

Special edition paper

列車運転規制への短時間降雨予測の活用に関する研究



大西 瑞紀^{*1}



中渕 達平^{*2}



内藤 孝和^{*3}

Research on the use of short-term rainfall forecasts for train operation restrictions

Mizuki ONISHI^{*1}, Yohei NAKABUCHI^{*2}, and Takakazu NAITO^{*3}

^{*1,*2}Assistant Chief Researcher, Disaster Prevention Unit of Research and Development Center of JR EAST Group

^{*3}Chief Researcher, Disaster Prevention Unit of Research and Development Center of JR EAST Group

Abstract

To ensure the safety of train operations during heavy rainfall, railways impose train operation restrictions based on the actual values of rain gauges along the line. Under train operation restrictions, when rainfall reaches a preset threshold, the train is immediately stopped even if it is traveling between stations.

In this study, a method for predicting rainfall a short time in advance was developed to prevent trains from stopping between stations when rainfall-related operation suspension restrictions are issued. This developed method was systemized as a "short-term rainfall prediction system," and a monitoring run was conducted by the Transportation Command in 2024. As a result, the prediction accuracy was good, and the effectiveness of this method for train operation restrictions was confirmed.

●Keywords: Predicted rainfall, Rainfall driving restrictions, Operation suspension, Orographic rainfall, Effective rainfall

^{*1}JR東日本研究開発センター 防災ユニット 副主幹研究員

^{*2}JR東日本研究開発センター 防災ユニット 副主幹研究員（現：新潟支社 新潟土木設備技術センター 副長）

^{*3}JR東日本研究開発センター 防災ユニット 主幹研究員

1. はじめに

鉄道では大雨時の列車運行の安全を確保するために、沿線雨量計の観測値に基づき列車運転規制を行っている^①。列車運転規制では、降雨量が運転中止規制の基準値（以下、運転中止基準値）に達すると駅間を走行中であっても直ちに列車を停車させる。列車が駅間に停車すると、降雨が弱まり、周囲の安全が確認できるまで基本的にその場に留まるため、お客様を長時間車内に留める場合がある。輸送指令では、雨量グラフの推移や雨雲レーダーなどから、経験的・感覚的に降雨量が基準値に達する時刻を予想して、運転中止の発令前に列車を駅で停車させる措置をとっている。しかしながら、急な大雨などによって予想が外れる場合もあり、年に数回程度駅間停車が発生している。この課題に対して、降雨量を高い精度で予測できれば、運転中止規制が発令される時刻を予測して列車を安全かつ降車可能な駅で事前に停車させることができる。そこで中渕ら^②は、短時間先の降雨予測に適した手法として、運動学的予測手法である移流モデルと山間部における地形性降雨を再現する物理モデルを組合せた手法を開発した。本稿では、開発した予測手法の概要と、本予測手法のモニターランの実施結果を報告する。

2. 降雨予測を活用した駅間停車の防止方法

降雨予測を活用した駅間停車の防止方法のイメージを図1に示す。降雨予測により手前のA駅・B駅間を走行中にB駅・C駅間での運転中止の発令を予測できれば、手前のB駅で停車させ安全の確保およびお客様の降車が可能となる。また、この方法を実践するためには何分先までの予測が分かればよいかについて検討した。在来線では99.5%の区間で駅間距離が10km未満である。駅間距離が10kmの場合、運転中止規制発令前の速度規制での徐行速度である35km/hで走行すると約17分である。そのため、20分程度先に運転中止規制が発令されることを予測できれば、ほぼすべての区間で列車を次の駅まで走行させたうえで停車させることができると想定される。以上から、駅間停車を防ぐうえでは、20分程度のごく短時間先の降雨を予測できることが重要であると考えた。

