

# 列車退避判定モデルによる 都市水害時の地下鉄列車の退避計画に関する一考察\*

## A Decision-Making Model of Train Evacuation Plan for Urban Flood\*

新田博之\*\*・秀島栄三\*\*\*・山本幸司\*\*\*\*

By Hiroshi NITTA\*\*・Eizo HIDESHIMA\*\*\*・Koshi YAMAMOTO\*\*\*\*

### 1. はじめに

近年、都市圏で水害が増大する傾向にある。気候変動により降雨形態が変化していることや都市構造の変化が被害の拡大を助長していることが原因として挙げられている。マスコミなどでも「都市水害」という言葉が取り上げられ、また様々な対策が講じられているものの、諸都市では全く予期していなかった被害が発生している。

ところで都市では地下空間が発達し、ほぼすべての政令指定都市で地下鉄が整備、運営されている。地下鉄、あるいは地下街では、地下空間という物理的性質上、常時、地下水の観測、排水管理、地上との連絡体制、避難体制などの様々な安全対策が欠かせないが、突発的な被害をもたらす「都市水害」に対してもさらなる対応が必要とされる。

そこで本研究では、列車を安全に退避させる方策を導くことを目的として、地下鉄構内が浸水した場合に浸水プロセスと列車運行プロセスを結合したモデルを構築する。そして実際の路線を対象とした分析を行い、具体的な列車退避方策と計画に関わる留意点を明らかにする。

### 2. 都市水害と地下鉄

#### (1)都市水害の特徴

ひとことに都市水害といわれるが、本稿では特に都市特有の気候、都市における土地利用、都市施設の複雑性、都市生活者特有の意識などに起因して被害が甚大となる場合を指すものとする。

このような都市水害は、突発的かつ局地的、さら

に機能的輻輳、社会機構の複雑化により、予測を困難とさせるとともに、発生を感知した時点から対策を講じるまでの時間的余裕が一般の水害と比較して少なくなりやすいといえる。

#### (2)都市水害による地下鉄への被害事例

都市水害によって引き起こされた地下鉄の被害事例として、平成11年6月29日に発生した福岡水害による被害、平成12年9月11日に発生した東海豪雨水害による被害を取り上げる。

福岡水害では駅に隣接するホテルの入口部から浸水した。この段階で乗客が危険に晒されることはなく、地下鉄施設は停電しなかったため駅長は雨がやんだことで水位が下がると判断した。このため、当初は運行を続けていたが、博多駅で軌道に20cmほど水が溜まった時点で空港 - 中州川端間の運行を停止した。当時、福岡市交通局では防災対策はその時々での判断で実施することとなっており、明確な行動基準はなかった。

東海豪雨水害では地下鉄入口には止水板や土嚢が置かれたが、浸水した塩釜口駅、野並駅はそれらだけでは対応できなかった。また隣接する地下駐輪場の出入口からの浸水が地下鉄構内に流入した。名古屋市交通局へのヒアリングによれば、東海豪雨災害では、庄内川と植田川の氾濫が十分事前に予測できたため、止水板を作動させる以前に列車は全線運休とし、乗客、列車ともに被害はなかったとのことである。

#### (3)災害時における地下鉄事業者の対応

地下鉄では、水害時の浸水に対するハード的な施策として、地上出入口における止水板、土嚢の設置、底上げ、河川周辺のトンネル部における止水壁の設置などを行っている。よって、通常の降雨で構内が急に浸水する可能性はきわめて低い。

また、ソフト面では地下における防災計画において、災害発生後速やかに営業運転を停止し、乗客を地上に避難させることに主眼をおいている。また災

---

\*キーワード：防災計画 鉄道計画 公共交通運用

\*\* 学生員、名古屋工業大学大学院 工学研究科博士前期課程

\*\*\* 正員、博（工）、名古屋工業大学大学院 ながれ領域

〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町

TEL 052-735-5586、FAX052-735-5586

\*\*\*\*正員、工博、名古屋工業大学大学院 しくみ領域

TEL 052-735-5484、FAX052-735-5484

害対応マニュアルを作成し、これに則った行動をとることとなっている。

しかし、営業運転の停止後、列車をどこか安全な場所に避難させるということについてはその都度対応するようである。すべての列車を車両基地に退避させるにはかなりの時間がかかり、その最中に新たな浸水が発生しないとも限らない。とりわけ都市水害は予期せぬ事態を招いていることを踏まえれば、浸水地点の近くに列車が存在する最悪の状況を想定し、列車という資産を損失しないよう、退避計画を想定しておく必要があるだろう。の制御は運転司令によって手動制御となっているが、細かな行動基準はなく、経験則やその場の判断によって対応することが多い。しかし、都市水害は予期せぬ場合で特に被害が大きくなることを踏まえれば、浸水地点付近で列車が走行しているような最悪の状況も想定し、列車の退避計画を策定しておく必要があるだろう。

