

小規模河川における浸水予測の過小評価を防ぐ 予測降水量評価方法

福原 隆彰* 高見 和弥* 鎌田 慈*

Methods to Evaluate Predicted Rainfall to Prevent Underestimation of
Inundation Prediction in Small-scaled Rivers

Takaaki FUKUHARA Kazuya TAKAMI Yasushi KAMATA

We are now studying a train disaster prevention system to prevent flooding disasters of the small scale rivers. In this system, we input the amount of synthetic precipitation obtained by radar as the past rainfall, and the blending predicted precipitation obtained by combination of the numerical meteorological simulation and the nowcast as the future precipitation. We have studied the input rainfall to prevent underestimating the immersion depth predicted by calculation by considering the difference of precipitation amount, which are caused by falling of raindrops or by displacement of precipitation area. As a result, we found out that it is necessary to input the synthetic rainfall obtained two minutes before the measurement time concerned as the past precipitation amount, and the maximum value of predicted precipitation amount of blending in the area within the radius of 1 km ~ 5 km from the measurement point concerned as the future precipitation amount.

キーワード：浸水予測，小規模河川氾濫，XRAIN 合成雨量，ブレンディング予測

1. はじめに

大雨による鉄道の気象災害として、盛土や沿線斜面の崩壊、河川増水による浸水氾濫、線路冠水、橋脚の洗堀などがある。これらの災害に列車が遭遇することを防ぐための措置として、鉄道沿線の数 km ごとに設置された雨量計で観測された値、あるいは河川水位があらかじめ定められた値を上回った場合に、速度規制や運転見合わせなどの運転規制が行われている。

河川増水による浸水氾濫や線路冠水は鉄道沿線だけでなく流域での降水によりもたらされるため、これらの災害に列車が遭遇することを防ぐためには川の上流側など線路沿線以外の雨量情報が必要となる。近年、降水を面的に取得できる気象レーダーが配備され、降水量を約 250m の格子間隔で 1 分毎に取得できるようになってきた。

大雨の中でも局地的短時間強雨の場合、小規模河川では集められる水の量に対して排水が追い付かないことにより、河川増水や河川氾濫・浸水などの被害がしばしば発生する。その中には、兵庫県神戸市の都賀川で発生した災害¹⁾や東京都の雑司ヶ谷で発生した災害²⁾など、降雨から被害発生までの時間が数分しかない事例がある。これらの事例では、雨量計や気象レーダーの観測データから浸水の危険度を計算しても、計算が終わる前に被害が発生する可能性がある。そのため、このような局地的短時間強雨に対する鉄道の減災のためには浸水・氾濫

の解析において対策への余裕時間の確保が課題であることから、降水量の観測結果に加え、降水量の短時間予測データを用いて浸水・氾濫の可能性を予測することが重要となっている。

鉄道総研では、都市域の小規模河川における局地的短時間強雨に対する減災手法として、外部機関から提供される降水量を用いて、浸水・氾濫や土砂災害の発生を予測し、これらの影響範囲を避けた列車の停止位置を解析するとともに旅客避難場所の検討を支援する「局地強雨対応の鉄道減災システム」を試作した³⁾。ここで、小規模河川はその流域面積が狭いために、局地的短時間強雨の予測誤差が浸水深の予測結果に与える影響が大きく、場合によっては浸水・氾濫解析の結果が実際より過小評価となり、浸水を見逃す可能性が考えられる。

そこで本研究では、過去に浸水が発生した首都圏の小規模河川（以下、河川 A）をモデルとし、このシステムの浸水・氾濫解析結果が浸水を見逃すような過小評価とならないための、外部機関から提供される降水量データを浸水・氾濫解析の入力降水量に変換・処理する方法（以下、前処理方法）を検討した。本稿はその結果を述べる。

2. 局地強雨対応の鉄道減災システムの概要

局地強雨対応の鉄道減災システムのフローを図 1 に示す。このシステムでは図 2 に示すように、ある時刻 (t_0) を基準として過去 2 時間、未来 2 時間の計 4 時間の面的

* 防災技術研究部 気象防災研究室

特集：防災技術

な降水量データを取得する。次に、この取得データより浸水・氾濫解析⁴⁾の入力降水量を作成する。この入力降水量を初期値として浸水・氾濫解析を実施し、鉄道沿線の浸水領域を求め、これらの領域に列車を進入させない条件を満たす列車の停止位置を解析する。

