

水害発生時における駅構内の 旅客安全性評価システムの開発

DEVELOPMENT OF THE EVALUATION SYSTEM ON PASSENGER SAFETY OF AN UNDERGROUND STATION AT A FLOOD OUTBREAK

真船 奨^{1*}・外狩 麻子²・島村 誠³・山田 武志⁴

Susumu MAFUNE^{1*}, Asako TOGARI², Makoto SHIMAMURA³,
Takeshi YAMADA⁴

In recent years, flood damages due to local heavy rainfall have occurred frequently and some underground stations were inundated. It is an important issue to consider appropriate countermeasures against inundation because flood in underground stations would cause serious damages which endangers the safety of passengers. In this research, we developed the prototype of system to evaluate the safety of passengers at stations in case of flood damages with the simulation technology. The aim of this research is to evaluate tangible and intangible countermeasures against inundations at underground station. We carried out case studies to verify the effects of some anti-inundation measures by this prototype-system.

Key Words : *underground station, inundation, anti-inundation measure, simulation*

1. はじめに

近年，局地的大雨等の水害が多発しており，地下空間を有する駅（地下駅）への浸水も発生している．地下駅の浸水は旅客の安全を脅かす深刻な被害につながる可能性があるため，より適切な浸水対策を検討することは重要な課題である．また，浸水対策を検討するのにあたり実際の地下駅で浸水状況を再現することは困難であるため，分析方法についても考慮すべきである．

そこで本研究では，地下駅構内が浸水した場合において，ハード施策（止水板等）およびソフト施策（駅員の誘導等）による様々な浸水対策を旅客安全性の観点から評価できるツールを構築するため，シミュレーション技術を用いた水害発生時における駅構内の旅客安全性評価システム（以下，本システム）のプロトタイプを開発した．さらに，モデル地下駅の浸水を想定し，本システム

を用いて複数の浸水対策の効果を検証するケーススタディを実施した．

本稿では本システムの概要と，ケーススタディの試行内容，およびその結果について報告する．

2. 開発システムの構成

本システムは，他のモデルが連携する場となる駅空間モデルと，それぞれ独立した解析プログラムである水害モデル，制御モデル，旅客流動モデルの4つのサブモデルで構成される．駅空間モデルは地下駅における位置情報を管理・表現するための場のモデルである．水害モデルは地下駅構内の浸水過程を解析するモデルである．制御モデルは駅員による対策の実施過程を解析するモデルである．旅客流動モデルは旅客の避難過程を解析するモデルである．上記4つのモデルにより，浸水防止対策や

キーワード：地下駅，浸水，浸水対策，シミュレーション

¹非会員 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター 防災研究所

Disaster Prevention Research Laboratory, Research and Development Center of JR East Group, East Japan Railway Company (E-mail: mafune@jreast.co.jp)

²非会員 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター 防災研究所

Disaster Prevention Research Laboratory, Research and Development Center of JR East Group, East Japan Railway Company

³フェロー会員 特任教授 東京大学社会基盤学専攻 Project Professor, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo

⁴正会員 (株)ベクトル総研 Senior Consultant, Vector Research Institute, Inc.

旅客への情報発信を考慮して駅構内の浸水状況や旅客避難状況をシミュレーションする。

浸水避難シミュレーションの結果として、避難所要時間や浸水箇所を歩行した旅客数等を出力し、旅客の安全性の観点から施策の効果を評価する。本システムの構成とシミュレーションの実施フローを図-1に示す。

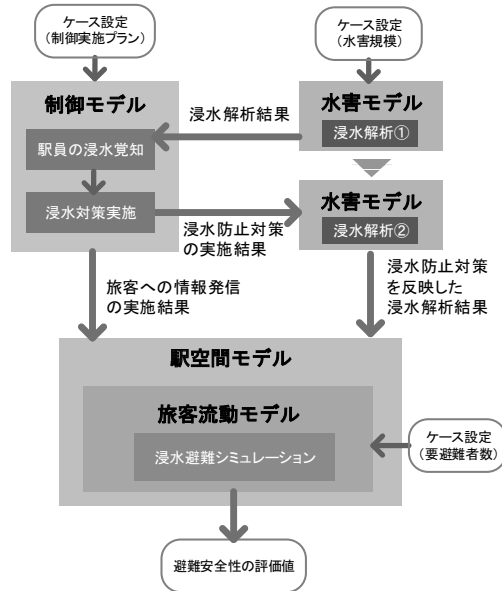


図-1 システム構成とシミュレーション実施フロー

3. サブモデルの概要

(1) 駅空間モデル

駅空間モデルは、駅構内への水の流入地点や駅構内の浸水状況、旅客や駅員の位置、各種設備の設置場所など、各種位置情報を管理・表現するための場のモデルである。

駅空間モデルは各階について解析対象領域を0.5m四方のセルに分割したメッシュ空間（構造格子）で表す。各セルには駅の構造や設備の設置状況に合わせ、通行可能（床面）と通行不能（壁や障害物）を表す属性値、床面の高さを表す属性値、改札や階段、エスカレータといった旅客挙動に影響する設備の属性値、止水板や土嚢といった止水設備に関する属性値、電光掲示板や放送設備といった情報発信設備に関する属性値、階の接続部を表す属性値などを設定する。駅空間モデルの例を図-2に示す。

