

地形性降雨を考慮した短時間降雨予測による 列車運転規制方法に関する研究

Investigation on the Train Operation Control Method with Short-term Rainfall Prediction Considering the Orographic Rainfall

中瀨遥平⁽¹⁾・中北英一

Yohei NAKABUCHI⁽¹⁾ and Eiichi NAKAKITA

(1) 東日本旅客鉄道株式会社

(1) East Japan Railway Company, Japan

Synopsis

Railway operators enforce the train operation control based on real-time rainfall values observed by rain gauges to ensure safe train operation in heavy rainfall events. Now by utilizing rainfall forecasting information they may make train operation safer. In this study, with the short-term prediction method combining the translation model and the orographic rainfall model suitable for the train operation control, we verify the accuracy of estimating real-time ground rainfall values and the accuracy of predicting times when the train operation control issues, and study introducing the correction method. As a result of verification at many railway rain gauge points in the east Japan when typhoon No.19 in October 2019 passing, we found that the accuracy of real-time estimation of ground rainfall values is improved by using the orographic rainfall model. And by the prediction method considering orographic rainfall model corrected using real-time prediction errors, it is possible to predict times when the train operation control issues with high accuracy, and indicate advantage in terms of ensuring safety.

キーワード: 列車運行, 降雨予測, 移流モデル, 地形性降雨

Keywords: Train operation, Rainfall prediction, Translation model, Orographic rainfall

1. 序論

鉄道では、降雨に起因した土砂災害などから列車運行の安全を確保するために、雨量計で観測される実況値に基づいて運転中止や速度規制といった列車運転規制を行っている(島村, 1989)。雨量計による列車運転規制では、降雨量の実況値が運転中止基準値(以下、単に基準値と呼ぶ)に達すると、直ちに列車の運行を停止する。そこで、列車指令員は、列車が駅と駅の間(駅間)で停止することを防ぐために、

降雨量が基準値に達する時刻を予想して、運転中止が発令される前に事前に駅に列車を停車させている。しかし、予想が外れると列車は駅間に停車し、乗客を長時間車内に留めることになる。さらに鉄道は山間部を通る路線が多く存在するが、鉄道における降雨災害は主に鉄道沿線で発生する土砂災害で、土砂災害の多くは山間部で発生する。山間部の路線で上述した駅間停車となると、停車中に近傍で土砂災害が発生し、乗客を車内に留める時間が長時間化することや災害に巻き込まれるリスクも考えられる。

そこで筆者らは数十分先までのごく短時間の降雨予測手法を用いて、運転中止が発令する時刻を予測し、列車を安全かつ降車可能な駅で事前に停車させる手法の確立を目指して研究を進めてきた(中渕ら, 2020) (中渕ら, 2021)。その結果、国土交通省XRAIN(eXtended RAdar Information Network)のCX合成雨量を入力値として、椎葉ら(1984)による移流モデルから得られる予測値を直近の予測誤差を反映して補正することである程度の精度で運転規制の発令時刻を予測できることがわかった(中渕ら, 2020)。一方で、予測が適中しない事例も多く存在し、移流予測の雨域の移動先が実況と異なることが一因であることがわかった(中渕ら, 2021)。また、水田ら(2021)によると山間部で発生する地形性降雨では、気象レーダーの観測高度よりも下層で降雨量が増加することで、CX合成雨量が雨量計の観測値よりも過少になる場合があり、この影響もCX合成雨量を初期値とする移流モデルの予測精度低下の一因と考えられた。

そこで筆者ら(2022)は、さらなる予測精度の向上を目的に、移流モデルと立平(1976)により提案された地形性降雨算定手法を組み合わせる予測手法について検討した。具体的には、2019年10月の台風19号通過時の箱根山周辺を対象としてAMeDAS箱根雨量計の観測値との比較による予測雨量の精度検証を行い、地形性降雨を考慮することで移流モデルのみの場合よりも予測精度が向上する可能性があることを示した。

本研究では、降雨予測情報の活用による駅間停車の防止に向けた検討をさらに進めるべく、東日本はほぼ全域を対象に約300地点の鉄道雨量計の観測値との比較から、地形性降雨を考慮した予測手法の有効性を検証した。検証の対象事例には、東日本エリアの広範囲にわたり大雨をもたらし、かつ地形性降雨の発生により山間部でとくに強い雨が発生した2019年10月の台風19号を用いた。

本論文の構成を以下に述べる。まず2章で駅間停車防止のために必要な予測のリードタイムについて検討し、3章で本研究に用いる予測手法、4章で検証の対象事例と領域について述べる。続く5章で予測精度に影響があると考えられる、地形性降雨算定手法による実況雨量の推定精度の検証を行う。6章で予測雨量の精度の検証、7章で運転規制の発令予測精度の検証を行い、8章では予測精度向上のための補正方法の検討も行う。最後の9章にて、本研究で得られた結論をまとめ今後の課題について述べる。

2. 駅間停車の防止に必要なリードタイム

本研究で目指す降雨予測情報を活用した駅間停車の防止方法の概要をFig. 1に示す。Fig. 1において、通常通りの運行ではB駅・C駅間を走行中に雨量計の実測値が基準値を達して駅間停車となる。これに対し、降雨予測情報により手前の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駅で停車させることができ、安全の確保および乗客の降車が可能となる。

ここで、この方法を実践するために必要となる降雨予測情報のリードタイムについて考察する。Fig. 1より、ある駅間を走り抜ける前に、次の駅間での運転中止の発令が予測できる必要がある。Fig. 2に東日本旅客鉄道株式会社(以下、JR東日本という)の在来線の全営業線区間、約1700区間における駅間の距離の分布を示す。駅間の距離はほぼ10km未満であり、平均値は約3.6kmである。列車運転規制では、一般的に観測される降雨量が大きくなるにしたがって、速度規制、運転中止の順で発令される。速度規制での徐行速度は35km/hであり、速度規制の発令時に一駅間を走行するのに要する時間は、駅間距離10kmの場合で約17分である。したがって、20分程度先に運転

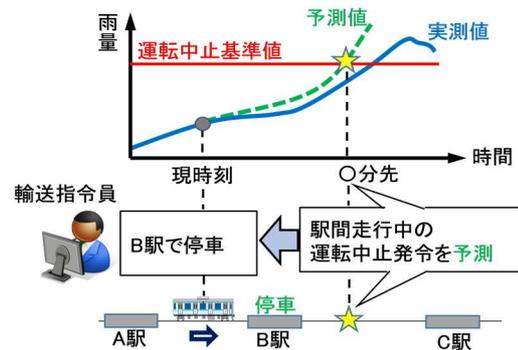


Fig. 1 Method to preventing stop trains between stations by using the rainfall prediction.

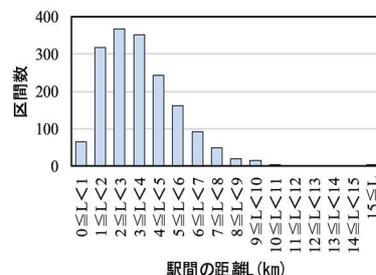


Fig. 2 Distances between stations in the JR East.

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上で停車させることができる。さらに、10分程度先の降雨予測情報でも、全区間の88%にあたる駅間距離5.8kmまでの区間で手前の駅に停車させることが可能となる。

以上から、本研究で提案する駅間停車の防止方法に用いる降雨予測情報に必要なリードタイムとして、10分および20分を想定し、10分先予測値および20分先予測値について検証を行うこととした。

3. 地形性降雨を考慮した短時間降雨予測手法

3.1 地形性降雨算定手法

本研究では、立平 (1976) によって提案された物理的計算手法を用いる。この手法は、気塊が山岳斜面に沿って上昇することによる水蒸気凝結や雲粒自身の成長、SeederFeeder機構による降水への転換を考慮した手法である。雲粒の速度が空気の色度に等しいとすれば、気塊中の雲水量 L_c [g/m³]の時間変化は式(1)の様に表される。

$$\frac{dL}{dt} = -cL - a(L - L_c) + WG - WL \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここで、 c は上空からの降水雲粒捕捉 (Seeder Feeder 機構による) の割合、 a は雲粒自身による降水への成長 (Auto Conversion) の割合、 L_c [g/m³]は降水へと転換する限界の雲水量、 W [m/s]は斜面による気塊の上昇速度、 G [g/m⁴]は気塊が単位距離上昇する間の水蒸気凝結による L の増加量、 ρ [g/m³]は水蒸気量を表す。右辺第一項と第二項は降水へ転換することによる雲水量の減少を表し、右辺第三項は気塊の上昇による水蒸気の凝結を、右辺第四項は大気の色縮性による見かけ上の L の変化を表す。右辺第四項は第三項に比べて1オーダー小さいので無視し、この式を流れに沿って時間的に積分すると、

$$L_{out} = \frac{WG + aL_c}{c + a} + \left(L_{in} - \frac{WG + aL_c}{c + a} \right) e^{-(c+a)\Delta t} \quad (2)$$

となる。ここで、 L_{out} [g/m³]はメッシュから流出する雲水量、 L_{in} [g/m³]はメッシュへ流入する雲水量、 Δt [s]は気塊が1メッシュを通過する時間である。地形性降雨強度 R_0 [mm/h]は、 L_{in} 、 L_{out} 、メッシュ内を気塊が通過する間に凝結し増加した雲水量 $WG\Delta t$ の収支を考えると、式(3)により解析的に計算される。ここで、 H [m]は上下方向に物理量を一様と考える層厚である。

$$R_0 = \frac{L_{in} + WG\Delta t - L_{out}}{\Delta t} \times 3.6 \times H \quad (3)$$