本研究では本鉄道減災システムに入力する過去降水量は4章に示すXRAIN合成雨量を用いることとした。また、予測降水量は短時間予測データとして防災科学技術研究所が気象庁の高解像度ナウキャストのデータと数値モデルCReSSを用いた数値予測データより作成・配信しているブレンディング予測降水量⁵⁾を用いることとした。ブレンディング予測降水量は降水量の短時間予測手法で広く使われている2つの手法（雨雲を運動学的に補外して予測する方法（ナウキャスト）と数値計算による方法）で得られるそれぞれのデータに対して重みづけして合成する手法⁶⁾で得られる。この手法による予測降水量は、その誤差がナウキャストや数値予測による予測誤差よりも小さいことが確かめられている⁷⁾など。

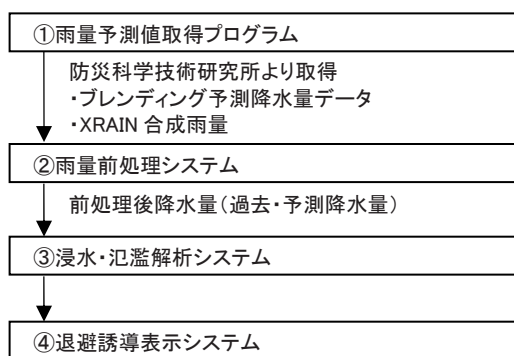


図1 局地強雨対応の鉄道減災システムのフロー

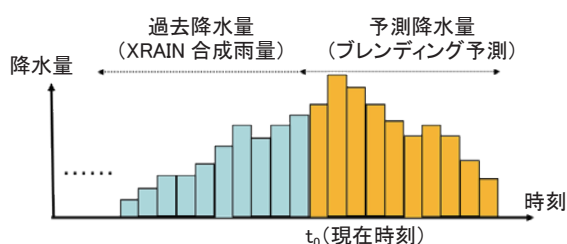


図2 浸水・氾濫解析システムに入力する降水量の概念図

3. 入力降水量と実際の降水量とのずれ

モデルケースとした河川Aの流域を2章で述べたブレンディング予測降水量の配信領域とあわせて図3に示す。浸水・氾濫解析の入力値となる面的な降水量は対象とする河川流域内のすべての地点で正確な値がわかることが望ましい。局地的短時間強雨の場合、その空間的な大きさは10km程度、発生時間は1時間程度であるのに対し、1章で述べたように小規模河川ではその流域面



図3 河川Aの流域とブレンディング予測降水量の配信対象領域
(白地図データ（国土地理院）⁸⁾をもとに作成)

積が狭いことから、降水領域のずれが浸水・氾濫解析結果に与える影響が大きい。本研究のモデルとした河川Aの流域は図3に示すように東西方向が12km程度に対して南北方向は5km程度と狭いため、降水領域が南北方向にずれた場合にその影響が特に大きくなる。

本鉄道減災システムに入力する降水量と地上で観測される降水量とのずれは以下の2種類が考えられる。

- 過去降水量：XRAIN合成雨量と地上降水量（地上の雨量計で得られる値）とのずれ
- 予測降水量：ブレンディング予測降水量とその後実際に観測される実況降水量の降水領域とのずれ

XRAIN合成雨量はレーダーで観測された上空の雨粒の状態から雨の強さを求めるものであり、雨粒の落下や蒸発、また雨雲の移動により地上で観測される降水量や降水領域にずれが生じることが考えられる。

また、ブレンディング予測降水量は、前にも述べたようにナウキャストによる降水量と数値予測による降水量により求められている。ナウキャストは今ある雨雲の移動を運動学的に外挿する方法をもとにしているため、直近の予測では確度が高いが、予測期間中に新たに発生する雨雲を的確に捉えることが難しい。数値予測は予測期間中に新たに発生する雨雲を予測できるが、気象モデル内で大気の状態が再現され雨雲が生成し始めるのは計算開始後ある程度の時間を経てからである。そのため、ブレンディング予測では両者の利点を組み合わせているものの、降水の予測結果と観測値とで降水領域にずれが生じることがある。

そこで本研究では、これら2種類のずれを対象に浸水・氾濫解析結果が過小評価とならないように降水量の前処理方法（図1の②）を検討した。以下に過去降水量、予測降水量に分けてその検討結果を示す。

