	その他
8月11日	11日18時から11日18:30頃	群馬県	高崎市・前橋市	△	○	1	ダウンハネまたはガネフロント
5月26日	26日17:20頃	長野県	大町市	△	△	0	その他
3月18日	18日12:45頃	鹿児島県	大島郡伊仙町	△	△	0	竜巻



### 3.3.3 精度評価

気象庁レーダーの250mデータを用いた品質管理の改善と突風総合判定基準の見直しで竜巻注意情報の予測精度がどれほど改善されるか、過去のデータで検証した結果、メソサイクロン検出数は改善前の約1/4になったが、竜巻注意情報の発表回数は約1割減であった（第3.3.4表）。発表回数の減少幅が小さい理由は、複合判定において元々突風危険指数が閾値を越えていなかった場所でのメソサイクロン検出数が減ったためと考えられる。捕捉事例数（適中事例数）を維持しつつ竜巻注意情報の発表回数を低減することができたため、適中率・捕捉率ともに向上させることができた。

第3.3.4表 アルゴリズム更新前後の竜巻注意情報の予測精度

2012年4月～2013年12月のデータを利用して更新後のアルゴリズムで竜巻注意情報の発表をシミュレートし、当時のルーチンの成績と比較した。2012年はレーダーの250m化の整備が行われており、更新整備前のレーダーサイトのデータについては、500m格子から対応する250m格子には同じ値を割り当てた。

2012年(4～12月)	ルーチン	実験	2013年	ルーチン	実験
MC検出数	14366	3054	MC検出数	16533	3913
竜注発表回数	590	570	竜注発表回数	606	532
適中数	16	16	適中数	24	25
突風事例数	45	45	突風事例数	57	57
捕捉数	16	16	捕捉数	25	26
適中率	2.7% (16/590)	2.8% (16/570)	適中率	4.0% (24/606)	4.7% (25/532)
捕捉率	35.6% (16/45)	35.6% (16/45)	捕捉率	43.9% (25/57)	45.6% (26/57)

### 3.4 竜巻発生確度ナウキャスト Ver4.0 (2016年12月15日12:00JST～)

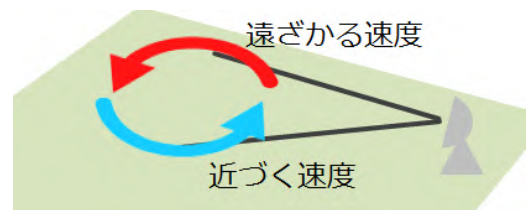
竜巻発生確度ナウキャスト Ver4.0 (以下、「NOWC ver4.0」)では、国土交通省 X バンドマルチパラメータ (MP) レーダを活用したメソサイクロン検出結果を取り入れている。また、メソサイクロン検出結果を突風危険指数の説明変数として利用すると共に、竜巻やダウンバーストの発生に関する最新の知見を取り入れた新しいMSM突風関連指数とレーダーエコー指数を説明変数候補として取り入れ、予測精度を改善している。これにより、竜巻注意情報を一次細分区域単位で発表しても予測精度を改善できることになった。

#### 3.4.1 国土交通省 X バンド MP レーダと気象庁気象ドップラーレーダーの複合利用によるメソサイクロン検出について

##### 3.4.1.1 新しいメソサイクロン検出\*

日本においても大きな被害をもたらす強い竜巻の多くはスーパーセルと呼ばれる積乱雲によるものと考えられるようになっている(海老原ほか 2007)。スーパーセルの内部には、メソサイクロンと呼ばれる渦が存在しており、メソサイクロンの検出は竜巻の実況監視と予測において重要な要素となっている。

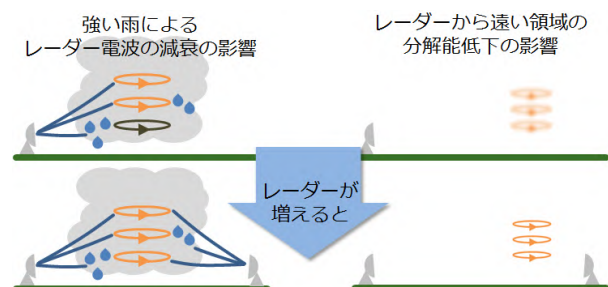
気象庁の気象ドップラーレーダーは、ドップラー効果を利用して降水粒子(雨、雪、あられ、ひょう)の動きを測定することができる。第3.4.1.1図に示すように、地面と平行な面に渦が存在すると、レーダーが観測するドップラー速度データには、レーダーに近づく速度と遠ざかる速度の組み合わせが見られる。この組み合わせを自動的に抽出し、積乱雲内の直径数 km 以上の渦を検出する処理がメソサイクロン自動検出である。気象ドップラーレーダー20基については、メソサイクロン自動検出処理(以下、「従来型」)が5分毎に行われ、その検出結果は、実況監視のみならず、竜巻発生確度ナウキャスト及び竜巻注意情報の発表に利用されている(瀧下 2011)。



第3.4.1.1図 メソサイクロンの検出原理

国土交通省が運用する X バンド MP レーダは、高解像度・高精度の雨量観測データを提供しており、気象庁の高解像度降水ナウキャストに利用されている(木川 2015)。この X バンド MP レーダは雨量観測と同時にドップラー速度観測も実施していることから、気象ドップラーレーダーとともにその観測データを利用した新しいメソサイクロン自動検出を開発した。

その最大の特徴は、本項の表題にもあるように、国土交通省 X バンド MP レーダと気象庁気象ドップラーレーダーの2つのレーダー観測網を複合的に利用している点である。レーダーが積乱雲を観測するとき、強い降水によるレーダー電波の減衰などの影響を受け、ドップラー速度の観測値の精度が低下、または観測できない場合が生じる。また、レーダーから遠い領域では、レーダーの分解能が低下するため、数 km 規模の渦を捉えにくくなる。そこで、新しいメソサイクロン自動検出(以下、「複合型」という。)は第3.4.1.2図に示すように、より多くのレーダーを利用することにより、電波減衰や分解能低下の影響を軽減し、積乱雲の内部の渦をより正確に観測することを目指した。

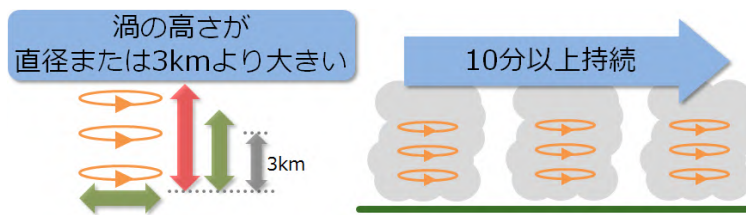


第3.4.1.2図 複数レーダー利用の利点

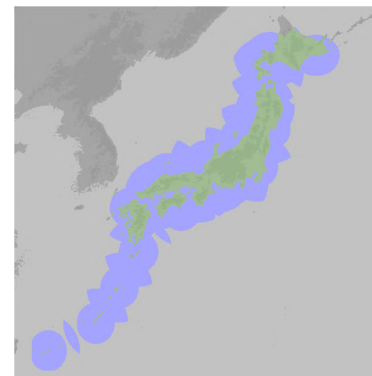
\* 運動学的予測グループ(木川 誠一郎、杉原 良、青木 大佳(観測部)、武樋 路子(現仙台管区气象台))

### 3.4.1.2 検出方法

メソサイクロン内部の速度分布がランキン渦に近似できると仮定して、相互相関法（浜田 1979）によるパターンマッチングを行い、相関係数が0.7以上かつ鉛直渦度が基準値（ $0.5 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ ）以上の場合に、渦パターン（ドップラー速度における近づく速度と遠ざかる速度の組み合わせ）有りと判定し、渦の直径及び渦度を計算する。複数のレーダーが渦を検出しているときは、渦度の最大値とその渦の直径を採用する。渦の高さは、渦度が基準値（ $0.5 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ ）以上の層の上端及び下端高度から計算し、渦の高さが直径よりも大きい、または3km以上で、かつ10分以上継続した場合にメソサイクロンとして検出する（第3.4.1.3図）。メソサイクロン検出は、渦の高さ方向の情報を利用するため、少なくとも2つの仰角による観測が必要であり、その検出領域は第3.4.1.4図に示すように、複雑な形状となっている。



第3.4.1.3図 メソサイクロン検出の条件

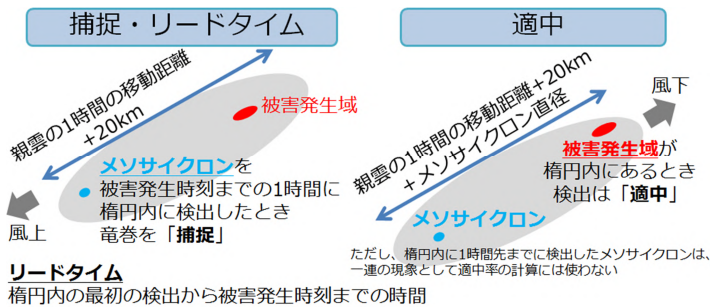


第3.4.1.4図 メソサイクロン検出領域  
緑または水色の部分が検出領域

なお、複合型メソサイクロン自動検出は、気象庁ホームページの竜巻等の突風データベースに掲載している「ドップラーレーダーによる解析結果」の解析手法と一部を除いて同じアルゴリズムである。観測システム運用室が実施した数多くの解析（例えば、2015年度実施は速報解析58事例、前年解析43事例）から得られた知見が、複合型の開発の基礎となった。

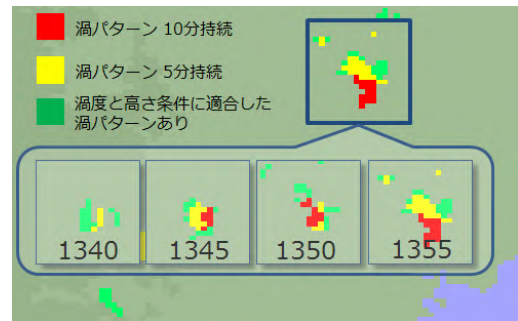
### 3.4.1.3 検出精度

複合型メソサイクロン自動検出の精度検証を56の竜巻事例<sup>1)</sup>について、第3.4.1.5図に示す方法により行った。その結果、捕捉率は7割(従来型4割)と高く、リードタイムも25分程度(従来型10分弱)であり、より多くのレーダーを利用した効果が現れた。しかし、適中率が2%(従来型12%)と低く、空振りが多いことが課題として残っている。このため、複合型は、従来型のメソサイクロン自動検出と併用する方式(併用はor条件、つまり、従来型と複合型のどちらかにメソサイクロンが検出されれば、検出ありとする方式。)により、2016年12月から竜巻発生確度ナウキャストに現業利用されている。



