

局所的短時間強雨の被害回避のための 列車停止・旅客避難支援システムの開発

奥田 大樹* 鈴木 崇正* 深澤 紀子*

Development of Train Stop and Passenger Evacuation Support System
to Avoid Damage from Local Short-Term Heavy Rain

Daiki OKUDA Takamasa SUZUKI Noriko FUKASAWA

There is an increasing risk that trains in operation suffer hazards such as unexpected flood due to local short-term heavy rain. The risk is not always treated by existing safety measures based on observation data from rain gauges installed along a railway line. This paper describes a train stop and passenger evacuation support system which we have developed to address the problem. The system can immediately calculate stop positions of trains and safety evacuation routes of passengers to minimize the risk in case of emergency. Moreover, the system can visually show calculation results for intuitive grasp.

キーワード：局所的短時間強雨，浸水，被害回避，列車停止，旅客避難

1. はじめに

鉄道路線の沿線には、一般に十数キロ程度の間隔で雨量計が設置されており、規制値以上の降水量が観測された際には、列車の運転を中止して、降雨に伴う浸水等のハザードの被害を未然に回避する安全対策が取られている。しかし、都市部を中心に増加傾向にある局所的な短時間強雨、いわゆるゲリラ豪雨は、雨量計の設置間隔よりも狭い範囲に猛烈な雨を集中的にもたらす場合があり、既存の観測値を基にした運転規制では、これに伴う突発的な浸水等のハザードに対応できない可能性がある。また、局所的な短時間強雨の降雨箇所や降水量は、その発生直前まで予測が困難であるため、計画運休といった事前の安全対策を講じることも難しい。そのため、このような事象が発生した際には、輸送指令は運行中の各列車と車内の旅客が被害を回避するための対策を、きわめて短時間で決定・指示することが必要となり、非常に大きな負担となる。

以上のような背景を受けて筆者らは、輸送指令の意思決定支援を目的として、複線路線を対象に、局所的な短時間強雨に伴う突発的な浸水等のハザードによる被害の可能性を最小化する列車の停止位置と、万が一の事態を想定した旅客の避難経路を、定量的な評価基準に基づき迅速に算出する、列車停止位置・旅客避難経路の算出アルゴリズム（以後、単にアルゴリズム）を構築した¹⁾。

本稿ではこのアルゴリズムと、これを実装した列車停止・旅客避難支援システム²⁾（以後、単にシステム）の

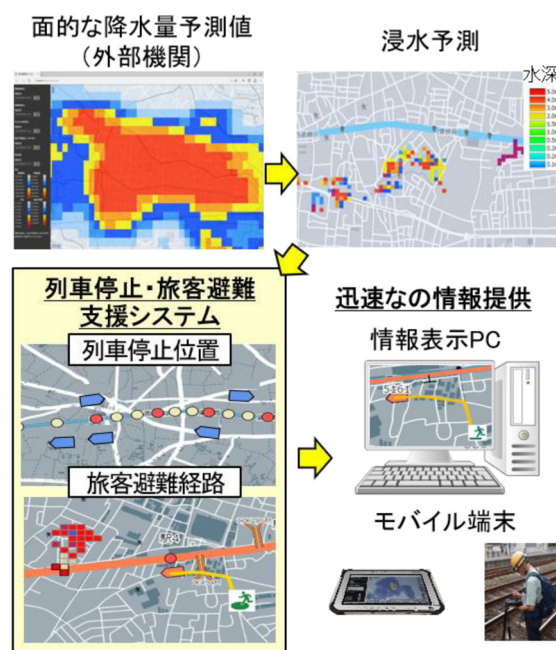


図1 浸水発生予測時のシステムの計算フロー

概要を述べるとともに、システムを用いた列車停止シミュレーションの実施例を示す^{ML1)}。局所的な短時間強雨は、浸水、突風、斜面崩壊等の様々なハザードも引き起こす可能性があり、本システムではそれらに対応することも可能であるが、本稿では浸水を対象として話を進める。

図1は、突発的な浸水の発生が予測された際の、本システムの計算フローを示したものである。入力データとして、降雨開始から60分後～90分後までの対象路線上やその沿線における浸水の発生予測箇所と、各予測箇