3.2 レーダー情報からの地形性降雨分離手法

レーダー情報から得られた降雨強度 R_{radar} を地形の影響を受けない非地形性降雨強度 R_N と地形性降雨強度 R_0 に分離する数値計算方法は中北・寺園 (2008) の手法を Guimaraes・中北 (2021) が発展させたものを用いた。

レーダー情報による降雨強度 R_{radar} を非地形性降雨強度 R_N と地形性降雨強度 R_0 の和であると仮定し、

$$R_{radar} = R_0 + R_N \quad (4)$$

と表す。ここで中北・寺園 (2008) は、立平 (1976) の論文中で示されている捕捉率 c と非地形性降雨強度 R_N の値をフィッティングすることで式 (5) の様な非線形関係を求めた。

$$c = 0.6778R_N^{0.731} \times 10^{-3} \quad (5)$$

この式 (5)を式(2)に代入し、得られる L_{out} の値を式(3)に代入することにより、地形性降雨強度 R_0 が非地形性降雨強度 R_N の関数として表されるため、式(4)と連立することでレーダー情報の分離が可能となる。本研究ではこの手法を、鉛直7層の物理量一定の大気層に適用した。具体的には、 σ 座標系で高度200m、400m、1000m、2000m、3000m、4000m、5000mの物理量を代表値とする、層厚200m~1000mの大気層を設定した。中北・寺園(2008)と同様の推定手法を用いて、GPV情報を水平方向1km四方、垂直方向15層の等圧面データに内挿して大気場 (風向・風速・水蒸気量・飽和水蒸気量)を推定し、入力データとした。また、レーダー降雨強度としてはXRAINのCX合成雨量を高度2000mの雨量として入力した。本研究の地形性降雨算定手法を Fig. 3 に模式的に示す。各メッシュについて、レーダー降雨強度 R_{radar} の入力層とした高度2000m層を計算の起点とし、上層に向かっては前述した分離の計算手法により上の層から降ってくる R_N が算出される。下層に向かっては、 R_{radar} を下層の層にとっての R_N とし、これを入力値とすることで下の層で発生する R_0 が算出される。これらの計算を最上層、または最下層まで繰り返すことで各層の R_N 、 R_0 が算出される。これにより、地形性降雨を考慮した地表付近の総降雨強度 R_T が、最下層の R_N と R_0 (Fig. 3における R_{N3} と R_{O3})の和として求められる。本研究では中北・寺園 (2022) と同様に地形性降雨の算定計算を空間分解能1km、計算間隔5分毎で行い、その算出結果を予測計算に用いた。

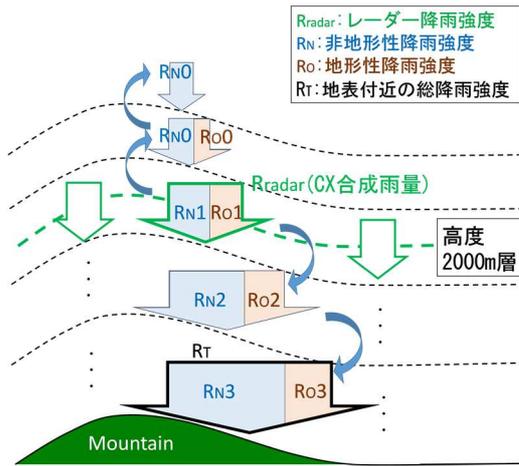


Fig. 3 Orographic rainfall model in multiple layers.

3.3 地形性降雨算定手法と移流モデルの組合せ方法

椎葉ら (1984) による移流モデルでは、降雨分布の変化を式(6)のように表現し、降雨強度分布 $R(x, y)$ を移流ベクトル $(u(x, y), v(x, y))$ に沿って移流させながら $\delta(x, y)$ で発達・衰弱させる。ただし、 (x, y) は位置座標である。

$$\frac{\partial R(x, y)}{\partial t} + u(x, y) \frac{\partial R(x, y)}{\partial x} + v(x, y) \frac{\partial R(x, y)}{\partial y} = \delta(x, y) \quad (6)$$

ここで、雨域の移流ベクトル $u(x, y), v(x, y)$ 、単位時間当たりの発達・衰弱量 $\delta(x, y)$ は、式(7)のように位置の一次式として表現している。

$$\begin{aligned} u(x, y) &= c_1 x + c_2 y + c_3 \\ v(x, y) &= c_4 x + c_5 y + c_6 \\ \delta(x, y) &= c_7 x + c_8 y + c_9 \end{aligned} \quad (7)$$

$c_1 \sim c_9$ は推定されるべきパラメータである。 $c_1 \sim c_9$ は時々刻々と得られる観測データから、式(6)と合わせて線形最小二乗推定問題を解くことで得られる。観測データが得られるごとに $c_1 \sim c_9$ は更新され、それをもとに降雨強度分布の予測値が算出される。

これまでの研究 (中瀬ら, 2020) では、1分毎に配信されるCX合成雨量を用いて、初期時刻1分間隔で移流モデルによる予測計算を行った。予測計算には、初期時刻5分前までの、1分間隔の5時刻分のデータを用いた。初期時刻を1分間隔としたのは以下の理由による。JR東日本の鉄道雨量計では1分毎の降雨量が観測されており、列車運転規制の発令判断も1分毎に行

われる。したがって、規制発令時刻の予測に使用する降雨予測情報もこれに合わせて1分毎としたほうが、規制発令時刻を精度高く予測する上で有利となるためである。そこで本研究で用いる地形性降雨を考慮した短時間降雨予測手法についても、1分毎の予測値が算出可能なスキームで計算を実施した。

本研究で用いた地形性降雨算定手法と移流モデルの組合せ方法を Fig. 4 に示す。本研究では、3.2においてレーダー入力層 (高度 2000m) で分離される非地形性降雨強度 R_N (fig. 4 中の R_{N1}) に移流モデルを適用する。まず、CX 合成雨量を入力値として地形性降雨算定手法により、分離される非地形性降雨強度 R_N とレーダー入力層以下で発生する地形性降雨強度 R_O (fig. 4 中の $R_{O1} \sim R_{O3}$ の和) が 5 分毎に算出される。次に、1分毎のCX 合成雨量と予測計算の初期時刻直近の地形性降雨算定結果から、 R_{radar} と R_N の比を用いて直近 5 分間の R_N の分布を推定する。初期時刻における直近 5 分間の R_N 分布を式(6)の $R(x, y)$ とみなし、移流ベクトルを推定する。初期時刻時点の R_N 分布を推定した移流ベクトルに沿って予測先時刻まで外挿する。数十分程度のごく短時間先の予測であるため地形性降雨強度 R_O は初期時刻の分布のまま停滞すると仮定し、予測先時刻における R_N と R_O を合成することで、予測先時刻における地表付近の総降雨強度 R_T を推定する。

なお、筆者ら (2022) のこれまでの検討で台風のように風速の強い事例では、雨量計の観測値を推定する場合に、雨量計直上のメッシュよりも隣接する風上側のメッシュのほうが近い値を示す場合があることがわかっている。そこで、この影響を考慮する簡易的な手法として、直近の計算結果と対象とする雨量計の観測値の情報から予測値を用いるメッシュを判断する手法を用いた。具体的には、5分間隔の地形性降雨算定計算のタイムステップ毎に、雨量計地点

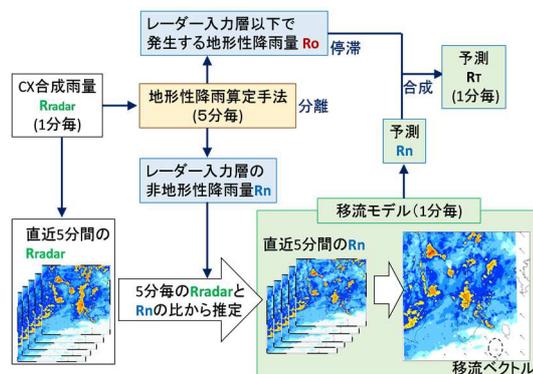


Fig. 4 Calculation flow of the prediction method considering orographic rainfall with CX composite data as input.

