

降水量予測値を用いた豪雨時鉄道減災システム

浦越 拓野* 川越 健* 渡邊 諭** 尾崎 尚也***

A Heavy Rainfall Induced Disaster Mitigation System for Railways Operation by Using a Precipitation Forecast Data

Takuya URAKOSHI Takeshi KAWAGOE Satoshi WATANABE Naoya OZAKI

A system to mitigate heavy rainfall related disasters has been newly developed for promoting safety operation of railway. The developed system contains five components; (1) downloading of the precipitation forecast data based on weather radar data from the third party, (2) flood analysis, (3) slope failure analysis, (4) train operation analysis to avoid approaching to the affected area, and (5) mapping and distribution of the result. This system provides railway engineers with heavy rainfall hazards and train operation information in advance of occurrence of the disaster.

キーワード：豪雨，減災，浸水・氾濫，大規模崩壊，列車停止

1. はじめに

わが国の多くの鉄道では、豪雨に対するソフト対策として、降雨時の運転規制が用いられている。線路沿線に設置された雨量計で規制値を超える雨量が観測された場合には、列車の運転中止などの措置がとられる。一方、局地的な豪雨の原因である積乱雲の水平方向のスケールは数 km 程度¹⁾で、線路沿線の雨量計の間隔より狭いことがあり、雨量計で捕捉できない場合があることが懸念される。また、線路から離れた箇所でも豪雨による大規模な土砂災害が発生し、その土砂等が線路を支障するケースに対しては、鉄道沿線での雨量計ではこのような豪雨を捕捉できないため、降雨時の運転規制が有効に機能しない可能性もある。さらに、降雨時の運転規制に伴い駅等で列車の運転が中止される場合において、停止した列車がその後の降雨で冠水等の影響を受ける可能性があるという課題がある。この点については既存の浸水ハザードマップ等を活用し、浸水が予測される範囲を避けて停止する方法も考えられるが、既存のハザードマップの想定以上の豪雨のケースや、急速に発達する積乱雲に伴う豪雨により短時間のうちに浸水が発生し、浸水範囲を避けられないケースなどに対して課題が残る。

このような課題に対して、気象レーダーを活用した面的な降水量の情報を用いることで、局地的な豪雨を見逃さないことが期待される(図1)。さらに、気象レーダーの情報を入力とした気象シミュレーションで得られる降水量の予測値を用いて、鉄道沿線の浸水・氾濫や大規模な土砂災害の発生を予測し、あらかじめこれらの影響範

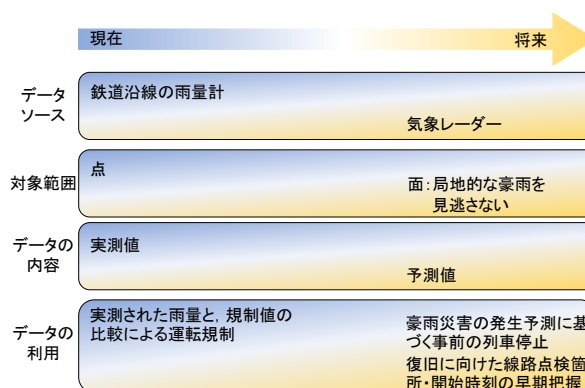


図1 豪雨時の運転規制における気象レーダー情報活用の将来像(概念)

囲を避けて列車を停止させることも考えられる。また、浸水・氾濫や土砂災害の危険性の低下を予測することで、運転再開に向けた線路点検箇所や点検開始時間を早期に把握できる可能性もある。

そこで、外部機関から提供された降水量予測値を用いて、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「豪雨時鉄道減災システム」を開発した²⁾。本システムは、将来的には鉄道事業者がそれぞれ自社内で運用可能とすることを目指している。本稿ではこのシステムについて報告する。