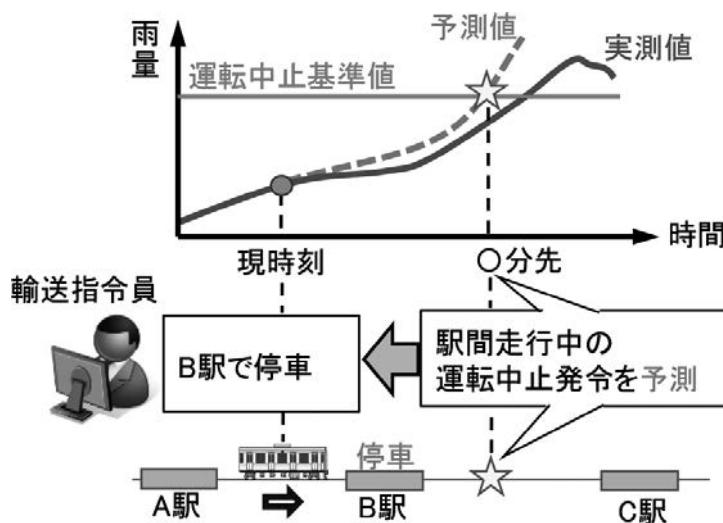


図1 降雨予測情報を活用した駅間停車の防止方法

3. 開発した短時間降雨予測手法

駅間停車の防止に有効な20分程度のごく短時間先の降雨予測に適した予測手法として、本研究では2つの計算モデルを組み合わせた手法を開発した。

1つ目は、椎葉ら³⁾によって開発された移流モデルである。移流モデルによる予測計算の概要を図2に示す。移流モデルでは、気象レーダーで観測される面的な降雨分布(レーダ雨量)を入力値として、直近の雨雲の移動方向・速度を移流ベクトルとして推定する。現時刻における降雨分布を、推定した移流ベクトルに沿って移動させることで将来の降雨分布を予測する。移流モデルは1時間先程度までの短時間の予測で高い精度を發揮するモデルであり、かつ計算負荷が少ないとから即時性に優れている。モデルに入力するレーダ雨量は任意であるため、本検討ではJR東日本管内全域で1分間隔に降雨分布が配信される国土交通省XRAINを用いた。計算時刻の前5分間の降雨分布から移流ベクトルを推定し、1分ごとに予測計算を行った。

2つ目のモデルは中北ら⁴⁾によって開発された地形性降雨モデルである(図3)。山間部では、地形の影響による上昇流で水蒸気が凝結して雲粒が増加する。この雲粒を上層からの降雨が捕捉して雨滴が成長することで降雨量が増加する機構を地形性降雨という。図3に示す地形性降雨モデルは、地形の影響による空気中の雲粒の増加量から、地形性降雨によって増加する降雨量を計算するモデルである。

前述した移流モデルでは地形の要素を考慮しておらず、地形性降雨による雨雲の発達・停滞を再現できないため、山間部での予測精度が低下するという課題があった。そこで移流モデルと地形性降雨モデルを組合せることでこの課題を解決した。各モデルの詳細、具体的な組合せ手法については中渕ら²⁾を参照されたい。