の直上 9 メッシュの実況 R_T と観測値を比較し、最も誤差が小さいメッシュの値を次のタイムステップにおける雨量計地点の予測値として用いることとした。

4. 検証の対象事例と領域

検証に使用する降雨事例として 2019 年 10 月の台風 19 号を用いた。台風 19 号の接近、上陸に伴い、台風経路の左側にあたる東日本から東北地方を中心に広い範囲で記録的な大雨が観測された (Fig. 5, 気象庁 (2019) より引用)。台風 19 号が記録的な大雨となった気象要因としては、大型で非常に強い勢力をもった台風の接近による多量の水蒸気の流れ込みや地形の効果などによる持続的な上昇流の形成、台風中心付近の発達した雨雲の直接的影響などが報告されている。これらの要因によって地形性降雨が発達し、山地の南東から東の斜面となる地域での降水量が明瞭に多くなっていた。台風 19 号通過時の大雨により、東日本の各地で土砂災害や河川の氾濫などの災害が発生し、鉄道沿線でも被害が発生した。

Fig. 6 に東日本全域の JR 東日本の在来線路線と本研究の対象領域および対象領域内の鉄道雨量計の位置を示す。図中に青枠で示した関東平野から山梨県・静岡東部にかけての関東全域、主に茨城県北部・栃木県・福島県からなる東北南部、宮城県北部から岩手県にかけての東北東部の 3 つの領域を本研究の解析対象領域とした。各領域の詳細情報を Table 1 に示す。3 領域とも概ね 200km 四方の領域であり、各領域内に 100 地点程度の鉄道雨量計が存在する。3 領域合わせた 307 雨量計のうち、約 60% にあたる 177 雨量計で降水量が基準値を超えて運転規制が発令した。このことから、台風 19 号により、鉄道沿線でも広範囲で災害の危険性のある大雨が発生したことがわかる。解析期間は、台風 19 号の進行に併せて、関東全域が 10 月 12 日 0 時から 10 月 13 日 0 時、東北南部および東北東部が 10 月 12 日 6 時から 10 月 13 日 6 時のいずれも 24 時間を解析対象とした。なお、運転規制の発令時刻もすべての雨量計でこの期間内である。

5. 地表付近の実況雨量推定精度の検証

台風 19 号通過時の箱根山周辺等山岳部では、地形性降雨の発生によりレーダーの最低観測高度 (2000m 付近) よりも低い層で多量の雨が存在する降雨構造であったため、CX 合成雨量の雨量値が雨量計の観測値よりも過少傾向であったことが報告されている (水田ら, 2021)。3 章で述べたように本研究で用いる予測手法では計算過程で初期時刻における地表付近の実況降雨量の推定を行う (Fig. 3 の R_T)。

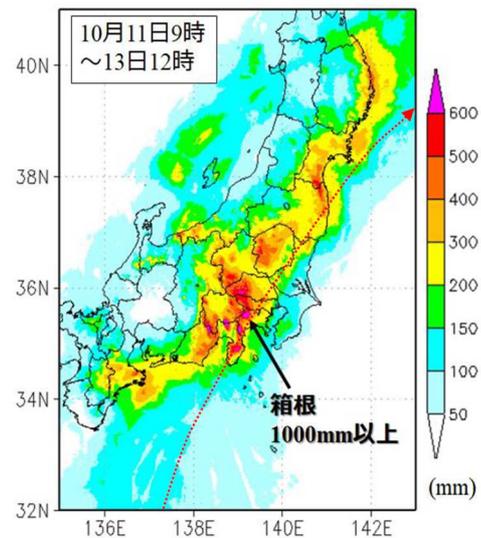


Fig. 5 . 2019 Typhoon No. 19's path and an accumulated rainfall distribution (JWA, 2019).

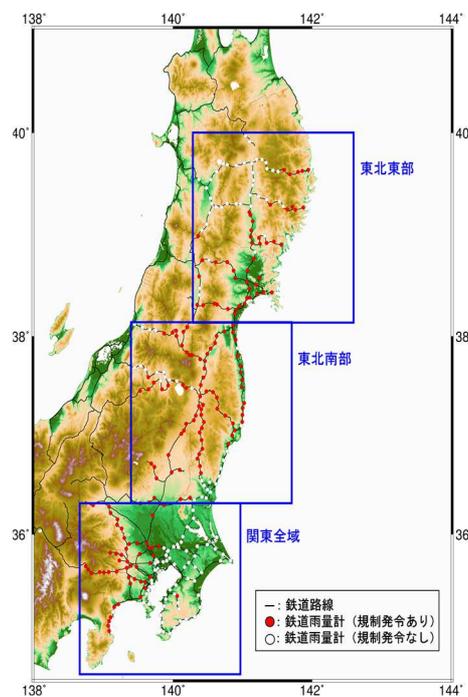


Fig. 6 The target areas and the locations of the railway rain gauges (the blue frames indicates the target area).

Table 1 Details of the target areas.

		関東全域	東北南部	東北東部	計
領域の 広さ (km)	東西	221	205	191	—
	南北	201	211	199	—
雨量計数	規制発令なし	59	30	41	130
	規制発令あり	49	80	48	177
計		108	110	89	307
解析期間	開始	10/12 0:00	10/12 6:00	10/12 6:00	—
	終了	10/13 0:00	10/13 6:00	10/13 6:00	—

実況 R_T の推定精度が高ければ地形性降雨算定手法を用いることの有効性が確認でき、予測雨量の精度向上も期待できるため、本章では解析対象領域における地表付近の実況雨量推定精度を検証した。

5.1 解析期間における積算雨量分布の分析

まず解析期間内の積算雨量、すなわち24時間積算雨量の分布状況から地形性降雨算定手法による実況雨量の推定精度を検証した。Fig. 7に、関東全域におけるCX合成雨量と地形性降雨算定手法により推定される地表付近の24時間積算雨量の分布を示す。24時間積算雨量は、解析期間におけるCX合成雨量は1分毎、地形性降雨算定手法は5分毎の降雨強度から算出した。また、Fig. 7の平面図では鉄道雨量計地点をプロットで示し、鉄道雨量計の観測値の24時間積算雨量をプロット内の色で示している。さらに、領域内の地形を高度300m毎の等高線で示す。

Fig. 7の左側に示したCX合成雨量の分布について、破線の円で示した御嶽山・高尾山等の山間部では、鉄道雨量計の観測値と比較してCX合成雨量の24時間積算雨量は小さな値であることがわかる。一方、中央に示した地形性降雨算定手法による推定結果では、山間部の雨量が全体的に増加しており、雨量計の観測値に近づいていることがわかる。Fig. 7の右側には、中央の図中のAA'、BB'断面における各高度で発生する地形性降雨量 (Fig. 3中の $R_{00} \sim R_{03}$) を示しており、中央の図の破線の円と対応する箇所を同様に示している。この図から、レーダー入力層よりも下層で地形性降雨の発生が再現され、推定される地表付近の総降雨量 R_T の増加に寄与していることがわかる。とくに斜面の勾配が急な山間部で地形性降雨

の増加量が大きくなっている。

Fig. 8に東北南部についての24時間積算雨量の推定結果を示す。東北南部でも地形性降雨算定手法により山間部での降雨量の増加が確認できる。破線の円で示した箇所に着目すると、CX合成雨量は鉄道雨量計の値と比較して小さな値となっている。一方で、地形性降雨算定手法では地上雨量計の観測値に近い推定分布となっている。当該箇所について推定される地形性降雨量の鉛直分布を確認すると、関東全域での推定結果と同様に、山間部でレーダー入力層よりも下層での地形性降雨の発生が再現されている。この結果、山間部での推定結果がCX合成雨量よりも鉄道雨量計の観測値に近づいたと考えられる。

Fig. 9に東北北部についての24時間積算雨量の推定結果を示す。東北北部では、破線の円で示した付近などで地形性降雨算定手法による精度向上効果が確認できるものの、全体的にCX合成雨量と地形性降雨算定手法の推定結果の差が小さい。Fig. 5に示した台風中心の経路より、東北北部通過時点で台風19号は陸上から離れた位置にある。これにより、関東全域・東北南部通過時よりも陸上での風の強さと水蒸気の流入が弱まったことで地形性降雨が他の領域よりも発達しなかったと考えられる。なお、Fig. 9の左図に白矢印で示した2地点は、鉄道雨量計の観測値とCX合成雨量の値に大きな差がある。これらの地点は最寄りのXRAINのXバンドMPレーダーから60km以上離れた定量観測範囲外 (国土交通省、レーダ雨量計情報HP) であることの影響と考えられ、以降の雨量に関する検証ではこの2地点は検証対象から除外することとした。

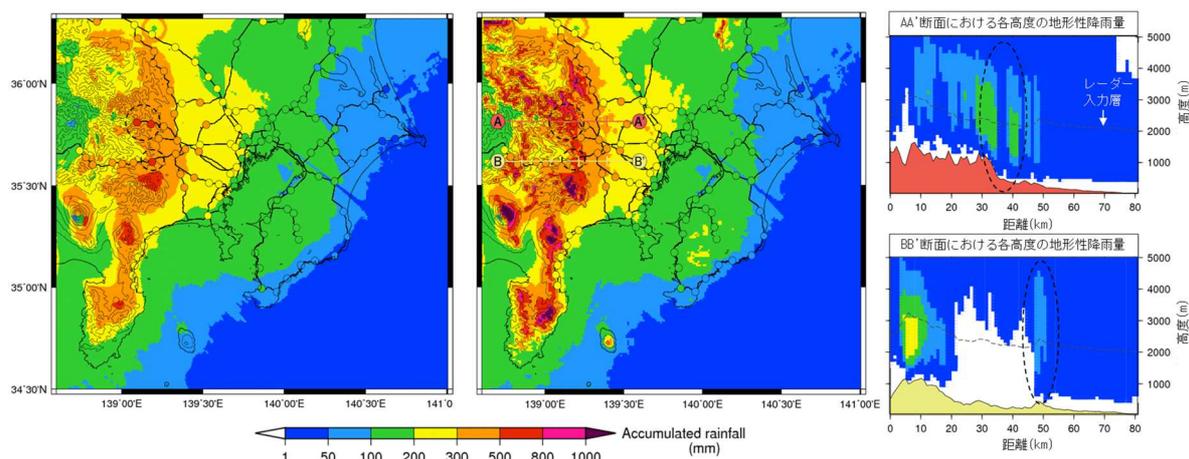


Fig. 7 Distribution of estimated 24-hour accumulated rainfall near the ground surface of Kanto. From the left, the CX composite rainfall, estimated result of the orographic rainfall model, and the vertical distribution of orographic rainfall estimated at each altitude in the AA' and BB' sections in the middle figure. The plots in the figure show the railway rain gauges, and the colors inside the plots the value of 24-hour rainfall observed by the rain gauges.

