

# 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

尾崎 尚也\* 渡邊 拓也\* 深澤 紀子\*

Algorithm of Train Operation Control and Passenger Evacuation Based on Forecast of Tornado and Flood

Naoya OZAKI Takuya WATANABE Noriko FUKASAWA

According to the effects of the climate change, the short-term strong rain has been increasing in recent years. There is also concern that the tornado, flood etc. increase along with such weather conditions. RTRI is developing a dynamic hazard mapping system as a technique to reduce damage to the railway passengers in case of such a disaster. Using the evaluation result of the hazard, we examined an algorithm to decide where to stop the train, and in some cases where to evacuate the passenger. In this paper, we report about the algorithm of the train operation control and the evacuation guidance for passenger.

キーワード：突風，浸水，列車停止，避難誘導，アルゴリズム

## 1. はじめに

気候変動の影響により局所的短時間強雨が近年増加傾向となっている。また、そのような気象状況に伴い竜巻等の突風も増加することが懸念されている。急激な気象の変化による線路の浸水や列車の転覆等の被害を受ける可能性が高まっており、より詳細な予測技術が求められている。

鉄道総研ではこのような気象災害の被害を少なくするための技術として、強風災害、洪水被害等の危険度を地図上に示すハザードマッピング技術の開発を進めてきた<sup>1)</sup>。現在は鉄道の将来に向けた研究開発の一環として、気象災害に対するハザードマップのリアルタイム化に取り組んでいる<sup>2)</sup>。突風については、急速に発達する積乱雲などの気象レーダーによる観測結果を利用して、地上付近で発生する突風を検知する手法の研究に取り組んでいる。浸水については、局所的短時間強雨への対策として、地形や河川の情報、高架か開削かといった鉄道構造物の条件、さらに線路勾配や排水設備などの詳細な情報と、雨量予測情報を用いて鉄道沿線の浸水を精度よく詳細に逐次評価する手法の開発を行っている。

これらを受け、筆者らは突風・浸水の予測結果を活用し、これらに遭遇する前にどの列車をどこに停車すればよいか、場合によってはどこに旅客を避難させればよいかを決定するアルゴリズムについて検討を行っている。これまで、鉄道総研では列車停止位置の決定について検討したことがある<sup>3)</sup>。この研究は、枝分かれする線区に

おいて、枝分かれした先の片方の線区で列車が運行停止となった際に、もう片方の線区の運行を確保するために列車をどのように停止すればよいかという観点から、列車停止位置を決定するアルゴリズムを構築したものである。一方、筆者らの研究は、突風・浸水の予測情報をもとにした列車運行の停止を想定しているという点で、既存の研究とは異なっている。

本稿では、突風・浸水の予測を用いて列車停止位置と避難場所を決定するためのアルゴリズムを報告した後、作成したプロトタイプシステムを紹介し、今後の展開について述べる。

## 2. 突風・浸水時の列車停止アルゴリズム

本章では突風・浸水が予測された際の列車停止アルゴリズムについて述べる。

### 2.1 列車停止アルゴリズムの前提と考え方

列車停止アルゴリズムの前提として、突風や浸水の予測は10分おきに60分程度先の予測ができると想定している。これらの想定は、現在、取得できる雨量予測情報の発表間隔と、鉄道総研で開発中の突風検知手法および浸水予測手法をもとにしている。また、列車の現在位置と今後の運行ダイヤが分かることを想定している。突風・浸水いずれも同様のアルゴリズムであるため、本章では浸水を例として説明する。

列車停止の考え方は、線区の状況に合わせて選ぶことができるように現段階では以下の3種類を検討している(図1)。

\* 信号・情報技術研究部 交通計画研究室

特集：輸送・交通計画技術

- (I) 浸水に遭遇しない範囲で、できるだけ先の駅から順に詰めて停止させる。
- (II) 浸水範囲が拡大する可能性を考慮して、できるだけ浸水範囲から離れた駅に停止させる。
- (III) 列車の運行再開時に列車間隔をある程度保つために、浸水に遭遇しない範囲でできるだけ等間隔に駅に停止させる。

