

## 気象レーダの列車運転規制への活用に関する研究



加藤 巨\*



保野 聡裕\*

2005年12月25日、羽越本線北余目～砂越間の第2最上川橋りょう付近で発生した列車転覆事故について、竜巻やダウンバーストといった突風が原因である可能性が指摘されている（小林ほか2006）<sup>1)</sup>。そこで、突風対策として予想天気図と気象庁レーダデータを用いた突風発生予測手法を開発した。また、突風捕捉が可能であるといわれている気象ドップラーレーダを用いた突風探知システムを開発するため、小型気象ドップラーレーダや高密度地上気象観測装置による観測を開始した。

●キーワード：竜巻、ダウンバースト、ドップラーレーダ、天気図、寒冷前線

### 1. はじめに

2005年12月25日、羽越本線北余目～砂越間の第2最上川橋りょう付近で列車転覆事故が発生した。小林ほか（2006）<sup>1)</sup>では、竜巻あるいはダウンバーストといった突風が原因である可能性が指摘されている。また、1978年2月の地下鉄東西線事故や、2006年9月の日豊本線の脱線事故においては、竜巻が原因と考えられている。

ダウンバーストや竜巻など、積乱雲に伴う突風は全国的にしばしば発生し、大きな自然災害をもたらすことがあるが、空間的にも時間的にも非常にスケールが小さい現象であるため、離散的な点での観測となる風速計で捉えることは難しい。また、仮に線路沿線の風速計で捉えられたとしても、警報が出てから列車を止めたのでは間に合わない。

このような突風の検知には、面的かつ連続的な観測が可能な気象レーダが最も適しているといわれている。そこで、突風対策として気象レーダを活用した以下の2つのテーマについての研究に着手した。

- (1) 天気図と気象レーダデータといった、部外の高度気象情報を用いた突風発生予測手法の開発
- (2) 小型気象ドップラーレーダの列車運行判断への応用可能性に関する検討

### 2. 突風発生予測手法の精度向上

本予測手法の概要は以下のとおりである。

- (1) 予想天気図から、突風発生の原因の一つと考えられている寒冷前線の通過の有無を抽出し、
- (2) 寒冷前線通過の可能性がある場合には、気象レーダで突風発生の原因と考えられている積乱雲を監視し、

- (3) 観測した積乱雲の強さ・広がりや高さがあらかじめ設定したしきい値を超えた場合、
- (4) 突風発生の可能性がある、と判定する。

以下に詳細を示す。

#### 2.1 気象レーダとは

気象レーダとは、アンテナから空中の観測対象となる降水粒子に向かって電波を発射し、反射波が戻って来るまでの時間から対象までの距離を測定し、反射波の強さから降水粒子の密度を推定し、観測している対象の空間の降水量を推定する気象観測機器である（図1）。

反射波の

時間：降水粒子までの距離

空中の降水粒子

強度：降水粒子の密度(≒降水量)

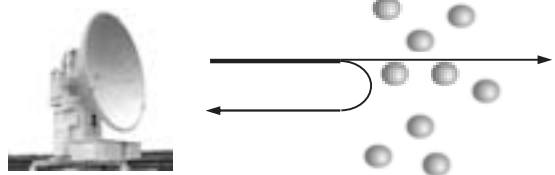


図1 気象レーダの原理（距離と降水量の観測）

#### 2.2 過去の突風・強風発生時の気象状況

過去の竜巻などの突風発生時の気象状況を調査したところ、突風は日本では寒冷前線や台風といった気象状況の下で発生する頻度が高いこと、沿岸域で発生数が多いことなどが判明した。また、過去の突風や強風による鉄道事故は、発生時の気象状況などを調査したところ、冬季（11月～翌年3月）の寒冷前線に伴う事例が多いこと、日本海側で多いことが判明した。