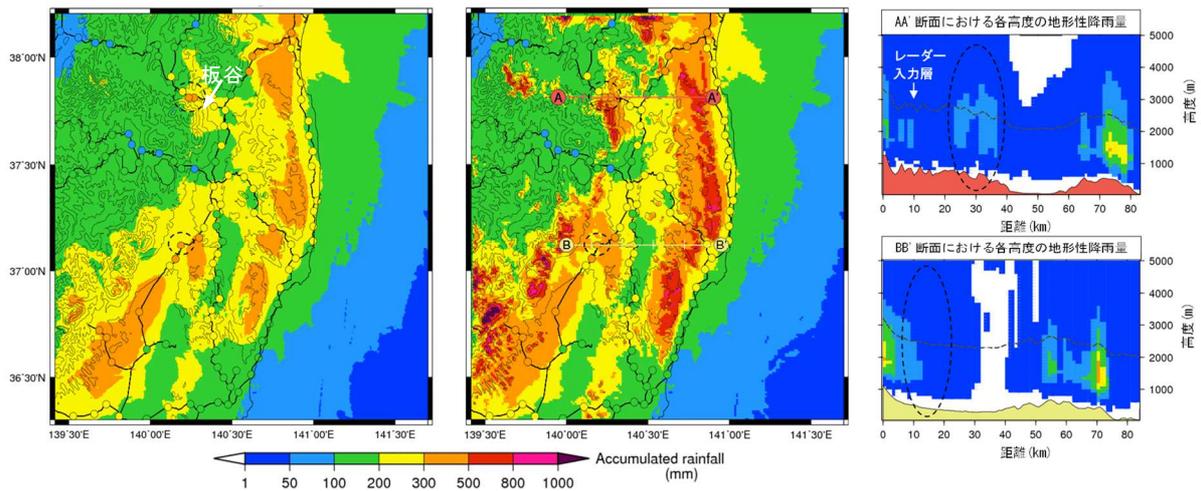


Fig. 8 Distribution of estimated 24-hour accumulated rainfall near the ground surface of the south Tohoku. Details of each figure are same to Fig. 7.

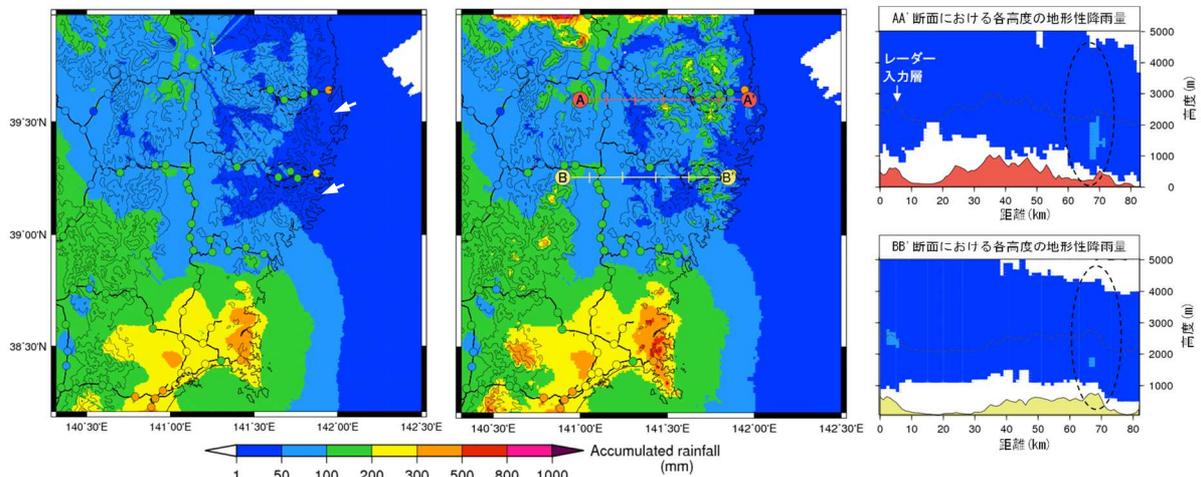


Fig. 9 Distribution of estimated 24-hour accumulated rainfall near the ground surface of the east Tohoku. Details of each figure are same to Fig. 7.

5.2 雨量計地点の標高と精度評価指標の関係の分析

地形性降雨算定手法による地上雨量の推定精度向上効果について精度評価指標を用いて詳細に分析した。精度評価指標には RMSE と回帰係数 (近似直線 $y=ax$ の a) を用いた。対象 3 領域の 305 雨量計 (全 307 雨量計から Fig. 9 左図の白矢印の 2 地点を除外) について、5 分毎の時系列データから回帰係数と RMSE を算出し、その傾向を分析した。分析方法として、地形性降雨が発生しやすい山間部での精度向上効果を確認するため、各地点の標高と RMSE および回帰係数の関係に着目した。

まず鉄道雨量計地点毎の分析の例として、東北部の山間部の鉄道雨量計である奥羽本線板谷雨量計の推定結果を示す。板谷雨量計の位置は Fig. 8 の左図に白矢印で示しており、標高は 550m である。Fig. 10

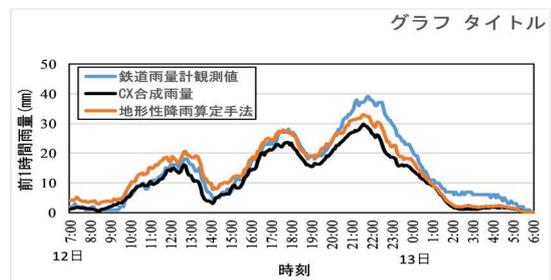


Fig. 10 Time series of hourly rainfall at the Itaya rain gauge.

に板谷雨量計地点における鉄道雨量計の観測値、CX 合成雨量、地形性降雨算定手法による 5 分毎の前 1 時間雨量の推移を示す。なお、3.3 で述べたように台風のように風速の大きな降雨事例では風上側の隣接メ

ッシュの値が雨量計地点の値をよく再現する場合があることから、雨量計観測値の比較対象とするメッシュは、雨量計の直上9メッシュのうち、前時刻(5分前)の計算結果において最も誤差の小さなメッシュとした。Fig. 10より、CX合成雨量は鉄道雨量計の観測値よりも小さな値を示す時間帯が多くあることがわかる。一方、地形性降雨算定手法による推定雨量はCX合成雨量よりも全体的に大きな値を示し、その結果鉄道雨量計の観測値に近い値となっている。

Fig. 11 に 5 分毎の 1 時間雨量を散布図で比較した結果を示す。鉄道雨量計と比較したときの平均的な大きさを示す回帰係数は、CX 合成雨量が 0.77 であるのに対し、地形性降雨算定手法では 0.93 となっており、1 に近い値を示す。また、RMSE も後者のほうが小さくなっており、地形性降雨算定手法による精度向上効果が定量的な指標からも確認できる。

Fig. 12 に、各鉄道雨量計について、板谷雨量計と同様に雨量計の観測値とCX合成雨量および地形性降雨算定手法による推定値の1時間雨量を比較したときの、RMSE・回帰係数を標高毎にプロットした結果を示す。Fig. 12 中には参考として板谷雨量計のプロットを破線のコで示しており、右上の表には標高300mを境界とした各指標の地点平均値を記載した。上段のRMSEの結果について、標高300m以上に着目すると多くの地点でCX合成雨量よりも地形性降雨算定手法のほうがRMSEが小さい。平均値から、地形性降雨算定手法によるRMSEの減少幅は、300m以上の地点のほうが300m未満の地点よりも全体的に大きい。なお、東北東部の地点はCX合成雨量、地形性降雨算定手法ともRMSEが小さくなっている地点が多くあるが、これは東北東部の山間部では前述したように地形性降雨が他の領域よりも発達せず、全体的に降雨量が小さかったためと考えられる。下段の回帰係数の結果についても標高300m以上の地点に着目すると、全体的に1より小さく過少傾向であるCX合成雨量が、地形性降雨算定により1に近づくことがわかる。平均値についても、標高300m以上の地点では、地形性降雨算定手法のほうがCX合成雨量よりも約1割大きな値を示し、標高300m未満の地点の回帰係数と近い値となっている。

5.1 および 5.2 の分析結果から、本研究で用いた地形性降雨算定手法を用いることで CX 合成雨量よりも高い精度で山間部の地上雨量を推定できることが確認できた。

6. 地表付近の雨量予測精度の検証

本章では、地表付近の雨量予測精度の検証を行った。検証は移流モデルのみによる予測結果と、3.3で

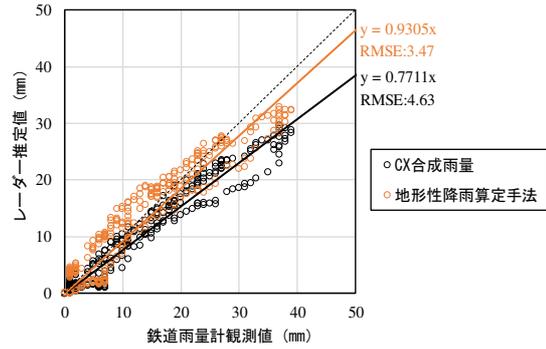


Fig. 11 Hourly rainfall of observed value of the Itaya rain gauge and estimated value with radar data.

