

## ドップラーレーダーの 鉄道への応用に 関する研究



新井 健一郎\*



足立 啓二\*



森島 啓行\*

2005年12月25日の羽越本線列車転覆事故について、列車が局所的突風を受けたことが原因とされている。そこで局所的な突風現象の捕捉に適していると考えられるドップラー気象レーダーを2007年3月から余目駅屋上に設置し、その観測データを用いた突風自動探知システムのプロトタイプを開発している。地上突風を伴う上空の渦をドップラー気象レーダーデータから自動抽出する手法によって、山形県庄内平野の高密度地上気象観測網で捕捉された顕著な突風事例16事例中、約6割にあたる10事例を検出することができた。一方で突風探知アルゴリズムの技術的課題も明らかとなり、その克服に向けた研究開発を進めている。

●キーワード：ドップラーレーダー、局地的突風、竜巻、ダウンバースト

### 1. はじめに

2005年12月25日、羽越本線北余目駅～砂越駅間の第2最上川橋りょう付近で脱線転覆事故が発生した。事故原因について、航空・鉄道事故調査委員会（現・運輸安全委員会）は「列車が走行中に転覆限界速度を超えるような局所的な突風を受けたため」との調査結果報告をまとめた<sup>1)</sup>。

鉄道分野において、突風災害は重大な事故や輸送障害につながるため、突風への対策は重要な課題である。しかし、竜巻あるいはダウンバースト（積乱雲からの強い下降気流）といった突風は、破壊的な力をもつ反面、空間的に小規模で短時間に生じる現象であり、離散的に配置された既存の風速計では捉えることが困難である。また、線路沿線の風速計で突風を捉えたとしても、その段階から警報を発令し列車の運行を止めたのでは間に合わない。したがって、突風の探知には、広範囲の風の動きを面的かつ短時間周期で連続的に計測する必要がある。ドップラー気象レーダーはこのような突風探知に最適な気象観測装置とされている。

そこで、突風に対するドップラー気象レーダーの捕捉性能を現地調査と事例解析に基づいて検証し、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小型ドップラー気象レーダーを設置し、観測を開始した（図1、表1）。

本報告では、山形県庄内平野をフィールドとした突風観測の取組み、小型ドップラー気象レーダーによる突風自動探知アルゴリズムの手法、実際に突風を探知した事例、鉄道運行への応用に向けた開発状況について紹介する。



図1 余目駅屋上に設置されたドップラー気象レーダー

### 2. ドップラーレーダーによる突風探知の原理と突風探知システムの流れ

#### 2.1 ドップラー気象レーダーの特性と突風探知

ドップラー気象レーダーは、アンテナを回転させながら電波を送受信し、周辺広範囲の雨と風の分布を面的に測定する気象観測装置で、突風探知に最も適した装置と考えられる。気象庁がすでに大型のドップラー気象レーダーを全国に展開しているが、広域を測定できる反面、遠方では空間分解能が粗くなる。また、遠方ほど観測する高度が高く、使用用途が異なるため鉄道にとって重要な地表面付近の風況分布の観測には向かない部分もある。一方で小型のドップラー気象レーダーは、観測領域は限定されるが、大型のレーダーに比べ安価であり、線路沿線の大気下層の風の分布を重点的に観測する用途に向いている。

表1 余目駅ドップラー気象レーダーの主要諸元

観測範囲	30km
距離分解能	75m
方位分解能	0.7°
アンテナ回転数	2rpm
周波数	9770MHz
空中線電力	40kW
アンテナ径	1.2m

## 2.2 突風探知の原理

ドップラー気象レーダーは、アンテナからビーム状の電波を発射し、観測範囲の大気中に存在する降水粒子によって電波が反射されて戻ってくることを利用して気象観測を行っている。通常の気象レーダーは、発射した電波が降水粒子に当たって反射波として戻ってくる時間と方位から降水粒子の位置を測定し、反射波の強さ（レーダー反射強度）から降水粒子の密度を推定し、観測対象空間における降水量を推定する。さらにドップラー気象レーダーでは、ドップラー効果による反射波の周波数変化から、降水粒子の速度情報（ドップラー速度）を算出し、これを大気の移動速度とみなして風の挙動を測定する（図2）。



図2 ドップラー気象レーダーの原理

低気圧のような反時計回りの渦をドップラー速度データで見ると、レーダーから見て左側に相対的に近づく風速成分、右側に遠ざかる風速成分が分布しているパターンとなる（図3）。この2つの風速成分の差が局所的に大きい場合、その箇所に強い渦状の空気の流れが存在する可能性がある。