これらのことから、本研究では冬季の寒冷前線に伴う

表1 2001年から2006年にかけて冬季に日本海沿岸および北海道で発生した突風事例（気象庁（2008）<sup>2)</sup>より）

年月日	場所	現象	気象現象	エコー降水強度 ランク※1	エコー雲頂高度 ランク※1	エコー降水強度 ランク14以上の メッシュ数※2	積乱雲の 移動方向	積乱雲の 移動速度 ※3
2002/10/15	福井県 織田町	ダウン バースト	寒冷前線	14	6	15	東南東	14
2002/11/4	石川県 加賀市	竜巻	寒気移流	6	4	-	-	-
2003/12/18	石川県 内灘町	その他 ・不明	寒冷前線	9	3	-	東南東	10
2004/2/5	新潟県 柏崎市	その他 ・不明	その他	8	4	-	-	-
2005/11/8	秋田県 大湯村	竜巻又は ダウン バースト	寒冷前線	14	4	10	北東	15
2005/12/25	山形県 酒田市	その他 ・不明	寒冷前線	14	4	12	北東	17
2005/12/26	秋田県 峰浜村	その他 ・不明	低気圧	14	5	24	-	-
2006/11/7	北海道 佐呂間町	竜巻	寒冷前線	14	5	18	北北東	12
2006/11/9	北海道 奥尻町	竜巻	寒冷前線	13	6	-	北東	10

※1: レーダエコーデータのランク

※網掛けは寒冷前線に起因した突風

※2: 突風発生時刻の前20分以内に観測されたエコー降水強度ランク14以上の1kmメッシュの数

※3: 突風の発生前の10分間の移動距離 (km/10分)

表2 気象庁レーダエコーデータのエコー降水強度ランクとエコー雲頂高度ランク

ランク	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
降水強度 (mm/時)	Z<1	1≤Z<2	2≤Z<4	4≤Z<8	8≤Z<12	12≤Z<16	16≤Z<24	24≤Z<32	32≤Z<40	40≤Z<48	48≤Z<56	56≤Z<64	64≤Z<80	80≤Z

ランク	1	2	3	4	5	6	7	8
雲頂高度 (km)	H<2	2≤H<4	4≤H<6	6≤H<8	8≤H<10	10≤H<12	12≤H<14	H

日本海側の突風を対象とし、羽越本線新津～酒田間・白新線新潟～新発田間における事例分析を実施した。

表1は、北陸から北海道にかけての日本海やオホーツク海の沿岸域において、調査対象の2001年11月～2006年3月の冬季5シーズンに発生した突風7事例、およびそれ以降に発生し大きな被害の出た北海道の2事例の計9事例に関するデータである。これらの突風の発生要因は、表1に示すように低気圧から伸びる寒冷前線によるものが6事例、それ以外の要因によるものが3事例であり、特に前者は被害の規模が大きい傾向があった。

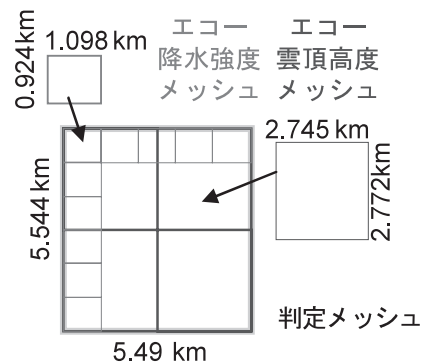
### 2.3 天気図を用いた突風発生予測の一次絞り込み

当社管内の日本海沿岸を寒冷前線が通過した日数は、調査対象の冬季（11月～翌年3月の151日間）5シーズン平均で1シーズンあたり25.4日であった。これにより、突風発生予測の一次絞り込みとして寒冷前線による絞り込みを行うと、25.4（日）/151（日）＝約17%まで絞り込めることが判明した。

### 2.4 気象レーダの観測値を用いた二次絞り込み

突風発生予測の二次絞り込みとして、気象レーダの観測値を用いて、突風発生の原因と考えられている強い積乱雲を捉えることにした。気象レーダは、2.1で述べたように、雲

の粒の位置や密度を観測するシステムで、積乱雲の強さや高さを観測することができる。その観測結果は、表2に示すような積乱雲の強さの指標「エコー降水強度」と、高さの指標「エコー雲頂高度」として示され、それぞれランクが高いほど強い積乱雲と考えることができる。これらのデータは、エコー降水強度については約1.1km四方、エコー雲頂高度については約2.7km四方のメッシュで提供されている。これらを組み合わせることにより、両者のメッシュ幅の最小公倍数である約5.5km四方のメッシュ単位でレーダデー