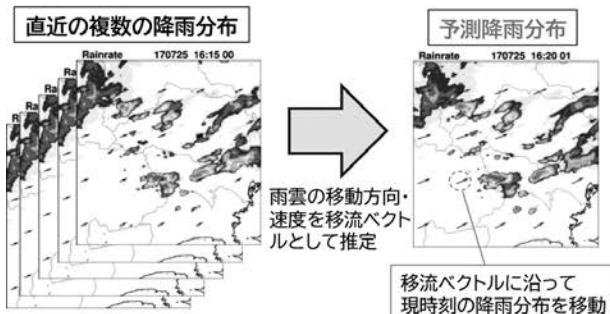


図2 移流モデルの概要

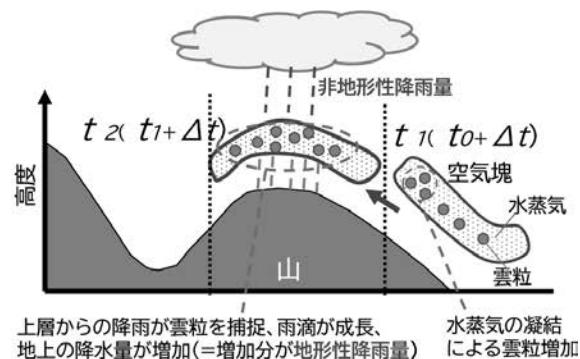


図3 地形性降雨モデルの概要

4. 過去の大雨事例を対象とした予測精度の検証

4・1 検証方法

本開発手法について、多くの雨量計で運転中止規制が発令された過去の大雨事例を対象に予測精度を総合的に評価した。精度の検証方法について以下に述べる。

駅間停車の防止のためには、規制発令時刻を正確に予測することが重要である。そこで、雨量計の値が運転中止基準値を超過した時刻（以下、実規制時刻）と、予測値が運転中止基準値を超過した時刻（以下、予測規制時刻）の差（以下、規制時刻差）に着目して予測精度を検証した。予測規制時刻が実規制時刻に対して遅すぎると判断が間に合わず駅間停車となる可能性がある。また、早すぎても不必要に駅での停車時間が長くなり、安定性を損なう。そのため、規制時刻差は短いほど望ましい。そこで本検証では、予測が適中したとみなせる規制時刻差の範囲を仮定した。具体的には図4に示すように、実規制時刻の15分前から5分後の範囲に予測規制時刻がある場合を適中とした。

予測精度の評価指標には、表1に示す捕捉率および適中率を用いた。捕捉率は見逃しが少ないほど高い値を示すため安全性を評価でき、適中率は空振りが少ないほど高い値を示すため安定性を評価できる。

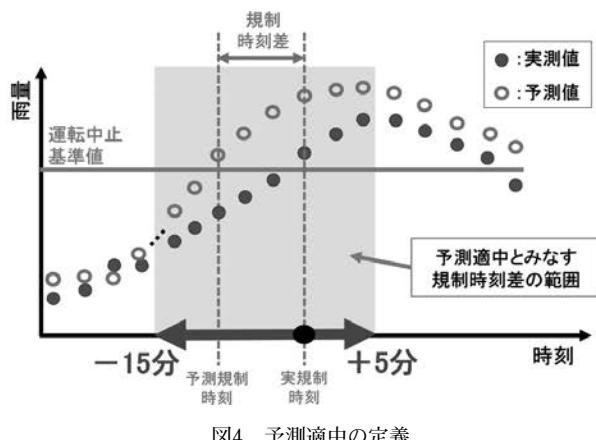


図4 予測適中の定義

表1 予測精度の評価指標

評価指標	算出方法	評価項目
捕捉率	予測が適中した地点数 実測値が運転中止基準値を超過した地点数	見逃しの少なさ （＝安全性）を評価
適中率	予測が適中した地点数 予測値が運転中止基準値を超過した地点数	空振りの少なさ （＝安定性）を評価

4・2 検証結果

予測精度の検証にあたり、表2に示す3件の大雨事例で検証を行った。表2には、開発した予測手法による10分先予測、20分先予測の精度評価結果も併せて示している。表2によると、3事例とも10分先予測では、捕捉率・適中率とも80%～90%台であり高い予測精度を示している。また、20分先予測についても3事例ともに捕捉率・適中率は60%以上であり、事例によっては90%付近の高い予測精度を示した。以上の検証結果から、本開発手法により運転中止規制の発令時刻を精度高く予測できる可能性があることが分かった。

表2 検証した大雨事例の詳細と予測精度の評価結果

大雨事例	発生日	検証領域	検証した大雨事例の詳細		予測精度の評価結果			
			雨量計地点数		10分先予測		20分先予測	
			全地点数	規制発令地点数	捕捉率	適中率	捕捉率	適中率
2019年台風第15号	2019/9/8	関東全域	107	51	94%	94%	75%	76%
2019年台風第19号	2019/10/12	太平洋側東日本の全域	307	177	81%	87%	64%	61%
2020年7月梅雨前線	2020/7/27	山形県を中心とする領域	88	27	81%	88%	89%	92%

5. 降雨予測情報配信のモニターラン

5・1 モニターランの概要

本開発手法を「短時間降雨予測システム」としてシステム構築し、2024年度の雨季にJR東日本管内の輸送指令で降雨予測情報配信のためのモニターランを実施した。対象とした指令は関東地方の指令Aと東北地方の指令Bの2指令とした。また、対象とする地点は、指令A、Bが管轄する線区内の運転中止規制のある雨量計地点を対象とした。(指令A:41地点、指令B:63地点)