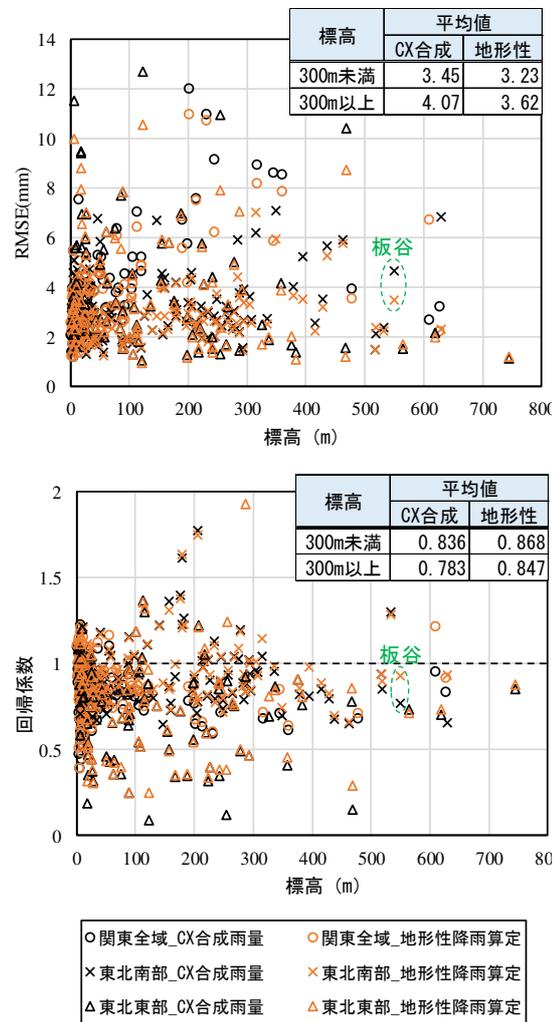


Fig. 12 Relationship between elevation of railway rain gauges in the three regions and RMSE, regression coefficients comparing estimated values and observed values.

述べた地形性降雨を考慮した予測結果を比較することで行った。予測先時間については、2. で述べた駅間停車の防止がほぼすべての区間で可能なリードタイムである 20 分とした。

Fig. 13 に東北東部における初期時刻 16 時 55 分の 20 分先の各手法の予測状況を示す。Fig. 13 には実況降雨分布として初期時刻時点と 20 分後の 17 時 15 分における CX 合成雨量も示している。なお、降雨分布はいずれも各時点における降雨強度を示す。図中にプロットした板谷雨量計地点に着目すると、実況降雨分布では初期時刻時点に存在する雨域が停滞・発達し、付近の降雨量が増加している。しかしながら移流モデルのみの予測では、板谷雨量計付近の雨域が西へ移動し、20 分後の実況降雨分布と比較して過少な予測となっている。一方で、地形性降雨を考慮した予測では、雨域の形状は若干異なるものの、板谷雨量計付近で停滞・発達する雨域を再現できていることがわかる。Fig. 14 に、板谷雨量計地点における観測値と予測値の 20 分間雨量の推移を示す。20 分間雨量は、予測値については 20 分先までの 5 分刻みの降雨強度から、観測値については同時間帯の 1 分毎の雨量値から算出した。また、初期時刻は観測値・予測値とも 1 分毎の値の推移を示している。Fig. 14 を見ると、移流モデルのみの予測値は鉄道雨量計観測値よりも小さな値となっている時間帯が多くあるのに対し、地形性降雨を考慮した予測値はばらつきはあるものの鉄道雨量計に近い値を示す傾向にある。Fig. 15 には Fig. 14 の観測値と予測値の散布図で示した。回帰係数より、移流モデルのみの場合の過少予測傾向が、地形性降雨を考慮することで改善していることがわかる。一方で、RMSE は両予測手法でほぼ同じ値となっており、地形性降雨を考慮した予測では、予測結果のばらつきが大きくなっていることが一因と考えられる。

次に、板谷雨量計と同様の検証を行ったときの各雨量計地点の RMSE、回帰係数の値と雨量計地点の標高の関係を分析した。結果を Fig. 16 に示す。上段の RMSE の結果を見ると、平均的には移流モデルのみの予測、地形性降雨を考慮した予測とも標高に関係なくほぼ同じ値を示している。回帰係数についても両者の差異は小さいが、傾向としては地形性降雨を考慮した予測手法のほうが大きな値を示す。5.2 で検証した実況雨量の結果と比較すると地形性降雨算定手法の導入による精度向上効果が明瞭ではないが、これは予測雨量については雨域の移動方向を決定する移流ベクトルの推定精度が大きく影響するためと考えられる。しかしながら、地形性降雨の考慮により RMSE が減少する地点や回帰係数が向上して 1 に近づく地点も散見される。また、Fig. 14 の板谷雨量計の検

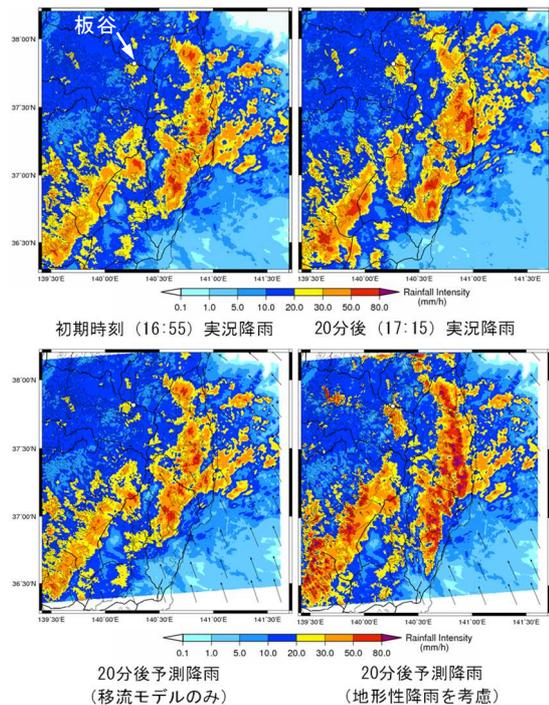


Fig. 13 Predicted rainfall distribution at calculation time 16:55 in the south Tohoku.

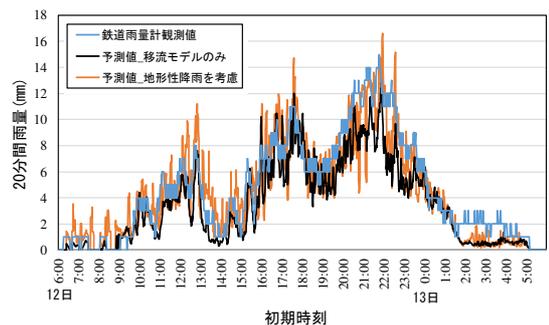


Fig. 14 Time series of 20 minutes rainfall values of observation and prediction at the Itaya rain gauge.

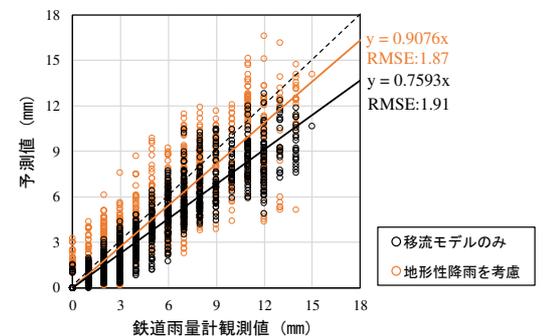


Fig. 15 20 minutes rainfall of observed value of the Itaya rain gauge and predicted value by only the translation model and combining the orographic rainfall model.

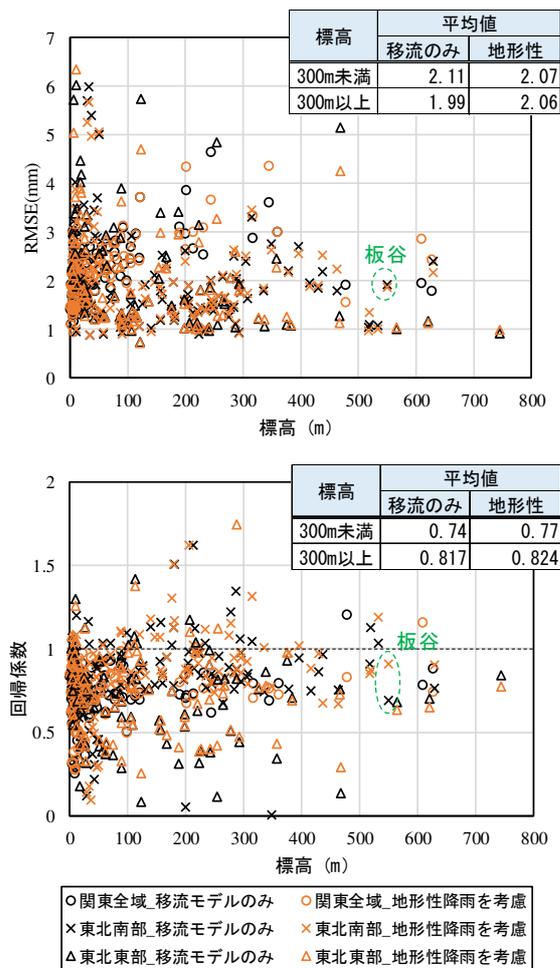


Fig. 16 Relationship between elevation of railway rain gauges in the three regions and RMSE, regression coefficients comparing predicted values and observed values.