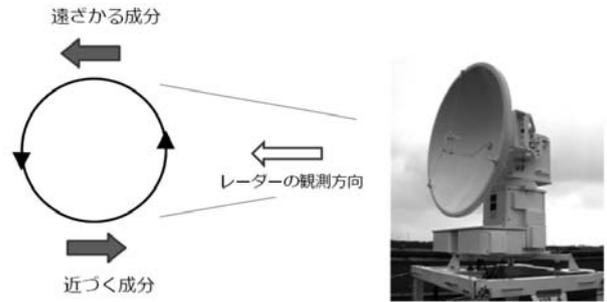


図3 反時計回りの渦のドップラーレーダー観測

## 2.3 庄内平野における突風観測

2007年7月から2010年3月まで、山形県庄内平野を研究フィールドとして、気象庁気象研究所、財団法人鉄道総合技術研究所、京都大学防災研究所とともに、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ー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」を実施した。このプロジェクトでは、余目駅屋上の小型ドップラー気象レーダー（以下「JRレーダー」）に加えて、風向風速や気温などを測定する気象観測装置を約4km間隔で計26台配置した高密度地上気象観測網を展開し、JRレーダーによって捉えられる上空の降水粒子および風の挙動と地上での突風現象との関係を調べた。また、各年の冬期には庄内空港ビル屋上に気象研究所の小型ドップラーレーダーを設置し、降水粒子と風の挙動を3次元で観測した（図4）。2009年4月からは気象研究所との共同研究を開始した。

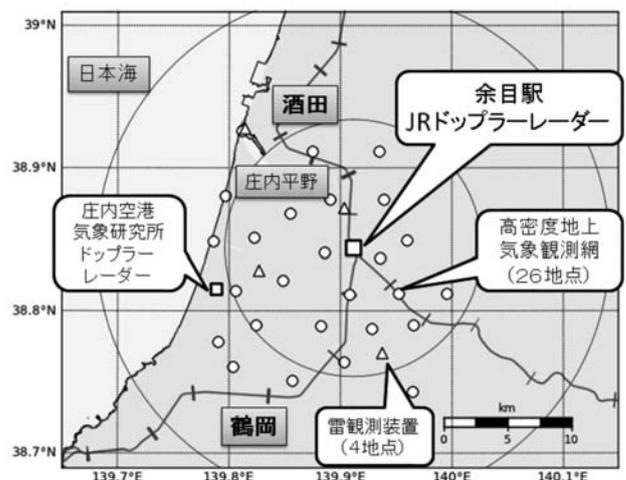


図4 庄内平野の気象観測網

突風発生の原因と考えられている強い積乱雲などの現地観測と事例解析を通じて突風に対する知見が蓄積され、このうち、突風が降水を伴っておりドップラー気象レーダーによる観測が可能であることと、観測された突風が数km以下の

小さな渦を伴うという研究結果をふまえ、小型ドップラーレーダーによる上空の渦の検出と監視技術の使用をベースとした突風自動探知システムのプロトタイプの開発を開始した。

## 2.4 突風探知システムの流れ

JRレーダーによる現地観測では、地上での突風発生事例の多くに、ドップラー速度データに渦状の空気の流れを示すパターンが見られた。突風探知システムでは、ドップラー速度分布からこの渦パターンを自動検出し、ドップラー速度から計算されるさまざまなパラメータを用いて絞り込みを行い、突風をもたらす渦の的確な探知をめざしている（図5）。探知システムの中核の部分のうち、渦の認識にかかわる部分は、気象庁気象研究所で開発された「メソサイクロン検出アルゴリズム」<sup>2)</sup>をベースとして改良・開発を進めてきたものを使用している。

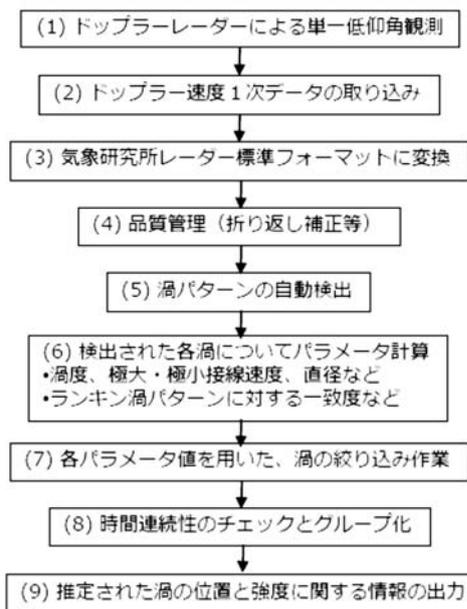


図5 突風探知の流れ（上空の渦の探知に基づく方法）

## 2.5 気象庁竜巻ナウキャストとの違い

気象庁ではすでに2008年3月から「竜巻注意情報」を発表しており、2010年5月からは、竜巻の発生確度を10km格子単位で解析し、10分刻みで1時間先までの予測を行う「竜巻発生確度ナウキャスト」の提供が開始されている。