* 信号・情報技術研究部研究部 交通計画研究室

所での浸水の発生予測時間を、1辺約25mのメッシュ単位で推計した浸水予測データを与える。本稿では、ナウキャスト³⁾による局所的な短時間強雨の面的な降水量予測値から、渡邊ら^{4) 5)}の手法に基づき推計する。なお、鉄道総研では、これら一連の計算を実行するシステムを、鉄道の減災システム⁶⁾としている。

2. 列車停止位置・旅客避難経路の算出アルゴリズムの概要

本アルゴリズムは、以下で示す3段階の計算を、上下線それぞれで実施する。

- ① 線路上の浸水の発生予測箇所の分布に基づく、対象路線の3分割 (2.1節)
- ② 在線位置と対象路線の分割状況に基づく、各列車の3群への分類 (2.2節)
- ③ 列車群ごとの列車停止位置と旅客避難経路の算出 (2.3節)

列車は線路上のあらゆる地点で停止可能であるため、線路上には列車が選択可能な停止位置（以降、停止可能位置）が無限に存在し、そのままでは各列車の最適な停止位置の算出が困難となる。そこで本アルゴリズムでは、各列車の停止可能位置を、駅もしくは駅間に離散的に予め設定する任意地点に限定して、計算負荷の低減を図る。なお、駅と駅間の任意地点の合計数は、運行中の列車本数よりも十分多くなるようにする。設定地点は上下線共通として、各地点で停止可能な列車本数は上下線それぞれ1本とする。また、2面4線の駅など複数のホームを持つ駅については、入線可能な列車数に基づき、上下線それぞれで停止可能な列車数を設定する。

2.1 浸水の発生予測箇所の分布に基づく対象路線の3分割

入力された浸水予測データに基づき、停車場区間を含む閉そく区間単位で、対象路線の上下線それぞれを表1で示した3つの区間に分割する。なお、閉そく区間の位

表1 浸水予測データに基づく路線の区間分け

DH区間	区間内に浸水の発生予測箇所がある閉そく区間と、これらに挟まれた閉そく区間の集合
IH区間	DH区間の進行方向後方にある閉そく区間の集合
NH区間	DH区間の進行方向前方にある閉そく区間の集合

表2 浸水予測データに基づく列車群の分類

DH列車群	浸水回避のために停止が必要、かつDH区間内のみで停止が可能
IH列車群	浸水回避のために停止が必要、かつIH区間内で停止が可能
NH列車群	浸水回避のための停止は必要ない（浸水に影響されず運行の継続が可能）

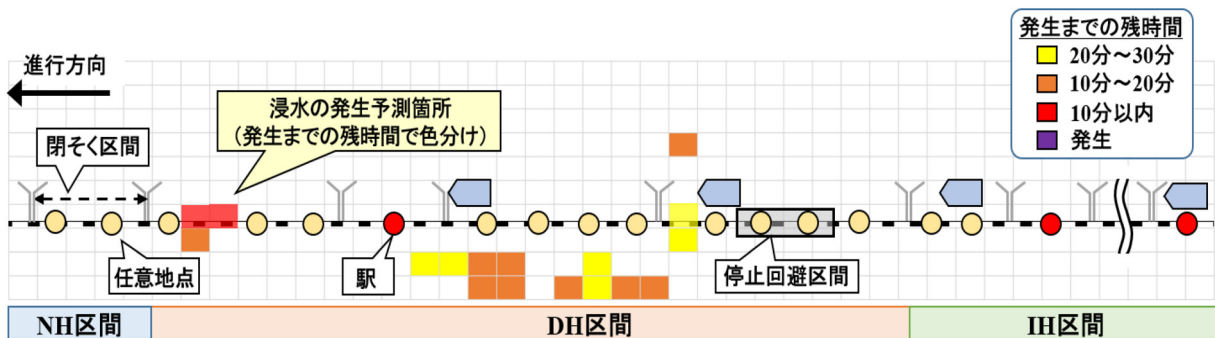
置は上下線で必ずしも一致しないため、3区間の境界は上下線で異なる場合がある。

DH区間は、区間内やその沿線に浸水の発生予測箇所を含んでいるため、区間内で停止した列車には、停止後にも直接的な浸水の被害が発生する可能性が残る。IH区間は、区域内や沿線に浸水の発生予測箇所は存在しないが、前方にあるDH区間の影響で、区間内の列車には、運行抑止等の間接的な被害が発生する可能性がある。NH区間については、DH区間が進行方向の後方にあることから、区間内の列車に浸水による被害が発生する可能性は無く、運行の継続が可能である。図2は、対象路線の一方向における、路線分割のイメージを図示したものである。