4. 過去降水量の前処理方法の検討

4.1 XRAIN 合成雨量と地上降水量とのずれの評価方法

過去降水量として入力する XRAIN 合成雨量は、気象レーダーで得られた上空の雨粒の状態から約 250m 間隔で求められるものである。そこで、XRAIN 合成雨量と地上で実際に観測された降水量とを比較した。

河川 A の流域には気象庁の降水量観測点はないため、河川 A の周囲にある気象庁の観測点において 1 時間降水量が 30mm 以上となった事例を対象とした。本鉄道減災システムでは局地的な強雨を主な対象としていることから、上記の降水量が観測された事例のうち、そのときの気象状況が広い範囲で強雨となる台風である場合を除いた 20 事例（表 1）を抽出した。

各事例において、気象庁の観測点で観測された 10 分間降水量（地上降水量，単位 mm）と、気象庁の観測点の周辺にある XRAIN 合成雨量の各格子点における 10 分間降水量（推定降水量，単位 mm）を比較した。ここで、XRAIN 合成雨量は 1 分ごとに降水強度（その強さの雨が 1 時間降り続いた場合の降水量，単位 mm/h）が与えられている。そこで、XRAIN 合成雨量による推定降水量は、各時刻で得られた降水強度の雨がその前 1 分間で同じ強

さで降り続いたと想定し、降水強度を 60 で除して 1 分間の降水量とし、それを 10 分間で積算した値で求めた。

得られた地上降水量と推定降水量について、両者の時間相関および二乗平均誤差（RMSE）をとり、過去降水量の前処理方法を検討した。

4.2 過去降水量の前処理方法の検討結果

地上降水量と、その地点を含む XRAIN 合成雨量の格子点での推定降水量の時系列の例として、表 1 の事例 5 について図 4 に示す。この図より、推定降水量は概ね地上降水量を再現しているものの、ずれも生じていることがわかる。また、事例 5 における 2 時間（14:30～16:30）の同時相関の相関係数の面的分布を図 5 に示す。これは XRAIN 合成雨量の各格子点の推定降水量の時系列が地上降水量の時系列をどの程度再現しているかを示すものである。図 5 より、相関係数が最も高い箇所は地上の気象観測点から少し離れた格子点で現れていることがわかる。このようなずれは他の事例でもみられている。

XRAIN 合成雨量は上空の雨粒の状態より求められる値である。雨粒が落下して地上での降水量として観測されるまでに時間差があり、図 5 に示したずれはこの間に雨雲が移動することで生じることが考えられる。そこで、過去降水量はその数分前の推定降水量を用いることで地上降水量との誤差が少なくなると考え、地上降水量を求める時刻から何分前に求めた推定降水量が地上降水量をより確からしく表現しているかを、両者の RMSE を用いて調べた。本研究では地上降水量を求める時刻と推定

表 1 抽出した局地的短時間強雨事例

事例	観測点	1 時間降水量のピーク	
		降水量	発現時刻
事例 1	さいたま	49.5mm	2016/08/18 23:40
事例 2	越谷	34.0mm	2016/08/03 02:17
事例 3	所沢	30.5mm	2016/07/14 19:00
事例 4	練馬	35.5mm	2016/07/14 15:47
事例 5	八王子	33.0mm	2016/08/20 15:58
事例 6	府中	46.5mm	2016/07/14 19:17
事例 7	世田谷	32.0mm	2016/07/14 19:35
事例 8	世田谷	38.0mm	2016/08/20 10:45
事例 9	東京	47.5mm	2016/08/20 10:37
事例 10	我孫子	53.5mm	2016/07/20 05:31
事例 11	佐倉	54.5mm	2016/08/24 12:59
事例 12	千葉	55.0mm	2016/09/13 11:03
事例 13	相模原中央	86.5mm	2016/08/10 18:08
事例 14	相模原中央	36.0mm	2016/08/20 11:38
事例 15	日吉	43.0mm	2016/07/14 19:51
事例 16	日吉	42.5mm	2016/07/15 12:53
事例 17	日吉	36.5mm	2016/08/02 06:27
事例 18	海老名	52.5mm	2016/08/10 17:27
事例 19	横浜	47.0mm	2016/07/14 19:44
事例 20	横浜	81.0mm	2016/07/14 13:15