2. 豪雨時鉄道減災システムの構成

2.1 全体フロー

図2に豪雨時鉄道減災システムの処理フローを示す。まず、外部機関から降水量予測値をダウンロードする。次に、降水量予測値を用いて、浸水・氾濫解析を行い、

* 防災技術研究部 地質研究室
** 防災技術研究部 地盤防災研究室
*** 信号・情報技術研究部 交通計画研究室

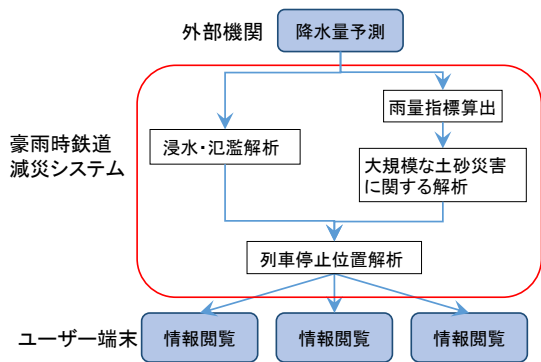


図2 豪雨時鉄道減災システムの処理フロー

浸水深を出力する。この浸水深がしきい値より大きな範囲を、浸水影響範囲とする。

また、降水量予測値から、時雨量や連続雨量といった雨量指標を算出する。この雨量指標がしきい値を超えた場合に、大規模な土砂災害が発生する可能性があると判断し、その影響範囲を土砂災害影響範囲とする。

列車停止位置解析にて、浸水影響範囲や土砂災害影響範囲に列車を進入させないという条件を満たす列車の停止位置を解析する。得られた結果は、地図上に表示され、ユーザー端末から閲覧できる。

2.2 降水量予測値

本研究では国立研究開発法人防災科学技術研究所(NIED)より、降水量予測値の提供を受けた。これは、気象庁の高解像度降水ナウキャスト³⁾のデータと、気象レーダー等による観測値をデータ同化した気象シミュレーション結果⁴⁾をブレンドして、降水量を予測した結果である。

NIEDによる降水量予測値の空間刻みは緯度方向・経度方向とも0.007度であり、首都圏では緯度方向約780m、経度方向約630mに相当する。

降水量予測値の時間刻みは1分であり、例えば10:03の降水量予測値とは10:02～10:03に降ると予測された1分間雨量(mm)である。また、降水量予測値の更新頻度は約10分である。

降水量予測値の予測対象時間は、2時間先までである。なお、すでに発生した積乱雲についてその後の挙動を予測することは一定程度可能であるが、発生前の積乱雲の発生位置や規模等を予測することは研究途中である。また、単一の積乱雲の寿命は1時間程度とされる²⁾。これらのことから、降水量を精度よく予測可能な範囲は、1時間先程度までである。ただし、本研究では、将来の予測技術の向上を見越したシステムの構築に取り組むため、参考として1時間から2時間先までの降水量予測値をも、NIEDに提供していただいた。

豪雨時鉄道減災システムでは、NIEDが管理するサー

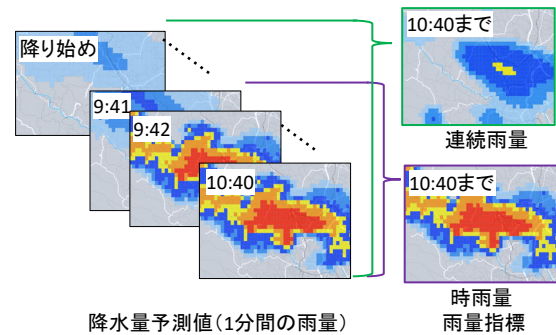


図3 雨量指標の算出の概念図

バーから降水量予測値を認証によりダウンロードする。ダウンロードは、サーバー内のファイル更新の都度、実施される。

2.3 浸水・氾濫解析

降水量予測値を入力とし、線路近傍での浸水・氾濫を解析する。本研究では首都圏の小流域を対象に浸水・氾濫解析⁵⁾を適用した。本解析手法では、降雨が河川に到達するまでは分布型モデルにより、河川内の流れおよび越流後の地表での流れは不等流計算により解析される⁵⁾。