2.2 在線位置と対象路線の分割状況に基づく各列車の3群への分類

浸水予測データ入力時の各列車の在線位置と、分割された対象路線の各区間の位置関係に応じて、上下線それぞれの各列車を表2で示した3つの列車群に分類する。

DH列車群の列車は、前述のとおり停止後に直接的な



※上下線それぞれで区間分割を実施する

図2 対象路線の一方向における路線分割のイメージ

浸水の被害の可能性が存在する DH 区間で停止することとなる。従って、列車や旅客の安全を確保するためには、この群に分類される列車は少ないほど望ましく、分類される列車がある場合でも、各列車の停止位置から沿線の安全な避難場所までの避難経路を確保し、万が一の事態に備える必要がある。一方で IH 列車群の列車については、停止後に受ける可能性がある浸水の被害は間接的なものとどまるため、各列車の停止位置から沿線の安全な避難場所までの避難経路の確保を考慮する必要はない。

2.3 列車群ごとの列車の停止位置と避難経路の算出

浸水による被害を回避するために停止が必要となる DH 列車群と IH 列車群を対象に、それぞれが置かれた状況を踏まえた最適化基準に従って、各列車の最適な停止位置等を算出する。そして、これらをあわせたものを、最終的な解とする。なお、上下線のどちらからも入線可能な共通ホームがある駅については、そのホームを停止位置として選択可能な列車のうちで、早く到着できる列車順に優先度を設定する。

NH 列車群は、浸水の発生予測後も運行の継続が可能のため、列車の停止位置等は算出しない。

2.3.1 DH 列車群

DH 列車群の各列車については、停止位置から沿線の安全な避難場所までの避難経路を確保する必要があるとともに、避難の必要性が発生した場合の旅客の避難所要時間は、短いほど望ましい。そこで、DH 列車群を I 、列車 $i \in I$ の停止可能位置の集合を J_i 、列車 i の旅客が選択可能な沿線の避難場所（以後、避難可能場所）の集合を K_i とし、式 (1) で示すように、列車 i が停止可能位置 $j \in J_i$ で停止した際の、避難可能場所 $k \in K_i$ までの避難所要時間 AT_{ij}^k の和が最小となるように、DH 列車群の各列車の停止位置を算出することとする。なお、十分な広さの構内を持つなど、避難場所を兼ねることが可能な大規模駅については、駅自体を避難可能場所を含める。また、対象路線の沿線で発生が予測されている浸水

の影響を受ける道路を含む避難経路や避難場所は、除外して計算を行う。

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_i} AT_{ij}^k \quad (1)$$

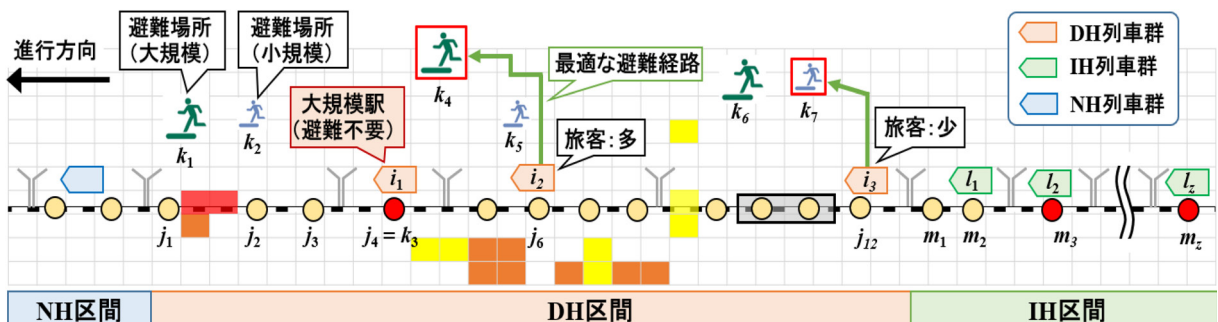
列車 i から避難場所 k への避難所要時間 AT_{ij}^k は、式 (2) で算出する。 L_{ij}^k は列車 i の停止可能位置 j から避難可能場所 k までの避難経路の経路長、 V は旅客の平均歩行速度、 Q_i は列車 i の車内旅客数、そして Δq_j は停止可能位置 j における単位時間当たりの降車可能人数である。なお、駅を避難場所としている場合の避難所要時間は 0 とする。また、高架区間上の停止地点など、DH 区間内であっても停止後に浸水の被害を受ける可能性が無い場合は、避難所要時間を 0 とする。

$$AT_{ij}^k = \frac{L_{ij}^k}{V} + \frac{Q_i}{\Delta q_j} \quad (2)$$

制約条件には、信号保安システムの制約（1 閉そく 1 列車）、駅のホーム数、エアセクションや特定の踏切での停止回避等の、鉄道路線の実態に即した条件を設定する。また、各列車の車内旅客数と避難場所の規模（収容可能人数）の関係も、考慮して計算することが可能である。