	緯度×経度	実距離
降水強度格子	30秒×45秒	0.924km×1.098km
雲頂高度格子	90秒×112.5秒	2.772km×2.745km
警戒格子	180秒×225秒	5.544km×5.49km

図2 レーダデータ判定に用いるメッシュ

タを取扱い、しきい値の評価を実施することとした(図2)。

具体的なしきい値の検討対象として、過去の突風発生事例における積乱雲の強さの指標「エコー降水強度」と、高さの指標「エコー雲頂高度」を調査することとした。また、積乱雲の水平方向の大きさに着目し、積乱雲の強さを表すエコー降水強度の拡がりについても検討し、さらなる絞り込みを実施した。

まず初めに、エコー降水強度とエコー雲頂高度によるしきい値の検討を実施した。表1に示すように、寒冷前線に伴う突風6事例が発生した時のレーダエコーは、エコー降水強度はランク9~14、エコー雲頂高度はランク3~6が観測されていた。このうち負傷者以上の人的被害が発生した事例では突風発生時のエコー降水強度ランク・エコー雲頂高度ランクは大きい傾向があった。突風の発生を完全に予測することは現行の技術では難しいと言われているが、少なくともこれらの人的被害が発生した事例を捕捉するために、エコーランクのしきい値をエコー降水強度ランク14、エコー雲頂高度ランク4(以下、14-4と記述)と設定した。

次に、過去の突風発生事例におけるエコー降水強度ランク14のエリアの拡がりについて調査した。寒冷前線に伴って発生したエコーランク14以上の突風事例4件は、表1に示すようにエコー降水強度ランク14以上のエリアが1kmメッシュ10個以上の塊として拡がりを持っていることが判明した。

これらの結果を踏まえ、冬季日本海沿岸部を寒冷前線が通過する場合には、以下の2つの条件を満たした場合に突風が発生する、という突風の判断基準を提案した。

- (1) 積乱雲の強さを表す「エコー降水強度」が80mm/時以上の領域が10km<sup>2</sup>以上の塊で拡がっていて、かつ
- (2) 積乱雲の高さを表す「エコー雲頂高度」が6000m以上の場合

## 2.5 警戒エリアの設定

突風が発生すると予測された場合に、運転規制の発令対象とする区間設定の最適化をめざし、その設定方法について検討した。

表1の9事例のうち、寒冷前線に伴って発生した6事例のレーダエコーデータから、突風発生時刻の直近から60分前までの10分毎の突風を発生させた積乱雲の移動方向と速度を調査し、突風が線路上に到達する前に積乱雲を捕捉するために必要な警戒エリアの大きさについて検証した。

移動方向については、およそ北北東~南東方向にかけて拡がっていることがわかった(図3)。

移動速度については10分間に最大17km程度移動してお

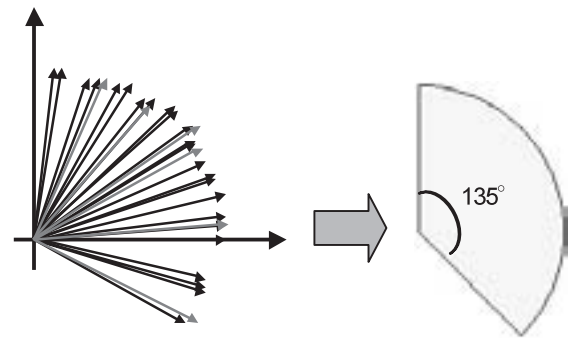


図3 積乱雲の移動方向から求めた警戒すべき方角

り、突風発生前に10分程度のリードタイムをもって積乱雲を捕捉するためには、警戒エリアは半径34km以上必要であることがわかった(図4)。

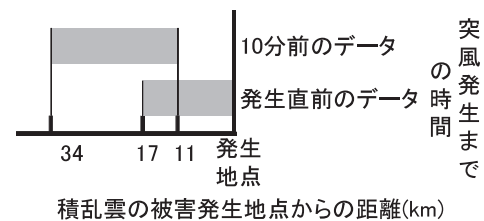


図4 突風発生前の各データ時刻における積乱雲の位置

これらのことから、しきい値を超過している約5.5km四方のメッシュの北から南東方向にかけて、メッシュ7個分に相当する半径約38kmの扇型のエリアを警戒エリアとして設定することとした(図5)。