### 3. 地下鉄列車退避判定モデル

#### (1) モデルの概要

名古屋市地域防災計画「風水害等災害対策編」<sup>1)</sup>によれば、浸水時には列車の運転は運転司令室の指示に従い、浸水のおそれのない場所に回送することになっているが、回送場所を車庫および車両基地とするとは明記されていない。これは退避地点が安全であれば水が引くまで列車の孤立を認めることを意味している。地下鉄路線の縦断面は浸水に備えて高低差をつけており、水が低いところに流れるようにしている。可能であるならば列車は車両基地まで退避させることが望ましいが、緊急の場合には列車は取り急ぎ近くの高い地点へ退避させることが有効である。なお、上述のように、本研究は乗客の地上への避難後を想定しており、乗客の避難誘導に要する時間などは考慮に入れる必要はない。

以下ではまず、地下構内に浸水が発生するプロセスがあり、次いで浸水に対応して地下鉄列車がどのような行動をとりうるかを説明する必要がある。本章では両プロセスを接続する数理モデルを構築する。

本モデルで水害の状況に対応して列車を退避させる方策を導くことで、経験と勘に頼っていた方策の決定を迅速かつ合理的に行うことが期待される。

まず簡単に対象路線を設定する。地下鉄の路線は図1に示すように複数の線分と複数の変勾配点の組み合わせとして単純化して表現する。列車の位置は始点からの距離  $y$  で表現する。退避可能な点は路線内の凸点となる。

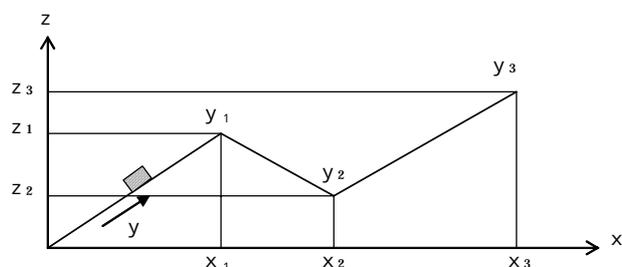


図1 単純化した地下鉄路線図

ただし、以下のような仮定をおく。

- ・路線は単線とし、渡り線などは考慮しない。
- ・1編成のみを取り上げ、他の列車との相互関係は考慮しない。退避可能な点であれば他の列車の影響を受けずどの点にも退避できる。
- ・列車の逆走を許可する。
- ・列車の速度は一定とし、加速度は無視する。
- ・列車の長さを考慮しない。

#### (2) 駅構内浸水プロセス

地下鉄駅構内への浸水については以下のように想定する。

まず、浸水はある一つの駅の地上出入口からのみ浸水するものとする。また、地下鉄駅にはそれぞれ幅の違う入り口が複数存在し、入り口に番号  $n$  をつける。そして、構内への流入量は、地上の氾濫水深  $h_f$  に依存する。

$h_f$  は時間変化するが、路線までへの到達時間を考慮して  $(t - \tau)$  の関数とする。ただし、 $t$  は路線に水が到達した場合を 0 とする時間座標、 $\tau$  は路線まで水が到達するのに要した時間を表す。この関数  $h_f(t - \tau)$  を水位上昇関数と呼ぶことにする。この  $h_f(t - \tau)$  を使い、路線への流入量を求める。駅出入口から線路部までの構造は実際には非常に複雑であるが、ここでは階段等の段差を水が下り降りる時の段落ちによる損失を考慮した簡易式を用い、式(1)のように表現する。

$$Q_e = \sum_{n=1}^k B_n \left\{ \mu h_f(t - \tau) \sqrt{g h_f(t - \tau)} \right\} \quad (1)$$

ここに、 $Q_e$  : 路線流入流量、 $B_n$  : 入口  $n$  の幅、 $\mu$  : 段落損失係数 (0.544 とする)、 $g$  : 重力加速度である。

駅構内、ポンプ所にはそれぞれポンプが配置されている。流入した水は高いところから低いところへ勾配に沿って流れ、凹部においてポンプ性能を超えて浸水した場合、レールレベルまで水が達すると、列車は電気系統に故障が生じるため、通過できなくなる上、当該駅間の信号はすべて停止信号となる。

レールレベルまでの路線断面は、長方形と近似することが出来るため、各地点の浸水水深  $H$  は長方形

断面の開水路のマニング公式を変形した式(2)から収束計算によって算定され、レールが水没するか否かを判定する。

$$\frac{Q_e - P}{BH} = \frac{1}{n} \left( \frac{BH}{2H + B} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \left| \frac{dz}{dx} \right| \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここに、 $P$ ：ポンプアップ容量、 $n$ ：マニングの粗度係数、 $B$ ：水路幅、 $H$ ：水深、 $\frac{dz}{dx}$ ：路線勾配である。