2.3.2 IH 列車群

IH 列車群の各列車については、直接的な浸水被害の可能性を考慮する必要はない。しかし、駅間の任意地点での停止となった場合には、長時間にわたる旅客の車内閉じ込めが発生する可能性があり、可能な限りこのような事態の発生を回避することが望ましい。そこで、IH 列車群を L 、列車 $l \in L$ の停止可能位置の集合を M_l とし、式 (3) で示すように、列車 l が停止可能位置 $m \in M_l$ に停止した際の、旅客の車内待機時間 CT_{lm} の和が最小となるように、各列車の最適な停止位置を算出することとする。なお、列車 l が停止した停止可能位置 m が駅



※上下線それぞれで計算を行う

図3 対象路線の一方における各列車の停止位置と避難経路の算出例

である場合は、旅客の自由な乗降が可能であるため、車内待機時間を0とする。つまり式(3)は、各列車を可能な限り駅で停止させることを目的としたものである。

$$\text{Minimize } \sum_{l \in L} \sum_{m \in M_l} CT_{lm} \quad (3)$$

制約条件は、信号保安システムの制約などDH列車群と同様である。

図3は、対象路線の一方方向において、DH列車群 $L=\{i_1, i_2, i_3\}$ およびIH列車群 $L=\{l_1, l_2, \dots, l_2\}$ となった場合の、各列車の停止位置と、DH列車群における避難経路の算出例を図示したものである。

3. 列車停止・旅客避難支援システム

3.1 システムの概要

本システムでは、実装されたアルゴリズムに基づき、対象路線の上下線で運行中の各列車の最適な停止位置や避難経路を自動で算出し、図4のように結果をシステム画面上に表示することが可能である。線路上や沿線における浸水の発生予測箇所は、その箇所まで浸水が発生するまでの残時間に応じて色分けされる。また、各列車のアイコンは、それぞれの停止位置に応じて色分けされるほか、対象路線についても分割された3区間に色分けされる。さらに、本システムは動的なシステムであることから、時間の経過に合わせて、列車の在線位置や浸水の発生状況等は変化するほか、DH列車群の列車であれば、最適な停止位置に対する最適な避難経路も表示さ

れる。

対象路線上の停止可能位置、閉そく区間の境界、停止回避区間は、システム内のデータベースにおけるトポロジデータ（キロ程）を更新することで、自由に位置の更新や新設・削除が可能である。また、高架区間といった路線内の特別な区間についても設定が可能であるほか、エアセクションや幹線道路上の踏切検知区間などについては、停止回避区間とすることが可能である。本区間については、いかなる場合でも停止を避ける絶対回避、もしくは他に選択肢がない場合には区間内での停止を認める極力回避の、いずれかを設定する。これら設定は、列車の停止位置等の計算にも自動で反映される。

3.2 システムを用いたシミュレーション

システムの妥当性や精度、計算速度等を検証するために、首都圏の主要路線であるA線を対象として、2パターンのシミュレーションを実施した。用いたデータは、仮想的に作成した浸水予測データと、局所的な短時間強雨の実績データから算出された浸水予測データである。A線は全線複線であり、総延長は約50km、運行頻度は上下線それぞれで1時間当たり10本程度（ラッシュ時間はそれ以上）である。ただし、閉そく区間の位置は仮想的に設定したものである。また、シミュレーションに用いたPCのスペックは、OS：Win10 Pro 64bit、CPU：Intel Core i7-6700 (3.40GHz)、RAM：8GBである。