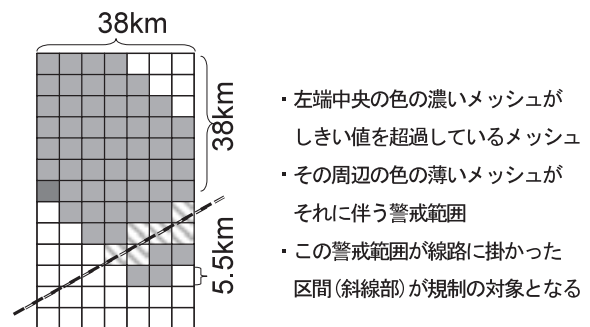


図5 レーダエコーデータと警戒範囲表示のイメージ

なお、この手法を2004年から2006年の冬季3シーズンの過去のデータに適用して検証を行ったところ、しきい値を超過する時は、冬季1シーズンあたり約150分(2時間30分)であった。

## 2.6 運転規制ルールへの試行

この手法を用いた運転規制ルールは2007年1月末から3月末まで羽越本線新津~酒田間・白新線新潟~新発田間で試行されたが、期間中レーダのしきい値を超過するよう

な事例は無く、運転規制は発令されなかった。

## 3. 小型気象ドップラーレーダの列車運行判断への応用可能性に関する検討

1章で述べたように、竜巻などの突風は水平スケールが小さいことから、風速計による地点での観測では捉えることが難しく、現在のところ、これらを捉えることができるのは面的な観測が可能でドップラーレーダのみであると言われている。

気象ドップラーレーダは、2.1で述べた大気中の雨や雪などの降水粒子の存在を観測するという通常の気象レーダの機能に加えて、反射して来る電波の周波数の変化から、対象物の移動速度を検出する機能を持っている(図6)。そのため、降水だけでなく風に関する情報も入手でき、点で存在する風速計では測定できない、風速の3次元的な分布を捉えることが可能である。

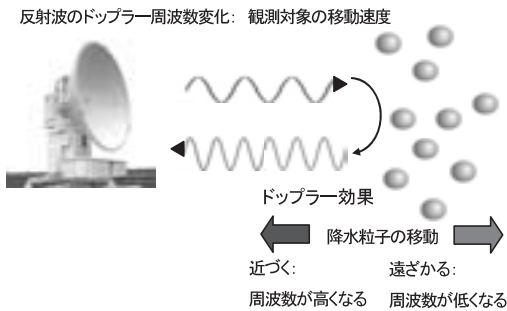


図6 気象ドップラーレーダの原理 (風速の観測)

気象ドップラーレーダは、従来は、主要な空港などで離着陸する航空機をダウンバーストなどから守るために空港周辺の広範囲の風況を監視したり、天気予報のために上空の風向・風速の分布を広範囲で測定して数値解析のデータとして用いるための大型のものが主流であった。しかしながら、大型のレーダは広い範囲を効率的に観測できる反面、レーダの電波は空中を直進するために、丸い地球上においては遠距離では高い高度の現象を観測することになる。そのため、鉄道にとって重要な地表付近の風況分布を観測するには不向きな面がある。

一方で、最近では小型である程度限定された範囲を観測するタイプのものが開発されており、線路沿線の地表付近に重点をおいた観測という目的に利用できる可能性が出てきた。そこで、小型気象ドップラーレーダの竜巻やダウンバーストといった突風に対する捕捉性能を現地観測と事例解析に基づいて検証するとともに、列車運行判断への応用可能性を評価することを目的として、2007年3月1日より羽越本線余目駅屋上に設置した小型気象ドップラーレーダによる観測を開始した。

### 3.1 小型気象ドップラーレーダによる観測

小型気象ドップラーレーダは、羽越本線の列車転覆事

故が発生した第2最上川橋りょう付近から約2km南にある余目駅屋上に設置した(図7、以下、「JRレーダ」と表記する)。なお、このレーダ観測半径は約30kmであり、地形の陰になることを考慮しなければ庄内平野のほぼ全域が収まることになる(図8)。



