

ドップラーレーダーを用いた突風探知手法に関する研究

Research on a Gust Detection system using Doppler Radar



藤原 忠誠*



北村 太郎**



鈴木 博人*

JR EAST set up a Doppler weather radar on the roof of Amarume Station in March 2007 with the aim of developing a gust detection and prediction method and assessing applicability of that to train operation decisions. This report covers characteristics of gust in Shonai area based on observation. Furthermore, the results of a study on specification and location of a new Doppler radar for improvement of the detection accuracy of gust are shown.

●キーワード：ドップラーレーダー、突風、竜巻、突風探知、気象観測

1. はじめに

突風は、破壊的な力を伴い、鉄道災害をもたらすことがある。そのため、突風に対する列車運転規制手法の確立は、鉄道防災上において大きな課題の一つである。

2005年12月25日、羽越本線北余目駅～砂越間の第2最上川橋りょう付近で列車脱線転覆事故が発生した。航空・鉄道事故調査委員会(現・運輸安全委員会)は、この事故に関して、「気象観測技術や情報処理技術などの進歩にも注目しつつ、広く研究を重ねることにより、実効性のある突風対策の実現に向けて真摯に取り組むべきである。」とする調査結果報告をまとめた¹⁾。

竜巻やダウンバースト(積乱雲からの強い下降流)などの突風は、空間的に小規模で短時間に生じる現象である。そのため、離散的に配置された既存の地上風速計で捉えることが難しい。仮に線路沿線の風速計で突風を捉えた際に警報を発令し、列車運行を抑制したとしても既に突風は線路を通過してしまっている。よって、突風による鉄道災害を効果的に防止するためには、面的かつ時間的に連続的な観測が可能なドップラーレーダーで、突風を探知し、突風が線路を通過する前に列車の運行を停止する方法の開発が必要である。

そこで、ドップラーレーダーを用いた突風探知手法の開発及び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、羽越本線余目駅屋上にドップラーレーダーを設置し、2007年3月より上空の風観測を開始した。

さらに、2007年7月から、気象庁気象研究所とともに、山形県庄内地域で地上風速や気圧などの観測(詳細は2.1)を開始した。

本報告では、初めにこれらの観測から得られた突風の特性に関する知見と、突風探知手法に関する知見を述べる。その上で、突風の探知精度向上のために新たに設置することとした新規レーダーの仕様と設置場所について検討した結果について述べる。

2. 観測で得られた突風の特性に関する知見

2.1 庄内地域での突風観測

突風を探知・追跡・警報を発令し、列車運転規制を実施するシステムを開発するためには、これまで未解明の部分が多かった突風の実態を把握することが重要である。

竜巻やダウンバーストなどの突風やそれらをもたらす気象現象は、時空間スケールが小さいため、風速計などの通常の気象測器では、観測そのものが困難である。そこで、山形県庄内地域に気象観測網を構築した(図1)。構築した観測網の観測項目は、以下のとおりである。

- ①ドップラーレーダー2箇所(JR東日本レーダー(余目駅)、気象研レーダー(庄内空港))
- ②地上気象観測点26箇所*(風向風速:サンプリング周期1秒、気温、湿度、気圧:サンプリング周期10秒)*2015年からは12箇所
- ③多点観測システム1箇所(風速計12台、気圧計25台:サンプリング周期0.1秒)
- ④雷観測点5箇所
- ⑤高層ゾンド観測

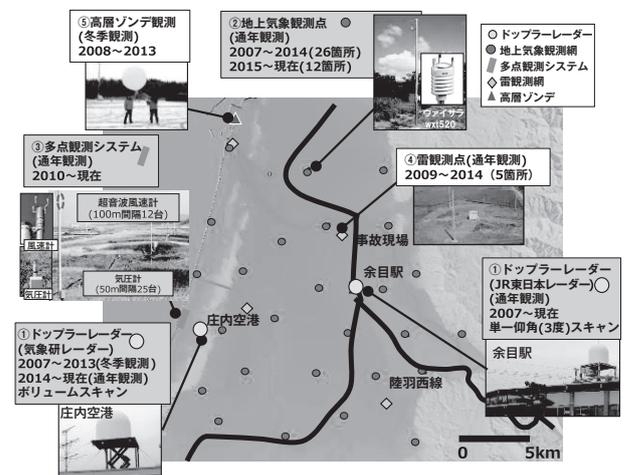


図1 庄内地域に構築した高密度気象観測網

2.2 庄内地域の突風に関する主な知見

2.2.1 地上で突風が観測された時のレーダー画像の特徴

地上で突風が観測されたときのレーダー画像の特徴を明らかにするため、事例解析と統計調査を実施した。初めに2007年12月5日の事例解析の結果を示す。図2は、突風が観測された時の地上風速の時間変化である。この事例では、突風の特徴である風速の立ち上がりが観測された。この地上で突風が観測されたときのレーダー画像を調査した(図3)。その結果、渦が存在するときの特徴であるフック状の降雨分布パターンが観測され(図3(a))、ドップラー速度分布図ではレーダーに近づく風と遠ざかる風のペアが存在した(図3(b))。以上より、この事例では、地上で突風が観測されたときに、上空で渦状のレーダーパターンがあることが分かった²⁾。