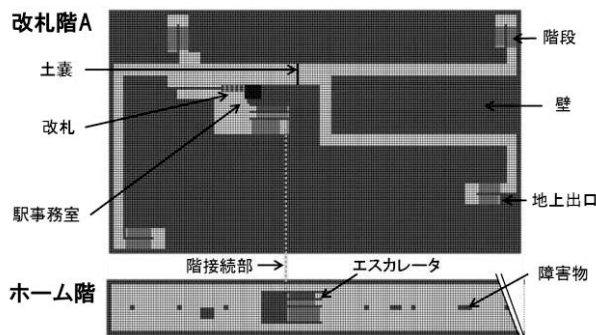


図-2 駅空間モデルの例

(2) 水害モデル

水害モデルは地下駅構内の浸水過程を解析するモデルである。具体的には、時々刻々と変化する地上出口の浸水深を入力値とし、駅空間の形状や止水設備の設置状況に従って、0.1秒単位でメッシュ空間の各セルの水位や流速を解析し、出力する。

ガイドライン¹⁾に従い、地上出口 i の時刻 t における地上出口の水位が $H_i(t)$ であるときの地下への流入量 $Q_i(t)$ を、地上出口 i の開口幅員 B_i を用いて

$$Q_i(t) = 1.59 B_i H_i(t)^{1.65} \quad (1)$$

で求め、井上ら²⁾、戸田ら³⁾で提案されている地下空間の浸水過程の解析手法（ポンドモデル）を用いて駅構内の各地点の浸水性状を解析する。なお、駅空間モデルのメッシュ空間の各セルを貯留槽とみなし、ポンドモデルの基礎方程式を次のように差分法で適用している。セル間の連続式を差分法で解くと、

$$A_{i,j} \frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n}{\Delta t} = Q_{i-1/2,j}^n + Q_{i+1/2,j}^n + Q_{i,j-1/2}^n + Q_{i,j+1/2}^n + Q_{in}^n \quad (2)$$

となる。ここで、 Δt は計算ステップの単位時間、 A_{ij} はセル ij の面積、 h_{ij}^n は計算ステップ n におけるセル ij の水位、 $Q_{i-1/2,j}^n$ はセル $i-1,j$ からセル i,j への流量、 Q_{in}^n は地上や他の階からの流入流量である。図-3にメッシュ空間における水位と流量の定義について図示する。

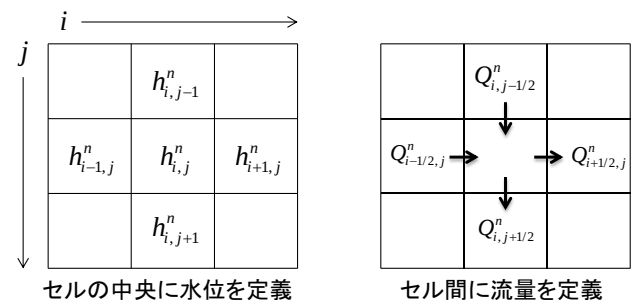


図-3 メッシュ空間における水位と流量の定義

同様に、セル間の運動量式を差分法で解くと、

① i 方向の流量

$$\frac{L}{gA_b} \frac{Q_{i-1/2,j}^{n+1} - Q_{i-1/2,j}^n}{\Delta t} = h_{i-1,j}^n - h_{i,j}^n - \alpha L Q_{i-1/2,j}^n |Q_{i-1/2,j}^n| \quad (3)$$

② j 方向の流量

$$\frac{L}{gA_b} \frac{Q_{i,j-1/2}^{n+1} - Q_{i,j-1/2}^n}{\Delta t} = h_{i,j-1}^n - h_{i,j}^n - \alpha L Q_{i,j-1/2}^n |Q_{i,j-1/2}^n| \quad (4)$$

となる。ここで、 L はセル間の距離（0.5m）、 g は重力加速度、 A_b は接面の断面積、 α は損失係数である。

なお、階段や土嚢などの段差部における計算ステップ

n のときの流量 Q^n は川池ら⁴⁾を参考にし、次に示す段落ち式と越流公式に従って計算する。なお、 B はメッシュ空間におけるセルの1辺の長さ、 h_1^n は図-4で示す段差部の基準面に対する上流の水位、 h_2^n は下流の水位である。

① 段落ち式 ($h_2 < 0$)

$$Q^n = 0.544 B h_1^n \sqrt{g h_1^n} \quad (5)$$

② 越流公式 (完全越流の場合: $h_2/h_1 \leq 2/3$)

$$Q^n = 0.35 B h_1^n \sqrt{2g h_1^n} \quad (6)$$

③ 越流公式 (潜り越流の場合: $h_2/h_1 > 2/3$)

$$Q^n = 0.91 B h_2^n \sqrt{2g (h_1^n - h_2^n)} \quad (7)$$

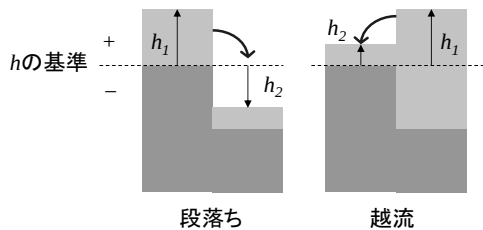


図-4 段差部の水位と適用式

(3) 制御モデル

制御モデルは駅員による地上浸水情報収集、地下空間の浸水防止対策（止水対策）、旅客への情報発信対策などの各種浸水対策の実施過程を解析するモデルである。

制御モデルは、まず、地上部の浸水情報収集設備の設置条件と水害モデルの解析結果を基に、駅員の浸水覚知時間を算出する。次に、各設備の設置位置、駅員数と配置、対策実施順序で構成される浸水対策プランを入力条件として、止水設備の仕様や情報発信手段の仕様、駅員の移動速度などの基礎データに基づき、各地点の止水設備の設置完了時間や旅客に対する避難情報の発信完了時間を解析する。図-5に制御モデルの処理の流れを示す。