解析の空間刻みは緯度方向0.75秒、経度方向1.125秒(首都圏では緯度方向・経度方向とも約25m)で、解析の結果、10分毎の浸水深を得る。一般に、空間刻みを細かくすると、解像度が上がるが、計算時間が増加する。自治体が公表している浸水ハザードマップと、解析で得られる浸水範囲が概ね一致する条件を満たす空間刻みは約25m以下であった。ここでは、計算時間を短縮するために、空間刻みを約25mに設定した。

得られた浸水深と鉄道事業者等が定めるしきい値を比較し、浸水深の方が大きな範囲を、浸水影響範囲と判定した。ただし、高架橋や盛土部等については線路の冠水は発生しないと判断し、浸水影響範囲から除外することとした。以上により、今から何分後に、どこが浸水影響範囲になるかという予測情報が得られる。

2.4 雨量指標算出

大規模な土砂災害の解析に用いる雨量指標である時雨量と連続雨量を、降水量予測値から算出した(図3)。雨量指標を算出する空間刻みは、降水量予測値の空間刻み(0.007度刻み)と同一とした。

時雨量は、ここでは毎時00分、10分、20分…の1時間前からの降水量予測値の累積値とした。例えば、10:40の時雨量とは、9:41から10:40までの降水量予測値の累積値である。

連続雨量の算出では、降り始めからの降水量予測値を累積する。ここで、一定時間(T)、継続して降水量予測値が0であれば、累積値を0にリセットすることとした。

T は、次節に記載する大規模な土砂災害が発生するとみなす降雨指標のしきい値に用いる連続雨量の条件と同一となるように設定する。

2.5 大規模な土砂災害に関する解析

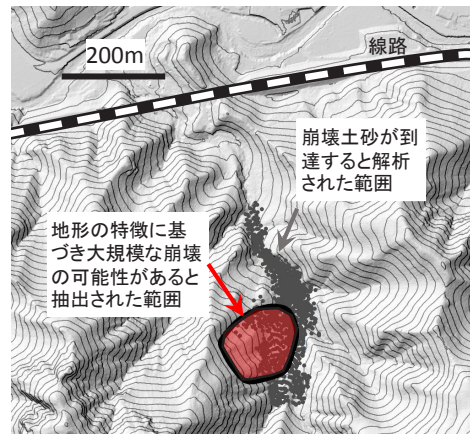
大規模な土砂災害に関する解析については、事前に大規模な土砂災害が発生しうる箇所と土砂等が到達する範囲をシステムにデータベースとして登録しておくこととした。システム稼働時に、雨量指標がしきい値を超えると予測された場合に、データベースから土砂等が到達する範囲を読み込んで、土砂災害影響範囲とすることとした。

事前の解析として、まず、過去の大規模な土砂災害の事例において確認される地形の特徴⁶⁾を高精細な地図(1mメッシュの数値標高モデルから作成した縮尺1:5,000の図面)から判読し、さらに現地踏査により斜面の状況を目視で確認することにより、大規模な土砂災害が発生しうる箇所を抽出した(図4)。次に、その抽出結果に基づき、予想される崩壊面積を算出した。その上で、過去の大規模な土砂災害の事例から得られた崩壊面積と崩壊土砂量の関係⁷⁾を用いて、崩壊土砂量を推定した。以上で得られた大規模な土砂災害の発生箇所と崩壊土砂量を入力として、大規模な土砂災害が発生した場合の土砂の到達範囲を、粒子法を用いた土石流解析⁸⁾を適用して解析した(図4)。得られた結果を、豪雨時鉄道減災システムにデータベースとして登録した。

豪雨時鉄道減災システムの稼働時には、雨量指標としきい値が比較される。このしきい値は鉄道事業者等が線区の状況等を踏まえて任意に設定できる。この設定に際して、例えば、過去に大規模な土砂災害が発生した際の時雨量と連続雨量⁷⁾が、概ね「時雨量 \geq 約50mmかつ連続雨量 \geq 約400mm」または「連続雨量 \geq 約500mm」(ただし、累積値をリセットする降水量予測値=0の継続時間(T)は24時間)の範囲であったことを参考にすることができる。雨量指標がしきい値を超えると予測された場合、事前に解析されていた土砂等の到達範囲を、土砂災害影響範囲と判定する。以上により、今から何分後に、どこが土砂災害影響範囲になるかという予測情報が得られる。