証結果のように時間帯によって予測精度にばらつきがあっても、運転規制が発令するような強雨のときの予測精度が高ければ、発令時刻の予測精度向上が期待できる。そこで次章では、本研究で用いた予測手法による列車運転規制の発令時刻の予測精度について検証を行った。

7. 列車運転規制の発令予測精度の検証

7.1 列車運転規制の雨量指標

JR 東日本では、降雨時の列車運転規制における雨量指標として、半減期 1.5, 6, 24 時間の 3 種類の実効雨量を用いている (鈴木・島村, 2009)。鉄道雨量計毎に 3 種類の実効雨量それぞれに対応する基準値が設定されている。3 種類の実効雨量がいずれかの基準値を超過すると規制が発令する。そのため、列車運転規制の発令予測精度を検証する場合は、算出

される降雨量の予測値から実効雨量を算出する必要がある。実効雨量は、降雨の効果が降雨後の時間経過とともに減少し、各時の効果の総和がその時点の降雨の影響 (= 危険度) を示す。時刻 T における実効雨量 $D(T)$ は、1 単位時間前の実効雨量値を $D(T-1)$ 、時刻 T における 1 単位時間雨量を $R(T)$ 、半減期を M 、減少係数を α とすると、以下の式(8)で推定される (鈴木・小橋, 1981)。

$$D(T) = D(T-1)e^{\alpha} + R(T)e^{\frac{\alpha}{2}}$$

$$M = \frac{\ln 0.5}{\alpha} \quad (8)$$

実効雨量の予測値は、予測計算の初期時刻における実効雨量の実況値と、以降の予測先時間までの 5 分刻みの予測値を式(8)に代入することで算出した。なお、2 章で述べたように本検証は予測先時間 10 分と 20 分の予測値を対象に行うため、前述の方法で 10 分先、20 分先の実効雨量の予測値を算出した。

7.2 発令予測精度の検証方法

発令予測精度の検証にあたり、実況値が基準値を超過する時刻 (以下、実規制時刻とする) と予測値が基準値を超過する時刻 (以下、予測規制時刻とする) の差に着目した。Fig. 17 に実規制時刻と予測規制時刻のイメージを示す。Fig. 17 中の予測値は予測先時間における実効雨量値を示している。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、予測規制時刻と実規制時刻の差 (Fig. 17 中

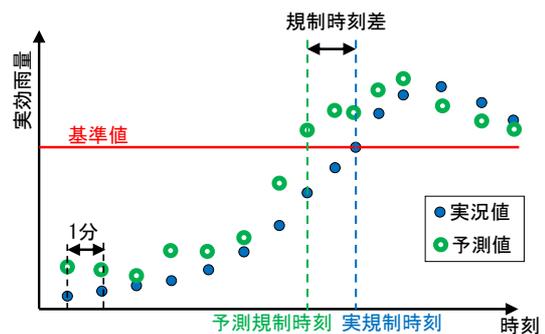


Fig. 17 Difference of the time when observed rainfall value exceeds the standard value and the time when predicted rainfall value exceeds it.

Table 2 Definition of capture ratio and hitting ratio.

評価指標	算出方法
捕捉率	予測が適中した地点数 / 実況値が基準値を超過した地点数
適中率	予測が適中した地点数 / 予測値が基準値を超過した地点数

の規制時刻差)は小さいほうが望ましい。そこで本研究では、予測が適中したと見なせる規制時刻差の範囲を仮定し、その範囲内に予測規制時刻がある場合に予測が適中したと評価した。具体的には実規制時刻の15分前から5分後の範囲内に予測規制時刻がある場合を適中とした。予測規制時刻が早めの場合は15分程度早かったとしても安定性への影響は限定的である一方、予測規制時刻の遅れは見逃しにつながるため許容時間を5分と短く設定した。予測精度の評価指標にはTable 2に示す捕捉率、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。なお、適中率算出時の予測値が基準値を超過した地点の定義は、規制発令ありの地点については前述の予測が適中したとみなす規制時刻差の範囲以前に予測規制時刻がある地点とした。これは、実規制時刻以降の予測で基準値を超過しても規制発令の判断に影響せず適中率の評価事例として適さないためである。このような場合は見逃しとなるため捕捉率によって評価される。

7.3 発令予測精度の検証結果

発令予測精度の検証にあたり、各地点の規制時刻差の頻度分布も併せて確認した。Fig. 18, Fig. 19にそれぞれ10分先, 20分先予測値の結果を示す。頻度分布は3領域それぞれの結果と全領域を合算した結果を示しており、図中の破線の枠は予測が適中したとみなす地点を示す。また、Table 3には3領域の全地点で評価した場合の捕捉率と適中率を示す。

Fig. 18の10分先予測値の結果を見ると、関東全域では一部の地点で地形性降雨を考慮する予測値で30分以上早めの規制発令を予測しており移流モデルのみの予測よりも空振りの地点が多くなっているが、東北南部・東北東部では両予測手法ともほぼ同じ分布を示す。3領域を合算した結果を見ても、両者の差は小さい。Table 3の10分先予測値の捕捉率と適中率についても、移流モデルのみの場合、地形性降雨を考慮した場合ともほぼ同じ値となっている。この理由として、10分先という非常に短いリードタイムの予測では、地形性降雨を考慮することによる予測結果の違いが表れにくかったことが考えられる。なお、適中率は両予測手法とも非常に高い値を示すが、これはFig. 18の分布が示すように実規制時刻以降に規制発令となる、すなわち過少予測傾向である地点が半数以上あり、空振りが少なかったためと考えられる。

一方、Fig. 19の20分先予測値の結果を見ると、地形性降雨を考慮した予測のほうが移流モデルのみの予測よりも各領域で予測規制時刻が早めとなる地点

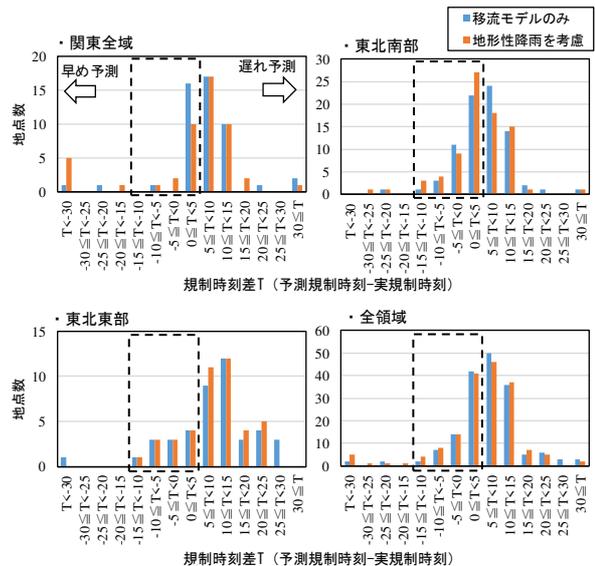


Fig. 18 Frequency distribution of the train control time difference using 10 minutes ahead prediction. The results for each three regions and the result of the sum of them are shown. The dashed frame in the figure indicates rain gauges where prediction is hit.

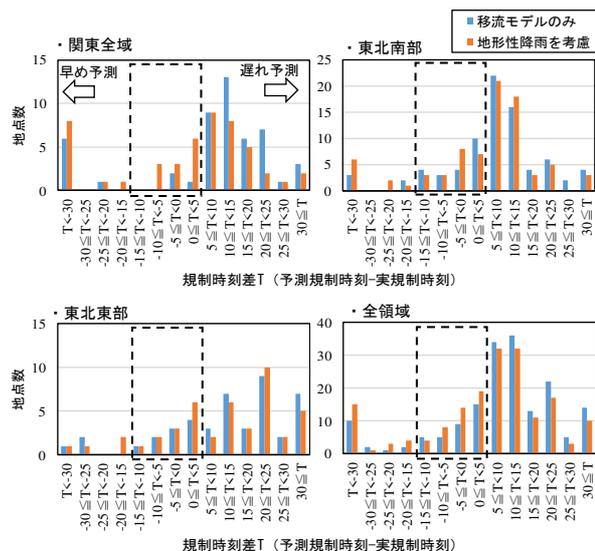


Fig. 19 Frequency distribution of the train control time difference using 20 minutes ahead prediction. Details are same to Fig. 18.

Table 3 Capture ratio and hitting ratio using 10 and 20 minutes ahead prediction in all points. The number in parentheses indicate the denominator and numerator when calculating the index.