また、駅間に列車を停止することも可能であるが、状況によっては長時間の車内待機を強いられる可能性を考慮すると旅客への影響が大きく、さらに旅客が降車して避難する際の手続きも煩雑であることから、極力避けたほうが良い。そのため、列車はできる限り駅に停止させ、駅間での列車停止はすべての駅のホームがふさがる場合に限るものとする。3章で述べるが、駅間で停止した列車から避難することも想定される。その際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。踏切の長時間遮断につながる可能性があるのは承知の上で、現段階では駅間に列車を停止させる場合は踏切付近で停止させることを想定している。また、浸水の予測精度に合わせて列車を止めるまでの余裕時間を設定する必要があるが、余裕の程度は別途研究している予測技術の精度に依存するため、現段階では余裕時間なしと仮定している。

2.2 列車停止アルゴリズムの概要

列車停止位置を決定する方法は、ネットワークフロー問題の一種である最小費用流問題としてモデル化した。最小費用流問題は最適化問題の形式の一つで、複数の供給地（工場等）から複数の中継地（積替場所・市場等）を通して複数の需要地（商店等）まで、それぞれの移動にコスト（トラック運賃等）と運搬できる容量（トラック台数等）が設定され、それぞれの供給地での生産量と需要地での必要量が決められた際に、どのように品物を運べば必要な量を最小コストで運べるかを求める問題である<sup>4)</sup>。このモデルでは移動はコストの低いほうに流

れることから、コスト設定を変えることで移動をコントロールすることができる。そのため、さまざまな移動の考え方を導入しやすいモデルである。

列車停止位置の決定は、各線区の状況に沿って上述のような最小費用流問題として設計し、最適化問題を解くことで、解を得ることが出来る。モデルの概略を以下に示す。ここでは a, b, c の3列車が走行している場合を例として説明する。列車の動きをモデル化し計算を行うためのネットワーク(図2)を以下のように作成する。フローとは列車が現在位置から最終的にどこで停止するかを模式的に流れとして表すものであり、流れの発生地点と最終的な到達地点が指定されるものである。また、フローが流れる点をノードと呼び、ノード間を結ぶものをエッジと呼ぶ。

- (1) 各列車について、駅、踏切についてノード（白色丸）を作り通過順序に則りエッジ（黒色線）を作る。図2の例では、図の上部から下部に列車が進行する。
- (2) 駅集約ノード（青色丸）を作り、各列車の各駅からのエッジ（青色線）を作る。
- (3) 踏切集約ノード（緑色丸）を作り、各列車の各踏切からのエッジ（緑色線）を作る。
- (4) 全集約ノード（灰色丸）を作り、各駅集約ノードからのエッジ（紫色線）を作る。
- (5) 各踏切集約ノードから全集約ノードへのエッジ（橙色線）を作る。
- (6) 列車の運行が終了する場合（車庫に入る場合）に用いるエッジ（灰色線）を、終着駅から全集約ノード間に作る。