2.6 列車停止位置解析

2.3節および2.5節で得られた、今から何分後に、どこが浸水あるいは土砂災害の影響範囲になるかという予測情報を入力とし、これらの範囲に列車が進入しないという条件での列車の停止位置を解析する。なお影響発生予測時刻より前に、影響範囲を通過できる場合には、当該範囲への列車の進入を許す。具体的な列車の停止位置の考え方(図5)⁹⁾は、次の3種類から鉄道事業者が



このデータは、国土交通省国土地理院が管理する航空レーザ測量データを使用したものである。

図4 大規模な土砂災害に関する事前解析結果の例

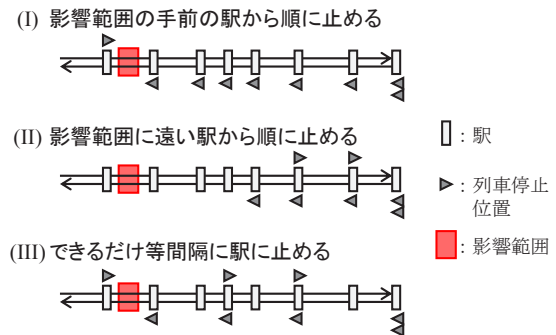


図5 列車停止の考え方⁹⁾

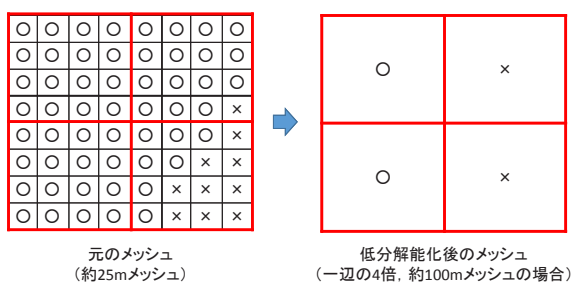
線区の状況等を踏まえて決定できる。

- (I) 影響範囲の手前の駅から順に止める。
- (II) 影響範囲が拡大する可能性を考慮して、影響範囲に対して、できるだけ遠い駅から順に止める。
- (III) 運行再開時の列車間隔をある程度保つために、できるだけ等間隔に駅に止める。

また、列車はできる限り駅に停止させるが、すべての駅のホームがふさがれる場合にのみ駅間での停止を許容する。駅間での停止後に列車から降車して避難する場合には、道路に出やすい踏切付近から避難するのが良いと考えられる。そのため、踏切の長時間遮断につながりうるという課題があるが、現段階では駅間での停止の場合は、踏切付近での停止としている。

列車停止位置解析の空間刻みは、浸水・氾濫解析の空間刻み(約25m)に対して、一辺の1倍,4倍,8倍,16倍,24倍から選択できるようにした。この際、空間刻みを粗くして低分解能化する場合には、低分解能化後のメッシュ内において、元のメッシュ中に1メッシュでも影響範囲がある場合には、低分解能化後のメッシュも影響範囲と判定することとした(図6)。

特集：防災技術



元メッシュ (約25mメッシュ) → 低分解能化後のメッシュ (一辺の4倍、約100mメッシュの場合)
 ×：影響範囲，○：影響を受けない範囲
 図6 影響範囲を低分解能化する際の概念図

2.7 情報閲覧

ユーザーは、解析結果をユーザー端末から閲覧する。表示される画面は、大きく列車停止位置等の表示画面と、降雨情報等の表示画面の二つに分かれる。

2.7.1 列車停止位置等の表示画面

図7に列車停止位置等の表示画面のイメージを示す。常時においては、地図上に、現在時刻の列車位置が表示される。目先2時間までに浸水や土砂災害が発生すると予測された場合には、影響を受けると予測された時刻までの残り時間と影響範囲、2.6節で得られた列車停止位置が表示される。背景地図には、近隣の避難場所を表示することができる。