図7 余目駅屋上に設置された気象ドップラーレーダ (吹き出し内は収納されているアンテナ)

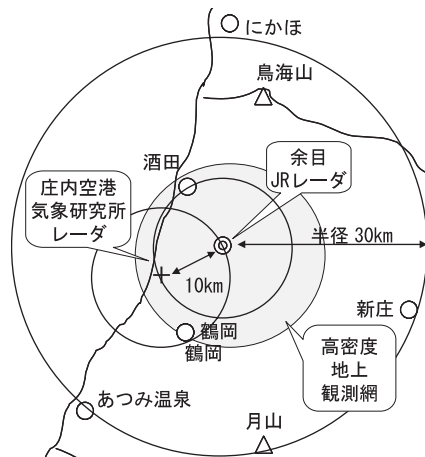


図8 レーダ設置箇所と観測範囲

図9は、現地付近を寒冷前線が通過する直前の南西風の観測結果の一例である。画面の中心がレーダの設置位置で、左下の南西方向にはレーダに接近してくるマイナスのドップラー速度、右上の北東方向にはレーダから遠ざかるプラスのドップラー速度が分布しており、この時の主風向が南西から北東に向いていたことがわかる。

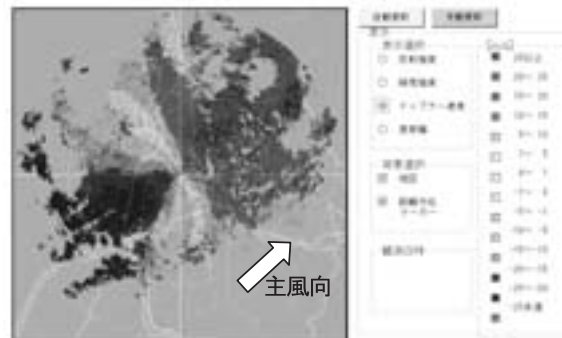


図9 JRレーダの観測画像の一例

### 3.2 庄内地方における気象観測プロジェクトの発足

2007年7月より、気象庁気象研究所、財団法人鉄道総合技

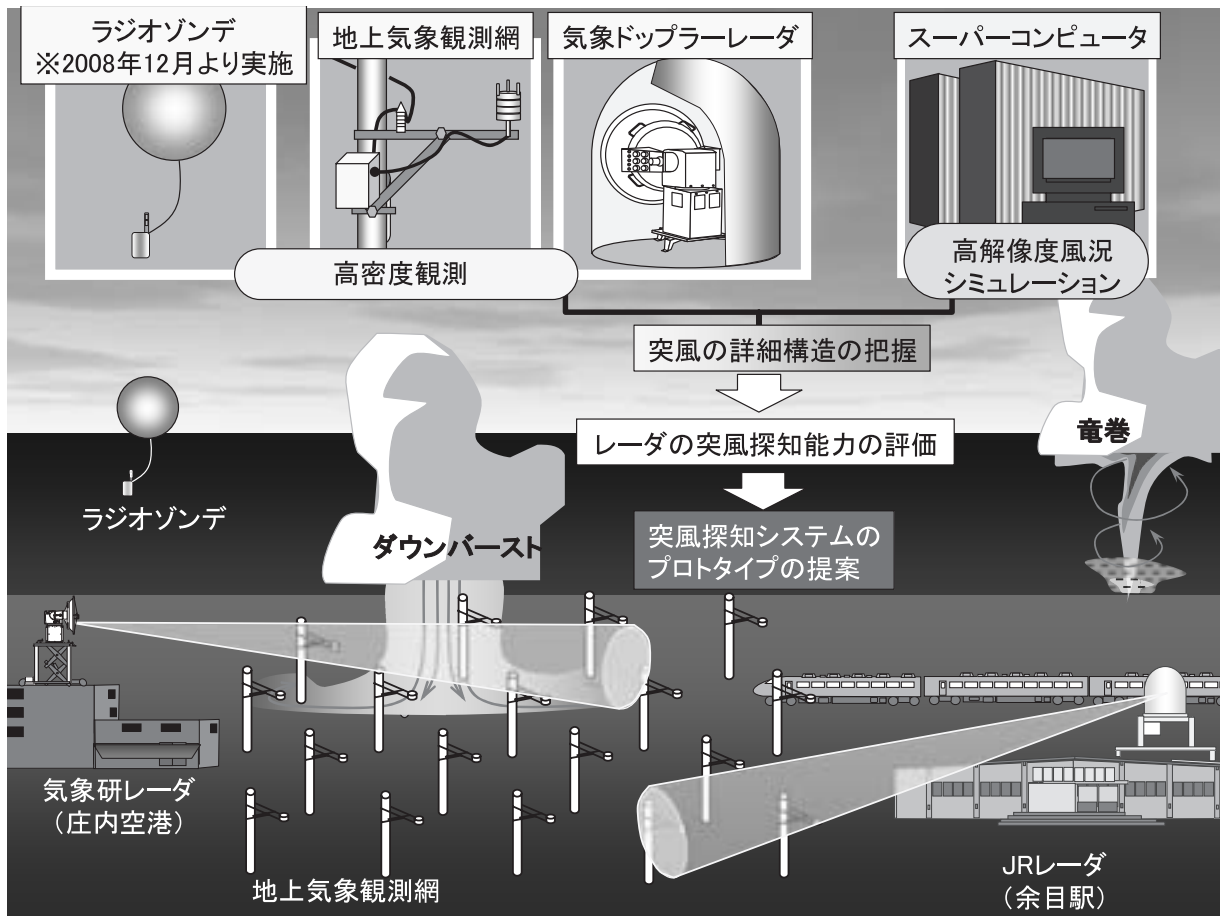


図10 「小型ドップラー気象レーダによる鉄道安全運行のための突風探知システムの基礎的研究」の概要図

術研究所、京都大学防災研究所とともに研究プロジェクトチームを結成し、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構の支援を受けた「小型ドップラー気象レーダによる鉄道安全運行のための突風探知システムの基礎的研究」(図10)を開始した。