3.2.1 仮想的な浸水予測データを用いたシミュレーション

図5は、仮想的な浸水予測データを入力した場合のシミュレーション結果を抜粋したものである。計算所要時

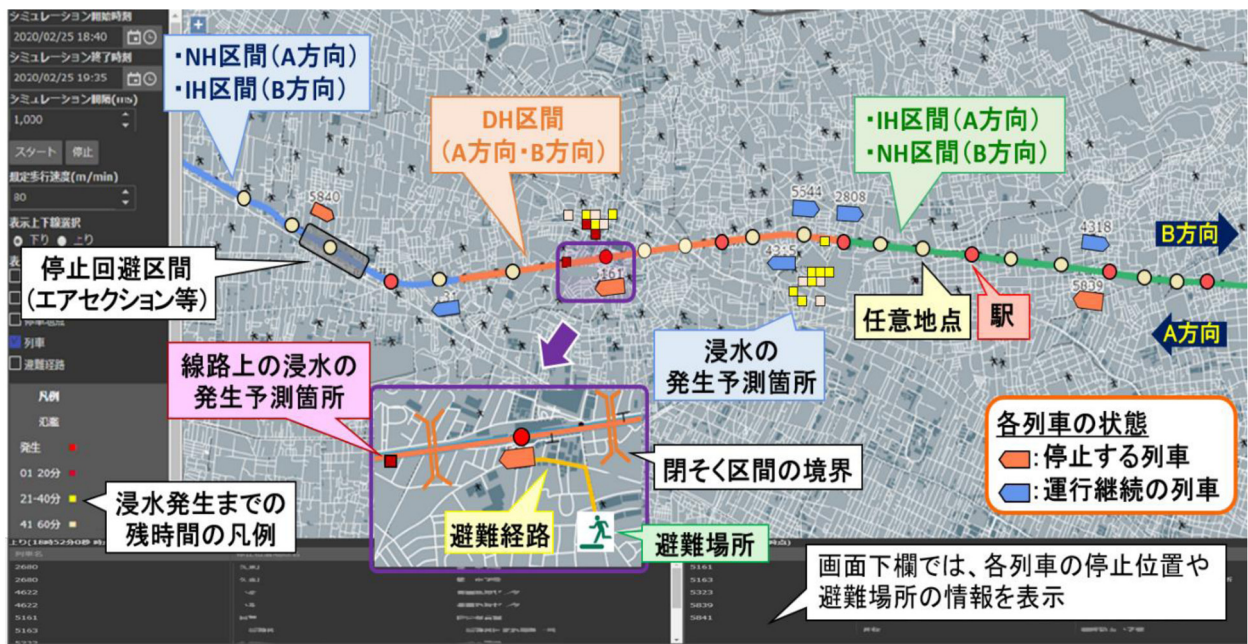


図4 列車停止・旅客避難決定支援システムにおける計算結果の表示例

間は約2秒であり、信号保安システムや停止回避区間等の制約もすべて満たされている。DH列車群に分類された上下線それぞれの各列車は、いずれも線路上の浸水の発生予測箇所の影響を受けない地点で停止できている。さらに、各列車の停止位置から、浸水の発生予測箇所の影響を受けない避難経路も算出できており、万が一の事態が発生しても旅客の安全は確保可能と考えられる。また、IH列車群に分類された上下線それぞれの各列車は、いずれも駅で停止できている、長時間にわたる旅客の車内閉じ込めが発生しない状態となっている。

3.2.2 局所的な短時間強雨の実績データから算出した浸水予測データを用いたシミュレーション

図6は、2019年9月18日20:00頃からA線の沿線

で発生した、局所的な短時間強雨の実績データから算出した浸水予測データを入力した場合のシミュレーション結果を抜粋したものである。計算所要時間は約16秒であり、信号保安システムや停止回避区間等の制約もすべて満たされている。DH列車群に分類された列車は、上下線ともに存在しない結果となった。これは、浸水の発生が予測された時点から、実際に浸水が発生するまでに比較的余裕があったためであり、浸水の直接的な被害を受ける可能性があるDH区間内での停止を避けるような計算をシステムが実行した結果である。また、IH列車群に分類された上下線それぞれの各列車は、いずれも駅で停止できている、長時間にわたる旅客の車内閉じ込めが発生しない状態となっている。また、浸水予測データ