#### 第3.4.1.5図 精度検証の手法

捕捉率とリードタイムの計算では、被害発生域を基準にして風上側に、適中率の計算ではメソサイクロン検出位置を基準にして風下側に楕円の領域を設定した。楕円の短軸は長軸の1/3とした。楕円の大きさと軸方向を決める「風」は、ウィンドプロファイラの観測データから高度8km以下の平均風速・風向を使用した。検証時間範囲は被害発生時刻±1時間である。



#### 第3.4.1.6図 メソサイクロン検出例

メソサイクロンの水平構造の例(2013年9月2日埼玉県さいたま市から茨城県坂東市の竜巻事例。格子間隔は1km)

### 3.4.1.4 今後の改善に向けて

複合型メソサイクロン自動検出では、メソサイクロンの鉛直構造の有無(渦の高さ条件)と10分以上の持続を条件としていることから、クラッター等の非降水エコーによるメソサイクロン誤検出が空振り過多の主要因とは考え難い。むしろ、直径数km規模の渦は、実際には数多く存在し、その一部が竜巻に関係していると考えられるかもしれない。複合型メソサイクロン自動検出では、メソサイクロンと積乱雲の水平・鉛直方向の構造・形状に関する情報も作成しており(第3.4.1.6図)これらの情報を利用して竜巻をもたらすメソサイクロンを見分ける技術の開発を進めたい。

<sup>1)</sup> 事例内訳: 2014年1月~2016年2月の陸上の竜巻事例(藤田(F)スケール0は42事例、F1は10事例) F2~F3事例として、F3(茨城県常総市 2012年5月6日) F2(埼玉県さいたま市 2013年9月2日、鹿児島県徳之島町 2011年11月18日) F1-2(栃木県真岡市 2012年5月6日)

### 3.4.2 MSM 突風関連指数とレーダーエコー指数の改善\*

これまでのMSM 突風関連指数は、大気の安定度、鉛直シアの強さ、あるいはこれらを掛け合わせたものが多かった。これらの説明変数は、竜巻やダウンバーストなどの突風現象の属性量(現象そのものを示す量)を捉えたものではなく、大気の状態変数(現象を発生させる環境場を示すもの)であるため、発生する可能性がある突風現象について、これらの変数の値の大小から竜巻等の激しい突風が発生する可能性、発生できる場所の限定、強さなどについて定量的なことを言うことはできない。

物理法則を用いて、大気の状態変数と竜巻の風速や直径などの属性量を関係付けることにより、より有効な予測指数を作成することができる。本改善で開発した新しいMSM 突風関連指数とレーダーエコー指数のうち主なものを第3.4.2.1表に示す。本開発では、後述のとおりメソサイクロン検出結果についても新たに突風危険指数の説明変数として利用しており、主なものを「メソサイクロン指数」として同表に示している。指数の命名規則として、MSM 突風関連指数は大文字、レーダーエコー指数は小文字、レーダーエコー指数とMSM 突風関連指数から作られた指数は基本的にレーダーエコー指数として取り扱い、先頭の文字を小文字にしている。メソサイクロン指数も小文字で表記し、“mc”で始まる名称としている。表に掲載した主な指数について付録3.Aで説明している。

第3.4.2.1表 新規開発したMSM 突風関連指数、レーダーエコー指数、及びメソサイクロン指数

■MSM突風関連指数 ※ この他に $R_{MC}$ (積乱雲の回転直径)、 $L_{EL}$ (鉛直積算した飽和水蒸気量)など補助的指数がある。

指数	意味	備考
$TVPE_z, TVPE_{zm}$	竜巻が発生できる領域と最大風速	エネルギー保存則から竜巻が発生できる領域を抽出
$R_{TOREz}$	竜巻の予想半径	エネルギー保存則から竜巻が発生できる領域を抽出
$P_{TORS}$	竜巻の種の発生確率	非平衡統計力学に基づく。確率の規格化は行っていない。
$DBV_{di}, DBV_{dim}$	ダウンバーストの推定風速(乾燥断熱)	ダウンバーストが発生できる場所の限定に使用する。
$DBV_{wi}, DBV_{wim}$	ダウンバーストの推定風速(湿潤断熱)	実際に観測される風速の推定値
$DBH_d$	ダウンバーストの厚さ(乾燥断熱)	ダウンバーストが発生できる場所の限定に使用する。
$DBH_w$	ダウンバーストの厚さ(湿潤断熱)	実際に観測されるダウンバーストの厚さの推定値

■レーダーエコー指数

指数	意味	備考
$r_{top}, r_{topE}$	積乱雲の頂高度の予想値に対する割合	積乱雲の発達度合いを表す。
$r_{vil}, r_{vilE}$	鉛直積算雨量の予想値に対する割合	積乱雲の成熟度合いを表す。
$tVP_{tp}, tVP_{mtp}$	竜巻の推定風速(エコー頂で補正)	MSM突風関連指数の $TVPE_z$ をエコー頂で補正。
$svil$	鉛直シアがあるときのvil	鉛直シアによる降水の広がり補正

■メソサイクロン指数

指数	意味	備考
$mcjma$	気象庁レーダーメソサイクロンの有無	
$mcj_{qc}$	$mcjma$ を $R_{MC}$ (回転直径)で品質管理したもの	
$mcxN$	国交省Xバンドメソサイクロンの検出の有無	$N$ は検出条件を表すレベル値。 $N=1\sim6$ 。
$mcxlv$	国交省Xバンドメソサイクロンの検出レベル値	$mcxlv=1\sim6$ 。

### 3.4.3 突風危険指数に関わる改善

突風危険指数に関わる改善を3つ行った。

1つ目の改善は作成方法に関するものであり、対象期間のすべての「突風なし」時における指数を使用して突風危険指数を作成する改善を行った。突風危険指数はロジスティック重回帰分析における統計式であり、その数学的意味は竜巻等の突風が発生する確率である。このため、「発生あり」か「発生なし」と判定するた

\* 中里真久、西村建志(気象庁予報部予報課)

めの突風危険指数の閾値は、適中率よりも小さい値になるはずであるが（理想的には、適中率 100%の時、閾値 50%）従来の適中率約 3%に比べて大きな値となっていた。この原因は、突風危険指数の作成の際に「突風なし」事例を限定して使用したためである。これまでの突風危険指数の作成では、突風が発生しなかったときの各種指数は、過去に突風が発生した場所で、突風が発生した年とは異なる年の同じ月日時のデータに限定して計算に使用していた。そのため、突風危険指数は値が大きめに計算され、それに伴い突風危険指数の閾値も十数%から 30%程度という大きな値になっていた。この作成方法が採用された理由は、各種指数の予測性能が低く、「突風なし」事例を限定しない場合は閾値が小さくなりすぎて予測性能が不安定になる可能性があったためであり、閾値が大きくなるように「突風なし」事例を限定していた。予測指数の改善で適中率の向上が期待できることから、竜巻等の突風が発生する確率という本来の意味のとおりとすることが適当と考えられた。これにより、突風危険指数は突風が発生する確率という本来の意味を持つこととなった。これに伴い、突風危険指数の閾値が 5%程度になっている。

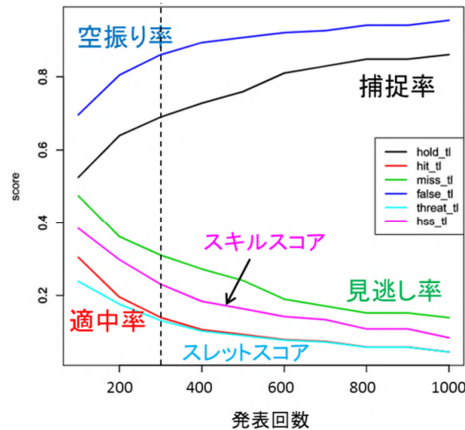
2 つ目の改善は、「突風なし」事例をすべて計算することにより、ロジスティック重回帰分析の時点で、予測精度の評価が可能になるという開発作業上の長所も得られたことである。予測精度の評価を行うためには、竜巻注意情報の有効時間と発表単位を指定する必要があるため、「突風あり」事例と「突風なし」事例の各種指数を計算（サンプリング）した後、一次細分区域毎、1 時間（=有効時間）毎の各種指数の最大値を計算する。その値が閾値を超える場合はその 1 時間内にその一次細分区域内で竜巻注意情報が発表されることが確実であり、その値が閾値を超えない場合は 1 時間内にその一次細分区域内で竜巻注意情報が発表されることはありえない。このデータを用いれば、NOWC Ver4.0 の最適化と同時に、竜巻注意情報の精度を計算することができる。これにより突風危険指数の開発効率が向上し、3 つ目の改善として示す方法で突風危険指数の最適な閾値を自動的に見つけ出すことができる。

3 つ目の改善は、3 つある突風危険指数（TR 型、DB 型、ALL 型）を捕捉率が最大となるように最適化を行う方法を開発したことである。従来の閾値の決定方法は、数通りの閾値を予め設定して竜巻発生確度ナウキャストを数年分計算し、精度評価の結果を比較検討して閾値を決めていた（3.3.2 項「突風危険指数と突風総合判定基準の改善」を参照）が、これにより、閾値を任意の値の中から自動的に決定できるようになった。

最適化の方法は次のとおりである。

1. 3 つの突風危険指数のそれぞれに対して、閾値の初期値 0.5 を設定する。突風あり事例となし事例を完全に分離できるときに閾値 0.5 となる。
2. 発表回数（例えば 100 回）を設定する。
3. 3 つの閾値をそれぞれ仮の閾値にコピーする。
4. 仮の閾値を突風の捕捉数が 1 つ増えるまで下げる。
5. 捕捉数が 1 つ増えたときの発表回数の増加分を計算する。
6. 3 つの突風危険指数について、捕捉数が 1 つ増えたときの発表回数の増加分を比較し、増加分が最も小さい突風危険指数の閾値を下げる。
7. 発表回数が目標値（例えば 100 回）に達したら、そのときの 3 つの閾値と各種スコアを保存する。
8. 新たな発表回数（例えば 200 回）を設定し、上記 2～7 を繰り返す。