同プロジェクトではJRレーダによる上空の観測のみならず、地上に約4km間隔という高密度で配置された26台の地上気象観測装置(図11)を通じて、上空と地上の両方から気象現象をより詳細に把握することが可能である。また、2007年12月下旬から2008年3月中旬にかけて、気象

研究所の小型気象ドップラーレーダが庄内空港に設置され(図12、「気象研レーダ」と表記)、JRレーダとともに観測することで、上空のより詳細な風況分布を把握した。



図12 庄内空港に臨時設置された気象研究所レーダ



図11 高密度地上気象観測装置  
(風向風速、気温、気圧、降水量、湿度を測定可能)

### 3.3 突風の観測事例とプロジェクトによる解析

2007年12月2日に酒田市内で発生した突風事例について、JRレーダで観測することができた。以下ではこの事例の解析結果<sup>3)</sup>を紹介する。観測画面(図13)で突風の構造を直接見られるわけではないが、上空のドップラー速度の観測データを解析した結果、図14のように上空に4つの渦が存在していたことがわかった。

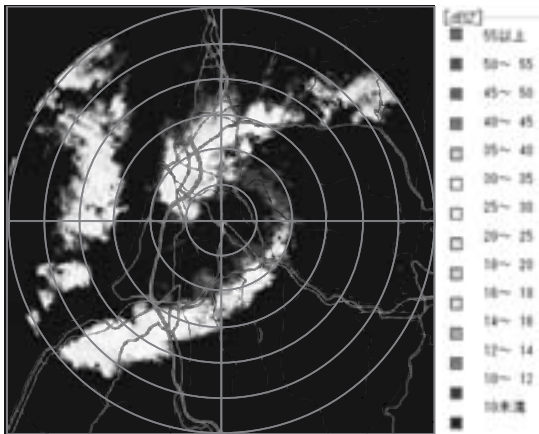


図13 2007年12月2日の酒田市内で発生した突風事例の観測画面  
(反射強度)