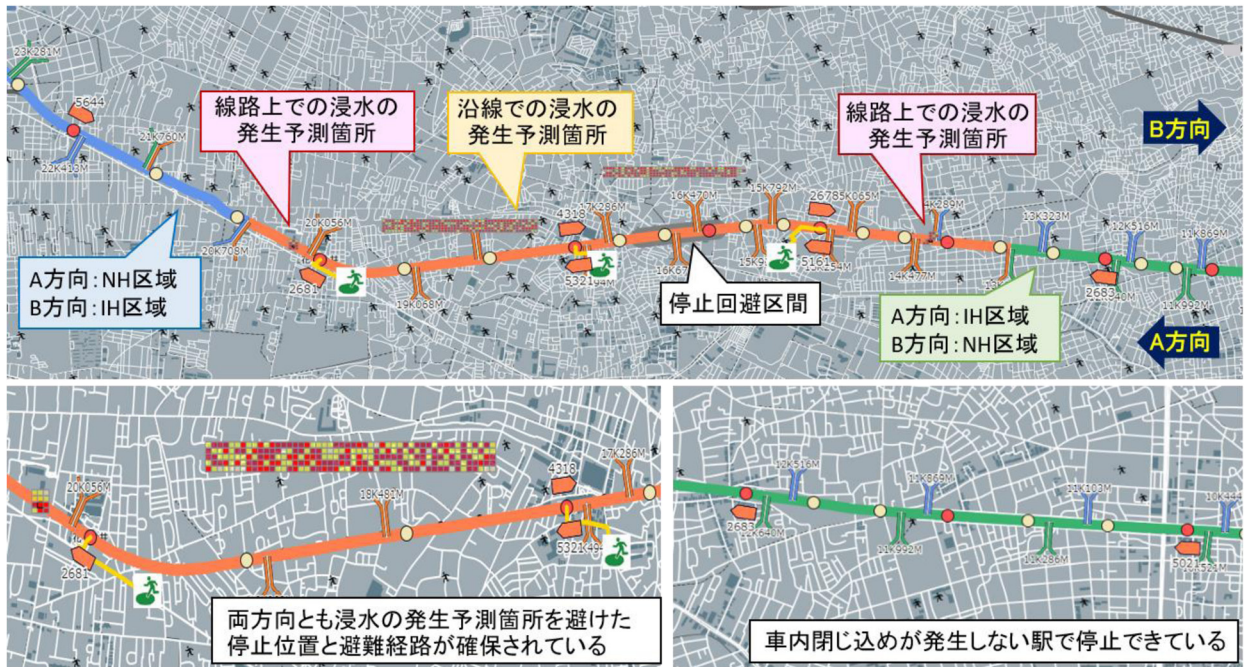


図5 仮想的な浸水予測データを用いたシミュレーション結果
(上：全体 左下：両方向DH区間抜粋 右下：A方向IH区間抜粋)