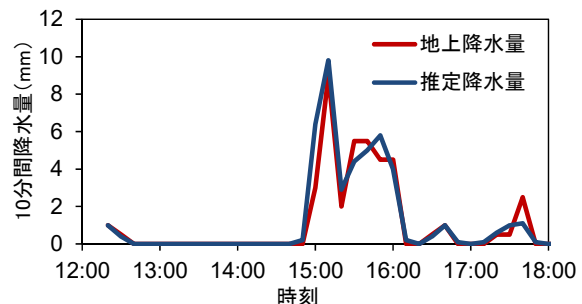


図 4 事例 5 における地上降水量とその地点を含む XRAIN 格子での推定降水量の時系列

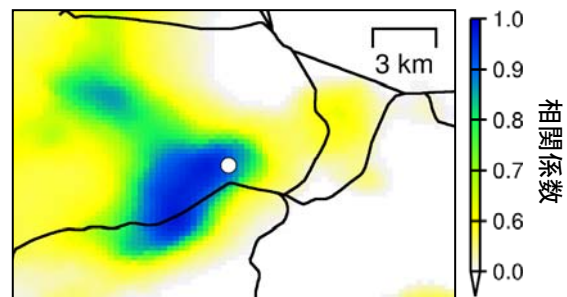


図 5 事例 5 における地上降水量とその周辺の格子での推定降水量の同時相関の分布（白丸：地上降水量観測点）

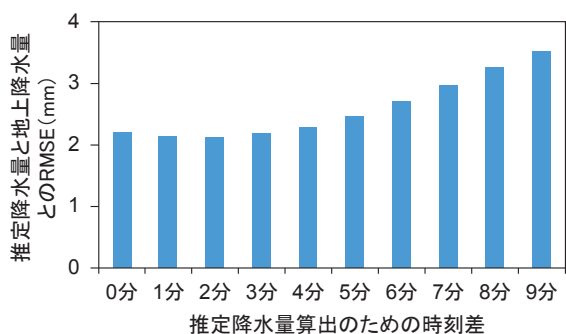


図6 時刻差ごとに求めた推定降水量と地上降水量との差 (20事例の平均値)

降水量を求める時刻の差 (時刻差) を1分単位で設定した。例えば時刻差が3分とは、10時10分から10時20分までの地上降水量に対応する推定降水量は10時07分から10時17分までの降水量を意味する。

抽出した20事例それぞれにおいて、表1に示した1時間降水量の最大値を観測した時刻 (10分未満切り上げ) の前90分、後30分の2時間分における毎正10分の地上降水量と、時刻差を0分から9分まで変えて求めた地上観測点を含む格子点での推定降水量とのRMSEを求めた結果を図6に示す。この図より、時刻差が2分のときにRMSEが最も小さくなっていることから、時刻差を2分とすることで、推定降水量が地上降水量をより確からしく近似できると考えられる。

このことから、浸水・氾濫解析に inputs する過去降水量は現在時刻の2時間2分前から2分前までの2時間で得られたXRAIN合成雨量とした。

5. 予測降水量の前処理方法の検討

5.1 予測降水量の前処理方法の考え方

3章で述べたように、短時間の降水予測では予測される降水領域とその後観測される実際の降水領域とにずれが生じる。この領域のずれを考慮しつつ、浸水・氾濫解析結果を過小評価とさせないように浸水・氾濫解析に降水量データを入力することが求められる。

今回検討する予測降水量の前処理では、この条件を満たしつつ浸水・氾濫解析に降水量データを可能な限り早く入力させるために、計算負荷を小さくする必要がある。そこで、処理が容易な手法として各格子点での予測降水量を、その格子点の周囲数kmの降水量の最大値とする処理方法をとることとした。この方法の概念図を図7に示す。これは、強い降水域の取り逃しをしないようにするものである。ただし、降水領域を広くとり過ぎると見逃しはなくなるものの、過大に浸水領域が計算されることとなる。以下では、この処理に用いる降水量の最大値をとる範囲を検討した結果を述べる。

