

気象情報を活用した突風に対する運転規制手法の改良

Improvement of Method of Train Operation Control against Gusts Using Weather Informations



南雲 洋介*



鈴木 博人*



藤原 忠誠*

It is estimated that the cause of the accident which occurred at Uetsu line in 2005 is a gust. Because gusts have small spatial scales, it is difficult to catch them by anemometers. Therefore, East Japan Railway Company developed “A method of train operation control against gusts using weather informations” to forecast occurrences of gusts. This method has been tested to train operation control of rail route at the Sea of Japan side area in winters from January 2008. In this study, we improved the method to raise accuracy of forecast of gusts. As a result, the improved method decrease total alarm time by 73% compared with the old one, keeping number of gusts which can be caught by the old method equal.

●キーワード：鉄道、予測、竜巻、積乱雲、気象レーダー、ナウキャスト

1. はじめに

強風に対して列車を安全に走行させるため、鉄道事業者は線路沿線に風速計を設置して、基準値以上の風速が観測されるときには速度規制や運転中止といった列車運転規制を行っている。一方、突風は空間スケールが小さく風速計では捉えることが困難であり、2005年12月に発生した羽越本線列車事故の鉄道事故調査報告書¹⁾においても、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とされている。そこで、東日本旅客鉄道株式会社（以下、JR東日本とする）では、気象庁から配信される気象データを活用することで突風の発生を予測して列車運転規制を行う手法（以下、突風予測手法とする）を開発した²⁾。この突風予測手法は、2008年1月よりJR東日本管内の日本海側エリアで冬期間に試行されている。

この突風予測手法は、試行開始から5年以上が経過した。この期間に気象庁から配信される気象情報が充実するとともに、解析や評価に利用できる突風事例が増加した。これらの背景から、突風予測精度や運用利便性を向上できる可能性が出てきたため、本研究において突風予測手法の改良に取り組んだ。本稿では、突風予測手法の改良の概要と結果について述べる。

2. 改良前の突風予測手法の概要と課題

竜巻などの突風は、一般的に強い積乱雲から発生する。突風予測手法は、気象情報から積乱雲の強さを定量的に評価して、突風を発生させる可能性があると考えられる積乱雲（以下、警戒積乱雲とする）を捉えることで、突風の発生

を予測する手法である。改良前の警報発令フローを図1に示す。警報発令フローは、前提条件の判断、警戒積乱雲の検出、警報範囲の設定、警報発令の流れとなっている。最初に、突風が発生しやすいと考えられる気象条件を警報発令の前提条件として設定する。前提条件は2つあり、1つは天気図をもとにした寒冷前線の通過する時間帯である。もう1つは、気象庁が配信する竜巻の発生可能性の程度を表す情報である竜巻発生確度ナウキャスト³⁾の確度2が発表されている時間帯および領域である。これら2つのどちらかを満たす時間帯と領域を警報発令の前提条件とする。次に、前提条件を満たす時間帯と領域に対して警戒積乱雲の検出を行う。検出には、気象庁のCバンド気象レーダーのデータを用いる。①雨の強さ、②雲の高さ、③雨の強い領域の大きさを積乱雲の強さのパラメータとして、基準値を上回る積乱雲を検出する。その次に、検出された警戒積乱雲に対して警報範囲の設定を行う。警報範囲は、警戒積乱雲を中心に北から南東135度、半径38kmの固定された領域として設定する。これは、過去の突風事例を調査して、その突風を発生させた積乱雲の移動距離と移動方向を包含する範囲として決定している。最後に、警報範囲に含まれる線路の区間を照査し、その区間を運転中止とする。

この突風予測手法の現在の試行線区は、羽越本線・新津～羽後本荘間、陸羽西線・余目～清川間、白新線・新潟～新発田間、信越本線・長岡～新潟間、越後線・柏崎～新潟間、弥彦線・弥彦～東三条間である。試行時期は、毎年11月から翌年3月までである。