事例解析で得られた結果が一般性を持つかどうかを検証するため、地上風速計で突風が観測された事例を対象に、レーダー画像の特徴について統計的に調査した。その結果、2007年から2013年の7冬季(10月から3月)に観測された突風44事例うち、約9割で、降水を伴い上空に渦状のレーダーパターンを伴っていることが分かった。

これらの結果から、地上の突風を捉えるには、上空の渦をドップラーレーダーで探知する手法が有効であると結論づけられる。

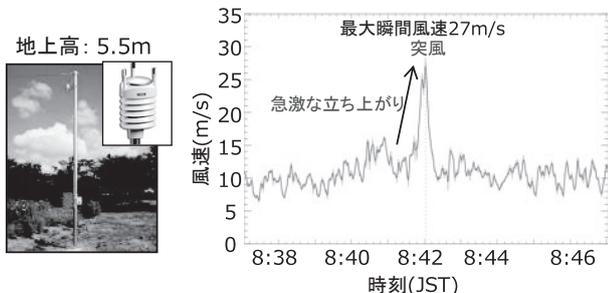


図2 地上風速計で突風が観測された時の風速時系列

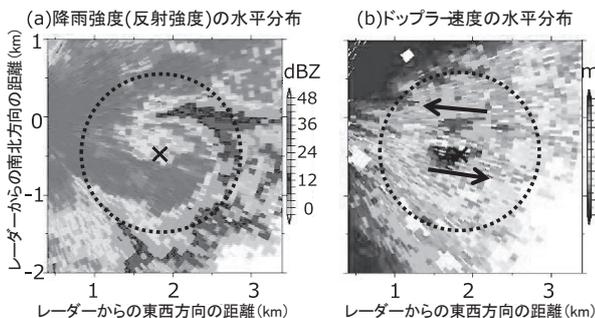


図3 地上風速計で突風が観測された時のレーダー画像 (×: 地上風速計の位置)

2.2.2 突風の移動特性

庄内地域で発生する突風(渦)の移動特性を明らかにするために、2007年から2013年の7冬季(10月から3月)に観測された事例について、調査を行った。JR東日本レーダーで観測された上空の渦の移動経路を図4に示す。図4には、上空の渦の最大風速が25m/s以上であった96事例を示した。この結果、下記の2つのパターンに分類され、渦の移動の方向は東方向に概ね直線的であり、日本海上で発生し、上陸することが分かった。

- ①冬型の気圧配置のときに発生した渦は、北西から南東へ移動する場合が多い(約8割、図4(a))
- ②寒冷前線に伴う渦は、南西から北東へ移動する場合が多い(約2割、図4(b))

これらの結果から、上空の渦の移動方向の予測は、渦を追跡することで可能であると結論づけられる。

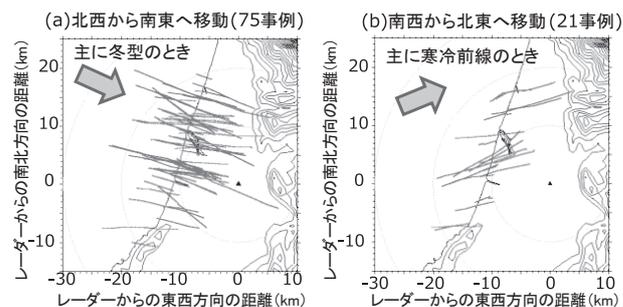


図4 上空の渦の移動経路

2.2.3 突風をもたらす渦の発生・発達機構

冬季に庄内地域で寒冷前線に伴って発生する渦の発生・発達過程を明らかにするため、高解像度数値シミュレーションを実施した³⁾。数値シミュレーションの結果、渦は下層から上層に向かって発達することが分かった³⁾。そのため、早期に渦を探知するためには、下層をレーダーで高頻度に観測する探知手法が適していることが分かった。

3. 突風探知手法に関する知見 — 渦の誤認識に関する原因分析 —

観測で得られた知見を基に、突風をもたらす可能性のある渦の位置と強さを表示できる突風探知システムを試作した²⁾。試作した突風探知システムでは、一定レベルで渦を捕捉できるものの、「渦の誤認識」により、空振りが発生することが分かっている¹⁾。本節では、その原因について分析した結果を示す。