本システムは、監視画面とグラフ画面の2種類から構成される。画面の一例を図5に示す。監視画面では、雨量計地点ごとに運転中止基準値の超過有無の判定結果を表示する。雨量計の観測値または予測値が運転中止基準値を超過した場合は、該当する地点の背景色が赤色となり10秒程度アラート音が鳴動する。また、監視画面の雨量計地点をクリックすると、グラフ画面が別タブで表示される。グラフ画面は、雨量計地点ごとの45分前から現時刻までの雨量計の観測値、および10分先、20分先予測値を、JR東日本で降雨時運転規制に使用している雨量指標である実効雨量の半減期1.5時間(短指標)、半減期6時間(中指標)、半減期24時間(長指標)のグラフ別に表示する。なお、本システムには、指定した雨量計地点における過去の雨量計の観測値と予測値を1分ごとに時系列で出力できる機能、および運転中止基準値を超過した地点と時刻の履歴を出力できる機能を保有する。

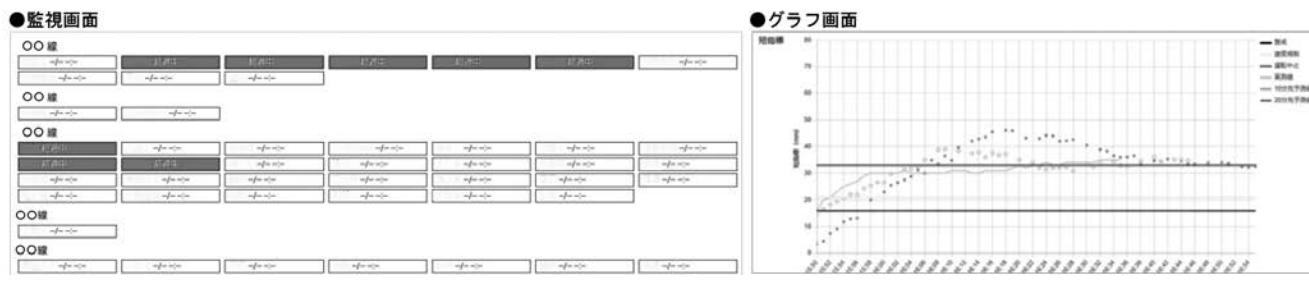


図5 短時間降雨予測システムの画面一例

5・2 精度検証結果

本開発手法についてモニターラン期間中の予測精度を検証した。検証にはモニターラン期間中の降雨事例を使用し、精度の評価には4項と同様に捕捉率と適中率を用いた。表3に指令A、Bの対象地点における精度検証結果を示す。指令Aの適中率は100%と高く、空振り予測は発生しなかった。また、捕捉率も10分先予測は80%、20分先予測でも60%と高い傾向が確認されたが、事例②③に関しては実際に運転中止規制が発令された地点が1地点のみであり、降雨の事例数が少ないと留意する必要がある。一方、指令Bは、指令Aと比べて捕捉率、適中率ともに低い傾向が確認されたが、10分先予測では表2に示す過去の大気事例での評価結果と同程度の予測精度を概ね確保できていることが確認された。そのため、今回のモニターランでは本開発手法の有効性を確認することができた。

表3 モニターラン時の指令A、指令B管内の雨量計地点の精度検証結果

指令	検証した降雨事例の詳細			予測精度の評価結果				指令	検証した降雨事例の詳細			予測精度の評価結果					
	降雨事例	発生日	雨量計地点数		10分先予測		20分先予測			降雨事例	発生日	雨量計地点数		10分先予測		20分先予測	
			全地点数	規制発令地点数	捕捉率	適中率	捕捉率	適中率	全地点数			規制発令地点数	捕捉率	適中率	捕捉率	適中率	
(関東地方)	①梅雨前線	2024/6/29	41	3	100%	100%	100%	100%	(東北地方)	①梅雨前線	2024/7/9	63	2	100%	40%	50%	25%
	②停滞前線	2024/9/27	41	1	0%	—	0%	—		②梅雨前線	2024/7/25	63	19	68%	100%	42%	67%
	③前線	2024/11/2	41	1	100%	100%	0%	—		③前線	2024/9/20	63	15	73%	100%	53%	100%
合計					80%	100%	60%	100%	合計					72%	90%	47%	71%