評価指標	10分先予測値		20分先予測値	
	移流モデルのみ	地形性降雨を考慮	移流モデルのみ	地形性降雨を考慮
捕捉率	37% (65/177)	38% (67/177)	19% (34/177)	25% (45/177)
適中率	89% (65/73)	86% (67/78)	62% (34/55)	61% (45/74)

が増加している。その結果、予測が適中した地点数も地形性降雨を考慮した場合のほうが移流モデルのみの場合よりも多くなっている。Table 3 の 20 分先予測値の捕捉率は、地形性降雨を考慮した場合のほうが 6% 高い値を示している。適中率は両手法ともほぼ同じ値であることから、空振りの頻度は同等としつつ、捕捉率が向上しており地形性降雨を考慮することの有効性が確認できる。

ここで、地形性降雨を考慮することの有効性について個別の雨量計地点の予測結果からも確認する。

Fig. 20 には、関東の山間部にある青梅線御嶽雨量計（標高 244m）の実規制時刻付近の 20 分先の予測状況を示す。Fig. 20 には御嶽雨量計の観測値から算出した実況実効雨量と各時刻において 20 分前を初期時刻とする予測実効雨量の推移を示している。移流モデルのみの予測値は全体的に実況値と比較して過少であり、予測規制時刻は実規制時刻の 20 分後となっている。これに対し地形性降雨を考慮した予測では過少傾向が解消されており、ばらつきはあるものの実況値に近い値を示す時刻も散見される。この結果、予測規制時刻は実規制時刻の 5 分前となり予測が適中した。言い換えると、Fig. 20 に矢印で示すように、実規制時刻の 20 分以上前から規制発令の可能性を把握できていた。Fig. 21 に、地形性降雨を考慮した予測で初めて基準値を超過した初期時刻 6 時 37 分における降雨分布の予測状況を示す。実況降雨分布は CX 合成雨量の分布を示し、初期時刻と予測先時間である 20 分先の降雨分布を示す。プロットで示した御嶽雨量計地点付近に着目すると、移流モデルのみの予測でも雨域の分布状況は実況と近い分布を予測結果であるが、Fig. 20 で示したように雨量計の観測値と比較すると過少な予測値であった。これは 5 章で検証したレーダーの観測高度よりも下の層で発達する地形性降雨量の影響と考えられる。一方、地形性降雨を考慮した予測では、移流した雨域の分布の傾向は移流モデルのみの場合とほぼ同じであるが、山間部の降雨量が強化されており、その結果実況値に近づいたと考えられる。

以上の結果から、地形性降雨を考慮した予測によって運転規制の発令予測精度が向上することが確認できた。しかしながら、Table 3 に示したように、その精度は 10 分先予測で捕捉率 38%、20 分先予測で捕捉率 25% と低く、列車運行の判断に用いることは難しい。そこで次章では、雨量計の観測値を用いた予測値の補正方法の導入について検討した。

8. 予測値の補正方法の検討

8.1 エラーアンサンブル補正の導入

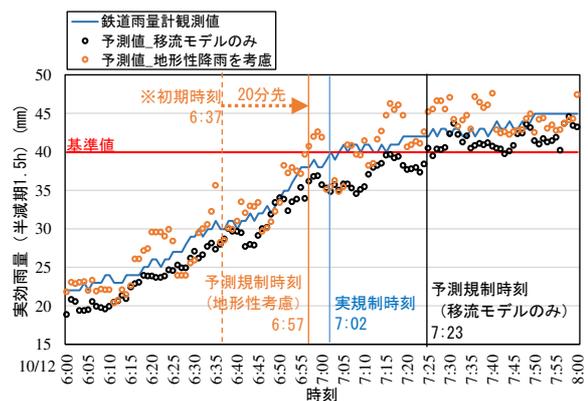


Fig. 20 Time series of observed values and 20 minutes ahead predicted values around the train operation control time at the Mitake rain gauge.

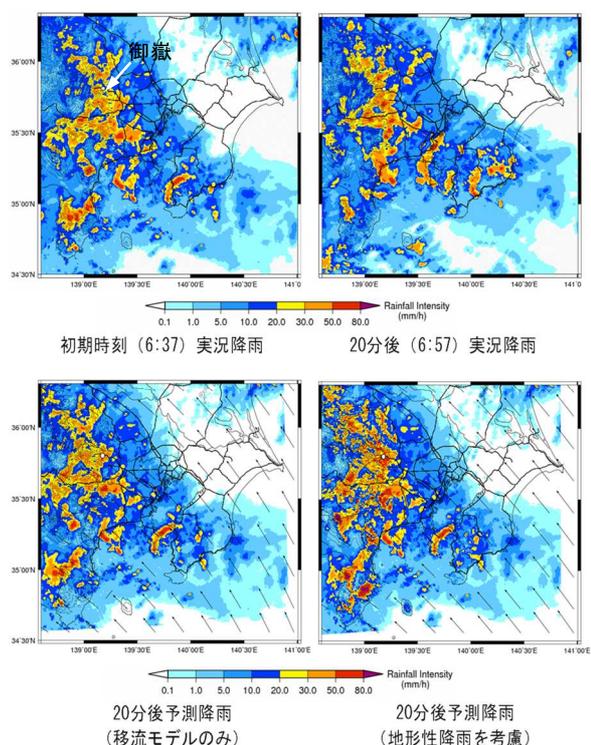


Fig. 21 Predicted rainfall distribution at calculation time 6:37 in Kanto.

本章では中北ら (2011) が短時間降雨予測の補正方法として用いた手法を検討する。この手法は、短時間降雨予測の予測誤差を予測開始時刻まで細かい時間間隔で算出し、誤差の統計的性質を求め、最新の予測値に補正量として反映するものである。この手法は予測モデルで考慮していない発生機構による降雨に起因する誤差や、気象レーダーから遠方でレーダー雨量の推定精度が低いことによる誤差など、時間的・空間的に共通する系統的誤差を現時刻の予測値に反映することができる。本研究で用いた予測計算を 1 分間隔に行う手法では、予測開始時刻の直前

の数十分間で多数の予測誤差を集計でき、系統的誤差を導くのに適していると言える。

本研究で検討したエラーアンサンブルによる予測値の補正方法の概要を Fig. 22 に示す。図中の Δt は予測値の計算間隔[分] (本研究では $\Delta t=1$ [分]), t は補正に用いる初期時刻以前の予測誤差の時間範囲[分], E_n は計算時刻毎の予測誤差[mm]を示す。初期時刻毎に直前の t 分間に行われた予測計算の予測誤差を算出し、これらの平均値を算出する。初期時刻の予測値に対してこの予測誤差の平均値を打ち消すように補正量を加えることで、リアルタイムに時間的・空間的誤差を反映した予測値を得ることが可能となる。なお、 E_n の算出時には予測先時刻における観測値が必要となるため、10 分先、20 分先予測ではそれぞれ現時刻から 10 分前、20 分前までを初期時刻とするデータから E_n を算出する。

エラーアンサンブル補正を導入するにあたり、補正に用いる直近のデータ期間 t について検討した。 t が長いほど系統的誤差の推定に用いられるデータ数が多くなり統計的に確からしい補正となる一方、初期時刻に近い時刻の誤差の傾向が反映され難くなる

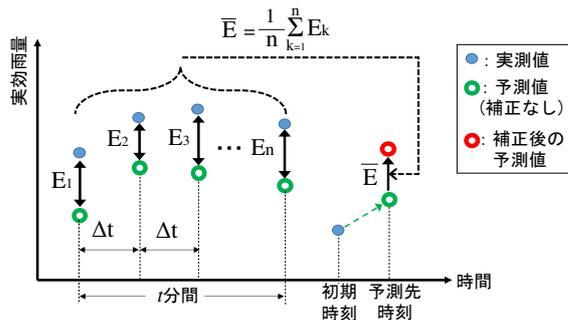


Fig. 22 Correcting method with error ensembles.

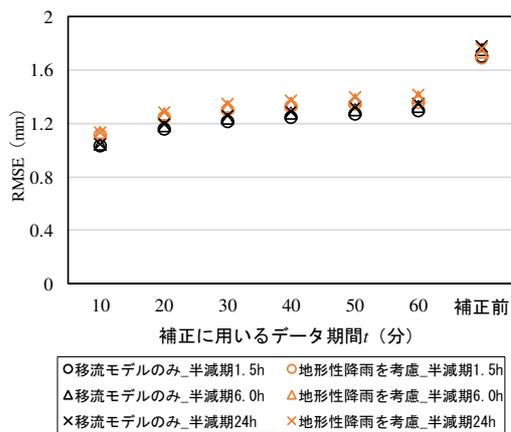


Fig. 23 RMSE using the error ensemble correction method in case of changing the past data period "t" for the 20-minute ahead prediction.

と考えられる。そこで、全 307 雨量計を対象に、20 分先予測実効雨量について $t=10$ から $t=60$ まで 10 分刻みに変化させたエラーアンサンブル補正を行い、各ケースの RMSE から補正の効果を検証した。移流モデルのみの予測値と地形性降雨を考慮した予測値それぞれについて運転規制に用いる 3 種類の実効雨量の RMSE を検証した結果を Fig. 23 に示す。RMSE は 307 地点それぞれについて実況値と比較した RMSE を算出し、それらの平均値を記載している。どのケースも補正前と比較して RMSE が 7 割程度に減少している。 t の値による変化に着目すると、移流モデルのみの予測、地形性降雨を考慮した予測とも t が短いほど RMSE が小さくなっている。本研究で対象とするごく短時間先の予測値を補正する場合は、なるべく直近の予測誤差を考慮することで補正による精度向上効果が高まると考えられる。以上から、本研究では $t=10$ としてエラーアンサンブル補正を行った。

8.2 補正後予測値による発令予測精度の検証

エラーアンサンブル補正後の予測値による列車運転規制の発令時刻予測精度を 7 章と同じ手法で検証した。

Fig. 24, Fig. 25 にそれぞれ補正した 10 分先予測値、20 分先予測値で発令予測を行った場合の対象雨量計地点における規制時刻差の分布を示す。Fig. 24, Fig. 25 は対象 3 領域を合算した結果であり、比較のため補正前の結果も記載した。Fig. 24, Fig. 25 を見ると補正前と比較して予測が適中となる地点が大幅に増加しており、補正による精度向上効果の大きさが確認できる。移流モデルのみの予測と地形性降雨を考慮した予測の結果を比較すると、両者は概ね同様の分布を示す。Table 4 に補正後の予測値による捕捉率と適中率の結果を示す。Table 3 の補正前の予測値による結果と比較すると、10 分先予測値、20 分先予測値とも捕捉率は大幅に向上している。適中率は補正前と同等の高い値を示しており、空振りを防ぎながら高い精度で運転規制の発令を予測できている。捕捉率は、10 分先予測値、20 分先予測値とも両予測手法で近い値となっているが、地形性降雨を考慮した予測のほうがわずかに高い値を示す。以上の結果から、エラーアンサンブル補正を用いることで両予測手法とも運転規制の発令予測精度が大きく向上することがわかった。

ここで、Fig. 24, Fig. 25 中に赤い破線の円および表で示した、適中事例の中で早め予測となる地点数に着目すると、10 分先予測、20 分先予測とも地形性降雨を考慮した予測のほうが該当する地点が多いことがわかる。この要因については以下が考えられる。

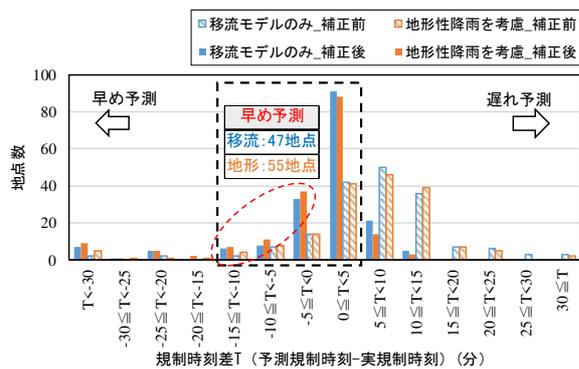


Fig. 24 Frequency distribution of the train control time difference using 10 minutes ahead prediction with the correction. The result in all three areas are shown. The dashed frame in the figure indicates rain gauges where prediction is hit.