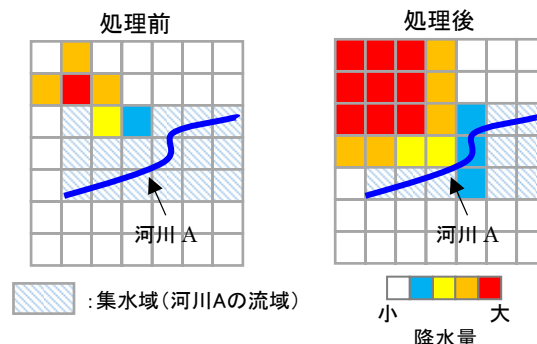


図7 浸水深予測計算に inputs する予測降水量の処理方法の概念図

なお、本研究では浸水・氾濫解析で浸水が発生しない場合でも計算結果を比較できるように、浸水・氾濫解析で得られる河川水位の値を指標として検討した。

5.2 予測降水量の前処理方法の検討手法

予測降水量の前処理方法の検討として、入力降水量の違いが浸水・氾濫解析結果に与える影響を調べた。

本研究では、観測された降水量をそのまま入力した場合の計算結果を比較の基準とするため、inputs する降水量をすべてXRAIN合成雨量とした浸水・氾濫解析を基準計算とし、基準計算で河川水位が川岸の高さを超えたときの時刻 (以下、越流発生時刻) とその発生地点とを求める。次に、本鉄道減災システムと同様にXRAIN合成雨量とブレンディング予測降水量をinputs 降水量として浸水・氾濫解析を行う。この解析で求められる水位について、基準計算での越流発生時刻における越流発生地点の水位に対して安全側 (水位が下回らない側) となるよう、各格子点での予測降水量に対して最大値をとる範囲の最小の半径を求めることとした。

本鉄道減災システムは短時間強雨に対する列車停止位置の決定や旅客避難を支援するものであり、それらの判断に要するリードタイムを考慮する必要がある。ここでは、避難に要する時間を20分以上と考え、現在時刻から20分後、30分後、40分後、50分後、60分後の5パターンにおける浸水・氾濫解析結果が過小評価とならないような前処理方法を検討した。なお、本研究では、基準計算で越流が発生した時刻 (以下、 t_1) での河川水位をもとに浸水・氾濫解析結果が過小評価とならないような前処理方法を検討するため、この検討での現在時刻に相当する時刻 (図2の t_0) を各パターンそれぞれ t_1-20 分、 t_1-30 分、 \dots 、 t_1-60 分として浸水・氾濫解析を行った。

5.3 検討事例の抽出と降水領域の調整

局地的短時間強雨事例はブレンディング予測領域 (図3) の南側の領域において2016年7月10日～2016年12月31日に得られたXRAIN合成雨量より、既往の研

究⁵⁾に基づき以下の方法で抽出した。

- ①前1時間降水量の最大値が50mm以上
- ②①の最大値の点を含む、閉曲線で囲われた前1時間降水量が30mm以上の領域の面積が100km²以下
- ③前3時間降水量が150mm以下、前24時間降水量が200mm以下
- ④①～③で抽出した事例毎の前1時間降水量の最大点を中心とする約110km四方(1度×1度)の領域において同時に発生している事例は同一のもののみとする。

この結果、局地的短時間強雨事例として表2に示す7事例を抽出した。抽出した7事例はすべて河川Aの流域以外の箇所で発生していた。そこで、本検討では河川Aの流域に降水を与えるため、次の調整を行った。まず、各強雨事例において前1時間降水量の最大値の分布を求め、降水領域内で最も前1時間降水量の値が大きい地点(極大点)を求める。次に、求めた極大点の前1時間降水量がピークとなる時刻にこの極大点が河川Aの流域の中央部を通るよう、ブレンディング予測で得られた降水領域全体を移動させる(図8)。この処理で与えた局地的短時間強雨をもとに、5.2節で述べた浸水・氾濫解析結果が安全側となる処理方法を検討した。

5.4 予測降水量の前処理方法の検討結果

5.2節で述べた、予測降水量の入力開始時刻(図2の t_0)を変えた各パターンにおいて浸水・氾濫解析を実施し、越流発生時刻における河川水位を求めた。まず、予測降水量の前処理をせずに浸水・氾濫解析を行った結果と基

表2 抽出した局地的短時間強雨事例

事例	降雨のピーク時刻	ピーク位置	
		経度	緯度
case1	2016/07/20 03:00	139.812	35.757
case2	2016/07/20 05:30	140.106	35.863
case3	2016/08/02 12:00	139.857	35.695
case4	2016/08/03 01:30	139.711	35.844
case5	2016/08/03 14:30	140.108	35.542
case6	2016/08/10 18:00	139.396	35.580
case7	2016/08/18 23:30	139.578	35.874