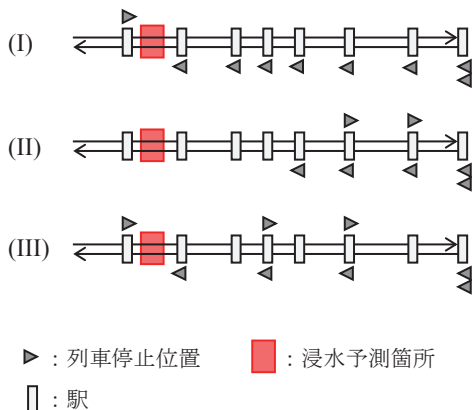


図1 列車停止の3種類の考え方

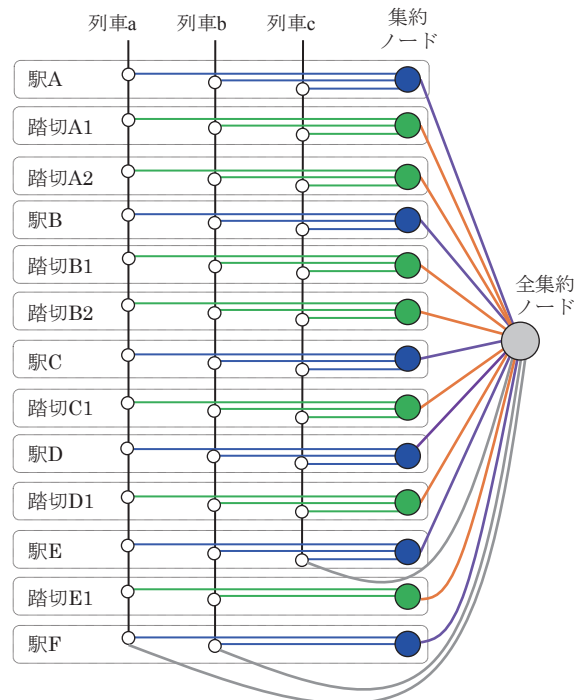


図2 列車停止位置計算用ネットワーク

次に、浸水予測が発生した場合の計算手順について説明する(図3)。列車がそれぞれ駅B、踏切A1、駅Aにいて(桃色丸)、踏切D1と駅Eの間が浸水すると予測されたと仮定する。列車の動きに制約をつけるために、各エッジの容量とコストの設定は以下の通りとする。

- (1) 各列車のエッジ(黒・灰色線)はコストを0、容量を1とする。できるだけ列車は通常運行することを表している。
- (2) 各列車の現在位置の手前の駅・踏切とのエッジ(桃色線)の容量を0とする。列車は後戻りしないことを表している。
- (3) 浸水する駅・踏切間のエッジ(赤色線)のコストを非常に大きい値に設定するか、あるいは容量を0にする。浸水範囲を列車が通過しないことを表している。
- (4) 駅から駅集約ノードへのエッジ(青色線)については容量を1、コストを1とする。浸水時は原則駅に停止することを表している。
- (5) 踏切から踏切集約ノードへのエッジ(緑色線)については容量を1、コストを5とする。駅に止まれない場合は踏切に停止することを表している。
- (6) 各駅集約ノードから全集約ノードへのエッジ(紫色線)は容量をホームの数、コストを0とする。駅では最大でホーム数分のみ列車を停止できることを表している。
- (7) 各踏切集約ノードから全集約ノードへのエッジ(橙色線)は容量を1、コストを0とする。踏切に停止できるのは1列車のみであることを表している。

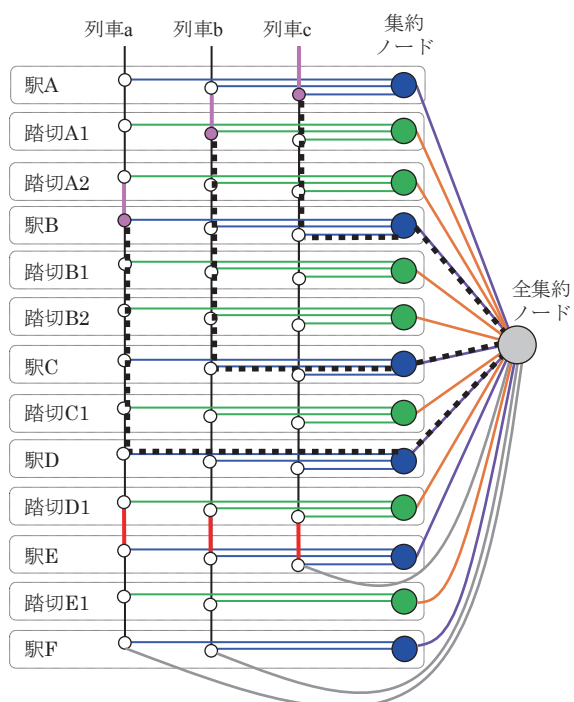


図3 列車停止位置計算時の設定と結果の例

最適化計算における制約条件は以下の通りである。

- (1) 列車がいる位置のノード(図3の桃色丸)から容量1のフローを流す。
- (2) 全集約ノードにすべてのフローを集約する。
- (3) 列車がいる位置のノードと全集約ノード以外のノードはフローの流入量と流出量は等しくなる。
- (4) すべてのエッジについてフローは容量を超えない。