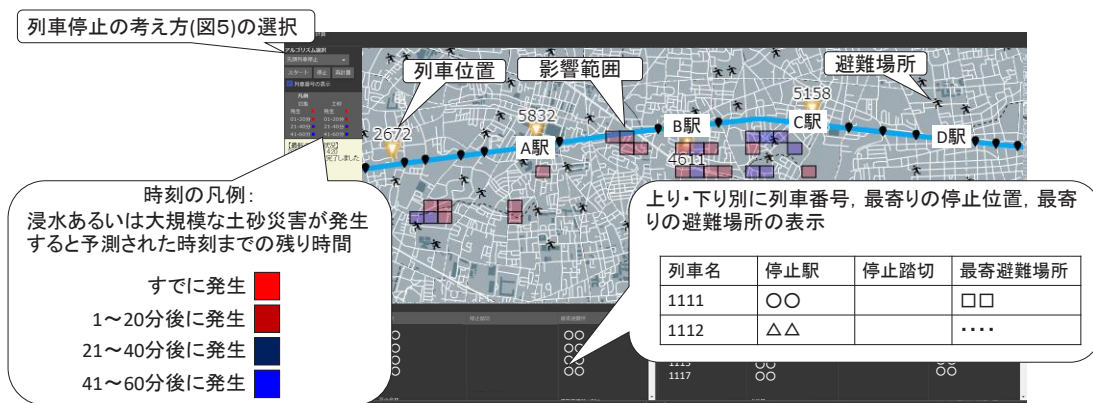


図7 列車停止位置等の表示画面のイメージ



図8 降雨情報等の表示画面のイメージ

2.7.2 降雨情報等の表示画面

降雨情報等の表示画面では、ユーザーが任意の時刻を選択し、NIEDから提供された降水予測値、これをもとに算出された時雨量および連続雨量、浸水深、大規模な土砂災害に関する情報を、地図上で閲覧できる(図8(A))。また、ユーザーが選択した特定のメッシュにおける時雨量と連続雨量の関係や、時雨量や連続雨量の時間変化をグラフ化できる(図8(B))。

大規模な土砂災害に関する情報としては、事前の解析で得られた大規模な土砂災害が発生しうる箇所の抽出結果、土砂等の到達範囲の解析結果、時雨量や連続雨量がしきい値を超過すると予測される範囲が表示される。

2.8 処理に要する時間

本システムでの処理に要する時間を図9に示す。NIEDによる降水量予測値は、予測開始から概ね10分以内に提供され、かつ更新頻度は10分である。そのため、豪雨時鉄道減災システムも1回の処理が10分以内で完了するようにした。豪雨時鉄道減災システムでの処理時間の内訳として、ダウンロードに1分以内、浸水・氾濫解析に3分以内、雨量指標算出に1分以内、大規模な土砂災害に関する解析に1分以内、列車停止位置解析に2分以内を見込んでいる。降水量予測値が2時間先までで

あり、ユーザー端末から結果の閲覧が可能になるのが概ね20分後であることから、ユーザーは概ね1時間40分先までの情報を閲覧できる。

3. 浸水・氾濫を対象とした稼働試験

3.1 稼働試験の条件

開発した豪雨時鉄道減災システムを用いて、首都圏のモデル線区を対象に、稼働試験を実施した。本稼働試験では、浸水・氾濫を対象とした。稼働試験の実施時期は、2017年6月～2018年3月である。

浸水・氾濫解析の対象は、モデル線区を横断する小河川を含む小流域とした。解析では、2時間前（過去）から2時間先（未来）までの合計4時間分の降水量を流域に与えることとした。これは、事前解析により当該流域においては概ね2時間で表流水が計算対象範囲から流出することが確認されたためである。

列車停止位置解析の空間刻みは、浸水・氾濫解析のメッシュの4倍（約100mメッシュ）とした。また、列車停止の考え方は図5の（I）とした。

3.2 試験稼働の結果

3.2.1 稼働状況

稼働試験の結果、構築した豪雨時鉄道減災システムによる処理が、図9に示す計算時間以内になされることを確認した。晴天・荒天の日を含め、平均的には0:00～2:00を対象とした降水量予測値を用いた一連の解析結果は、概ね0:15ころに閲覧可能となっている。ただし降雨状況等により、解析結果を閲覧可能となる時刻は異なる。