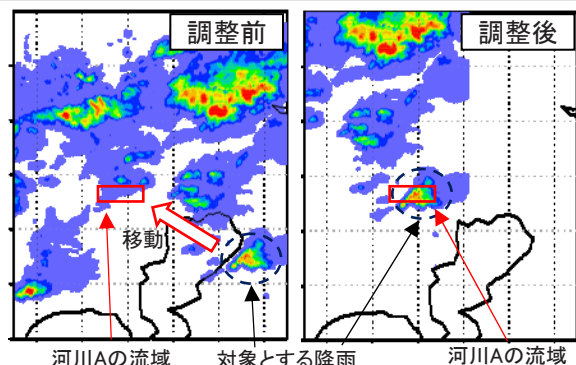


図8 感度実験のための降水領域調整例

準計算での結果例として表2のcase6での結果を図9に示す。この図において、横軸は河口からの距離(値が小さくなるほど海に近いことを示す)。この河川は西から東に流れているため、軸の数値を逆転している)、縦軸は水位(河川堤防の上端を0mとしたときの値、正のときに浸水の可能性がある越流が発生していることを示す)である。この図より、基準計算では河口より19.7km付近の箇所(図中黒丸部分)で水位が0mを上回り越流が発生していることがわかる。これに対し、 t_1-20 分を予測降水量の入力開始時刻とした場合(図中橙色実線)には越流発生時刻において基準計算より水位が高く、越流が発生している一方で、それ以外の4パターンでは計算された水位が河口からの距離にかかわらず0mを下回り、越流は発生しないことがわかる。このように、前処理をしない場合には基準計算より水位が低く計算され、越流を見逃す可能性がある。

そこで、前処理で越流を見逃すことがないように予測降水量の最大値をとる最小の範囲を決定するため、各格子点の1km, 3km, 5km, 10kmの範囲内の最大値をそれぞれ入力値とする処理を行い、浸水・氾濫解析を行った。一例として、case6について予測開始時刻を t_1-40 分としたときの計算結果を図10に示す。この図より、入力降水量を周囲1kmの最大値とした場合(図中灰色実線)では河川水位が基準計算で得られた水位を上回る箇所と下回る箇所があり、場所によっては見逃しが発生することとなる。その一方で、予測降水量を周囲3km以上の最大値とした(図中黄・青・緑実線)場合には基準計算で得られた河川水位を上回り、過小評価とならない計算結果となった。従って、case6で t_1-40 分を予測開始時刻とする場合には予測降水量を周囲3kmの範囲の最大値とする前処理を行うことで安全側の評価ができることとなる。

このように、計算結果に見逃しがないように前処理において最大値をとる最小の範囲を、各降雨事例、各予測開始時刻別に求めた。その結果ならびに各予測開始時刻別に求めた降水量の最大値を求める範囲の最小値を表3に示す。これより、予測の時間が長くなるほど最大値をとる範囲が広くなることがわかる。

以上より、予測開始時刻以降の降水量を周囲1kmか

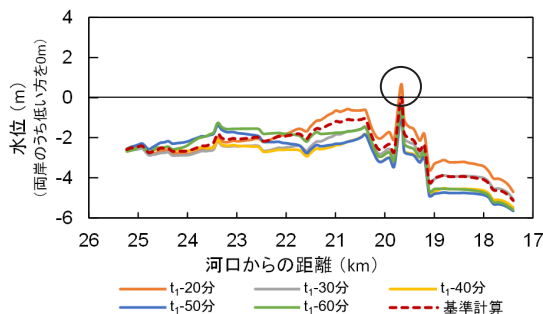


図9 前処理をしない場合の浸水・氾濫解析結果(case6)

特集：防災技術

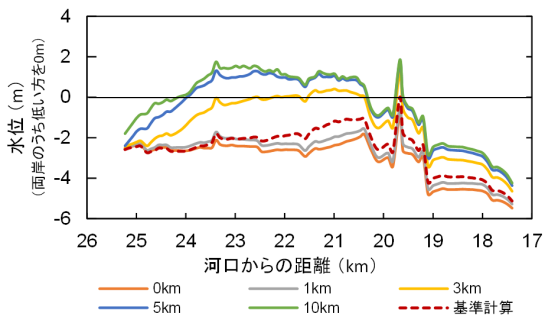


図 10 各地点の周囲数 km の最大値の取り方により入力降水量を変えたときの浸水・氾濫解析結果の例 (case6 予測降水量入力開始: t_1-40 分)