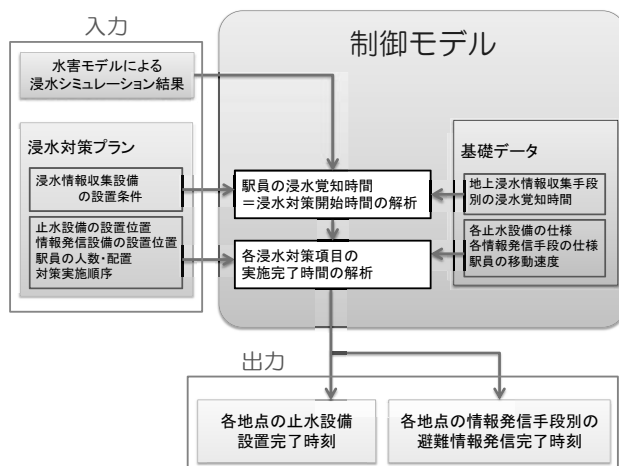


図-5 制御モデルの概要

a) 情報収集対策と駅員の浸水覚知時刻

地上部の浸水状況の情報収集対策としては、地上出口付近に監視カメラを設置し、カメラ映像をモニタリングすることや、浸水センサーを設置することなどが考えられる。無対策の場合には浸水が駅員の周囲に及ぶことで気づくことも考えられる。ガイドライン¹⁾に従い、駅員の浸水覚知時刻を表-1の通りとする。

表-1 地上の浸水情報収集手段別の浸水覚知時間

手段	覚知時間の条件
無対策	駅員の位置の浸水深が3cmに達したとき
監視カメラ映像のモニタリング	モニタリングされている地上出口の路面水位が10cmに達したとき
浸水センサー	浸水センサーの設置地点の水位が3cmに達したとき

b) 止水設備の仕様

止水対策としては、地上出口部分におけるマウンドアップ、止水板や防潮板、防水扉やシャッター、土嚢や水嚢などの各種止水設備の設置などが考えられる。水害発生時に設置、作動させる各止水設備について以下の5項目を止水設備仕様とし、制御モデルの基礎データとして設定する。

- ① 止水可能高さ (m)
- ② 1箇所あたりの取り付け（作動）要員数 (人)
- ③ 1箇所あたりの取り付け（作動）作業時間 (秒)
- ④ 遠隔操作 (可/不可)
- ⑤ 設置が不可能となる浸水深 (m)

なお、事前対策である地上出口のマウンドアップは駅空間モデルで表現する。

c) 情報発信手段の仕様

旅客への避難情報の発信手段としては、放送設備を用いた駅員の肉声による非常放送や録音された音源を用いた非常放送、文字情報のみ表示可能なLED表示板や文字と図を表示できる電光表示板などを用いた情報表示、駅員からの直接の呼び掛けなどが考えられる。各情報発信手段について、以下の項目を情報発信手段の仕様とし、制御モデルの基礎データとして設定する。

- ① 情報到達可能距離 (m)
- ② 情報伝達所要時間 (秒)
- ③ 要員数 (人)

情報伝達可能距離については、放送設備の場合はスピーカーからの水平距離、情報表示設備の場合は表示板からの水平距離、駅員の場合は駅員からの距離である。情報伝達所要時間については、放送設備の場合は放送開始から放送内容を伝え終わるまでの所要時間、情報表示設備の場合は表示開始から人が表示内容を読み終わるまでの所要時間、駅員による直接の呼び掛けの場合は呼びかけ開始から内容を伝え終わるまでの所要時間である。

d) 浸水対策プランと対策完了時間の解析

浸水対策プランでは以下の項目を設定する。

- ① 地上浸水情報収集設備の種別と設置位置
- ② 止水設備の種別と設置位置
- ③ 情報発信設備の種別と設置位置、駅員が呼びかけを行う時の位置
- ④ 止水対策や情報発信を行う駅員数とその初期配置
- ⑤ 各駅員の対策実施の役割分担と実施順序

制御モデルは、駅員の浸水覚知時間を浸水対策開始時間とし、各地点の各止水対策完了時間や各情報発信手段による情報伝達完了時間を出力する。出力値は、浸水対策プランに従って各駅員が地点間を移動する時間と各地点での対策実施時間の加算を繰り返すことで解析した結果である。