このようにして計算した結果の例を第 3.4.3.1 図に示す。この方法で、発表回数を指定すれば、3 つの突風危険指数の最適な閾値とそのときの捕捉率、適中率が同時に決まる。



第3.4.3.1図 突風危険指数の最適化結果

### 3.4.4 突風判定方法の改善

これまでの様々な技術開発によって、突風判定方法の選択肢が広がった。まず、竜巻やダウンバーストの発生に必要な保存則を考慮した指数を整備したことに伴い、従来のようにロジスティック重回帰分析の説明変数としての利用の他に、新しい指数に対して閾値を設定（マスキング）することが考えられる。閾値の設定のしかたとしては、複数の指数に対して閾値を設定し、突風の可能性がないものを予め排除したデータに対してロジスティック重回帰分析を適用する方法と、複数の指数に対して設定する閾値のみでいわば決定論的に判定する方法の2つが考えられる。

メソサイクロンについては、従来は突風危険指数と合わせた複合判定で使用していたが、平成26年度に行った250m分解能のデータの活用と検出アルゴリズムの改善に伴い、メソサイクロンの単独判定の可能性についても検討した。また、メソサイクロン検出結果を突風関連指数やレーダーエコー指数と区別して取り扱う必然性はないため、メソサイクロン検出結果もロジスティック重回帰分析の説明変数の1つとして扱うことも考えられる。

これらを踏まえ、突風関連指数、レーダーエコー指数、メソサイクロン検出結果の3つに対して、異なる取り扱い方を組み合わせた13種類の突風判定方法について、精度検証を行った(第3.4.4.1図)。その結果、検証期間の気象庁レーダーによるメソサイクロンの単独の捕捉率は約46%、適中率は約6%であり、メソサイクロンの単独判定を採用した場合(1又は2を含む判定方法)は空振りが多くなるため適中率の向上が望めないことがわかった。メソサイクロン検出結果を説明変数として取り入れる判定方法では、「ALL型なし」(2を含む判定方法)よりも「ALL型あり」とする方法が有効であることがわかった。決定論的な方法(C-b-2)はアルゴリズムの最適化が難しく採用しなかった。結局、第3.4.4.1図中の赤文字で示す4つの突風判定方法(A-a-、A-a-1、B-a-、B-a-1)を比較し、最も予測精度が良かった次の突風判定方法(A-a-1)を採用することにした。

1. 突風関連指数とレーダーエコー指数について、緩やかな閾値を設定した上で、従来と同じく突風危険指数の説明変数として利用。
2. メソサイクロンについても、他の指数と同じく突風危険指数の説明変数として利用。

【データ種別毎の判定方法】

1. MSM・LFM指数
  - A. 従来どおり（ロジスティック重回帰分析に基づく突風危険指数）
  - B. 従来方法にマスキング
  - C. 決定論（Heaviside関数を用いて“突風危険指数”を作成）
2. レーダーエコー
  - a. 従来どおり（ロジスティック重回帰分析に基づく突風危険指数）
  - b. 物理的方法（Heaviside関数を用いて“突風危険指数”を作成）
3. メソサイクロン
  - α. 従来どおり（複合判定）
  - β. 単独判定を採用（β1：複合判定を併用、β2：単独判定のみ）
  - γ. 突風危険指数に組み入れ（γ1：All型あり、γ2：All型なし）

【組み合わせ】13通り

- 従来方法又はその変形：A-a-α、A-a-β1、A-a-β2、A-a-γ1、A-a-γ2
- 従来方法にマスキング：B-a-α、B-a-β1、B-a-β2、B-a-γ1、B-a-γ2
- 決定論的方法：C-b-β2、C-b-γ2、C-b-Γ2

第3.4.4.1図 検討を行った13種類の突風判定方法の組み合わせ

メソサイクロンの扱いで、2は2とほぼ同じであるが、突風危険指数を使わず直接突風判定を行う。

第3.4.4.1表 ステップワイズ法で選択された説明変数（Ver4.0）

	説明変数
ALL型	iemx, hemx, vil, zmax, vild, k01r7, pzt10r, dbzE, dbzlr, dbzCR, dbzER, maxlvR, r_top, r_vil, tVP_tp, svil, rsvil, LCL, EL, SSIm, TTIm, CAPEm, MLCAP3, SREH, BRNsh, EHI, VGP, TVP, DIV, SWEAT, Msh, TVPEz, PTORS, DBHd, ZEL, LEL, VILen, RMC, RVMC, mcj_z, mcj_V, mcjx6, mcj_qc
TR型	iemx, hemx, vild, k01r7, pzt10r, dbzlr, dbzCR, dbzER, r_vil, r_vilE, tVP_tp, svil, rsvil, LCL, EL, TTIm, CAPEm, MLCAP3, EHI, VGP, DIV, SWEAT, EPTdif, Msh, TVPEz, PTORS, DBHw, ZEL, VILen, RMC, RVMC, mcj_z, mcj_V, mcjx6
DB型	K01r7, pzt10r, dbzlr, dbzER, dbzCR, svil, EL, BRNsh, TVP, ZEL, LEL, RMC, mcj_V, mcjma, mcj_qc

上記1の閾値設定は、*tVP\_tp*と*tVPmp*、*r\_top*などを用い、検証期間の突風事例すべてが閾値を超えるように設定している。竜巻が発生し被害を生じる際は、多くの場合、新しいMSM突風関連指数で兆候が見られるため、この閾値設定は適中率の向上にとって大変有効であった。このアルゴリズムでは、30か月分の従属資料による精度検証結果として、捕捉率約69%、適中率約14%が得られた。

ステップワイズ法<sup>1)</sup>による説明変数の最適化の結果、新たに開発した指数が広く採用された（第3.4.4.1表）。注目に値するのは、ダウンバーストの風速推定のために開発した*DBH<sub>w</sub>*がTR型でも採用されている点である。鉛直シアーから水平渦を作り出したり、水平渦を立ち上がらせるためには積乱雲に伴う下降流が必要との研究があるが（Markowski et al. 2003）、実際にある程度の強さの下降流が発生できるような大気環境でなければ竜巻は発生できないことを示しているのかもしれない。

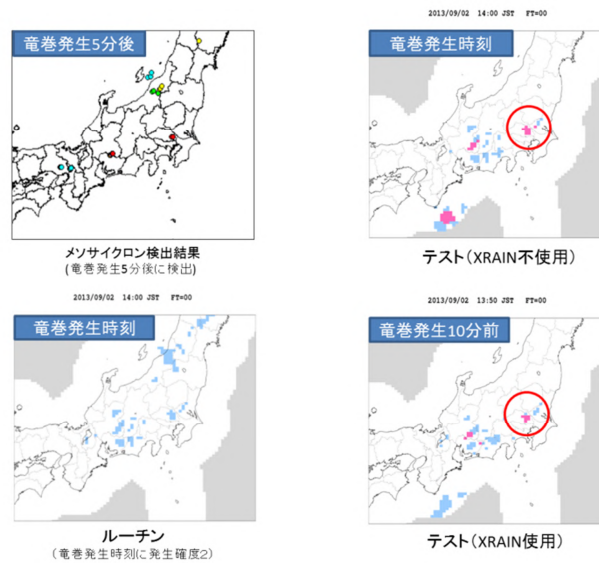
採用した判定方法は、「竜巻が発生するポテンシャルがあり、実際に積乱雲がある場所でメソサイクロンが検出されれば、竜巻が発生する可能性がある」ということであり、人による判断に近いものである。メソサイクロン検出を含めて、複数の説明変数が相互に品質管理をしているような扱いになるため、従来に比べて空振りが減少した。また、単独判定用の突風危険指数（TR型とDB型）は、元々、レーダーから離れた場所でメソサイクロン検出性能が低下することを補うために導入されたが、新しい突風判定方法では、TR型とDB型でもメソサイクロン検出結果を説明変数として用い、遠方では自然な形で連続的に指数単独判定に移行する。

<sup>1)</sup> 3.3.2項の脚注を参照。



### 3.4.5 新しい竜巻発生確度ナウキャストの例

第3.4.5.1図にNOWC Ver.4.0の計算例を示す。ここに示した2013年9月2日に埼玉県さいたま市で発生した竜巻(強さ:F2)の事例では、従来の竜巻発生確度ナウキャストより20分、国土交通省XバンドMPレーダを用いたメソサイクロン検出(以下、Xバンドメソサイクロン検出)を使わない場合より10分早く発生確度2が現れることが確認された。第3.4.5.1表に同年9月に発生した突風について、発生当時のルーチン(Ver3.0)による竜巻注意情報との当否比較結果を示す(9月2日埼玉県さいたま市で発生した竜巻のように、1つの竜巻が複数の一次細分区域をまたいで移動したのものについては一次細分区域ごとに記載されている)。表中の赤色で示される部分が改善している。同年9月15日の和歌山県南部の事例について、この地域で発生する竜巻は捕捉が難しいことが多いが、3事例中2事例が捕捉されており注目に値する。



第3.4.5.1図 竜巻発生確度ナウキャスト Ver4.0の計算例

第3.4.5.1表 竜巻発生確度ナウキャスト Ver3.0との竜巻注意情報の当否比較(2013年9月)