気象レーダーは、雨粒などの降水粒子の反射(降水エコー)から降水の分布を得ることを目的としている。一方、降水エコーのほかに、周囲の建物や地形からの反射(地形エコー)

が観測されてしまうことがある。現行レーダーは、余目駅舎の屋上(地上高8m)から観測を行っているため、レーダー観測にのつての障害物(建物や電波鉄塔など)が存在する。また、周辺には鳥海山など起伏のある地形が存在する。そうした障害物あるいは周辺の地形の影響により、地形エコーが観測範囲内の広い範囲に生じている(図5)。それらの影響から、ドップラー速度の「折り返し補正」注)が失敗し、見かけ状の渦(遠ざかる風と近づく風のペア)として認識されてしまうため、図6に丸で示した領域において、渦の「誤認識」が発生していることが分かった。

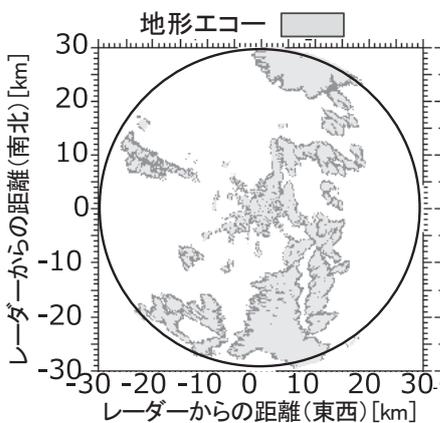


図5 地形エコー分布図

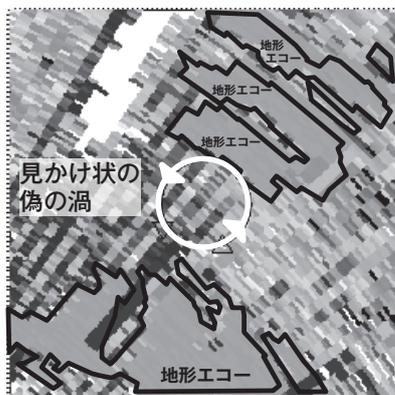


図6 地形エコー周辺で「折り返し補正」が失敗した事例

注) 折り返し補正:ドップラーレーダーでは、原理上、測定できるドップラー速度の測定範囲は決まっている。そのため、その範囲を超える速度は、「折り返し」が発生し、真のドップラー速度とは異なる値になってしまう。そのため、データ処理の過程で、周辺のデータの連続性から「折り返し」の補正を行う。

4. 突風の探知精度向上のための新規レーダーの仕様と設置場所に関する検討

渦の誤認識に関する原因分析から、余目駅の現行レーダーの設置場所では、精度向上に限界があることが分かってきた。そこで、突風の探知精度をさらに向上する方法を検討するために、新規レーダーに関する仕様と設置場所について、検討する。

4.1 新規レーダーの仕様

検討した新規レーダーの仕様を、余目駅に設置した現行レーダーと国土交通省が整備したXRAINと比較したものを表1で示す。XRAINは、豪雨監視体制の強化のために、局所的な雨量をほぼリアルタイムに観測可能なXバンドMPレーダー網である⁵⁾。2010年から運用を開始し、2015年度末時点で全国39箇所に整備されている。

新規レーダーは、XRAINの仕様をベースとしているが、さらに突風の探知精度の向上を目指し、XRAINよりも方位角方向と距離方向ともにサンプリングの分解能を向上させる。

また、現行レーダーとの比較では、現行レーダーより大きなアンテナを使うことでビーム幅が小さくなり、渦の探知にとつて重要な方位角方向の分解能が向上する。さらに、現行レーダーよりも、最大探知距離を拡大することで、より広い範囲で精度良く突風の探知が行えるようになることを目指している。

新規レーダーでは、送信方式をマグネトロンから固体素子とすることで、送信部の寿命が大幅に向上したことにより、安定した運用が見込まれる。

表1 レーダーの仕様比較

緒元	国土交通省 XRAIN	新規レーダー	現行レーダー
距離方向サンプリング	150m	75m	75m
方位方向サンプリング	1.2度	0.7度	0.7度
アンテナ径	2m	2m	1.2m
ビーム幅	1.2度	1.2度	2度
最大探知距離	80km	60km	30km
送信方式	固体素子 クライストロン	固体素子	マグネトロン