(4) 旅客流動モデル

旅客流動モデルは駅構内における避難過程を解析するモデルである。本モデルは、個々の旅客の挙動を表現可能なマルチエージェント手法を用いた。旅客は駅空間モデルの各セルに最大一人までが入れることとし、解析単位時間は0.1秒とした。

a) 避難開始の意思決定と情報判断モデル

旅客の避難開始条件を

- ① 自ら浸水に気づく
- ② 非常放送、電光表示板、駅員から情報を取得する
- ③ 他の旅客が避難するのを目撃する

のいずれかとする。①の場合、ガイドライン⁹⁾に基づき、それぞれの旅客の位置の浸水深が3cmに達した時点当該旅客の避難開始時刻とする。②の場合、情報発信源の情報伝達範囲内にいる旅客は当該情報発信源の情報伝達完了時刻に避難情報を取得できるものとする。③の場合、旅客の周囲（半径3m以内）を避難中の旅客が通過したときに目撃したものとする。

ただし、避難するよう促された旅客が直ちに避難を開始するとは限らない。そこで、真船ら⁹⁾、疋田ら⁹⁾が、避難を促す情報を取得した旅客が『避難を開始する』確率を調査し、構築した情報判断モデルを適用し、②③の場合、避難情報を取得した旅客や他の旅客の避難を目撃した旅客が『避難を開始する』か否かを以下に示す式(8)を用いて確率的に決定することとした。

$$\Pr[B=b_i] = \frac{\exp\left[I + \sum_i w_i x_i\right]}{\exp\left[I + \sum_i w_i x_i\right] + \exp\left[\sum_i w_i (1-x_i)\right]} \quad (8)$$

$\Pr[B=b_i]$ は行動(B)が『避難を開始する』(b_i)となる確率、 x_i は情報源からの情報の取得の有無、 w_i は情報源*i*に関する重視度、 I は基本確信度である。ここで、基本確信

度とは、情報源の種類によらず、避難を促す情報を得たときに『避難を開始する』と判断する度合いを表す値である。基本確信度 I や情報源*i*の重視度 w_i は、アンケート調査結果を分析して推計した。 w_i と I の値を表-2に、情報判断のフローを図-6に示す。

表-2 アンケートに基づくパラメータ推計値

パラメータ		重視度
情報源	駅員（直接呼び掛け）	1.53
	非常放送（録音された音声）	0.02
	非常放送（肉声による放送）	0.62
	LED表示板（文字情報のみ）	0.45
	電光表示板（文字と図）	0.00
	伝聞（他の旅客の会話）	0.04
	他の旅客の避難を目撃	1.74
基本確信度		3.24

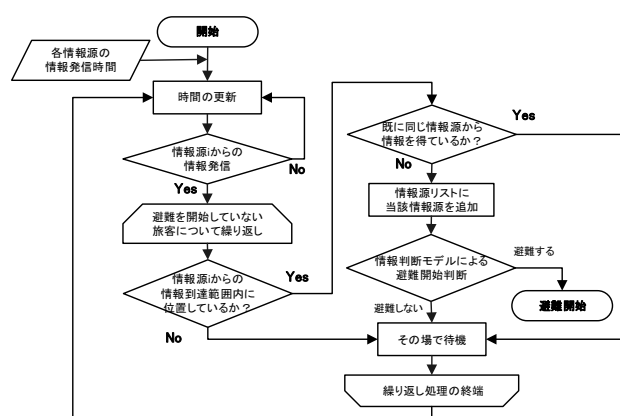


図-6 情報判断のフロー

なお、各旅客は避難を開始するまで初期位置に留まり続けるものとする。また、③によって避難を開始する場合、他の旅客の避難を目撃してから5秒後に避難を開始するものとする。

b) 経路選択と衝突回避

旅客の避難完了地点は地上出口とする。自ら浸水に気付いた旅客は流入口とは逆方向の階段まで、駅員や他の旅客から情報を得た旅客は誘導された方向の階段まで最短経路を移動する。以下に経路選択モデルの概要を示す。

駅空間モデルの各地点から目的地までの距離は、各階のメッシュ空間における目的地セルを粒子源、通行不能セルを境界条件とし、粒子密度場を σ 、拡散係数を D とする拡散方程式

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

を解くことでメッシュ空間の各セルに対し移動しやすさを示す粒子密度がある閾値に達するまでの時間を求め、その時間を規格化した値(ポテンシャル値)を用いる。

各旅客は、現在地のセルと隣接する8つのセルの合計9

つのセルから次の移動先のセルを選択して移動する。このとき、他の旅客が存在するセルや通行不能セルを移動先候補から除外することで衝突回避を表現する。さらに、目的地までのポテンシャル値が低いセルほど選択確率を高く、他の旅客や壁と近接するセルは選択確率を低くすることで、各旅客が現在地から目的地まで他の旅客や障害物を避けながら最短経路を移動する過程を表現する。

c) 旅客の歩行速度と浸水による速度低減

旅客の自由歩行速度は、避難安全検証法⁷⁾を参考とし、水平路の歩行速度 v_f を1.0m/s、上り階段歩行速度 v_s を0.45m/sとする。また、火災予防審議会⁸⁾を参考とし、改札通過時の歩行速度 v_r を0.5m/sとする。また、ガイドライン¹⁾を参考とし、浸水時には水平路の歩行速度 V_p 、階段の歩行速度 V_s 、改札部の歩行速度 V_r をそれぞれ

$$V_f = \max\{v_f(1-h/0.7), 0\} \quad (10a)$$

$$V_s = \max\{v_s(1-h/0.3), 0\} \quad (10b)$$

$$V_r = \max\{v_r(1-h/0.7), 0\} \quad (10c)$$

として、浸水深 h に応じて歩行速度を低減する。

4. モデル駅でのケーススタディ

地下駅浸水時における旅客安全確保対策として考えられるいくつかの浸水対策プランについて、本システムによって旅客安全性向上効果の観点から対策を評価できることを確認するため、ケーススタディを実施した。本ケーススタディは実在する駅を対象とするのではなく、いくつかの地下駅を参考として作成したモデル駅を用いて検討を行った。