年月日	発生時刻	突風発生場所 (一次細分)	ルーチン		テスト	
			当否	リードタイム(確度2時刻)	当否	リードタイム(確度2時刻)
2013.09.02	14:30頃	茨城県南部	○	20(14:10)	○	40(13:50)
	14:00頃	埼玉県南部	△	-10(14:10)	○	10(13:50)
	14:12頃	千葉県北西部	○	2(14:10)	○	22(13:50)
2013.09.04	6:30頃	高知県西部	○	≥ 50	○	≥ 50
	11:50頃	高知県東部	○	≥ 50	○	≥ 50
	12:20頃	栃木県南部	×	-	○	30(11:50)
	12:50頃	栃木県北部	×	3(12:47) (12:20に発生した竜巻の自撃情報で発表)	○	30(12:20)
2013.09.07	14:20頃	三重県南部	○	≥ 50	○	≥ 50
	13:30頃	胆振地方	×	-	×	-
	14:00頃	和歌山県南部	×	-	○	≥ 50
2013.09.15	17:10頃	和歌山県南部	×	-	○	≥ 50
	18:05頃	和歌山県南部	×	-	×	-
	21:10頃	三重県南部	×	-	×	-
	22:30頃	栃木県北部	×	-	○	≥ 50
2013.09.16	02:17頃	群馬県南部	×	-	○	47(01:30)
	01:30頃	埼玉県北部	×	-	○	30(01:00)
	02:00頃	埼玉県北部	×	-	○	≥ 50
	02:30頃	埼玉県北部	×	-	○	≥ 50
	02:40頃	埼玉県北部	×	-	○	≥ 50
	15:00頃	宮城県東部	×	-	△	0(15:00)
	18:30頃	釧路地方	×	-	×	-
		計	5/21	-	16/21	-
		捕捉率	24%	-	76%	-

### 3.5 竜巻注意情報の一次細分区域化

#### 3.5.1 一次細分区域単位での発表による予測精度の変化と発表方法

府県単位から一次細分区域単位に地域を絞って発表する効果とこれに適した有効時間の設定方法をどのようにするのがよいのかを調べる目的で、NOWC Ver3.4 を用いて竜巻注意情報の一次細分区域単位での発表時の予測精度の評価を行った。本評価では、NOWC Ver4.0 の精度検証は含んでいない。比較期間は、2012年4月から2014年9月までの30ヶ月分（ルーチンとして旧判定が使用されており、250m分解能の気象庁レーダーデータが利用できる期間）とした。発表区分と有効時間の設定に関するシミュレーション結果は次のとおり（第3.5.1.1表）。

- 一次細分区域化によって一連発表回数は平成26年度以前と比べて17%の増加。
- 平成26年度以前と比べると適中率は減少、捕捉率は増加（いずれも僅か）。
- 予報作業上重要である個別発表回数は平成26年度以前と比べて減少。
- 総発表時間<sup>1)</sup>は平成26年度以前比で約40%になる（はずれ感の減少）。
- 有効時間の設定を一次細分区域毎とするよりも、府県で単一とする方が個別発表回数と総発表時間が減少し、一次細分区域化の効果が大きい。

以上より、一連発表の回数が多少増加するものの、適中率と捕捉率に大きな変化はなく、一次細分区域化の効果（総発表時間の顕著な減少）が十分認められる。有効時間の設定は、個別発表回数と総発表時間を考慮して、府県で単一とするのがよい。有効時間の長さを変えてシミュレーションを行った結果は次のとおり（第3.5.1.2表）。

- 一連発表の回数は有効時間に依存しない。
- 有効時間が長くなるに従い適中率、捕捉率共にわずかに増加。
- 個別発表回数は有効時間が長くなるに従い減少。
- 総発表時間は、有効時間が長くなるに従い増加。有効時間を1時間にしたときに一次細分化の効果が最も大きい。有効時間を2時間にすると、現行実績（19時間）と変わりがなく、一連発表回数、適中率、捕捉率と合わせて考えれば、一次細分化を行うメリットがなくなる。

以上より、一次細分化の効果を上げるためには有効時間は1時間のままとするのがよい。

竜巻注意情報を一次細分区域単位で発表した場合を府県単位での発表と比較した具体例として、2013年7月13日に滋賀県で発表された竜巻注意情報の例を第3.5.1.1図に示す。

<sup>1)</sup>1つの一次細分区域1年間あたりの発表時間の合計であり、ここでは一次細分区域化の効果を測るための指標としている。

### 3.5.2 竜巻発生確度ナウキャスト Ver4.0 による竜巻注意情報の精度

NOWC Ver4.0 による一次細分化後の竜巻注意情報の予測精度評価を行うにあたり、Xバンドメソサイクロン検出データは時間の都合上1か月分のみが用意できた。このため、まずはXバンドメソサイクロン検出データを含めないで30か月分のデータを対象とした精度評価を行い、Xバンドメソサイクロン検出データの利点が最大となるように組み込むという方針を採用した。

第3.5.1.1表 府県内で単一の有効時間を設定する場合と一次細分毎の場合の比較

発表区分	有効時間の設定	一連発表回数(回)	適中率(%)	捕捉率(%)	個別発表回数(回)	総発表時間(時間)	備考
府県	府県内で単一	12	2.72	40.25	26	28	旧判定実績(～H26.11)
		9	3.89	45.28	17	19	現行実績(H26.11～)
一次細分	一次細分毎	14	2.48	43.40	24	12	試算
	府県で単一	14	2.38	42.14	23	11	

<参考> 旧判定方法のまま一次細分化した場合

発表区分	有効時間の設定	一連発表回数(回)	適中率(%)	捕捉率(%)	個別発表回数(回)	総発表時間(時間)	備考
一次細分	一次細分毎	20	1.58	38.36	40	18	旧判定方法(～H26.11)

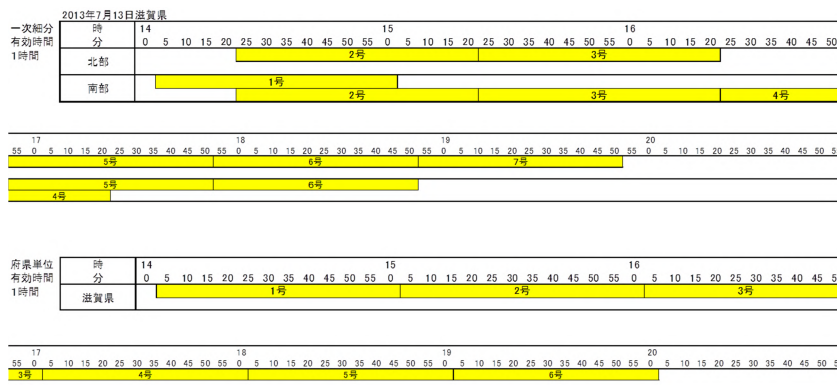
「一連発表回数」：最初の発表から終息までを1回と数えた場合の1府県1年間あたりの回数。

「個別発表回数」：発表毎に1回と数えた場合の1府県1年間あたりの回数。

「総発表時間」：1つの一次細分区域1年間あたりの発表時間の合計(一次細分区域化の効果を測るための指標)

第3.5.1.2表 有効時間を変えた場合の適中率、捕捉率、個別発表回数、及び総発表時間の比較

発表区分	有効時間	一連発表回数(回)	適中率(%)	捕捉率(%)	個別発表回数(回)	総発表時間(時間)	備考
府県	平成26年度以前	12	2.72	40.25	26	28	旧判定実績(～H26.11)
	1時間	9	3.89	45.28	17	19	現行実績(H26.11～)
	1.5時間	9	3.89	45.28	14	23	
	2時間	9	4.06	46.54	13	28	
一次細分	平成26年度以前	20	1.58	38.36	40	18	
	1時間	14	2.48	43.40	24	12	
	1.5時間	14	2.53	44.03	20	15	
	2時間	14	2.64	45.28	18	18	



第3.5.1.1図 現行の府県単位での発表との比較例(2013年7月13日滋賀県)

上：一次細分区域単位での発表であり、府県で単一の有効時間とする設定で、有効時間は1時間とした場合の例、下：対応する府県単位での発表。14時に滋賀県に発表された竜巻注意情報第1号は、一次細分での発表では南部のみに発表される。続けて14時20分に北部に竜巻注意情報第2号が発表されるが、同時に南部にも第2号が発表される。これは、府県で単一の有効時間とする設定を採用したためである。この例では、第4号は北部には出されない。竜巻注意情報は第7号まで出され(府県単位での発表の場合は第6号まで)、府県単位での発表よりも10分早い19時50分に解除される。

3.4.3 項「突風危険指数に関わる改善」で記述した方法で計算された予測精度は第 3.5.2.1 表のとおりである。最適値はリードタイムも変えて計算した。この結果、リードタイム 15 分としたとき、発表回数を約 300 回とすれば、捕捉率 68.9%、適中率 13.9%が得られた。リードタイムの選択では、20 分以上にするとダウンバーストの予測精度の低下やメソサイクロン検出結果が説明変数に採用されないことがあること、米国でもリードタイムは約15分であることなどを考慮した。この最適化の中で、メソサイクロン指数の1つとして、気象庁レーダーメソサイクロン検出の有無（指数名：*mcjma*）が選択された。この指数は、Xバンドメソサイクロン検出の有無と似た特性を持つと考えられる。このため、Xバンドメソサイクロン検出データの使用方法としては、*mcjma*の一部を、Xバンドメソサイクロン検出データを用いた指数である *mcjx6*（Xバンドメソサイクロン検出の品質管理レベル6の有無、又は気象庁レーダーメソサイクロン検出の有無）で置き換える方法を採用した。これにより、適中率をあまり落とすことなく、Xバンドメソサイクロン検出データを使用しない場合と同等以上の捕捉率を確保できることが期待される。検証実験を行った結果、Xバンドメソサイクロン検出データを使用した場合に、リードタイムを10分長く確保できる事例があることが確認された。

第3.5.2.1表 竜巻注意情報の精度評価結果

2012年4月～2014年9月の30か月分のデータを用いた従属資料による評価値。

発表区分	一連発表回数(回)	適中率(%)	捕捉率(%)	備考
府県	12	2.7	40.2	検証期間実績
一次細分	20	1.5	38.3	現在のまま一次細分化した場合の試算
	5	13.9	68.9	開発した技術を適用した場合の試算

## 参考文献

- Markowski, P.M., et al., 2003: Tornadogenesis Resulting from the Transport of Circulation by a Downdraft: Idealized Numerical Simulations. *JAS*, **60**, 795-823.
- Nakazato, M., et al., 2009: "Possible stretching mechanisms producing the tornado vortex in the mid-level", 13<sup>th</sup> Conference on Mesoscale Processes, Salt Lake City, UT.  
(<https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/154933.pdf>)
- Niino, H., et al., 1997: A Statistical Study of Tornadoes and Waterspouts in Japan from 1961 to 1993. *J. Climate*, **10**, 1730-1752.
- 海老原智, 瀧下洋一, 2007: 突風予測技術. 平成19年度量的予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 1-16.
- 木川誠一郎, 2015: 高解像度降水ナウキャストにおける降水の解析・予測技術について. 測候時報, **81**, 55-76.
- 気象庁, 2012: 気象庁竜巻等突風予測情報改善検討会、「竜巻等突風に関する情報の改善について(提言)」.  
([http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/toppuu/24houkoku/H240727\\_houkoku\\_honpen.pdf](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/toppuu/24houkoku/H240727_houkoku_honpen.pdf))
- 瀧下洋一, 2011: 竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について. 測候時報, **78**, 57-93.
- 竜巻等突風対策局長級会議, 2013: 「竜巻等突風対策局長級会議」報告.  
(<http://www.bousai.go.jp/fusuigai/tatsumakikyokucho/pdf/h25-t/houkoku.pdf>)
- 浜田忠昭, 1979: 風計算. GMSシステム総合報告, データ処理解説編(その2), 気象衛星センター技術報告(特別号 -2), 15-42.