3.2.2 2017年8月19日の大雨事例

2017年8月19日の午後、東京地方では、大雨により浸水害や土砂災害が発生した¹⁰⁾。気象庁解析雨量では、練馬区付近では17:30までの1時間に約70mmの非常に激しい雨が解析されている¹⁰⁾。気象庁からは、16:28に東京都の複数の自治体に最初の大雨警報（浸水害）が、16:55には洪水警報が発せられ、22:13までにこれらの警報は解除（注意報は継続）された¹⁰⁾。この大雨により浸水被害や道路等の冠水が認められた。

この大雨事例における豪雨時鉄道減災システムの稼働実績について述べる。最初に浸水が予測された経緯は次の通りであった。16:30～18:30を対象とした降水量予測値が、16:42頃にダウンロードされ、このデータを利用した豪雨時鉄道減災システムによる解析が16:45頃に完了した。この解析結果には、17:00に最大で深さ40cmの浸水が発生するとの予測結果が含まれていた。浸水が予測された箇所は、小河川が道路下を暗渠で流下する地点の、暗渠の出口付近であった。本ケースでは浸

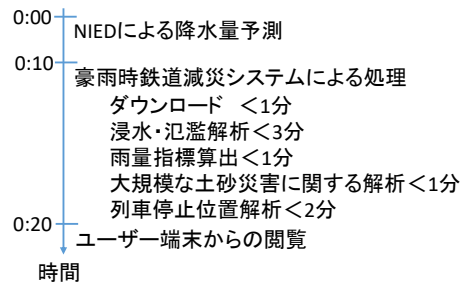


図9 処理に要する時間

水の発生に対して約15分のリードタイムを確保して予測できている。その後も10分毎に解析がなされ、全体としては17:00～20:30にかけて浸水が発生すると予測された。

豪雨時鉄道減災システムにより浸水が予測された箇所や時間と、実際の冠水箇所や時間との詳細な比較はできておらず、解析精度の評価は今後の課題である。なお、実際には、線路への支障はなかった。

3.2.3 2017年8月19日の大雨事例の再現解析¹¹⁾

豪雨時鉄道減災システムでは、解析結果を長期間は保存せず、逐次上書きしている。そこで、当日の状況を再現するために、NIEDより提供された降水量予測値を用いて再現解析を行った。

16:40～18:40を対象とした降水量予測値（図10（A））に基づいて解析された浸水深を図10（B）に示す。小河川に沿って浸水が予測されている。鉄道の線路近傍では、2箇所に浸水が予測されている。地形を考慮すると、一方は小河川からの越流に伴う鉄道盛土ののり尻での滞水で、他方は池の水位上昇と周辺の低地への越流と解釈できる。この浸水・氾濫解析結果に対する列車停止位置解析の結果を図10（C）に示す。盛土部については、本線の直接の冠水はないと判断して、浸水影響領域としていない。これに対して、池の周辺の低地への越流については、線路に支障する浸水影響領域と判定されている。列車停止位置解析の結果、この浸水影響領域に進入させないために、D駅からA駅方へ進行する列車を、D駅で抑止すべきと解析されている。

4. まとめ

外部機関による面的な降水量予測値を用いて、鉄道沿線の浸水・氾濫や大規模な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「豪雨時鉄道減災システム」を構築した。本システムにより、稼働試験時の設定では、10分更新で、概ね1時間40分先の予測情報を閲覧可能であることを確認した。今後、精度の確認や向上に取り組む。