「竜巻発生確度ナウキャスト」および「竜巻注意情報」は、あくまで突風の起きやすい気象状況に関する情報として発表している。したがって、突風の発生を探知してはいない。列車の運行規制の判断を行うには、突風発生の早い時期にその位置と移動方向について時間的・空間的な絞り込みを行うことが必要となる。

JRレーダーで実施している突風自動探知実験では、これま

での観測で得られた知見に基づき、探知の対象とする渦の直径を200m～2kmとし、アンテナ仰角を3.0°に固定、約30秒で1回転の頻度で観測を行うこととした。そのため、時間分解能も高く、小規模で持続時間の短い突風現象自体を捉えることができる。

## 3. 突風自動探知実験による探知事例

### 3.1 自動探知した事例

2010年12月3日19時30分前後に、強い風を伴う雨雲が酒田市付近を通過した。この事例について、JRレーダーの観測データを用いたリアルタイムでの突風自動探知実験では、19時27分03秒のレーダーデータ分から渦の探知が始まり、19時43分08秒まで検出することができた（図6、図7）。レーダー反射強度データを見ると、渦状の雨雲が酒田市付近を東北東に移動し、その渦の中心付近を断続的に探知していたことが確認できた。この渦探知位置の軌跡を追うと、日本海上で発生した渦が上陸後、羽越本線東酒田駅付近を19時41分頃に通過していた。一連の探知における推定最大風速値は約36m/sであり、上陸直前の日本海上で記録された。なおこの渦状の雨雲に伴う地上の突風および被害は報告されていない。

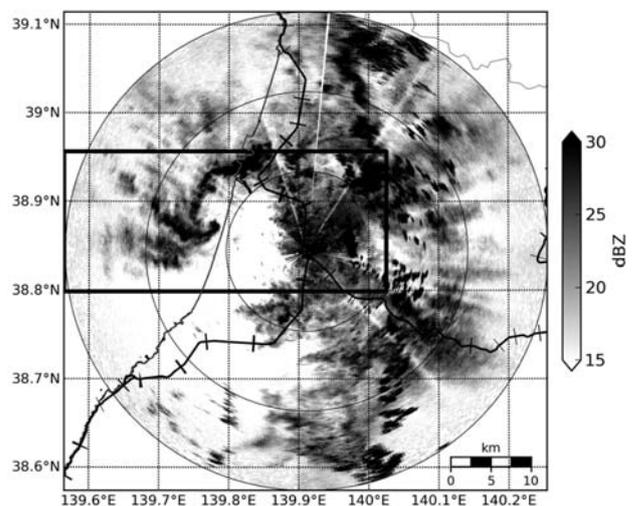


図6 2010年12月3日19時33分53秒のレーダー反射強度

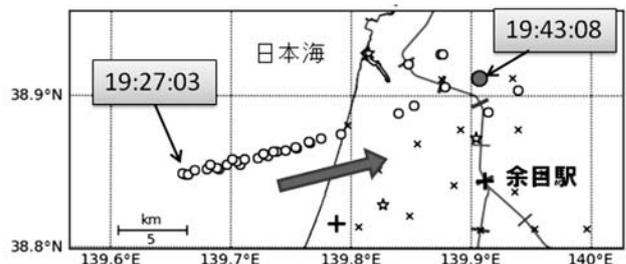


図7 2010年12月3日19時27分03秒～19時43分08秒に探知された渦の軌跡（図6の黒枠部分の領域）

### 3.2 突風自動探知システムの検証

2007年11月～2010年2月の期間において、高密度地上気象観測網で突風の発生が確認された事例のうち、JRレーダーの反射強度データから気象研究所の研究員が渦状の雨雲を確認した16事例について、JRレーダーのドップラー速度データを用いて突風自動探知システムの検証を行ったところ、部分的なものを含め、地上突風を伴う上空の渦の存在を探知できた事例が10事例あり、残り6事例については探知できなかった。