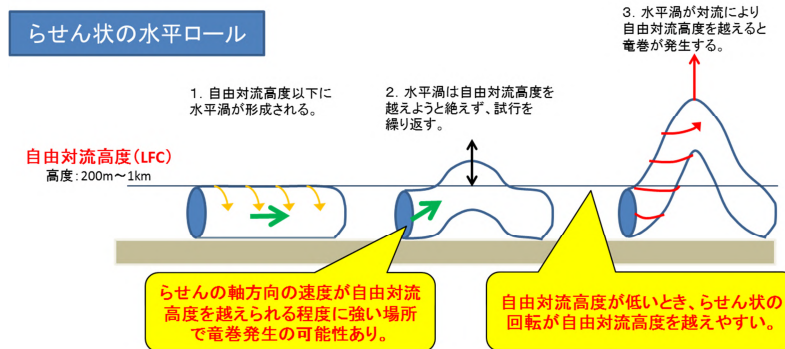
付録3 . A 本改善で開発した主な予測指数

3 . A . 1 竜巻の推定風速と発生可能な場所の限定 (  $TVPE_z$ 、 $TVPE_{zm}$ 、 $R_{TOREz}$  )

竜巻の強い回転風速は渦の引き伸ばしによって生じ、渦の引き伸ばしが強いほど回転風速が強くなる。この渦はいくらでも引き伸ばせるわけではなく、エネルギー保存則による制約を受けている。引き伸ばしに使えるエネルギーの制約で、引き伸ばされる高度の上限は中立浮力高度以下になる。引き伸ばしは鉛直速度  $v_z(z)$  が 0 になる高度まで可能である。鉛直速度をエネルギーに直した軸方向の運動エネルギー  $E_z(z)$  ( $=v_z(z)^2/2$  ) は力学的エネルギー保存の法則から次の式で表される。

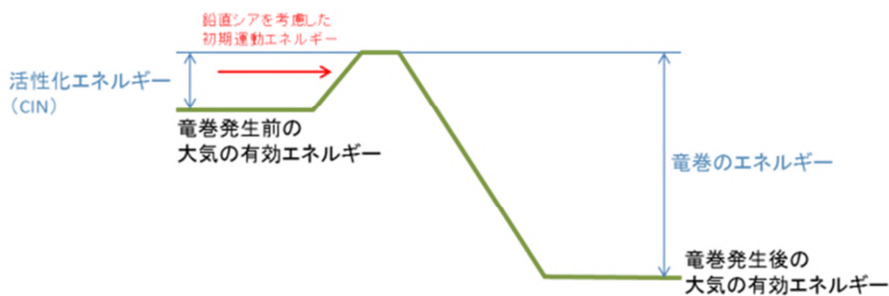
$$E_z(z) \equiv \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\overline{\rho(z)}z}{\rho(z_{LFC})z_{LFC}} \right) \left( \frac{\Delta V}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} v_z(0)^2 + CIN + CAPE(z)$$

ここで、 $z$  は高度であり自由対流高度  $z_{LFC}$  と中立浮力高度  $z_E$  の間の値を取る (  $z_{LFC} \leq z \leq z_{LNB}$  )



第3.A.1.1図 らせん状の水平ロールと竜巻渦の発生のイメージ

$\overline{\rho(z)}$  は地上から高度  $z$  までの平均大気密度、 $V$  は自由対流高度での風ベクトルと地上の風ベクトルの差の大きさ、 $CIN$  は対流抑制、 $CAPE(z)$  は自由対流高度から高度  $z$  までの対流有効位置エネルギーである。この式で  $v_z(0)$  は第3.A.1.1図の緑色の矢印で示される「らせん状の水平ロールの軸方向速度」であり重要な物理的意味を持つが、計算方法等の詳しい説明は長くなるため割愛する。自由対流高度では、 $E_z(z)$  の式の右辺第1項目と  $CAPE(z)$  が 0 になり、軸方向の運動エネルギー (  $v_z(0)^2/2$  ) と  $CIN$  の和になる。この和が負になる時は、竜巻は発生しない。第3.A.1.2図に示すように、 $CIN$  は化学反応における活性化エネルギーの役割を持っており、軸方向の運動エネルギー ( 図中の赤矢印 ) が  $CIN$  の壁を越えるのに十分な大気状態の場所でのみ竜巻が発生する可能性がある。



第3.A.1.2図 竜巻発生時の大気エネルギー関係

らせん状の水平ロールが自由対流高度を越えた後、 $E_z(z)$  が正である間は渦の引き伸ばしが可能であり、0 になるまで引き伸ばされる。このときの高度を  $z_{ELEz}$  とすると、発生が予想される竜巻渦の最大の回転風速

$TVPE_z$  (Tornado Velocity Parameter constrained by  $E_z$ ) は連続の方程式と角運動保存則を用いて次の式で計算される (Nakazato et al. 2009)。

$$TVPE_z \equiv \eta(z_{ELEz}) \frac{\Delta V}{2}$$

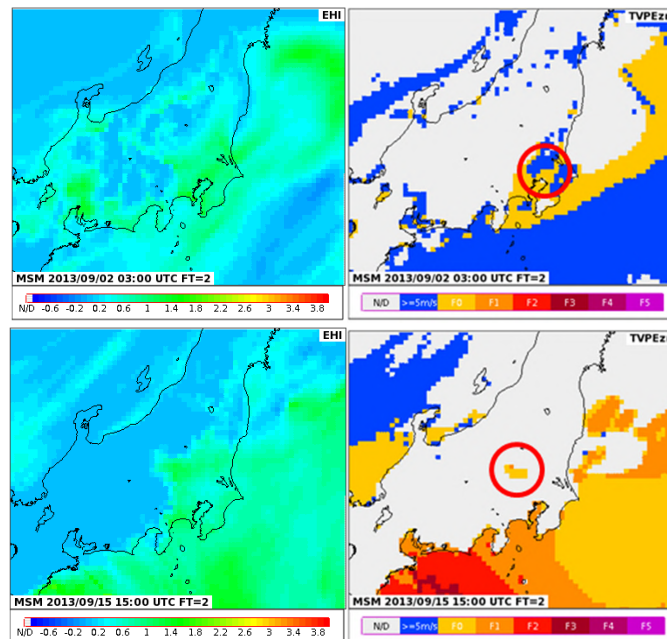
$$\eta(z_{ELEz}) \equiv \sqrt{\frac{\rho(z_{ELEz}) L_{adv}}{\rho(z_{LFC}) z_{LFC}}}$$

ここで  $L_{adv}$  は竜巻渦の長さである。移動している竜巻で生じる最大風速を地上から観測した場合は、上記の回転風速に移動速度が加わる。地上で観測される竜巻の最大風速の推定値  $TVPE_{zm}$  は次のようになる。

$$TVPE_{zm} \equiv TVPE_z + V(z_{LFC})$$

ここで  $V(z_{LFC})$  は、自由対流高度における一般場の風速である。

第3.A.1.3図では2013年9月2日にさいたま市で発生した竜巻 (T130902) と2013年9月16日に埼玉県比企郡滑川町で発生した竜巻事例 (T130916) について、竜巻の発生予想によく使われるエネルギーヘリシティインデックス  $EHI$  (海老原・瀧下 2007) と  $TVPE_{zm}$  を比較している。T130902 では、 $EHI$  は関東地方全域と中部地方で竜巻の危険性を示しているが、 $TVPE_{zm}$  では南関東で竜巻の可能性を示している。T130916 でも、 $EHI$  は関東地方全域で高いが、 $TVPE_{zm}$  では陸上で竜巻の危険性を示しているのは竜巻が発生した埼玉県と群馬県の一部地域のみである。なお、中部地方の南海上で値が大きくなっているのは、台風の接近で  $V(z_{LFC})$  が大きくなっているためであり、 $TVPE_z$  などの他の指数を併用することで一般場の風速が大きい場合に、誤って利用する危険性を排除できる。 $TVPE_{zm}$  の特徴は、竜巻が発生する可能性がない場所を排除できること (図中の白色の部分) 竜巻の推定風速値が得られるため、被害を発生させるような竜巻の発生領域を限定できることである。



第3.A.1.3図 エネルギーヘリシティインデックス  $EHI$  (左) と竜巻風速パラメータ  $TVPE_{zm}$  (右) の比較

図は、次の日/場所で竜巻が発生した時刻の分布図である。上：2013年9月2日さいたま市、下：2013年9月16日埼玉県比企郡滑川町等 (近隣で計5つの竜巻が発生)。

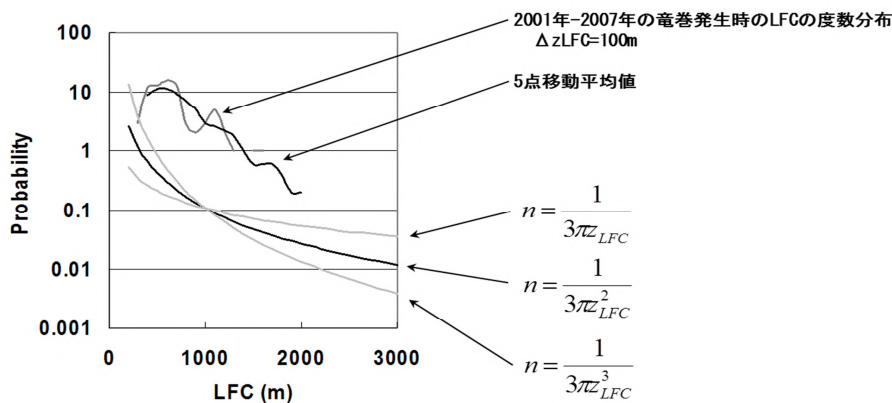
### 3.A.2 竜巻の種の発生確率 ( $P_{TORS}$ )