突風予測手法は、羽越本線列車事故の原因とされている突風を含む冬期間に日本海側で発生した突風を一定の割合で捕捉することができる。これにより、風速計では捉えることが難しい局所的な突風に対して、列車運行の安全性を向上

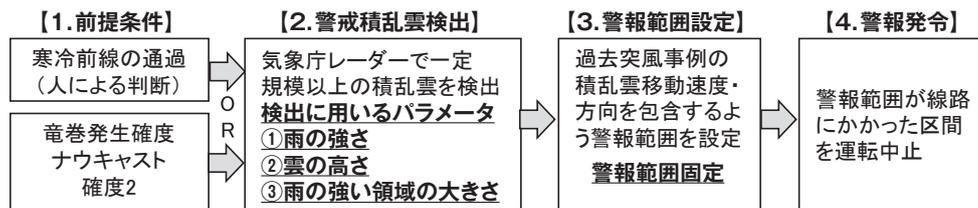


図1 改良前の警報発令フロー

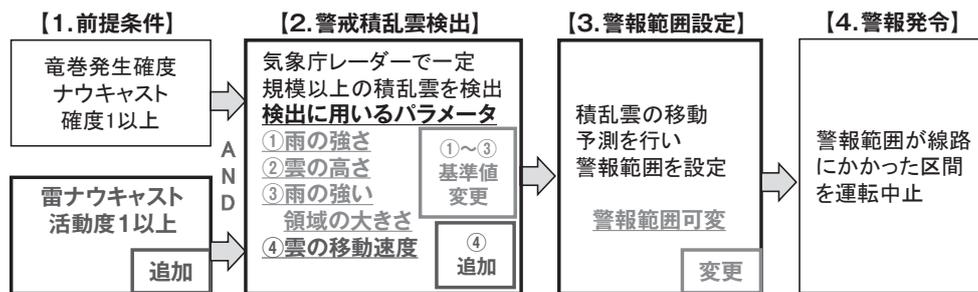


図2 改良後の警報発令フロー

させることが可能である。一方で、この手法は開発当時の知見や気象情報に基づいているため、その後の新たな情報を活用することで突風予測精度や運用利便性を向上できる可能性がある。突風予測精度の向上に関わる要因としては、新たな気象情報の配信、気象情報の分解能向上、試行実績の蓄積、精度検証のための突風事例の増加などが挙げられる。また、運用利便性について、警報発令の前提条件である寒冷前線の通過が人の判断で行われているが、ヒューマンエラーの防止、条件判断の画一化、運用システムの簡略化などの観点からは運用の自動化が望ましい。寒冷前線の通過判断を新たな気象情報で代替することができれば、運用の自動化が可能になり手法の利便性が大きく向上する。次章では、これらを踏まえた突風予測手法の改良について検討する。

3. 突風予測手法の改良点

自然現象に対して列車運転規制を行う際の基本は、必要な安全性を確保したうえで、できる限り運行を安定的に行うことである⁴⁾。一般的には、列車運転規制の安全性と安定性はトレードオフの関係にある。今回の突風予測手法の改良にあたっては、改良前と同等の安全性を確保することを基本として安定性の向上を図ることとした。評価対象とする突風事例は気象庁が公開する竜巻等の突風データベース⁵⁾から抽出した。突風予測手法の当初開発時の検証に用いた突風9事例に2010～2014年の冬期(10～3月)にJR東日本管内で発生した藤田スケール⁶⁾F1以上の突風8事例を加えた全17事例(以下、評価突風事例とする)を選定した。なお、データベースでF0～F1としている突風はF1として扱