図6にはモニターラン期間中の降雨事例のうち、指令Aの事例①において予測が適中していたC地点について、雨量計観測値と20分先予測値の推移を示す。この地点では、23:54に配信された20分先予測値で運転中止規制を予測しており、予測規制時刻は0:14であった。実規制時刻は0:23であるため9分早く規制を予測していたが、実規制時刻の約29分前にアラートが鳴動しており、運転中止規制の発令を早めに予測できていた事例である。また、図7には指令Bの事例①において予測が適中していたD地点の雨量計観測値と20分先予測値の推移を示す。この地点では実規制時刻と予測規制時刻が一致しており、運転中止規制となる時刻を正確に予測できていた。実規制時刻の約20分前にアラートが鳴動しており、この事例も運転中止規制の発令を早めに予測できていた事例である。

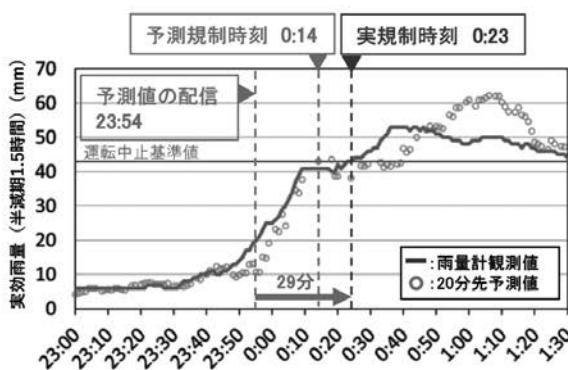


図6 指令A管内の事例①、C地点における雨量計観測値と20分先予測値の推移

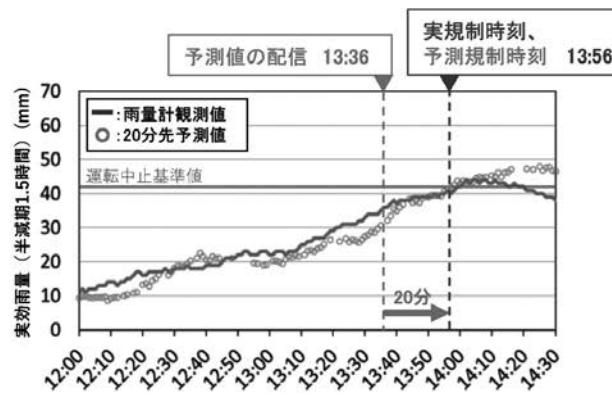


図7 指令B管内の事例①、D地点における雨量計観測値と20分先予測値の推移

6. まとめと今後の課題

本研究では、列車運転規制発令時の駅間停車の防止を目的として、10分～20分のごく短時間先の降雨予測手法を開発し、本手法を活用するための検討を行った。本開発手法について過去3件の大気事例を対象に予測精度を検証した結果、いずれの事例でも10分先予測は80%以上、20分先予測では60%以上という確率で運転規制の発令時刻を精度良く予測できることが確認された。2024年度にはこの開発手法を「短時間降雨予測システム」としてシステム構築し、雨季に2ヶ所の輸送指令で降雨予測情報配信のためのモニターランを実施した。モニターラン期間中の降雨事例の予測精度を検証した結果、精度は両指令で違いはあるものの、過去3件の大気事例でシミュレーションした結果から期待していた程度の精度を確保できていることが確認された。そのため、今回のモニターランからは本開発手法の有効性が確認できた。

今後はより多くの降雨事例を用いて本開発手法の精度検証を実施し、引き続き本手法の列車運転規制判断への活用可能性を検討していく。

参考文献

- 島村誠：降雨・河川増水に対する運転規制方法等の改正、日本鉄道施設協会誌、第27巻第6号（1989）、pp.37-40。
- 中瀬遙平、中北英一：列車運転規制のための地形性降雨を考慮した地上雨量推定と短時間降雨予測に関する研究、土木学会論文集、80巻5号（2024）。
- 椎葉充晴、高橋琢馬、中北英一：移流モデルによる短時間降雨予測手法の検討、第28回水理講演会論文集（1984）、pp.423-428。
- 中北英一、寺園正彦：地形性降雨の非地形性降雨に対する非線形効果を考慮した短時間降雨予測手法、水工学論文集、第52巻（2008）、pp.331-336。