(1) モデル駅の設定

モデル駅は独立した2つの改札階と1つのホーム階で構成される。ホーム階は地下2階に相当し、2つの改札階はともに地下1階に位置する。ホーム階から各改札階へは階段と2つのエスカレータで構成される昇降設備がそれぞれ設けられている。各改札階にはそれぞれ異なる4つの地上出入口が設けられている。モデル駅の模式図を図-7に、改札階の平面図を図-8に示す。

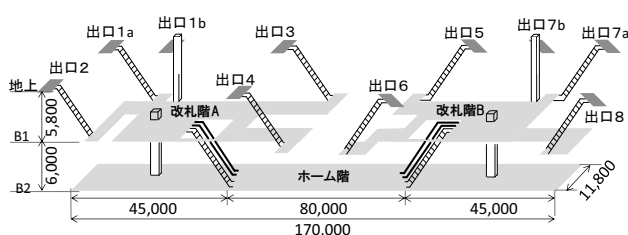


図-7 モデル駅の模式図

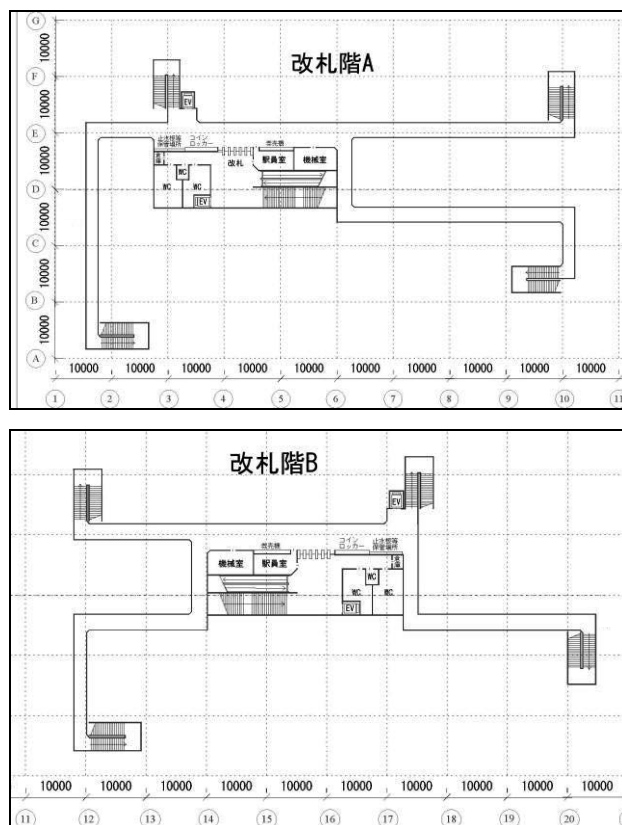


図-8 改札階の平面図

(2) シミュレーションの条件設定

a) 浸水条件の設定

地上の地形について、出口3、出口4、出口5、出口6は他の出口より標高がやや低く、水害時により流入しやすい地点であると想定した。また、各地上出口は路面に対して15cm高くなっているものとした。

ガイドライン¹⁾を参考として、地上出口部分の路面水位の上昇速度（浸水速度）が遅い場合と（浸水レベル低）と浸水速度が速い場合（浸水レベル高）の2つの水害規模を想定した。各水害規模について設定した各地上出口の浸水速度と最高水位を表-3に示す。また、地上出口の模式図を図-9に示す。

表-3 浸水条件の設定

水害規模	標高が高い出口 (出口1a, 2, 7a, 8)		標高が低い出口 (出口3, 4, 5, 6)	
	浸水速度	最高水位	浸水速度	最高水位
浸水レベル低	1cm/分	15cm	2cm/分	30cm
浸水レベル高	2cm/分	15cm	4cm/分	30cm

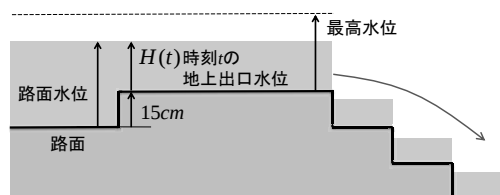


図-9 地上出口の模式図

b) 浸水対策にあたる駅員の設定

改札階Aと改札階Bにはそれぞれ駅員室があり、各駅員室にいる駅員のうち、それぞれ2名（計4名）が浸水対策にあたるものとした。駅員は地点間を最短経路で移動することとし、移動速度は一律1m/sとした。

c) 要避難者数の設定

ホーム階と各改札階の旅客密度を0.25人/m²とし、各階に面積に応じた旅客数をランダムに初期配置して要避難者とした。表-4に要避難者数の設定値を示す。

表-4 各階の要避難者数

	面積	密度	要避難者数
ホーム階	1,520m ²	0.25人/m ²	380人
改札階A	392m ²	0.25人/m ²	98人
改札階B	360m ²	0.25人/m ²	90人
合計	2,272m ²	—	568人

d) 浸水対策プランの設定

地上部の浸水情報収集設備として、標高が低い地上出口3、4、5、6に監視カメラを設置し、路面水位を監視することとした。止水対策は土嚢の設置と止水板の設置とした。情報発信手段は肉声による非常放送と駅員による直接の呼び掛けとした。想定した止水設備の仕様を表-5に、情報発信手段の仕様を表-6に示す。