これらの制約条件のもとで、各エッジのコストとフロー量の積の総和を最小化するフローが最適解となる。

新たな浸水予測が得られるたびに、浸水領域を変化させ、最適解を求める。フローが駅集約ノードに流れた列車はその駅が列車停止位置、踏切集約ノードに流れた列車はその踏切を列車停止位置とする。ここで、図3に示した黒破線を最適解のフローとする。この場合、列車aは駅D、列車bは駅C、列車cは駅Bで停止するということを示している。

実際の列車運行を想定した場合、車両の運用や中線のある駅なども考慮する必要があるが、例えば大都市圏の稠密線区であっても図2で示したネットワークとして表現することが可能であり、本アルゴリズムにより最適解を求めることが可能である。

また、コストの低いほうにフローが流れると考える本アルゴリズムでは、コストの値の設定により、2.1節で示した3種類の列車停止の考え方を表現することができる。(I)の前駅から詰めていく考え方であれば、進行方向先の駅から駅集約ノードへのエッジのコストを低くすることにより表すことができる。(II)の浸水範囲から遠いところに止める考え方であれば、浸水範囲に近い駅から駅集約ノードへのエッジのコストを高くすることにより表現できる。(III)の運行再開を考慮し列車どうしの間隔をあけておくという考え方であれば、2駅ごとに駅から駅集約ノードへのエッジのコストを高くすることにより表すことができる。また、例えば規模の大きい駅に列車を優先的に停止させたい場合には、規模の大きい駅から駅集約ノードに繋がるエッジのコストを低くすることにより表すことができる。このように、エッジのコストを調整することによって、列車停止の考え方にあった結果を得ることが可能である。

### 3. 浸水時の避難誘導アルゴリズム

本章では浸水予測が発生した際の、旅客の避難誘導のアルゴリズムについて説明する。なお、突風の場合は旅客を降車させて避難させることよりも、突風に遭遇しない駅で沿線から突風が過ぎ去るのを待つほうがよいと考えられるため、突風時の避難誘導については対象外とする。

特集：輸送・交通計画技術

3.1 避難誘導アルゴリズムの前提と考え方

避難誘導アルゴリズムの前提として、列車停止アルゴリズムと同様に浸水の予測は10分おきに60分程度先の予測ができると想定している。また、浸水範囲外の駅で列車を止め、浸水がなくなるまで待機することを基本とするが、予測が変わり列車を停止させた位置で浸水が発生すると予測された場合、列車から降車し避難所へ避難するものとする。この場合、避難場所が浸水しない、かつ、駅や踏切から避難場所への避難経路が浸水しないように避難場所と経路を選択する。