軸方向の運動エネルギー  $E_z(z)$  が竜巻を起こすのに十分であったとしても、軸方向の速度成分  $v_z(0)$  が水平方向を向いたままでは竜巻は発生できない。竜巻の元となる水平渦は、絶えず上向きに変位したり、元に戻ったりしていると考えられる。上向き変位量が自由対流高度  $z_{LFC}$  を超え、軸方向の速度を元に対流が開始できる場合に竜巻渦が成長すると考えられるが、この確率  $P_{TORS}$  は Langevin 方程式から  $z_{LFC}$  の二乗に比例する。

$$P_{TORS} \equiv \frac{2}{3\pi z_{LFC}^2}$$

$P_{TORS}$  は  $m^{-2}$  の単位(次元)を持ち、意味としては単位面積当たりの竜巻の発生確率に関係した量と考えられる。竜巻の発生確率としては、実際には地表面の状態など様々な要因が関与していると考えられ、また、確率の規格化が行われていないが、ロジスティック重回帰分析の説明変数としての利用が可能である。 $P_{TORS}$  の表式は、「竜巻は自由対流高度  $z_{LFC}$  が低いときに発生しやすい」ことを表しており、米国での観測による研究結果と同じ内容である。

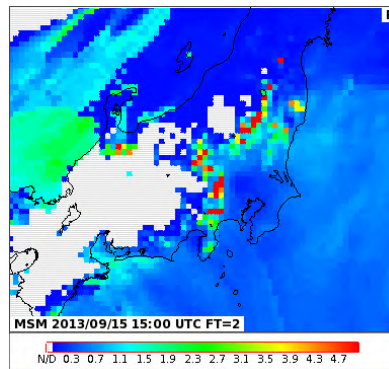
竜巻の発生数と自由対流高度の関係を検証するために、2001年から2007年に発生した竜巻について、竜巻発生時の自由対流高度  $z_{LFC}$  の度数分布を求め、それを  $P_{TORS}$  と比較した(第3.A.2.1図)。図では100m毎の度数を曲線として表したものの、5点移動平均曲線、理論曲線、及び比較のため、 $z_{LFC}^{-1}$  と  $z_{LFC}^{-3}$  の依存性を示す曲線が描かれている。竜巻の発生数は、自由対流高度が低いほど多い。度数分布(5点移動平均値)の傾きは、 $z_{LFC}^{-2}$  に最も近い結果となっていることが分かる(縦軸は対数であることに注意)。第3.A.2.2図に  $P_{TORS}$  の例を示す。竜巻が発生した群馬県と埼玉県を含む北関東で高い値が現れている。



第3.A.2.1図 竜巻発生時の自由対流高度 ( $z_{LFC}$ ) の度数分布と  $P_{TORS}$  の比較

図では100m毎の度数を曲線として表したものの、5点移動平均曲線、理論曲線 ( $z_{LFC}^{-2}$  の依存性を示す) 及び

比較のため、 $z_{LFC}^{-1}$  と  $z_{LFC}^{-3}$  の依存性を示す曲線が描かれている。



第3.A.2.2図 P<sub>TORS</sub>の例

2013年9月16日1時30分から2時40分にかけて埼玉県比企郡滑川町とその近隣で計5つの竜巻が発生した。

### 3.A.3 ダウンバーストの推定風速 ( $DBV_{ip}$ , $DBV_{im}$ , $DBH_{ip}$ , $DBV_{is}$ , $DBV_{dm}$ , $DBH_d$ )

降水の蒸発によって、高度  $z_0$  で仮温度  $T_{v,parcel}$  の空気塊が生じた場合、周囲の仮温度より低い時は空気塊が降下し、ダウンバーストの元になる下降流が生じる。地上に到達した場合の鉛直速度  $v_z(0)$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) は次の式で表される。

$$v_z(0) = \sqrt{2g \int_{z_0}^0 \frac{T_{v,parcel} - T_v}{T_v} dz}$$

ここで、 $g$  は重力加速度 ( $\text{ms}^{-2}$ )、 $T_v$  は高度  $z$  での仮温度 (K)、鉛直速度は下向きを正としている。地上に到達した空気塊は周囲に広がるが、このときの水平風速分布  $v_r(r)$  は、連続の方程式から次の式で計算できる。

$$r \geq \sqrt{\frac{S}{\pi}} \text{ のとき} \quad v_r = \frac{v_z(0)S}{2\pi H} \frac{1}{r}$$

$$r \leq \sqrt{\frac{S}{\pi}} \text{ のとき} \quad v_r = \frac{v_z(0)}{2H} r$$

ここで  $S$  はダウンバーストの断面積 ( $S = R_{MC}^2$ 、 $R_{MC}$  は第3.A.7で定義)、 $H$  はダウンバーストの厚さ、 $r$  はダウンバーストの中心から測った水平距離である。水平風は、重力流として伝搬する際、次の式で表すことができる。

$$v_r = \sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho} H}$$

は重力流 (ダウンバースト) の大気密度、 $\rho$  はダウンバーストの大気密度と周囲の空気の大気密度の差である。上式を解いて、ダウンバーストの推定風速と厚さを次の式で計算できる。

$$v_r = \left( \frac{v_z(0)S}{2\pi r} g \frac{\Delta T_v}{T_v} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad H = \left( \frac{\rho v_z(0)^2 S^2}{4\pi^2 g \Delta\rho r^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

空気塊の降下時、乾燥断熱的に降下する場合と湿潤断熱的に降下する場合が考えられる。乾燥断熱的に降下



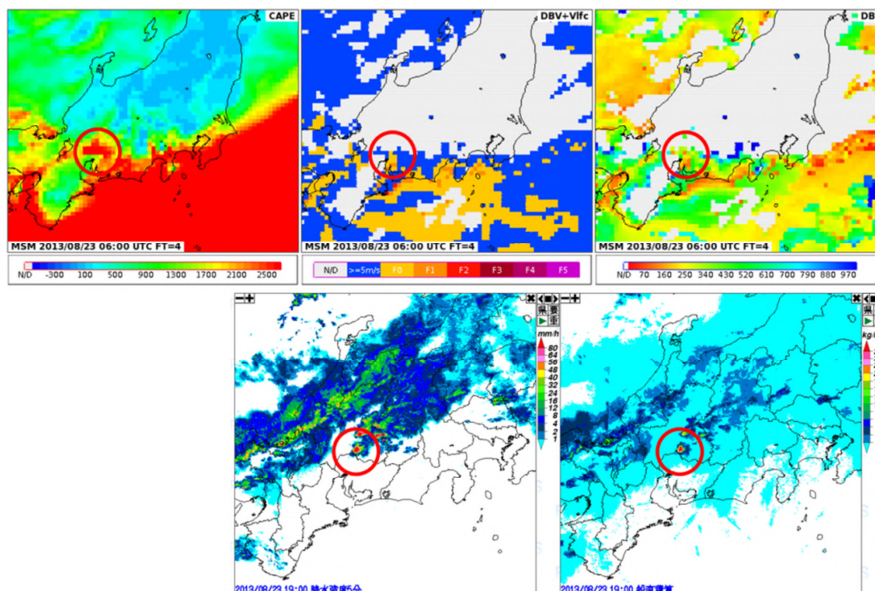
させたときの  $v_r$  を  $DBV_d$  (DownBurst Velocity dropped with dry adiabatic lapse rate) 湿潤断熱的に降下させたときの  $v_r$  を  $DBV_w$  (DownBurst Velocity dropped with moist adiabatic lapse rate) と表す。また、対応する厚さ  $H$  をそれぞれ  $DBH_d$ 、 $DBH_w$  で表す。

ダウンバーストの場合も、竜巻の場合と同様に、移動速度を加えることによって予想される最大風速値が得られる。ダウンバーストの場合は、高度  $H/2$  における一般場の風速を加えることで、最大風速を推定する ( $DBV_{dm}$ 、 $DBV_{wm}$ )。これまでの検証では、ダウンバーストの発生場所の特定は  $DBV_{dm}$  でよく表現され、現地調査によるダウンバーストの強さは  $DBV_{wm}$  に近い値である。これは次のように考えられる。ダウンバーストは下降流であるため、本来的には乾燥断熱的に下降する。このため、発生場所の特定は  $DBV_{dm}$  でよく表現される。しかし、ひとたびダウンバーストが発生すると下降中の空気が周囲の雨滴を蒸発させることで熱が奪われ温度が低下することで、風速の大きさは結果的に  $DBV_{wm}$  に近くなる。

第3.A.3.1図に  $DBV_{dm}$  (上中図) と  $DBH_d$  (上右図) の例を示す。鉛直積算雨量 (右下図) でダウンバースト発生の前兆が捕らえられているが、陸上では該当場所の  $DBV_{dm}$  が最も高い値となっており、 $DBH_d$  は最も薄くなっている。このようにして、ダウンバーストの発生を適切に予想できる。

### 3.A.4 積乱雲の発達程度 ( $r_{top}$ 、 $r_{vil}$ 、 $r_{topE}$ 、 $r_{vilE}$ )

MSM 突風関連指数とレーダーエコー指数は、突風危険指数の説明変数としての使い方に違いはないが、MSM 突風関連指数は1時間毎のデータであるため、竜巻発生確度ナウキャストの発生確度2のタイミングはレーダーエコー指数が握っている。中でもエコー頂高度と鉛直積算雨量は積乱雲の発達段階を知る上で重要であるが、エコー頂高度や鉛直積算雨量がどこまで成長すれば突風が発生しやすいのかは大気状態によって様々である。特に竜巻では、値が大きなくても発生する場合もあるため、あまりよい説明変数になっていないという課題があった。



第3.A.3.1図  $DBV_{dm}$  と  $DBH_d$  の例

2013年8月23日岐阜県美濃加茂市で発生したダウンバースト。上左図：CAPE、上中図： $DBV_{dm}$ 、上右図： $DBH_d$ 、下左図：降水強度、下右図：鉛直積算雨量 ( $v_{il}$ )。