表 3 前処理において降水量の最大値をとる範囲

予測開始時刻	t_1-20	t_1-30	t_1-40	t_1-50	t_1-60
case1	0km	0km	0km	5km	3km
case2	1km	3km	1km	0km	5km
case3	0km	1km	3km	3km	3km
case4	0km	0km	1km	3km	1km
case5	0km	0km	0km	3km	1km
case6	0km	1km	3km	3km	1km
case7	0km	0km	3km	0km	3km
範囲の最大	1km	3km	3km	5km	5km

ら 5km の最大値とする前処理により浸水・氾濫解析結果に見逃しがないようにできる見通しが得られた。

6. おわりに

本研究では、局地強雨対応の鉄道減災システムに入力する降水量の前処理方法を検討した。このシステムでは過去降水量は XRAIN 合成雨量を、未来降水量はブレンディング予測降水量を用いるため、XRAIN で観測される降水量と地上降水量とのずれや、予測降水量がもつ降雨領域のずれを考慮した。その結果、過去降水量は各時刻の 2 分前の XRAIN 合成雨量をその時刻の降水量とし、未来降水量はブレンディング予測降水量の周囲 1km ~ 5km の最大値とする前処理により、浸水・氾濫解析結果の過小評価を防ぐ入力降水量とできることがわかった。

なお、本システムは流域面積が狭い小規模河川を主な対象としており、流域面積が広い大規模河川ではこの前処理を適用できるとは限らないことに注意が必要である。

ブレンディング予測をはじめとする降水量の短時間予測では予測開始時刻直後は降水領域のずれは小さく、次第にそのずれが大きくなる傾向にある。そのため、この前処理で得られた降水量による浸水・氾濫解析結果が過小評価にはならないものの、過大な降水量を入力してい

る可能性があることから、予測開始直後では最大値をとる範囲を狭く、予測時間が長くなるにつれてその範囲をより広くすることで実態に近づけられると考える。今後は、予測降水量の最大値をとる範囲を動的に設定する手法を構築し、安全側の評価は維持しながらも、浸水・氾濫解析結果が実際よりも極端に大きくならないような前処理手法の構築を行うことを計画している。

謝辞

本報告に記載した内容には、総合科学技術・イノベーション会議の SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)「レジリエントな防災・減災技術の強化」(管理法人: JST) による取り組みが含まれている。また、本研究で用いた降水量データは国立研究開発法人防災科学技術研究所から提供いただいた。

文献

- 1) 立川康人, 江崎俊介, 椎葉充晴, 市川 温: 2008 年都賀川増水における局地的大雨の頻度解析・流出解析と事故防止に向けた技術的課題について, 京都大学防災研究所年報, 第 52 号 B, pp.1-8, 2009
- 2) 東京都下水道局: 雑司ヶ谷幹線再構築工事事故報告書, 2008
- 3) 川越健, 尾崎尚也, 太田直之: 降雨予測値を活用した「局地強雨対応の鉄道減災システム」, SIP 防災シンポジウム 2017 予稿集, p.23, 2017
- 4) 渡邊諭, 湯浅友輝, 馬目凌: 鉄道沿線における局地的短時間豪雨時の流出・氾濫影響評価手法, 鉄道総研報告, Vol.32, No.7, pp.11-16, 2018
- 5) Kato, R., Shimizu, S., Shimose, K., and Iwanami, K., "Very Short Time Range Forecasting Using Cress-3DVAR for a Meso- γ -Scale, Localized, Extremely Heavy Rainfall Event: Comparison with an Extrapolation-Based Nowcast," *Journal of Disaster Research*, Vol.12, No.5, pp.967-979, 2017.
- 6) Bowler, N. E., C. E. Pierce, and A. Seed: STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges and extrapolation nowcast with downscaled NWP, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 132, pp2127-2155., 2006.
- 7) 清水慎吾, 加藤敦, 前坂剛, 木枝香織, 岩波越: 雲画像数値モデルによる降雨量予測実験 -2004 年 10 月 9 日の台風 22 号の事例解析-, 防災科学技術研究所研究報告, 第 78 号, pp1-14, 2010
- 8) 国土地理院: 地理院地図 (白地図)
<http://maps.gsi.go.jp/#9/35.788855/139.464569/&base=blank&ls=blank&disp=1&lcd=blank&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f2&d=v> (参照日: 2018 年 4 月 10 日)