い、評価対象とした。

改良後の警報発令フローを図2に示す。3.1～3.3節では、それぞれ1.前提条件、2.警戒積乱雲検出、3.警報範囲設定の改良点について述べる。

3.1 前提条件

警報発令の前提条件について、改良前は寒冷前線の通過と竜巻発生確度ナウキャスト確度2のOR条件としていた。評価突風事例のうち竜巻発生確度ナウキャストの配信が開始された2010年5月27日以降の事例を調査した結果、改良前の前提条件を満たす突風については、いずれも竜巻発生確度ナウキャスト確度1以上が発表されていたことを確認した。そこで、改良前の前提条件を、改良後は竜巻発生確度ナウキャスト確度1以上に置き換えることとした。これにより、人による寒冷前線の通過判断がなくなり、突風予測手法の自動運用が可能になった。

さらに、突風が発生しないのに警報が発令される空振りを低減するために、突風が発生しやすい気象条件を絞り込む検討を行った。ここでは突風の発生と関連性が高いといわれる気象現象の雷に着目することとし、気象庁が配信する雷の激しさや雷の可能性を表す情報である雷ナウキャスト⁷⁾の前提条件への追加を検討した。評価突風事例のうち雷ナウキャストの配信が開始された2010年5月27日以降の事例を調査した結果、雷ナウキャスト活動度1以上をAND条件として前提条件に追加しても突風の見逃しが増加しないことがわかった。そこで、改良後の前提条件は、竜巻発生確度ナウキャスト確度1以上と雷ナウキャスト活動度1以上のAND条件とした。

3.2 警戒積乱雲の検出条件

警戒積乱雲の検出条件について、改良前は①雨の強さ、②雲の高さ、③雨の強い領域の大きさの3つのパラメータを用いていた。これらのパラメータに関して、気象レーダーデータの雨の強さが14階調から251階調に細分化されたことや、精度検証のための突風事例が増加したことから、基準値の変更を行った。また、従来は積乱雲を約5.5km四方単位のメッシュ(雨の強さのメッシュと雲の高さのメッシュの最小公倍数)で検出していたが、今回の改良にあわせて雨の強さのメッシュと同じ約1km四方単位の細分化した。

さらに、積乱雲の移動速度がある一定の範囲内にあることを新たな検出条件として追加した。3.3節で述べる積乱雲の移動速度の算出過程において、警戒積乱雲と似た形状の別の積乱雲が存在する場合には、警戒積乱雲がそこへ移動したものと判断され、異常に大きなもしくは小さな移動速度が算出される可能性がある。このようにして生じる可能性のある異常値の除去を目的として、評価突風事例を発生させた積乱雲の移動実績を調査し、積乱雲の移動速度の下限値と上限値を決定した。

3.3 警報範囲の設定方法

図3には、警報範囲設定方法のイメージを示す。改良前の警報範囲は、警戒積乱雲を中心とした北～南東の半径38kmで固定していた(図3(a))。この方法では、積乱雲の移動距離と移動方向をほぼ確実に捉えられる一方で、実際の積乱雲の移動に対して警報範囲が広くなり、積乱雲が移動しない領域にも警報が発令される。そこで、積乱雲の過去の移動実績から将来の移動位置をリアルタイムで予測して、その予測に予測誤差を加味した警報範囲をその都度設定する方法を検討した(図3(b))。