表-5 止水設備の仕様

	止水板	土嚢
止水可能高さ	90cm	15cm
設置に必要な要員数	2人	2人
設置に必要な所要時間	60秒	60秒
遠隔操作（可／不可）	不可	不可
設置不可能となる浸水深	20cm	15cm

表-6 情報発信手段の仕様

	肉声による非常放送	駅員による直接呼び掛け
情報伝達可能距離	10m	10m
情報伝達所要時間	15秒	5秒
要員数	1人	1人以上

止水対策と情報発信対策の実施内容や実施順序を変更し、3つの浸水対策プランを設定した。各プランの概要を表-7に、各浸水対策プランの実施順序を表-8に、対策実施順序の説明で用いる地点名称を図-10に示す。

表-7 浸水対策プランの概要

プラン名	プラン概要
プランA	止水対策を行ってから非常放送と駅員による直接の呼び掛けを行うプラン
プランB	非常放送を行ってから止水対策を行い、その後、駅員による直接の呼び掛けを行うプラン
プランC	非常放送と駅員による直接の呼び掛けを行い、止水対策を行わないプラン

表-8 各浸水対策プランにおける対策の実施順序

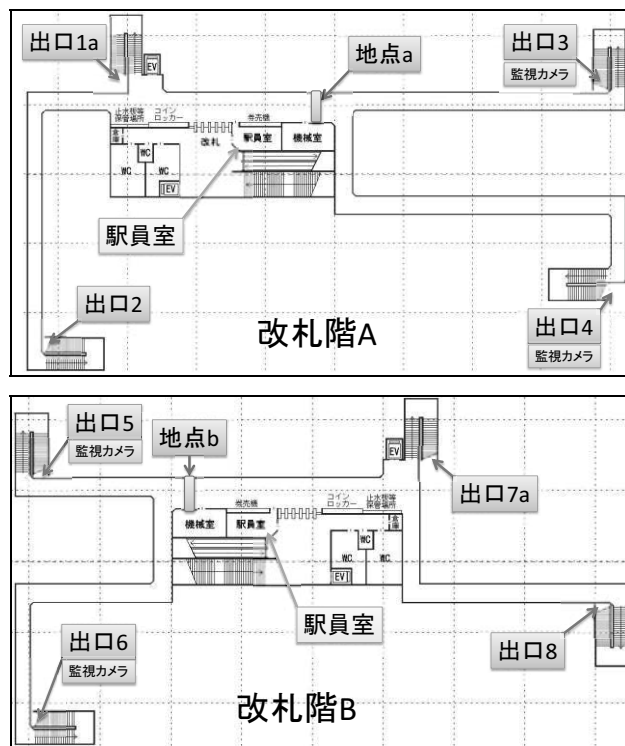
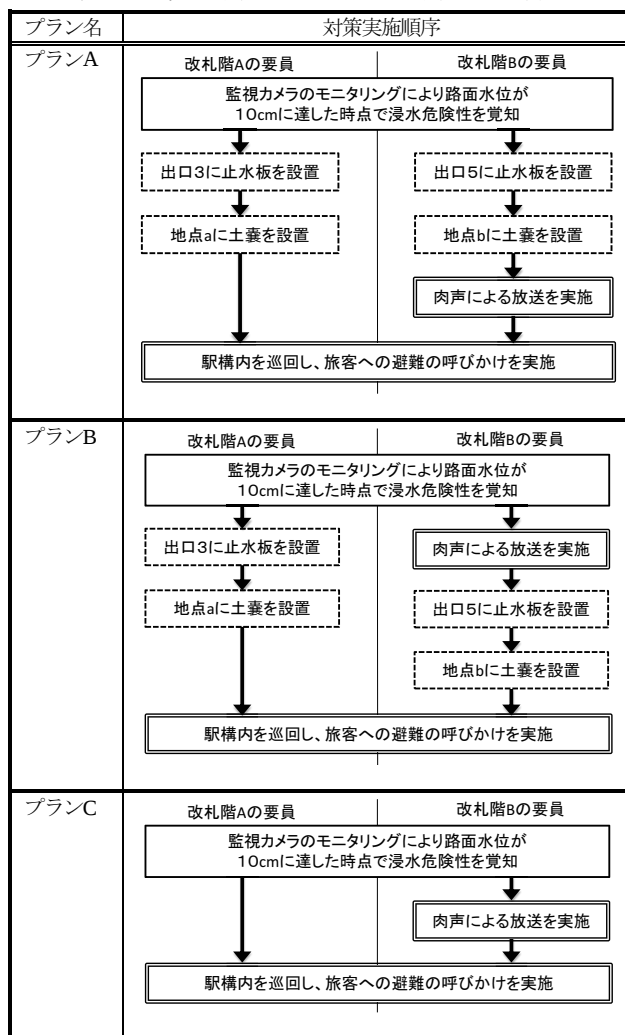