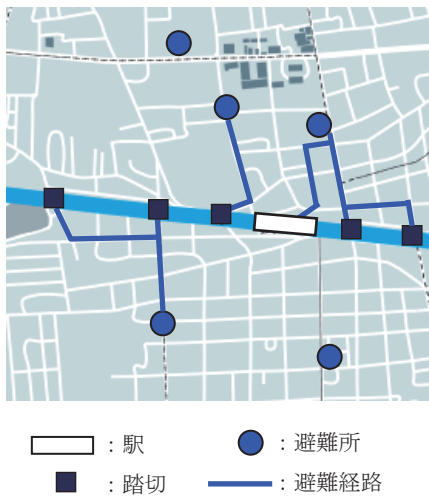


図4 浸水範囲外での避難場所探索のイメージ

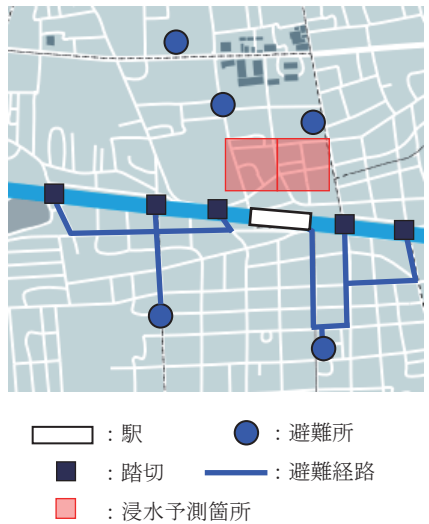


図5 浸水予測時の避難場所探索結果のイメージ

3.2 避難誘導アルゴリズムの概要

次に、3.1節に示した前提と考え方をもとに、検討した避難誘導アルゴリズムは以下の通りである。

- (1) 事前に各駅、各踏切から徒歩で移動できる範囲内の避難所のリストを用意しておく。
- (2) 浸水予測が発生しない場合は避難場所および経路

は各駅、各踏切から道路距離で最も近い場所とする(図4)。浸水予測が発生した場合は、浸水範囲の周囲一定範囲において、避難場所と避難経路の再計算を行う。この際、浸水する範囲を避けた経路をそれぞれ調べ、避難場所は道路距離で最も近い場所とする(図5)。

- (3) 浸水データが更新された場合は、再度避難場所と避難経路の計算を行う。

このように、浸水予測データの更新に合わせて、計算を繰り返すことで、浸水予測結果に合わせた避難場所と経路を決定することができる。

避難経路の決定については、現段階では道路距離を基準としているが、駅・踏切・避難所の標高情報や道路の傾斜情報などを取得することができれば、高低差も考慮し坂道の上り下りの少ない経路を求めることも可能である。

4. プロトタイプシステム

検討しているアルゴリズムや実使用時の課題を検討するために、大都市圏の实在路線をモデルケースとした列車停止位置決定および避難経路決定支援システムのプロトタイプを作成した。

本システムを稼働させるために事前に整備が必要なデータは列車ダイヤ・車両運用・駅のホーム数・避難所の位置情報・沿線の道路情報・地図情報・突風および浸水の予測データである。

本プロトタイプでは、列車ダイヤおよび車両運用については、通常ダイヤで列車が動くものとし、駅のホーム数については各駅上下線に各1列車が停止できると仮定している。また、突風および浸水の予測については仮想データを用いている。列車の停止に関する考え方については、2.1節の(1)で述べた前から順に詰めていく考えを採用している。

実運用上では、ダイヤ乱れなどを想定し、実際の列車在線位置や将来的な列車位置を入力する必要があるが、第一段階としてシステムが稼働できるかを確認するために通常ダイヤとした。また、実際のホーム数や退避線の有無などの詳細な配線図を入力することを想定している。

4.1 突風向け列車停止位置決定支援システム

突風向け列車停止位置決定支援システムのプロトタイプの画面を図6に示す。地図上に突風が発生すると予測される箇所をメッシュで表示し、遭遇までの予測時間を色分けで表示する。青色から赤色に近づくほど突風が発生するまでの時間が短いことを示す。列車位置を矢印で表示する。そのまま運行した場合、突風の影響範囲に入

る最初の列車を赤色で表示する。

画面下部には画面に表示されている全列車の列車番号、列車停止位置、運転再開予測時刻（突風が通過し終わる予測時刻）が表示される。

これにより、どの列車が最初に突風の影響を受けるか、いつ頃運転再開できるかを把握することができる。

#### 4.2 浸水向け列車停止位置決定・避難場所決定支援システム

浸水向け列車停止位置決定および避難場所決定支援システムのプロトタイプ画面を図7に示す。地図上に浸

水が予測される箇所をメッシュで表示し、浸水までの時間を色分けで表示する。突風の場合と同様青色から赤色に近づくほど浸水するまでの時間が短いことを示す。列車位置を矢印で表示する。浸水の影響を受け、駅に停止する列車を橙色、駅間に停止する列車を赤色で示す。