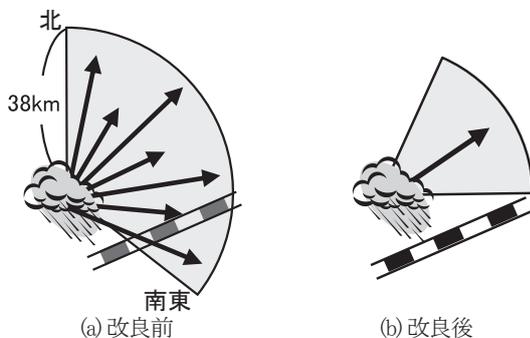


図3 警報範囲設定方法のイメージ

図4に、警戒積乱雲の過去の移動実績の導出イメージを示す。移動実績のもととなるベクトルの計算には相互相関法⁸⁾を用いる。導出の流れは以下のとおりである。

- (1) 警戒積乱雲を中心とした南北80km×東西50kmの周囲4点にベクトルの計算点を設定する(図4①～④)。
- (2) 各計算点を中心とした南北160km×東西100kmの領域に対して、10分前と5分前の2つの降水画像を抽出する(図4では、計算点①に対応する領域を例示)。
- (3) 2つの降水画像の重なり位置を少しずつ変えながら雲の形と雨の強さの相関が最も高くなる重なり位置を計算する。
- (4) 2つの降水画像のずれの大きさと方向を各計算点①～④の過去5分間の移動ベクトル $V_1 \sim V_4$ とする。
- (5) 移動ベクトル $V_1 \sim V_4$ の平均ベクトル V_{AVE} を求め、これを警戒積乱雲の過去5分間の移動実績とする。

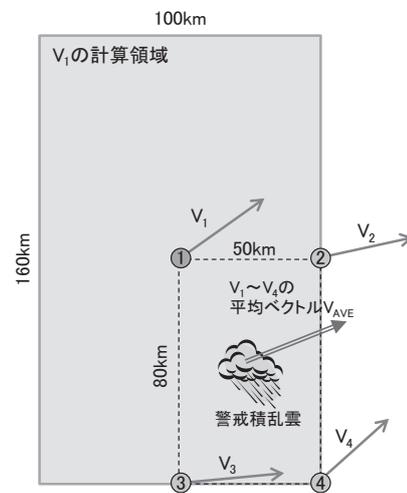


図4 警戒積乱雲の移動実績の導出イメージ

さらに、移動予測の信頼性を高める方法を検討した。評価突風事例を発生させた積乱雲の移動実績を調査した結果、ほぼ全ての事例で周囲4点の移動ベクトル $V_1 \sim V_4$ が、 V_{AVE} に対して大きさ、方向ともある程度の範囲におさまっていることを確認した。そのため、大きさと方向のそれぞれについて V_{AVE} に対する基準範囲を設けて、 $V_1 \sim V_4$ の1つでも基準範囲から外れる場合には突風が発生する確率が低く、積乱雲の移動予測の信頼性も低いものと判断し、警報範囲を設定しないこととした。

改良後の警報範囲設定方法を図5に示す。警報範囲は、図5の凡例の表現で警戒積乱雲領域、予測警戒領域、誤差警戒領域(距離)、誤差警戒領域(方向)

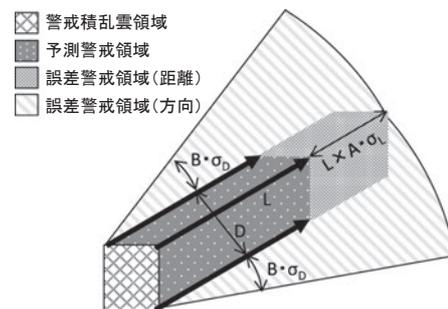


図5 改良後の警報範囲設定方法

差警戒領域(距離)および誤差警戒領域(方向)を足し合わせた範囲として設定する。警戒積乱雲領域は、3.2節で述べたとおり約1km四方単位のメッシュとして検出される領域である。予測警戒領域は、積乱雲が過去の移動実績と同じ方向に同じ速度で移動を続けると仮定し、警戒積乱雲の現在位置から20分先の予測位置(距離 $L=4V_{AVE}$)まで警戒積乱雲を平行移動させたときに通過する領域である。予測先時間を20分としたのは、気象情報の更新周期、情報の配信遅れおよび警報が発令されてから列車が停車するまでの余裕時間を考慮するためである。誤差警戒領域(距離)は、距離の予測誤差を考慮して設定する領域である。その領域の大きさは、評価突風事例を発生させた積乱雲の実際の移動距離と予測した移動距離との比を調査し、その比の標準偏差から決定した。誤差警戒領域(方向)は、方向の予測誤差を考慮して設定する領域である。その領域の大きさは、積乱雲の実際の移動方向と予測した移動方向との差を調査し、その差の標準偏差から決定した。