図-10 地点名称と各設備の設置位置

なお、スピーカーは駅構内のすべての地点から放送を聞けるように配置した。また、非常放送や駅員による呼び掛けの際には、浸水の危険性が高い出口3、出口4、出口5、出口6ではなく、浸水の危険性が低い出口1a、出口2、出口7a、出口8に避難するよう促すものと想定した。

(3) 解析結果

2つの水害規模と3つの浸水対策プランの組み合わせによる計6ケースについて、地上部（路面）の浸水開始時を0秒として浸水避難シミュレーションを実施した。ケース設定の一覧を表-9に示す。

表-9 ケース設定一覧

ケース番号	水害規模	浸水対策プラン
ケース1	浸水レベル低	プランA
ケース2		プランB
ケース3		プランC
ケース4	浸水レベル高	プランA
ケース5		プランB
ケース6		プランC

各ケースにおける各浸水対策の順序および完了時間を表-10に示す。ケース1とケース4において、改札階Aと改札階Bとで止水板や土嚢の設置完了時間が異なるのは、止水板および土嚢の設置位置までの駅員の移動距離の差によるものである。

表-10 各ケースの浸水対策完了時間

ケース1		ケース2		ケース3	
改札階A	改札階B	改札階A	改札階B	改札階A	改札階B
浸水危険性の覚知					
5分00秒					
止水板	止水板	止水板	非常放送		非常放送
7分10秒	6分50秒	7分10秒	5分15秒		5分15秒
土嚢	土嚢	土嚢	止水板	駅員の呼び掛け	
9分10秒	8分30秒	9分10秒	7分5秒	9分00秒	
	非常放送		土嚢		
	8分55秒		8分45秒		
駅員の呼び掛け		駅員の呼び掛け			
15分45秒		15分45秒			

ケース4		ケース5		ケース6	
改札階A	改札階B	改札階A	改札階B	改札階A	改札階B
浸水危険性の覚知					
2分30秒					
止水板	止水板	止水板	非常放送		非常放送
4分40秒	4分20秒	4分40秒	2分45秒		2分45秒
土嚢	土嚢	土嚢	止水板	駅員の呼び掛け	
6分40秒	6分00秒	6分40秒	4分35秒	6分30秒	
	非常放送		土嚢		
	6分25秒		6分15秒		
駅員の呼び掛け		駅員の呼び掛け			
13分20秒		13分20秒			

各ケースについて各避難者の避難完了時間の平均値（平均避難完了時間）と浸水地点を歩行した避難者の割合（浸水地点歩行率）を表-11に示す。なお、各数値は

表-11 解析結果一覧

ケース番号	平均避難完了時間	浸水地点歩行率
ケース1	11分10秒	2.8%
ケース2	7分40秒	1.8%
ケース3	7分40秒	2.3%
ケース4	8分30秒	77.8%
ケース5	5分10秒	4.6%
ケース6	5分00秒	3.3%

各ケースについて浸水避難シミュレーションを3回試行した結果の平均値である。

浸水レベルが低いケース1からケース3に着目すると、平均避難完了時間はケース2、ケース3とも7分40秒であった。平均避難完了時間が同じであった理由は、いずれも最初に非常放送を行うためである。非常放送を行うと多くの旅客が避難を開始し、またこれらの旅客の避難の様子を目撃して避難を開始する旅客も多い。よって、ケース2とケース3では大部分の旅客の避難が同様に行われた。浸水地点歩行者率はケース1からケース3ではいずれも3%未満であり、どの浸水対策プランも優劣無く良好な結果であった。その中で、止水対策を優先するケース1が2.8%と最も高い値となったのは非常放送が遅れたことが原因である。出口3、4、5、6の出口高さに路面水位が達するのは7分30秒であるが、止水板は流入前に設置完了できたものの、非常放送の完了は8分55秒であり、出口4、出口6からの流入開始後となった。ケース2とケース3ではケース2の方がわずかに浸水地点歩行率が低いものの、これは確率的要素を有するシミュレーションにおいては誤差の範囲である。

浸水レベルが高いケース4からケース6に着目すると、平均避難完了時間は、ケース1からケース3の場合と同様の傾向となった。一方、ケース4の浸水地点歩行率は77.8%と非常に高い値となった。これは、出口3、4、5、6の出口高さに路面水位が達する3分45秒に止水板の設置が間に合わないことと、非常放送が完了する6分25秒からわずか1分後の7分30秒に出口1a、2、7a、8からも流入が始まることが原因である。

ケース4の6分後と8分後の浸水避難性状を可視化した画像を図11に示す。6分後において避難中の旅客48人は自ら浸水に気づいて避難を開始した旅客である。この時点では非常放送が行われていないため、その他の520人の旅客は避難を開始していない。出口3は4分40秒、出口5は4分20秒に止水板が設置完了するものの、3分45秒に流入が始まるため、止水板設置完了前に流入した水が表現されている。8分後は389人が避難中だが、7分30秒以降は避難先である出口1aや出口7からも流入してくるため、これらの旅客は水の流れに逆らって避難する。また、168人が避難を完了しており、12人が未だ避難開始せずにその場に留まっている。