MSM 突風関連指数として、対流の最大の高さの目安である中立浮力高度  $EL$  が求められる。予想される強さ

まで発達した対流を見分けるためには、中立浮力高度に対してどの程度まで積乱雲が発達しているかを見ることが有効である。

次の式でエコー頂高度比 ( $r_{top}$  又は  $r_{top}$ ) を定義し、大気状態下での積乱雲の発達を知ることができる。

$$r_{top} \equiv \frac{top}{z_{EL}}$$

ここで、 $top$  はエコー頂高度 (単位: km)、 $z_{EL}$  は中立浮力高度 (単位: km) である。鉛直積算雨量  $vil$  についても同様に

$$r_{vil} \equiv \frac{vil}{L_{EL}}$$

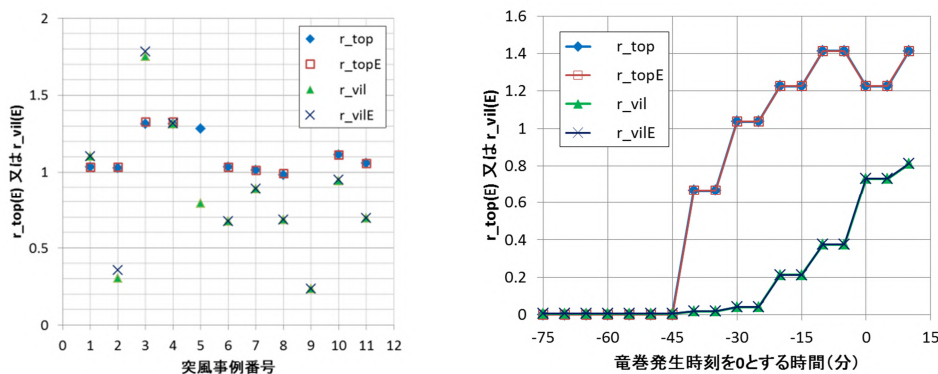
で鉛直積算雨量比 ( $r_{vil}$  又は  $r_{vil}$ ) を定義できる。ここで  $L_{EL}$  は次の式で計算できる。

$$L_{EL} \equiv \rho_d \int_0^{z_{EL}} \Delta r_s(z) dz$$

ここで、 $\rho_d$  は大気密度、 $r_s(z)$  は高度  $z$  と  $z_{EL}$  の飽和混合比の差であり次の式で求められる。

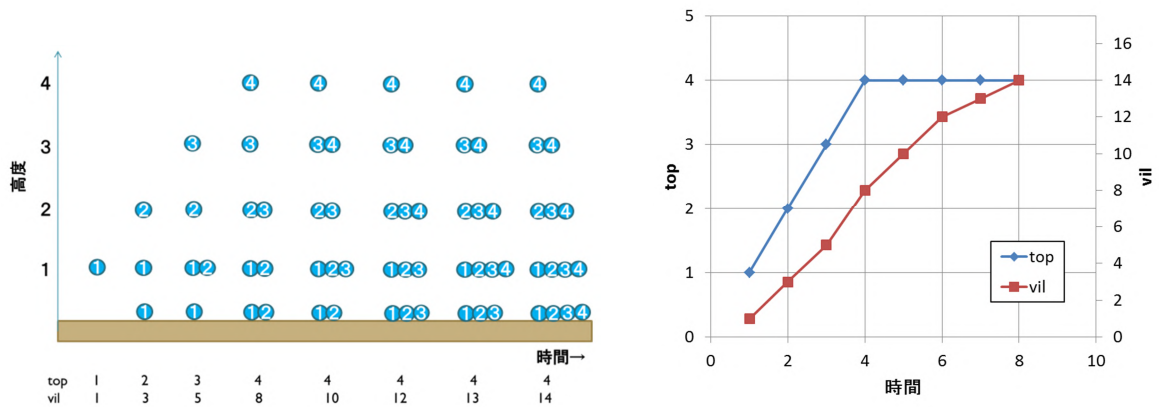
$$\Delta r_s(z) \equiv r_s(z) - r_s(z_{LNB})$$

$\rho_d r_s(z) dz$  は、高度  $z$  と  $z+dz$  の間にある降水粒子の量を表している。ある高度に存在する降水粒子の量は、その高度より高い高度で凝結し落下してきたものの総和であり、ある高度においてレーダーで観測される降水に相当する。これを鉛直積算した  $L_{EL}$  は  $vil$  に相当する量になる。レーダー観測から得られる  $vil$  は、Z-R 関係が仮定されており、理論的には正確な降水量を推定するのは難しいと考えられるが、第 3.A.4.1 図に示すとおり実際には  $r_{vil}$  は最大で 1 に近い値になる。 $vil$  が小さくても  $L_{EL}$  が小さければ積乱雲が十分に発達していることを示すことができ、積乱雲の発達を表す指数として利用できる。



第 3.A.4.1 図  $r_{top}(E)$  と  $r_{vil}(E)$  の計算例

左) 横軸の数字は事例に番号を付けたものを表す。縦軸は各事例における  $r_{top}(E)$  と  $r_{vil}(E)$  の最大値であり 1 に近い値になることが分かる。 $r_{vil}(E)$  の事例によってばらつく理由は、鉛直シアが強い時や突風の発生場所がレーダーから遠い時に値が小さくなるため。右) 2012 年 5 月 6 日に常総市で竜巻が発生した際の  $r_{top}(E)$  と  $r_{vil}(E)$  の時間変化。横軸は竜巻発生時刻を 0 とする時間 (単位: 分) を表す。竜巻発生の 45 分前から  $r_{top}(E)$  が増加し、25 分前から  $r_{vil}(E)$  が増加し始めている。



第3.A.4.2図 エコー頂高度 ( $top$ ) と鉛直積算雨量 ( $vil$ ) の時間変化のイメージ

左) 横軸は時間、縦軸は高度であり、丸数字は雨滴が凝結した高度を表す。最も高い高さにある丸数字の高度が  $top$  に相当し、丸数字の数を鉛直方向に足し合わせた総数が  $vil$  に相当する。この図では、 $top$  が最高値 (4) に到達した時点で  $vil$  は 8 単位であり、最高値 14 単位の約 6 割の成熟度である。右) 左図の状況をグラフにしたものであり、第 3.A.4.1 図右と比較できる。

竜巻の場合は、 $z_{EL}$  の代わりに 3.4.2.1 項「竜巻の推定風速と発生可能な場所の限定」で説明した  $z_{ELz}$  を使ったものも定義することができ、以下、 $r_{topE}$ 、 $r_{vilE}$  と表記している。

$r_{top}$  と  $r_{vil}$  はいずれも積乱雲の発達の日合いを示すが、両者が大きくなるタイミングは異なり、第 3.A.4.2 図に示すようにまず  $r_{top}$  が大きくなり、その後  $r_{vil}$  が大きくなる。このように  $r_{top}$  は対流が十分発達したかどうか (発達度) を示し、 $r_{vil}$  は積乱雲が発達後十分に時間が経って、降水の空間分布が平衡状態に達したかどうか (成熟度) を表すと言える。

これを実際の突風現象の発生と関連付けると次のようになる。まずダウンバーストは、積乱雲の崩壊時の下降流であるが、これは降水の空間分布が十分に平衡状態に近くなった後で乾燥空気の流入により降水の蒸発が起こった際に発生するとされている。これに加えて降水粒子の負荷による周辺気塊の引きずり下ろしが下降流を強める働きを有する。このため、 $r_{vil}$  の発達はダウンバースト発生の可能性が高まっていることを示していると言える。また、竜巻の発生の前には、下降流による水平渦の顕在化が必要である。このため、やはり下降流発生の前兆である  $r_{vil}$  の発達が竜巻発生のタイミングを計る上で重要となる。

予測指数としての  $r_{top}$  と  $r_{vil}$  はこのように振る舞いが異なるため、互いに独立な指数として価値がある。片方だけ値が大きな状態よりも、両方大きくなった場合の方がより突風発生の危険度が高いと判断できる。

これまでの説明では、対流が鉛直上向きに発達することを仮定していたが、鉛直シアがある場合は竜巻が発生しやすくなるにもかかわらず、降水粒子が広範囲に広がり  $r_{vil}$  が小さくなるため、予測精度が低下する。鉛直シアがある場合、 $vil$  に相当する量をどのように計算すればよいかを次に示す。

### 3.A.5 鉛直シアが大きい時の鉛直積算雨量 ( $svil$ )

鉛直シアが大きいときは積乱雲が鉛直方向に発達せず、落下中の降水粒子は風に流されながら対流の場所から遠く離れた場所に落下するため、 $vil$  の値が大きくなりえない傾向がある (第 3.A.5.1 図)。鉛直シアが大きいときは強い竜巻が発生しやすくなるが、 $vil$  は小さくなるという逆相関が見られることもある。このため、 $vil$  は竜巻事例に対してはあまりよい説明変数になっていない。鉛直シアがない時の  $vil$  には積乱雲で生成した降水と落下中の降水が含まれるが、鉛直シアが大きい時の  $vil$  にはこれらの中の一部の降水

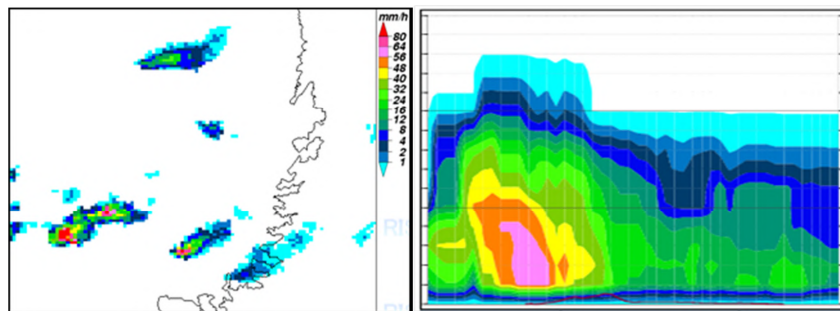
しか含まれないため、鉛直シアーによる  $r_{vil}$  への影響は、発達した積乱雲中で  $r_{vil}$  が 0.02 程度にしかならないこともあるほど顕著である。