### 3.3 突風自動探知システムの課題

3.1で示した渦の探知成功事例について、探知の時間経過を追跡したところ、現在の突風自動探知システムの抱える技術的な課題点が明らかとなった（図8）。

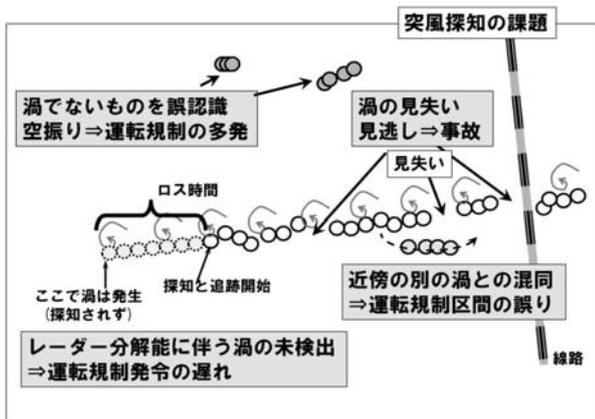


図8 突風自動探知システムの課題

- (1) レーダー遠方では、発生初期の渦を自動検出できない場合がある。このことは列車運転規制発令の遅れにつながる。
- (2) 渦を一時的、断続的に見失うことがあり、これを渦の消滅と誤認した場合、突風領域の移動を見逃し、必要な規制発令ができないことになる。
- (3) 追跡中の渦の近傍に別の渦が存在した場合、渦の進行方向の予測が混乱し、運転規制区間の誤りにつながる。
- (4) 渦ではないものを渦として誤認識すると、誤った運転規制を引き起こし、安定輸送を乱すことになる。

また、現在の突風自動探知システムのアルゴリズムが、渦の探知に全面的に依存しているため、上空の渦を伴う地上の突風は適正に探知できるが、上空の渦を伴わない地上の突風や、逆に上空に渦があっても地上に突風が発生しない場合には、それぞれ探知の「見逃し」および「空振り」となり、事故や過剰な運転規制につながるおそれがある（図9）。

これらの課題を克服するために、地上突風の詳細構造を捉える詳細で高い密度の地上観測を実施し、上空のレーダーデータに現れる特徴との関係を調べるとともに、突風探知アルゴリズムの改良と動作試験を重ねる。これらのことを通じて探知精度の向上を図る必要がある。

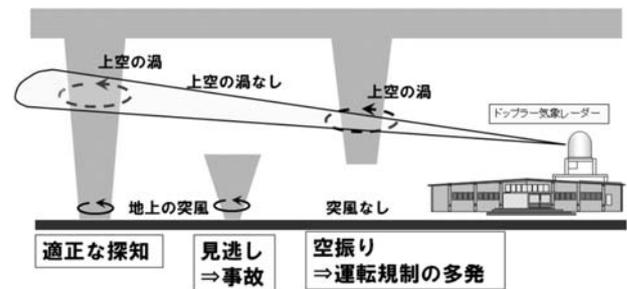


図9 上空の渦探知への全面的な依存による探知能力の低下と、運転規制への影響

## 4. おわりに

ドップラー気象レーダーは突風探知に最も有効な気象観測機器であるが、実用化に向けて、突風探知の精度向上と導入コストが課題である。そこで、突風現象と発生環境がよく似ている雷に着目し、雷放電と地上突風現象との関係を調べる研究を2009年度から開始した。2010年10月からは、気象研究所との共同研究で開発した雷観測装置を庄内平野4か所に設置し、雷放電の3次元観測を実施している。ここで得られたデータをドップラーレーダーによる突風探知に併用することで、突風探知性能の向上およびレーダー未設置領域の補完の可能性を探る。また、突風の水平構造を詳細に捕捉するために、現在展開中の地上気象観測網に加え、500m以上の直線領域に100m以下の間隔で超音波風速計と気圧計を設置し、観測を実施する。これらの研究を進め、さらなる探知精度向上を図っていきたい。

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制度」事業により研究助成を受けた。

### 参考文献

- 1) 航空・鉄道事故調査委員会；鉄道事故調査報告書 東日本旅客鉄道株式会社羽越線砂越駅～北余目駅間列車脱線事故、2008.4.
- 2) Suzuki, O., H. Yamauchi, M. Nakazato and K. Akaeda: A new multi-scale meso-vortex/divergence detection algorithm with modified Rankine combined vortex, Preprints, 33<sup>rd</sup> Conf. on Radar Meteorology, 2007.