以上、時間を変化させて式(1)から式(2)のプロセスを繰り返し、レールまで水没する時間を求める。また、浸水によって物理的に通行不能となる区間を通行不能区間とする。一方、通行不能区間を含んでおり、信号現示によって通行不能となる駅間を通行不能駅間と定義してそれぞれ検出する。

### (3)列車退避方策判定基準

地下鉄浸水モデルにより駅が水没するまでの時間が算出されると、これにより列車をどの場所へ退避させるべきかを判定することが出来る。退避先は直近の凸点とする。ただし、退避先の候補地点がどのような状況であるかをチェックしておく必要がある。起こりうる状況として、退避地点が通行不能駅間にある場合と退避地点が通行不能駅間にない場合とがある。これらいずれの状況かによって判定する基準が異なっており、これを危険許容基準と呼ぶこととする。危険許容基準として以下の2つのレベルが考えられる。

レベル1：最も近い退避候補地点を退避地点とする。  
レベル2：通行不能駅間外に退避し、通行不能駅間外で最も近い退避候補地点を退避地点とする。つまり、レベル2の方がレベル1より安全側をみている。

以上の前提に基づき、列車退避方策の判定モデルを構築する。

まず、列車の現在位置  $y$  に対する退避候補地点を式(3)～式(5)によって決定する。

$$l_f = y_f - y \quad (3)$$

$$l_b = y - y_b \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} l_{c0} &= l_f && (l_f < l_b \text{ のとき}) \\ l_{c0} &= l_b && (l_f \geq l_b \text{ のとき}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに、 $l_f$ ：前方退避地点までの距離、 $l_b$ ：後方退避地点までの距離、 $y_f$ ：前方退避地点の  $y$ （距離）座標、 $y_b$ ：後方退避地点の  $y$ （距離）座標、 $l_{c0}$ ：初期退避候補地点である。つまり、初期退避候補地点は退避可能な2点のうち、距離が近い方が選択される。

次に、選択した退避候補地点に列車は向かうが、このとき、路線が水没する時間内に列車が通行不能

区間（または通行不能駅間）内を脱出できるかを算定し、脱出可能である場合、初期退避候補地点が退避地点となる。一方、脱出できない場合は退避候補地点を初期退避候補地点と逆の方向にある地点（遠い地点）に設定し、もう一度所要時間を算定する。このとき、脱出可能であれば、変更された退避候補地点が退避地点となる。しかし、脱出出来ない場合は、列車は水没する（動けなくなる）。

以下に、危険許容基準レベル1に対する定式化を行う。たとえば、初期退避候補地点に  $y_f$  が選択されたとすると、

$$l_{fi} = y_{fi} - y \quad (6)$$

$$(t - \tau)_{sf} = l_{fi} / v \quad (7)$$

となる。ここに、 $l_{fi}$ ：列車位置から通行不能区間の  $y_f$  方向への端点までの距離、 $y_{fi}$ ：通行不能区間の  $y_f$  方向への端点の  $y$ （距離）座標、 $(t - \tau)_{sf}$ ： $y_f$  を退避候補点とした場合の脱出時間、 $v$ ：列車速度（一定とする）である。なお、 $y_f$  は必ず通行不能区間の外または通行不能区間の端点上にあるので、

$$y_{fi} \leq y_i \quad (8)$$

ここで、以下の条件式 が成立する場合、 $y_f$  を退避地点として決定する。

$$\begin{aligned} \text{条件式} & : (t - \tau)_{sf} \leq (t - \tau)_d \\ T & = l_f / v \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 $(t - \tau)_d$ ：通行不能区間の水没時間、 $T$ ：退避時間である。一方、条件式 が成立しなかった場合は、退避候補地点が  $y_b$  となる。このとき、

$$l_{bi} = y - y_{bi} \quad (10)$$

$$(t - \tau)_{sb} = l_{bi} / v \quad (11)$$

となる。ここに、 $l_{bi}$ ：列車位置から通行不能区間の  $y_b$  方向への端点までの距離、 $y_{bi}$ ：通行不能区間の  $y_b$  方向への端点の  $y$ （距離）座標、である。なお、 $y_{bi}$  も必ず通行不能区間外または通行不能区間の端点上にあるので、

$$y_{bi} \leq y_b \quad (12)$$

条件式 が成立せず、以下の条件式 が成立する場合は、初期退避候補地点よりも遠い地点が退避地点として選択されたこととなる。

$$\begin{aligned} \text{条件式} & : (t - \tau)_{sb} \leq (t - \tau)_d \\ T & = l_b / v \end{aligned} \quad (13)$$