このような不具合を改善するために、降水粒子が鉛直シアーで広がる範囲（経路）を MSM から計算し、その経路に沿って降水をすべて積分することで、鉛直シアーがない場合の  $vil$  に相当する量を計算することにした。この量を以下 slantwise  $vil$  ( $svil$ ) と呼ぶことにする。

積分経路の選択方法としては、等高度で積分後に鉛直積算する方法、雨滴の軌跡に沿って積分する方法など様々あるが、いずれの方法も多重積分を含み複雑な計算式となる。そこで、対流の場所と中立浮力高度に達した降水粒子の落下点を結ぶ経路の 10km 格子での  $vil$  を積算する近似的な方法を採用した(第 3.A.5.2 図)。この方法は、10km 格子で計算すると値が大きくなることもあるが、計算が大幅に単純になるというメリットがある。

格子点  $(X, Y)$  での  $svil$  の計算方法は次のとおりである。格子点  $(X, Y)$  に対して、対流の開始点  $(x_s, y_s)$  とエコーの先端  $(x_e, y_e)$  を次の式で計算する。

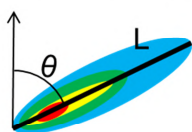
$$x_s = u(z_{LFC}) \left( \int_{z_{LFC}}^{z_{LNB}} \frac{dz}{w} + \frac{1}{w_0} \int_{z_{LNB}}^{z_{LFC}} dz \right)$$



第 3.A.5.1 図 鉛直シアーが大きい時の典型的な降水分布の例

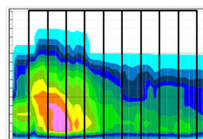
### 計算方法

① 数値モデルから鉛直シアーによって降水が広がる範囲を計算



降水の広がりの長さや角度を計算する。

② その範囲の雨水量をすべて足し合わせる



ある積乱雲から生じた降水が計算できる。

③ 積乱雲の断面積で割って、 $vil$  に相当する量を計算

・断面積は MSM から計算  
・周辺 9 格子の中で最大でない場合は 0 とする。

第 3.A.5.2 図  $svil$  の近似的な計算方法

$$y_s = v(z_{LFC}) \left( \int_{z_{LFC}}^{z_{LNB}} \frac{dz}{w} + \frac{1}{w_0} \int_{z_{LNB}}^{z_{LFC}} dz \right)$$

$$x_e = \int_{z_{LFC}}^{z_{LNB}} \frac{u}{w} dz + \frac{1}{w_0} \int_{z_{LNB}}^{z_{LFC}} u dz$$

$$y_e = \int_{z_{LFC}}^{z_{LNB}} \frac{v}{w} dz + \frac{1}{w_0} \int_{z_{LNB}}^{z_{LFC}} v dz$$

ここで  $u$  と  $v$  は高度  $z$  での風速成分、 $w_0$  は雨滴の落下時の終端速度(約  $10\text{ms}^{-1}$ )、 $w$  は対流の鉛直速度であり、高度  $z$  までの対流有効位置エネルギー  $CAPE(z)$  から

$$w = \sqrt{2CAPE(z)}$$

で計算できる。積分経路の長さ  $L$  と向き ( $X$  軸から反時計回りに測った角度) は次の式で求められる。

$$L(X, Y) = \sqrt{(x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2}$$

$$\theta(X, Y) = \cos^{-1} \frac{x_e - x_s}{L}$$

$L$  と  $\theta$  は MSM を用いて計算される。 $svil$  は理論的には次の式で計算できる。

$$svil(X, Y) = \sum_{n=0}^{X_e - X} vil(X + n, Y + n \tan \theta), \quad |\cos \theta| \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ のとき}$$

$$svil(X, Y) = \sum_{n=0}^{X_e - X} vil(X + n \cot \theta, Y + n), \quad |\cos \theta| \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ のとき}$$

ここで、

$$X_e = X + L(X, Y) \cos \theta(X, Y)$$

$$Y_e = Y + L(X, Y) \sin \theta(X, Y)$$

である。

実際の計算では、既に計算されている  $10\text{km}$  格子の  $vil$  を用いている。可能な限り単純かつ正確に計算するために次のような計算を行っている ( $L$  の単位はメートル)。

1. 次式で計算に使用する  $10\text{km}$  格子の数を計算

$$N \equiv \text{Int} \left( \frac{L(X, Y)}{\frac{10000m}{\cos \theta(X, Y)}} \right)$$

2. 次式で1つの格子サイズに満たない分の長さの補正量を計算

$$\delta \equiv L(X, Y) - N \cdot \frac{10000m}{\cos \theta(X, Y)}$$

3. 次式で1つの積乱雲で生じる雨水量を計算

$$total\_water \equiv \left( \sum_{i=0}^{N-1} vil(i) \right) \cdot D \cdot \frac{10000m}{\cos \theta(X, Y)} + vil(N) \cdot D \cdot \delta + vil(0) \frac{\pi R^2}{2} + vil(N) \frac{\pi R^2}{2}$$

ここで、 $vil(i)$  は計算に使用する  $i$  番目の  $10\text{km}$  格子の  $vil$  であり、右辺第1項が理論式に相当する。右辺第2項は格子サイズに由来する補正量、第3項と第4項は、積乱雲のサイズ (3.A.7項の

$R_{MC}$ と同じ)に由来する補正量である。

4.  $svil$ は次の式で計算できる。

$$svil = \frac{total\_water}{\pi R^2}$$

この式で、鉛直シアーがないときは、 $total\_water$ の式の右辺第1項と第2項が0になるため、通常の $vil$ と同じ値になる。

3.4.2.4項「積乱雲の発達程度」の $r\_vil$ の式で、 $vil$ の代わりに $svil$ を使うことで、鉛直シアーがあるときの積乱雲の発達度を測る指標として $r\_svil$ を定義できる。この指数は、NOWC Ver4.0における突風危険指数の作成の際に説明変数候補として使用している。

### 3.A.6 推定風速の補正 ( $tVP_{tp}$ , $tVP_{mtp}$ )

3.4.2.1項「竜巻の推定風速と発生可能な場所の限定」で説明した $TVPE_z$ では、エネルギー保存則による制約から竜巻渦の発達高度が中立浮力高度よりも低い場合があり、そのため推定風速が弱まる可能性があることが考慮されている。このように、竜巻渦の発達高度は、数値モデルの予測の不確実性や竜巻渦の発達の確率的側面もあると考えられる。実際に過去の竜巻事例における $TVPE_{zm}$ が現地調査結果と一致しないこともある。これら一致しない事例のエコー頂高度には、予想値とずれがあり、推定風速が現地調査結果より小さい事例ではエコー頂高度が低い傾向がある。このことから、逆にエコー頂高度で推定風速を補正することで、よりよい推定風速を求めることができる。求められた推定風速は、レーダー観測データとしての性格を有することから、レーダーエコー指数のひとつとして取り扱っている。

3.4.2.1項で説明した $TVPE_z$ の定義式において、対流の高さが推定値 $z_{ELEZ}$ より低い場合は、渦管の長さ $L_{adv}$ が短くなるため、推定風速が小さくなる。 $L_{adv}$ の計算では、積分変数として高度 $z$ を用いているが、この積分計算の際に、予め、高度3km、4km、・・・、15kmなどの代表的な高度まで積分したときの $TVPE_z$ を計算しておく(これを $TVP(n)$ とする。ここで、 $n = 3, 4, \dots, 15$ )。この計算には、MSM突風関連指数(更新間隔3時間毎)の予報値(1時間毎)を使用する。10分毎にエコー頂高度 $top$ が得られた際、推定風速の補正值( $tVP_{tp}$ 又は $tVP_{mtp}$ )は、

$$tVP_{tp} \equiv TVP(\text{int}(top))$$

で計算される。 $tVP_{tp}$ は、3.4.2.1項で説明したエネルギー保存則を満たし、エコー頂高度が3km程度以上の対流がある場所でのみ値を持つ。 $tVP_{mtp}$ は $TVPE_z$ の代わりに $TVPE_{zm}$ を用いたものである。NOWC Ver4.0では、 $tVP_{tp}$ と $tVP_{mtp}$ に閾値を設定し、閾値以下の場合は突風危険指数を0とすることで発生確度2の出現場所を大幅に限定している。

### 3.A.7 メソサイクロン直径( $R_{MC}$ )と回転速度( $V_{MC}$ )の予想値、及び気象庁レーダーメソサイクロン検出の品質管理

気象庁レーダーデータを用いたメソサイクロンの検出では、直径、高さの連続性、時間的連続性などが品質管理に利用されているが、竜巻発生確度ナウキャストプログラムでは、これまでメソサイクロン検出の有無のみが使用されてきた。しかし、メソサイクロンの属性は、大気の状態によって変化するため、品質管理に一律の厳しい閾値を適用するとメソサイクロン又は竜巻注意情報の捕捉率や適中率の低下をもたらす可能性がある。このため、品質管理で使われる様々な閾値は余裕を持った緩いものにせざるを得ず、閾値が十分

に機能しない原因になる。

このため、 $r_{top}$  や  $r_{vil}$  と同じ考え方で、MSM 突風関連指数を用いてメソサイクロンの回転直径と回転速度の予想値を計算し、検出されたメソサイクロンの直径と回転速度が予測値に近いかどうかを示す指数を作成した。

実際の品質管理方法としては、MSM を用いて計算される積乱雲の半径  $R_{MC}$  と最大接線風速  $V_{MC}$

$$R_{MC}(z) = \frac{z_{LFC}}{2} \left( \frac{\overline{\rho_{LFC}}}{\rho(z)} \right)^{1/2}$$

$$V_{MC}(z) = \left( \frac{\overline{\rho(z)}}{\rho_{LFC}} \right)^{1/2} \frac{\Delta V}{2}$$

から角運動量  $R_{MC}V_{MC}$  を計算し、メソサイクロン検出と同時に計算される回転半径  $R$  と最大接線風速  $V$  から角運動量を計算して次の式で一致度を評価し、突風危険指数の作成の際に説明変数候補として使用している。

$$mcj_{-qc} = \frac{RV}{|RV - R_{MC}V_{MC}| + 1}$$

高度  $z$  としては、メソサイクロン検出結果に記録されているメソサイクロンが観測された高度を使用する。 $RV$  と  $R_{MC}V_{MC}$  が一致した場合は角運動量の値になる。