4.2 設置場所に関する検討

突風の特性に関する知見から、新規レーダーの設置場所を検討した。渦は日本海上で発生して上陸するため、海岸沿いに近いほど、渦を探知してから列車を規制するまでの時

間(リードタイム)が確保できる(2.2.2参照)。また、渦は下層から発達するため、水平方向に近い、低い仰角で高頻度に観測する手法が適している(2.2.3参照)。

次に、余目駅設置の現行レーダーの観測環境から、新規レーダーの設置場所を検討した。現行レーダーは、設置高度が高くない駅舎の屋上の地上高8mで観測を行っている。そのため、周辺には建物など、レーダー観測にとっての障害物が存在する。そうしたレーダー近傍の建物等の影になり、ドップラー速度を観測できない領域が発生する場合があることが分かった(図7)。さらに、地形エコーによる折り返し補正の失敗により、渦の誤認識が発生する場合がある(3節参照)。よって、気象庁や国土交通省などで設置しているレーダーと同様に、丘やタワーなどで、周囲の建物や構造物よりも設置高度を高くすることで、データの品質を担保する必要がある。

以上の検討より、新規レーダーの理想的な設置条件、観測モードを下記にまとめる。

- ① 海岸に近い場所
- ② 設置場所から低い仰角で高頻度に観測
- ③ 周囲の建物・地形に阻害されない高い高度

これらの条件から、レーダーの設置箇所を検討した。その結果、海岸から約2kmの距離にある庄内砂丘(標高50m)に新規レーダーを設置することとした(図8、図9)。また、レーダー設置箇所周辺は樹高20m程度の松林が広がっているため、高さ30mの鉄塔上にレーダーを据え付ける(図10)。これにより、周囲の障害物の影響を減らしながら、水平方向に近い低い仰角で下層を高頻度に観測することで、渦の探知精度の向上が見込める。

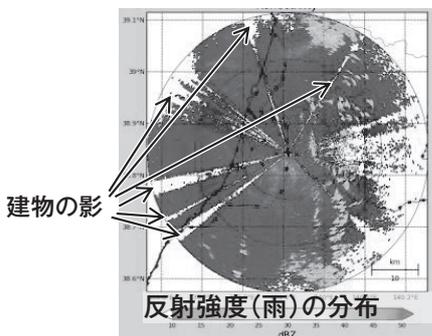


図7 レーダー近傍の建物の影響

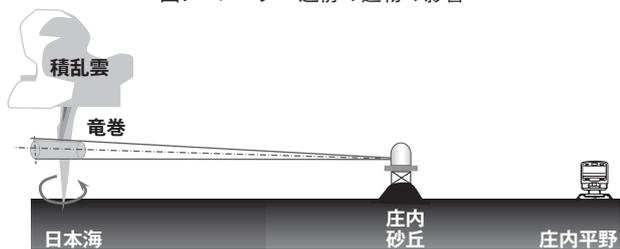


図8 設置箇所と突風の位置関係

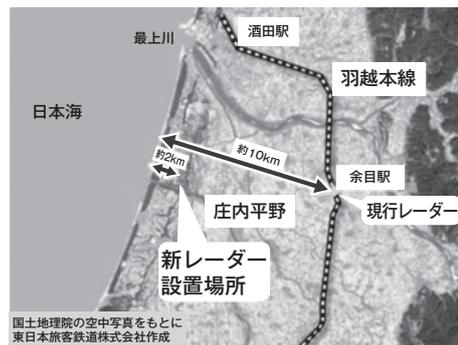


図9 新規レーダー設置場所

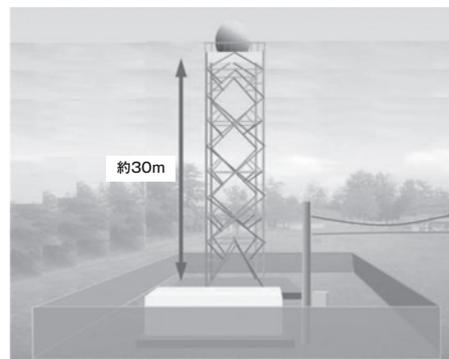


図10 新規レーダー設置イメージ

5. おわりに

本報告では、山形県庄内地域に展開した観測網から得られた突風に関する知見、突風探知手法に関する知見について述べ、突風の探知精度向上のための新規レーダーの仕様と設置場所について検討した。

検討結果に基づき、より高性能なドップラーレーダーを観測に適した箇所に設置し、2016年度中の観測開始を目指す。新規レーダーで観測されるデータを基に、突風を探知するシステムを用いた列車運転規制の実用化を目指して、さらに検討を進める予定である。

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) 楠研一ほか; 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、運輸分野における基礎的研究推進制度平成19年度報告書、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構、2010
- 3) 下瀬健一ほか; 2008年12月11日庄内平野に突風をもたらした気象じょう乱-高解像度シミュレーション-, 2010年度日本気象学会春季大会予稿集A407, 2010.
- 4) 新井健一郎ほか; ドップラーレーダーの鉄道への応用に関する研究、JR EAST Technical Review, No.35, 42-45, 2011.
- 5) 土屋修一, 山地秀幸, 川崎将生; XRAIN雨量観測の実用化技術に関する検討資料、国土技術政策総合研究資料、909, 2016.