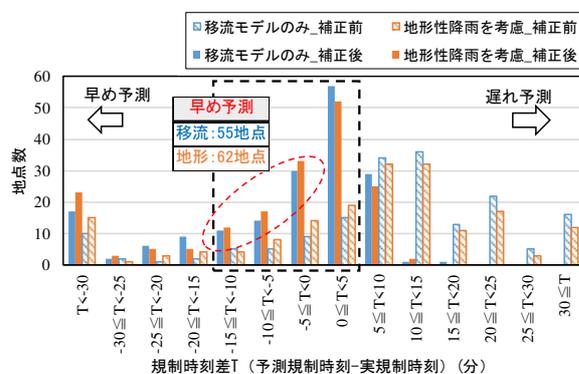


Fig. 25 Frequency distribution of the train control time difference using 20 minutes ahead prediction with the correction. Details are same to Fig. 24.

Table 4 Capture ratio and hitting ratio using 10 and 20 minutes ahead prediction with the correction in all points. The number in parentheses indicate the denominator and numerator when calculating the index.

評価指標	10分先予測値		20分先予測値	
	移流モデルのみ	地形性降雨を考慮	移流モデルのみ	地形性降雨を考慮
捕捉率	78% (138/177)	81% (143/177)	63% (112/177)	64% (114/177)
適中率	88% (138/156)	87% (143/165)	62% (112/152)	61% (114/157)

エラーアンサンブル補正は初期時刻の直前（本研究では10分前、20分前）における系統的誤差を反映するものである。移流モデルのみの予測でも直前の時点で地形性降雨の発達しており、これによる予測誤差が生じている場合は現時刻の予測にこれを反映す

ることができる。一方、初期時刻付近で地形性降雨が発達し始めるような場合はこれによる誤差を補正することができず過少な予測値となる。地形性降雨を考慮した予測では、後者の場合も雨量計観測値に近い値を予測することができるため過少予測を防ぐことができ、前述の早め予測の傾向は、この違いが表れた可能性が考えられる。

両予測手法とも補正を施したとしても多少の誤差が生じるのは止むを得ない中で、予測雨量により駅間停車を防止する場合、早め予測のほうが余裕をもって手前の駅で停車させることができ、確実な安全の確保という観点から優位性があると言える。よって、地形性降雨を考慮した予測値にエラーアンサンブル補正を施す予測手法が、駅間停車防止のために実運用に用いる予測手法として適していると考えられる。

9. 結論と今後の課題

本研究では、列車運転規制における駅間停車の防止を目的に、地形性降雨を考慮した予測手法について検討を行った。具体的には、JR 東日本管内の広い範囲に大雨をもたらした 2019 年の台風 19 号を対象として、鉄道雨量計の観測値との比較から雨量および運転規制の発令時刻の予測精度の検証を行った。さらに雨量計観測値を用いた系統的誤差の補正方法についても検討も行った。ここで得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 地表付近の実況雨量の推定精度について、CX 合成雨量よりも地形性降雨算定手法を用いて推定した場合のほうが高い精度を示す。
- 2) 予測雨量の推定精度について、移流モデルのみによる予測と地形性降雨を考慮した予測で対象地点の平均的な精度に大きな違いはなかったが、山間部の雨量計など地点によっては明瞭な精度向上効果が確認できた。
- 3) 列車運転規制の発令予測精度について、地形性降雨を考慮した予測のほうが移流モデルのみの予測よりも高い捕捉率を示したが、10分先予測で 38%、20分先予測で 25%と低い値となった。
- 4) 初期時刻毎に直前の系統的誤差を反映できるエラーアンサンブル補正を、初期時刻 1 分間隔の 20 分先までの予測に適用する場合、直近 10 分間のデータを用いることで予測誤差を小さくできる。
- 5) エラーアンサンブル補正により移流モデルのみの予測、地形性降雨を考慮した予測とも 10 分先予測で 80%付近、20 分先予測で 65%付近の高い捕捉率を示した。

6) エラーアンサンブル補正後の両予測手法の適中状況に着目すると、地形性降雨を考慮した予測のほうが実規制時刻よりも早めの発令を予測する地点が多く、確実に安全を確保するという観点から優位性がある。

これらの結果から、移流モデルと地形性降雨算定手法を組み合わせた手法による予測値にエラーアンサンブル補正を施すことで、高い精度で運転規制発令時刻を予測できるとともに安全性の面でも優位な予測ができることがわかった。

本研究では広範囲にわたる多数の雨量計を用いた検証を行ったため、ある程度汎用性のある結果を得られたと考えている。一方で2019年の台風19号のみを対象としたため、今後の研究課題として他の気象じょう乱でも同様の精度を発揮するか検証が必要と考えている。

またさらなる予測精度向上のための課題として、地形性降雨算定手法の実況雨量の推定精度をさらに高めることが考えられる。本手法では、上層からの降雨による雨滴の捕捉率 c を式(5)で示した推定式により求めている。式(5)は実際の降雨の発生機構によらず一律の粒径分布を仮定した推定式であるが、観測されたレーダー情報をもとに粒径分布を推定(例えば山口ら(2012)の手法)することで、より正確な捕捉率 c を導ける可能性がある。これにより実況雨量の推定精度をさらに向上できれば、予測精度の向上にも資すると考えている。

謝 辞

本研究で利用した XRAINデータは国土交通省より提供された。利用したデータセットは、国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」：データ統合・解析システム(DIAS)の枠組みの下で 収集・提供されたものである。

参考文献

気象庁 (2019, 2023年8月20日閲覧) : 令和元年台風19号に伴う大雨の要因について,
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yohokaisetu/T1919/mechanism.pdf>.
国土交通省 (2023年8月20日閲覧) : レーダ雨量計情報, https://www.mlit.go.jp/tec/tec_fr_000040.html.
椎葉充晴・高埴琢馬・中北英一 (1984) : 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, pp.423-428.
島村誠 (1989) : 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, Vol.35,

pp.437-440.

鈴木修・島村誠 (2009) : 実効雨量による降雨時列車運転規制基準の開発と導入, 鉄道力学論文集, Vol.13, pp.200-203.

鈴木雅一・小橋澄治 (1981) : がけ崩れ発生と降雨の関係について, 新砂防, Vol.121, pp.16-25.

立平良三 (1976) : 雨滴成長を考慮した地形性降雨の計算, 天気, Vol.23, No.2, pp.27-32.

中北英一・寺園正彦 (2008) : 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, pp.331-336.

中北英一・吉開朋弘・キム スンミン (2011) : 地形性降雨を考慮したレーダー短時間降雨予測へのエラーアンサンブルの導入, 土木学会論文集 B1(水工学)Vol.67, No.4, I_619 -I_624.

中淵遥平・鈴木博人・金原知穂・遠藤理・中北英一 (2020) : 列車運転規制への活用のための短時間降雨予測の補正手法の検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76, No.2, I_409 -I_414.

中淵遥平・鈴木博人・金原知穂・遠藤理・中北英一 (2021) : 列車運転規制への活用を目的とした短時間降雨予測の精度向上手法に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第64号B, pp.227-236.

中淵遥平・中北英一 (2022) : 短時間降雨予測のためのXRAIN立体観測データを用いた地形性降雨算定手法の検討, 京都大学防災研究所研究発表講演会, D304.

中淵遥平・中北英一 (2022) : XRAIN立体観測データによる地形性降雨を考慮した短時間降雨予測手法の検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.78, No.2, I_355 -I_360.

水田奈緒美・武中英好・佐野哲也・深見和彦 (2021) : XRAINの現状と品質向上への取り組み, 河川情報シンポジウム講演集.

山口弘誠・金原知穂・中北英一 (2012) : Xバンド偏波レーダーを用いた雨滴粒径分布とその時空間構造及び降水量の推定手法の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, I_367 -I_372.

Guimaraes.G., Nakakita.E (2021) : Verification by Full Volume Scan Radar Observation of Vertical Rainfall Profile Estimated by an Orographic Rainfall Model Based on the Seeder-Feeder Mechanism, 京都大学防災研究所研究発表講演会, C208.

(論文受理日: 2023年8月31日)