画面下部には列車番号、列車位置（緯度経度）、停止位置（駅または踏切）、停止位置からの最寄りの避難所が表示される。

これにより、どの列車が浸水の影響を受けるか、どの列車をどこに列車を停止させるとよいか、避難が必要な場合にどの避難所にどのような経路で避難したらいいか



図6 突風向け列車停止位置決定支援システムのプロトタイプ画面例



図7 浸水向け列車停止位置決定および避難場所決定支援システムのプロトタイプ画面例

特集：輸送・交通計画技術

を把握することができる。

また、現状では別のシステムとして構築しているが、列車の停止位置から最適な避難所までの避難経路を計算し、地図上に表示する避難経路計算・表示機能を図8に示す。避難の途中で避難予定経路に浸水予測が発生した際に、避難所ならびに避難経路を変更する機能を実現している。

5. おわりに

本稿では、突風や浸水の予測を用いて列車停止位置と避難場所を決定するためのアルゴリズムについて報告し、プロトタイプシステムを紹介した。

突風や雨量の予測が得られ、アルゴリズムを導入したシステムを作成することにより、突風に対しては、どの列車が最初に突風の影響を受けるか、いつ頃運転再開できるかを把握することができる。浸水に対しては、どの列車が浸水の影響を受けるか、どこに列車を停止させるとよいか、避難が必要な場合にどの避難所にどのような経路で避難したらいいのかを把握することができるようになる。

紹介したプロトタイプシステムは、突風および浸水の予測については仮想のデータを使用している。今後、鉄道総研で現在開発中の突風・浸水予測システムと連動さ

せ、予測システムで求めた結果を用いて列車停止位置決定および避難場所決定をできるようにする予定である。また、浸水後の運行再開に活用することも予定している。例えば、浸水がなくなる時刻を予測し、浸水箇所の点検に行くための経路と保守区所を出るべき時刻を示すことで、運行再開を少しでも早めることに寄与できると考えられる。

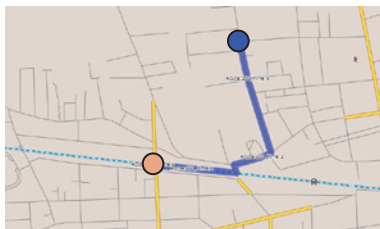
今後の課題は以下のとおりである。列車停止や避難誘導の考え方について、実務に沿った計算ができるようアルゴリズムの改良と評価の方法について検討を続けていく。また、鉄道事業者での利用を想定して、システムの画面の表示内容や表示方法、操作方法について検討し改良を進めていく。また、現段階では通常時の列車ダイヤを用いて列車位置を計算しているが、実務で活用するためには、ダイヤ乱れ時への対応が必要となる。そのためには列車の現在位置データや将来的な列車位置のデータの取得が必要となるため、これらを得るための仕組みづくりが必要となる。さらに、現在、風や雨により列車運行を停止させる基準として、沿線で計測された風速や時間雨量などが使われている。本稿で紹介した雨量等の予測値を使って運行管理を行うためには、実務上の基準を作る必要がある。また、突風・浸水の予測精度に合わせた列車停止のための余裕時間の設定が必要である。

これらは研究の途上であり、技術的な課題と併せて、実導入へ向けた課題を整理する必要がある。ひきつづきアルゴリズムの検討とシステムの改良、実用化に向けた課題の整理を進めていく。

本稿に記載した内容には、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の「レジリエントな防災・減災技術の強化」による研究が一部含まれている。

文献

- 1) 浦越拓野, 福原隆彰, 布川修, 長谷川淳: 気象災害ハザードマッピング技術の開発, 鉄道総研報告, Vol.30, No.3, pp.5-10, 2016
- 2) 太田直之: 自然災害対策の課題と取り組み, 鉄道総研報告, Vol.31, No.5, pp.1-4, 2017
- 3) 平井力, 國松武俊, 近藤繁樹, 富井規雄, 高場基司: 列車抑止計画作成アルゴリズムの開発, 鉄道総研報告, Vol.22, No.6, pp.11-16, 2008
- 4) 藤澤克樹, 後藤順哉, 安井雄一郎: Excelで学ぶOR, pp.149-152, 2011



(a) 避難経路に浸水予測がない場合



- (b) 避難途中で浸水予測が発生した場合
- : 避難開始地点
  - : 避難所
  - : 浸水予測範囲
  - : 避難経路

図8 避難途中での経路変更のイメージ