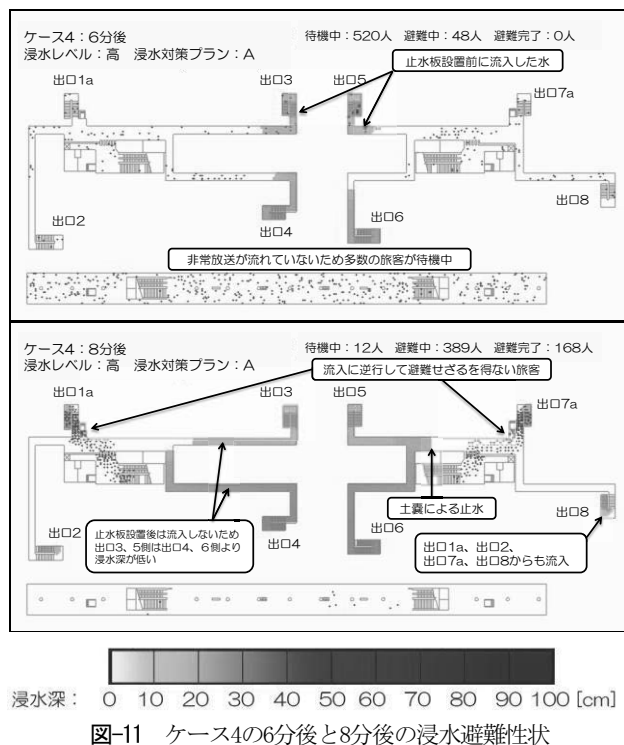


図-11 ケース4の6分後と8分後の浸水避難性状

(4) 旅客安全性評価と駅構内の安全性評価

本ケーススタディの結果から、想定した浸水対策プランの中では浸水対策プランBとプランCがプランAよりも旅客安全性が高いことが明らかとなった。

一方、旅客の安全性と同様に水害発生後の迅速な復旧も重要課題であるため、プランBとCについて、本ケーススタディの結果を踏まえて考察する。表-12に30分後の駅構内の流入流量を示す。

止水対策を行わないプランCの流入流量は、止水対策を行うプランBに対して、浸水レベルが低い場合で約1.67倍、浸水レベルが高い場合で約1.78倍となった。よって、プランCはプランBよりも浸水による駅構内の設備故障のリスク、復旧までの所要時間やコストが大きい可能性がある。このことから、旅客安全性評価としては評価が同等であったプランBとプランCであっても、駅構内の安全性評価としてはプランBの方が優れているものと思われる。このように、駅構内の安全性の評価を行う際には、シミュレーションの各出力値に基づく浸水対策プランの評価方法を明確にしておくことが重要である。

表-12 各ケースの30分後の駅構内流入流量

ケース名	水害規模	浸水対策プラン	30分後までの流入流量 (m)
ケース1	浸水レベル低	プランA	444.1
ケース2		プランB	444.1
ケース3		プランC	742.6
ケース4	浸水レベル高	プランA	1685.4
ケース5		プランB	1685.8
ケース6		プランC	2979.1

5. まとめ

本研究では、シミュレーション技術を用いて駅空間、地下駅の浸水状況、駅員によるハード・ソフト施策制御、旅客の避難状況を表現する4つのサブモデルを作成し、地下駅構内における水害発生時の旅客安全性評価システムのプロトタイプを開発した。また、開発システムを用いてモデル駅におけるケーススタディを行うことで、ハード施策およびソフト施策による各種浸水対策の組み合わせ（浸水対策プラン）の効果を検証することが可能であることを確認した。

本システムの開発は一定の成果は得られたものの、現段階では実用に資するためのシステムとしてはまだ十分ではない。例えば、限られた資源を効率的に配分するためには、規模別の水害発生頻度や、各浸水対策を実施するため設備の導入や維持管理のコストを考慮して浸水対策プランを評価することが必要である。現在、これらの課題に対応すべくシステムへのモデル追加や既存モデルの改良について検討を進めている。

今後は、引き続きシステムの完成に向けた開発を進めるとともに、実駅の浸水対策の促進に寄与すべく、本システムの実用化への取り組みを行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省：地下空間における浸水対策ガイドライン
- 2) 井上和也，戸田圭一，川池健司，栗山健作，大八木亮：地下空間における浸水過程の解析について，京都大学防災研究所年報第45号B，pp.173-184，2002。
- 3) 戸田圭一，大八木亮，井上和也，間島真嗣：都市水害時の地下空間の浸水過程について，京都大学防災研究所年報第47号B，2004。
- 4) 川池健司，中川一，今井洋兵，山田裕三：都市域の内・外水氾濫解析における下水道システムのモデル化，京都大学防災研究所年報第51号B，pp.591-601，2008。
- 5) 真船奨，疋田篤史，木下芳郎：情報提供手段が旅客の避難開始に与える影響に関するアンケート調査 駅における火災時の情報提供手段に関する基礎研究 その1，日本建築学会 学術講演梗概集 防火，pp.359-360，2013。
- 6) 疋田篤史，真船奨，木下芳郎：旅客の情報判断のモデル化および避難確率の算出 駅における火災時の情報提供手段に関する基礎研究 その2，日本建築学会 学術講演梗概集 防火，pp.361-362，2013。
- 7) 国土交通省住宅局建築指導課，国土交通省建築研究所，日本建築主事会議，日本建築センター編集：井上書院，2001年版避難安全検証法の解説及び計算例とその解説，2001。
- 8) 火災予防審議会，東京消防庁：複合化するターミナル施設の防火安全対策のあり方ー火災予防審議会答申一，2011。