ここに、 $(t - \tau)_{sb}$ ： $y_b$  を退避候補点とした場合の脱出時間である。いずれかの条件式が成立し、退避地点

が決定した場合、退避にかかる時間  $T$  を算出する。一方、 $H_1$ 、 $n$  がいずれも成立しない場合は、列車はどこにも退避できなくなり、水没と判定される。

なお、危険許容基準がレベル2の場合は、通行不能区間の端点が通行不能区間の駅に置き換えられるのみであるので、式については割愛する。

さらに、本モデルのいくつかの特徴を簡単に述べることにする。

- ・浸水する駅が複数存在したり、通行不能駅間が複数の駅にわたる場合でも対応可能である。また、各駅毎に浸水の規模を設定でき、浸水に時間差が生じる場合は  $n$  を用いて調整が可能であるため、一路線を連続的に扱うことが可能である。

- ・データを時系列で取り扱うため、たとえば停車や逆走による時間損失なども考慮することができる。

- ・列車、駅を点として扱い、列車の相互関係を考慮しないため、同位置に2編成以上の列車が退避する結果を示せない。また、勾配は本来列車速度にかなり影響を与えるが、速度を一定としている。

#### 4. 事例分析と退避計画に関する考察

##### (1) 事例分析

3.において作成したモデルを、名古屋市交通局鶴舞線に適用して分析を行った。鶴舞線は名古屋市内を北西から東南にわたって結ぶ路線であり、東海豪雨災害において路線西部を流れる庄内川の破堤と、東部を流れる植田川の暗渠部の氾濫により、浸水による被害を最も受けた路線である。

分析方法は、列車の初期位置を変化させ、危険な区域を見出す手法を採用する。各種パラメータは表1に示す。

表1 分析に用いたパラメータ

レールレベル $H_1$	0.198m
ポンプアップ容量 $P$	$0\text{m}^3/\text{sec}$
入り口の幅 $B_n$	駅によって異なる
水路幅 $B$	3.0m
粗度係数 $n$	0.02
到達時間	駅によって異なる
列車速度	15km/hr

##### (2) 事例分析の結果および考察

紙幅の都合上、図示を省略するが、得られた結果はおおよそ以下の通りである。

結果として、まず、当然ながら、退避地点の選択法が退避地点までの距離に依存する結果となった。

また駅間の距離が離れるほど水没する可能性が高いことが明らかとなった。すなわち、地下鉄の駅間が短いほど退避が容易であると理解できる。

列車の退避を考える場合、信号現示によって誘導

することが現実的である。危険許容基準レベル2は、これに該当し、駅間の距離が比較的長い場合は、区間内に信号（平常時は使わなくてもよい）を設けるなどして退避不能駅間を短くし、列車の退避を助ける仕組みをつくれればよいといえる。また新線を建設する際に浸水が予測される区間では駅間を短くすることや信号を設けることが対応策として考えられる。

次に、事例分析の結果の具体例として、ある状況下での庄内緑地公園駅周辺の例について解説する。

浸水により庄内緑地公園 - 庄内通駅間は通行不能駅間となる。退避候補地点は通行不能駅間両端外にある凸点のいずれかとなる。退避不能となる列車は発生せず、退避地点は距離の短い地点が選択された。仮に退避を判断するまで5分を要した場合には退避不能となる列車が生じることが明らかとなった。

本研究で分析した路線では、浸水の程度を問わず、他の退避地点を選択できなくなり危険となる箇所があることが明らかとなった。

以上のようなシミュレーション分析を行っておくことにより、退避時間地点の選択に直近の地点が選択されない場合で、これによって退避時間が長くなる地点の周辺を予め危険区間と定め、浸水発生時に重点的に対処するようにすれば緊急時の選択と集中を図ることが可能となる。

#### 5. おわりに

本論文では、高度に集積した都市空間の中で、起こりうる災害に対して事前に様々な状況を想定することが重要と考え、地下鉄の被災について、浸水災害に焦点を当てて考察した。具体的にはモデル分析の結果から列車を安全に退避させるための方策を導き出す方法論を構築した。そして、今後さらに地下鉄事業者が実施可能な施策を提示した。ただし構築したモデルは実際と比べ、かなり捨象している。地下街や地下鉄構内などの空間への浸水現象については水理的に解明されていない面もあり、この点において実証的課題も残されている。

最後に、資料提供、アドバイスを頂いた名古屋市交通局に深く感謝する次第である。

##### 参考文献

- 1) 名古屋市防災会議：名古屋市地域防災計画 風水害等災害対策編, p271~p273, 1999.
- 2) 建設技術研究所：名古屋市風水害被害想定調査報告書, 5-1~5-41, 2001.
- 3) 名古屋市交通局：資料集・名古屋の地下鉄建設, p48~p69, p127, p143, 1986.