4. 突風予測精度の評価

4.1 安全性の評価

安全性は、評価突風事例の捕捉数で評価した。ここでは、突風発生の20分前に突風発生地点が警戒範囲に入った事例を捕捉とした。なお、竜巻発生確度ナウキャストと雷ナウキャストが配信されていない2010年5月26日以前の9事例は、過去のデータで前提条件を検証することができない。そのため、これらのうち3事例については関係資料^{3), 7), 9), 10)}から突風発生時のナウキャスト発表状況を推定し、それ以外の突風については改良前の前提条件を満たす事例は改良後も前提条件を満たすものと仮定した。表1より、改良前、改良後ともに突風の捕捉数は17事例中9事例で捕捉率は53%である。以上より、突風予測手法は改良前後で同等の安全性となることを確認した。

表1 改良前後の突風捕捉数(捕捉数/評価数)

改良前	改良後
9/17	9/17

4.2 安定性の評価

安定性は、警報時間で評価した。2010~2013年度の試行期間において試行エリアで発令される警報延べ時間をシミュレーションにより比較した。その結果を図6に示す。改良前と比較して改良後では警報延べ時間が73%減となり、安定性が大きく向上することを確認した。

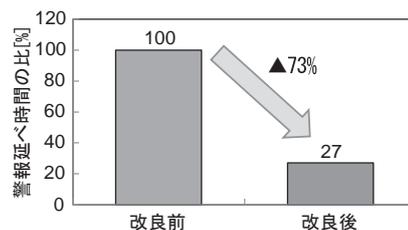


図6 改良前に対する改良後の警報延べ時間の変化

5. おわりに

本研究では、JR東日本管内の日本海側エリアで冬期間に試行している突風予測手法を改良し、突風予測精度と運用利便性の向上を図った。

- (1) 警報発令の前提条件の改良を行い、人の判断による寒冷前線の通過を気象庁配信の竜巻発生確度ナウキャスト確度1以上に置き換えた。その結果、手法運用が自動化され、ヒューマンエラーの防止、条件判断の画一化、運用システムの簡略化を可能にした。
- (2) 警報発令フローにおける各条件を見直すことで、安全性を改良前と同等に保ちつつ、安定性の向上を図った。その結果、現行の試行エリアにおける警報延べ時間を改良前と比較して73%低減した。

改良した突風予測手法は、2015年11月より試行エリアに導入している。

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) 鈴木博人、加藤亘、島村誠、畑村真一、野村真奈美、日置江桂; 列車運転規制のためのレーダーエコーデータを用いた冬期寒冷前線に伴う突風に対する警戒基準の開発、天気、Vol.56、No.5、pp.41-53、2009.5.
- 3) 瀧下洋一; 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-、測候時報、Vol.78、No.3、pp.57-93、2011.
- 4) 村石尚、杉山友康、香川清治; 実行雨量による災害予測法の検討、鉄道総研報告、Vol.9、No.3、pp.7-12、1995.3.
- 5) 気象庁; 竜巻等の突風データベース、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado> (2016年8月17日閲覧)
- 6) 気象庁; 藤田(F)スケールとは、<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/toppuu/tornado1-2.html> (2016年8月17日閲覧)
- 7) 笠原真吾; 雷ナウキャストにおける雷の解析・予測技術と利用方法、測候時報、Vol.78、No.3、pp.95-140、2011.
- 8) 谷口浩成、黒川浩助、大谷謙仁; 気象衛星「ひまわり」画像から算出した雲移動ベクトルを用いた雲の自動推定、写真測量とリモートセンシング、Vol.39、No.6、pp.4-12、2000.
- 9) 気象庁; 平成19年度末に開始する情報について -シミュレーション事例等の紹介-、平成19年度突風等短時間予測情報利活用検討会、第2回、資料2、2007.11. <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/toppuu/2-shiryu02.pdf> (2016年8月17日閲覧)
- 10) 田中恵信; 平成24年度予報技術研修テキスト、気象庁予報部、pp.88-94、2013.