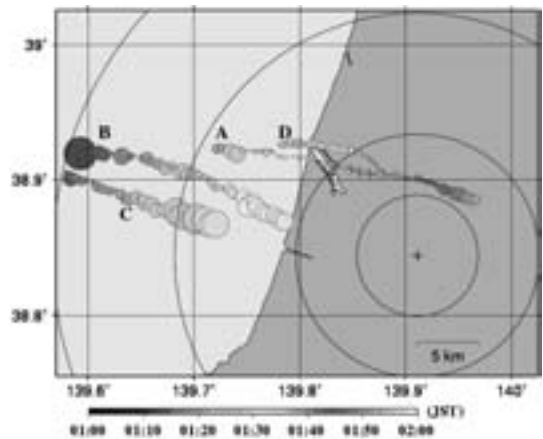


図14 解析で抽出された4つの渦とその軌跡  
(図中十字の部分が地上の被害箇所)

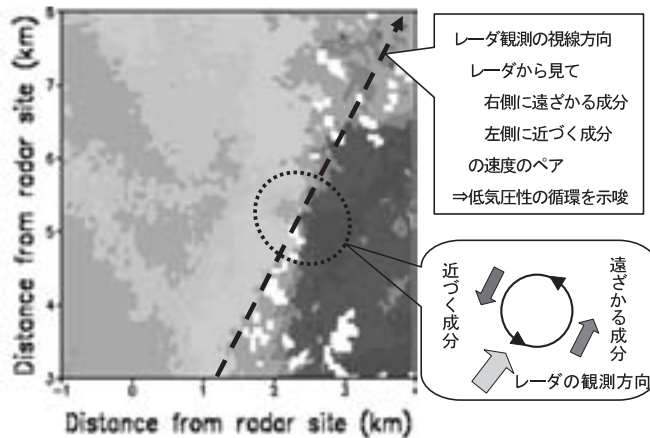


図15 渦Aのドップラー速度解析結果

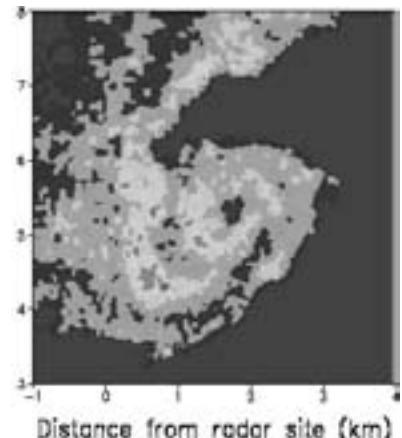


図16 渦Aの反射強度解析結果

このうちのひとつである渦Aは、その軌跡が地上の被害域と比較的よく一致するといわれている。この渦Aをより詳細に解析したところ、レーダから見て右側に遠ざかる風速成分、左側に近づく風速成分が分布していることがわかった。これらのことは、上空には低気圧と同じような反時計回りの雲の渦が存在していることを示唆している(図15)。また、反射強度のデータからも、台風の目のような渦状の構造を持っていたこと(図16)がわかった。

今後はこれらの観測データやスーパーコンピュータによるシミュレーションを通じて、より詳細な突風の立体構造を把握し、突風探知システム開発のために必要な知見を抽出する予定である。

## 4. まとめ

突風発生予測手法については、今後も試行を通じて予測精度などの検証を行う予定である。

気象ドップラーレーダによる観測プロジェクトについては、2008年3月までの冬季の観測データの解析や、詳細

な地形を反映した高解像度風況シミュレーションの実施と並行して今冬季も観測を継続する。2008年度冬季は、3.1で述べた観測態勢に加え、風船に気象観測装置を取り付けて高高度の気象データを観測するラジオゾンデ観測を12月5日より開始している。

これらの観測・解析を通じて突風発生のメカニズムを立体的に把握し、ドップラーレーダを用いた突風探知システムの提案をめざして研究を継続していく。

## 謝辞：

本研究は独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構の「運輸分野における基礎的研究推進支援制度」事業により研究助成を受けている。

## 参考文献

- 1) 小林文明, 松井正宏, 田村幸雄; 2005年12月25日から26日にかけて北日本で発生した突風災害, 日本風工学会誌, 107.2006, pp.137~144.
- 2) 気象庁, 竜巻等の突風データベース, 2008.
- 3) 楠研一, 今井俊昭, 鈴木博人, 竹見哲也; 小型ドップラー気象レーダによる鉄道安全運行のための突風探知システムの基礎的研究, (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構研究成果報告書, 2008.