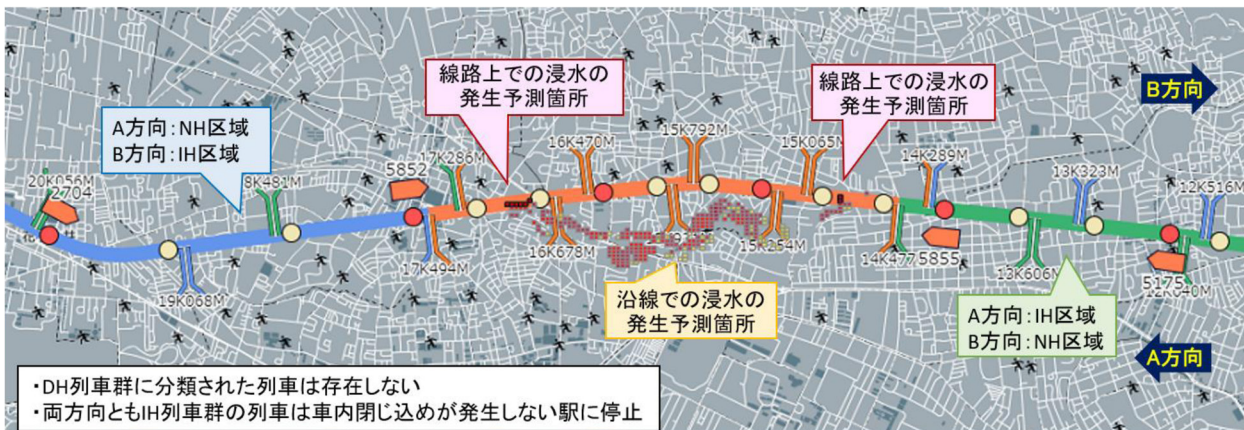


図6 局所的な短時間強雨の実績データから算出された浸水予測データを用いたシミュレーション結果

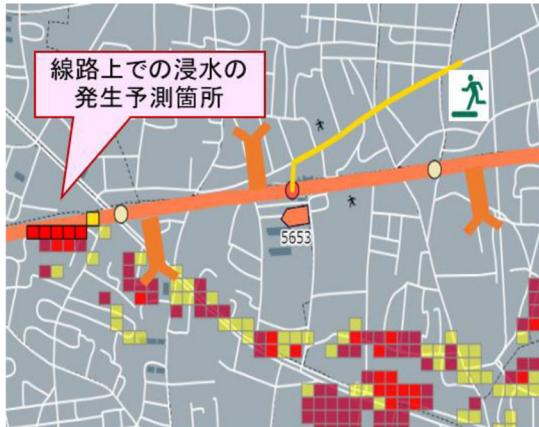


図7 極端条件下におけるシミュレーション結果

の一部を変更して、浸水の発生予測と同時に線路上で浸水が発生するという、仮想的な極端条件下でのシミュレーションも併せて実施した。図7は、その場合のシミュレーション結果を抜粋したものである。計算所要時間は約20秒であり、信号保安システムや停止回避区間等の制約もすべて満たされている。今回は、DH列車群に分類される列車が発生したが、浸水発生予測箇所を避けた最適な停止位置と避難経路が適切に算出できている。

以上のことから、本システムは様々な条件下において、安全な解を迅速に算出できたと見え、突発的な災害発生時でも、輸送指令等の意思決定に資する情報を、迅速に提供することが可能と考えられる。

4. おわりに

局所的な短時間強雨に伴う突発的な浸水等のハザード発生時における、輸送指令等の意思決定支援を目的として、複線路線を対象に、その被害の可能性を最小化する列車の停止位置と、万が一の事態を想定した旅客の避難経路を、定量的な評価基準に基づき迅速に算出するアルゴリズムと、これを実装したシステムを開発した。そして、首都圏のA路線を対象に、仮想的な浸水予測データや、局所的な短時間強雨の実績データから算出された浸水予測データを用いたシミュレーションを実施した。その結果、様々な条件下において、信号保安システムの制約（1閉そく1列車）等の実際の鉄道路線における各種制約を満たしつつ、旅客の安全を守ることが可能な解を数秒～数十秒程度で算出することができ、突発的な災害発生時に活用可能であることを確認した。また、本シ

ステムは、対象路線における防災・減災観点での重点整備箇所の抽出や、設備投資効果の把握等を目的とした、仮想的な浸水予測データを用いた被害シミュレーションとしても、活用可能と考えられる。

今後の課題としては、実地における稼働試験を進めて検証事例を蓄積し、システムの計算結果の妥当性や精度、および動作の安定性等の検証について、さらなる深度化を図る必要があると考えられる。また、在線位置情報や車両応荷重情報等との、リアルタイムな接続も必要と考えられる。さらに、地上にある車両基地など、営業線以外への適用についても検討が必要と考えられる。

謝 辞

本成果には、総合科学技術・イノベーション会議のSIP「レジリエントな防災・減災技術の強化」（2014～2018年度）による取組みが含まれている。

文 献

- 1) 奥田大樹, 鈴木崇正, 深澤紀子: 突発的な浸水の回避を目的とした列車停止位置の推計手法, 電気学会論文誌D, Vol.140, No.6, 2020
- 2) 奥田大樹, 鈴木崇正, 深澤紀子: 突発的な浸水被害の回避を目的とした列車停止・旅客避難支援システムの開発, 令和2年度土木学会全国大会講演予稿集, IV-131, 2020
- 3) 気象庁: 高解像度降水ナウキャスト:
<https://www.jma.go.jp/jp/highresorad/index.html>
(参照日: 2020年12月10日)
- 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) 渡邊諭, 湯浅友輝, 馬目凌: 局地的豪雨時における鉄道沿線の流出・氾濫影響を予測する, RRR, Vol.76, No.11, pp.16-19, 2019
- 6) 川越健, 馬目凌, 浦越拓野, 奥田大樹: 降雨予測値を用いた局地的短時間強雨時の鉄道減災システム, 鉄道と電気, No.864, Vol.31, No.4, pp.3-6, 2020
- ML1) 奥田大樹: 局所的な短時間強雨に伴う浸水の回避を目的とした列車停止・旅客避難支援システム, 鉄道総研月例発表会, 2020
<https://youtu.be/sx5SjUbUMAE>
(参照日: 2020年12月2日)