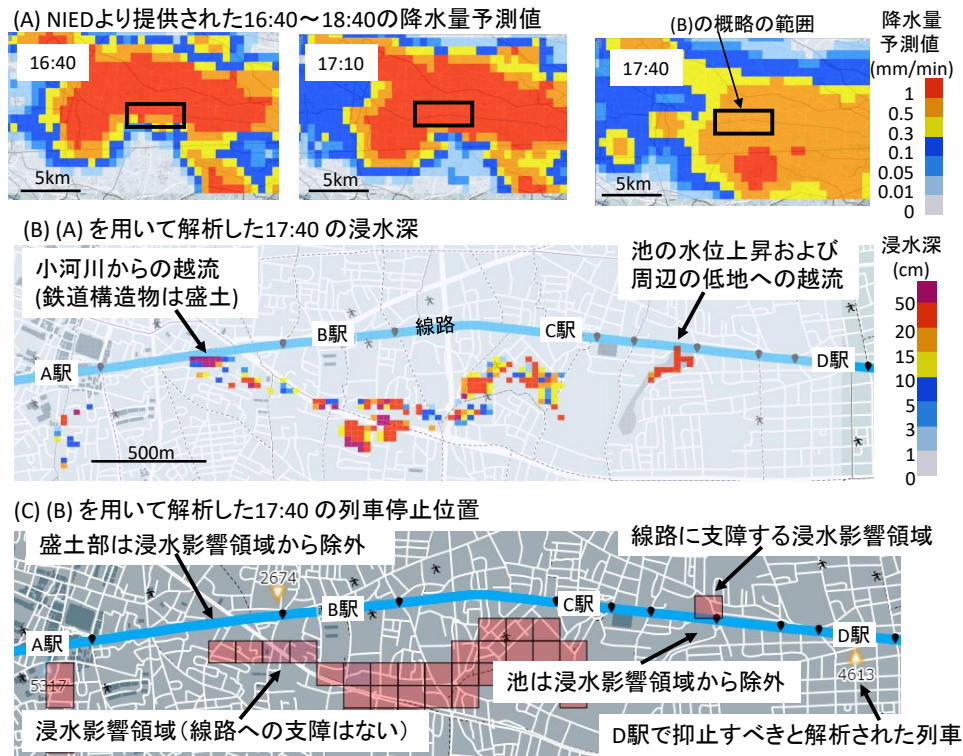


図10 2017年8月19日を対象とした再現解析例¹¹⁾

謝辞

西武鉄道株式会社には、本システムのモニターとしてご協力いただいた。また、国立研究開発法人防災科学技術研究所には降水量予測値を、国土交通省国土地理院には航空レーザ測量データを提供していただいた。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。

文献

- 1) 気象庁：さまざまな気象現象, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-1-2.html>
(最終閲覧日：2018年3月8日)
- 2) 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
- 3) 気象庁：高解像度降水ナウキャスト http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kurashi/highres_nowcast.html
(最終閲覧日：2018年3月8日)
- 4) 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.

- 5) 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
- 6) 西金佑一郎, 川越健, 長谷川淳, 浦越拓野, 太田岳洋, 三好壮一郎, 小野尚哉, 古橋燕子：大規模崩壊の発生箇所認められる地形的特徴 - 崩壊前のDEMデータを用いた地形判読結果 -, 第14回岩の力学国内シンポジウム講演集, 講演番号053, 2017
- 7) 長谷川淳, 浦越拓野, 福原隆彰, 川越健：事例研究に基づく大規模な斜面崩壊の発生規模および降雨量の検討, 鉄道総研報告, Vol.32, No.7, pp.17-22, 2018
- 8) 阿部慶太, Johansson Jörgen, 小長井一男：MPMを応用した高速長距離土砂流動の運動範囲予測のための数値解析手法, 土木学会論文集C, Vol.63, No.1, pp.93-109, 2007
- 9) 尾崎尚也, 渡邊拓也, 深澤紀子：突風・浸水予測を用いた列車停止及び避難誘導アルゴリズム, 鉄道総研報告, Vol.31, No.10, pp.5-10, 2017
- 10) 東京管区気象台：平成29年8月19日の大雨に関する東京都気象速報, http://www.jma-net.go.jp/tokyo/sub_index/bosai/disaster/20170817-20/20170817-20.html
(最終閲覧日：2018年3月8日)
- 11) 浦越拓野, 渡邊諭, 尾崎尚也, 川越健, 太田直之：都市部小流域河川を対象とした局地的短時間強雨に対する減災システムの試作, JREA, Vol.61, No.6, pp.7-10, 2018