

# 土地鑑を考慮した徒歩経路探索モデルによる 浸水避難シミュレーション

廣川 雄一<sup>1,a)</sup> 西川 憲明<sup>1</sup> 山田 武志<sup>2</sup> 印南 潤二<sup>2</sup> 坂井 隆志<sup>3</sup> 浅野 俊幸<sup>1</sup>

受付日 2018年8月15日, 再受付日 2018年10月16日,  
採録日 2018年11月2日

**概要:** 近年, 集中豪雨など極端気象現象の発生頻度が増加しており, 河川氾濫などの水害発生につながる可能性がある。水害発生時における防災・減災では, あらかじめ避難計画や施設補強などの事前防災を検討しておくことが重要である。著者らは避難者ごとに異なる土地鑑を考慮した徒歩経路探索モデルを提案し, 火災避難のシミュレーション例では避難場所の位置把握が避難完了率に大きく影響することを明らかにした。本稿では徒歩経路探索モデルと浸水シミュレーションを連成させ, 浸水避難シミュレーションを検討した。シミュレーション例では浸水を回避する際に対向流が多数発生する可能性があることが分かった。また, 避難者が道路網の知識を持っているにもかかわらず, 不適切な経路を選択するケースが発生することが分かった。不適切な経路選択の要因として周辺の被災状況を正しく把握できていないことがあげられる。IoT デバイスや携帯端末などで周辺の被災状況をリアルタイムに把握することができた場合, 避難者が適切な経路選択を行えるようになり, 対向流も抑制できる可能性が示唆された。

**キーワード:** 徒歩避難, 経路探索, 土地鑑, マルチエージェント, 浸水

## A Simulation during a Flood Evacuation using the Route Choice Model with Pedestrians' Individual Maps Recognition

YUICHI HIROKAWA<sup>1,a)</sup> NORIAKI NISHIKAWA<sup>1</sup> TAKESHI YAMADA<sup>2</sup> JUNJI IN-NAMI<sup>2</sup>  
TAKASHI SAKAI<sup>3</sup> TOSHIYUKI ASANO<sup>1</sup>

Received: August 15, 2018, Revised: October 16, 2018,  
Accepted: November 2, 2018

**Abstract:** In recent years, the frequency of extreme weather phenomena as well as earthquake inducing a Tsunami is increasing, which has a possibility to lead a flood. In a mitigation or prevention of disaster affliction to pedestrians during a flood, it is important to consider a preliminary countermeasure such as evacuation plan, facilities reinforcement and other concerns. The authors have proposed the route choice model for pedestrians that consider different road maps for each pedestrian, and an example of simulation during a fire evacuation shows that the pedestrian's cognition of the refuge's position affects the evacuation completion rate. In this paper, we propose the flood evacuation simulation model for a pedestrian which couples the pedestrian simulation with the flood simulation. In a simulation example of flood evacuation, there is a possibility that many counter-flow will occur when avoiding flooded area or searching refugees. Since a pedestrian recognize the condition of roads within their visual range and supposes the integrity of unconfirmed roads by the normalcy bias, the local pedestrians tends to choose inappropriate routes in spite of knowledge of the road map. A real-time cognition of road's condition using the IoT devices and handheld devices improves the evacuation completion rate and mitigates the counter-flow of pedestrians.

**Keywords:** pedestrian evacuation, route choice, locality, multi-agent systems, flood

## 1. 緒言

近年、集中豪雨など極端気象現象の発生頻度が増加しており、洪水などの発生につながる可能性がある。また、地震の活動期に入った可能性も指摘されており、津波遡上などが発生する恐れもある。防災・減災の検討では、災害の影響範囲および災害が社会および人間に与える影響を高精度に予測し、施設補強や避難計画などをあらかじめ検討しておくことが重要である。様々なシナリオを計算機上で検討できるシミュレーションは、実験が難しい被災条件などを具体的に検討できるツールとして有用である [1]。最も基本的な徒歩避難 [2] では、経路選択は避難完了率などに影響すると考えられる。従来手法では全避難者が避難場所への最短経路と全道路の状況を把握していると仮定しているが、実態と乖離している可能性がある [3]。著者らは各避難者の道路認識状況 [4] を考慮した動的な経路選択モデルを提案しており、火災避難シミュレーション例では避難者の避難場所位置把握が避難完了率に大きく影響することを示した [5]。本モデルでは各避難者が各々異なる「避難場所位置や道路、道路状況の認識（以下、土地鑑とする）」を持つのが特徴である。本稿では経路探索モデルを浸水シミュレーションと連成させ、浸水避難シミュレーションにおいて土地鑑が避難状況に与える影響を検討した。また、各避難者の微視的な振舞い（衝突回避行動など）の解析には視覚に基づき行動するヒューリスティックモデルを用い [6], [7], 浸水による歩行速度低下を考慮した。

2章に浸水避難シミュレーションの概要、3章に経路選択モデル、4章に経路選択シミュレーションと観測結果の比較、5章に土地鑑を考慮した浸水避難シミュレーション、6章に浸水状況リアルタイム把握の有効性、7章に考察、8章で結言を示す。

## 2. 浸水避難シミュレーションの概要

浸水避難シミュレーションは、図1のように浸水シミュレーション結果を徒歩避難シミュレーションに反映させる単方向弱連成解析とした。浸水シミュレーションは標高や道路の摩擦などを考慮して各地点における時々刻々と変化する水位を高精度に計算することが可能である。また、浸水シミュレーションの瞬間的な値を近似や単純化することなく、避難シミュレーションと連成することで動的な避難状況を精緻に扱うことが可能である。なお、浸水シミュ

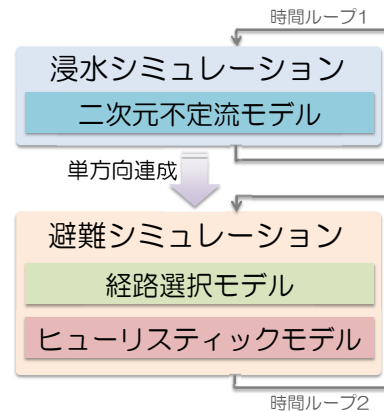


図1 浸水避難シミュレーションの概要

Fig. 1 The simulation scheme of a flood evacuation.

レーションは出力データが大きくファイル読込に時間を要するため、メモリ上でデータを参照するオンラインの連成シミュレーションを行った。また、図1の時間ループ1と2のタイムステップサイズを同じ値にし、タイムステップごとに浸水および避難シミュレーションを実行した。2.1節に浸水シミュレーション、2.2節に避難シミュレーションの概要を示す。

### 2.1 浸水シミュレーションの概要

浸水シミュレーションは二次元不定流モデルにより解析する。街区の標高や道路・建物などを考慮しており、浸水範囲の時間進行を高精度に解析することが可能である。支配方程式として式(1)~(5)の非線形・非定常の浅水長波方程式を用いる。ここで、 $H = h + z$ ,  $M = uh$ ,  $N = vh$ であり、 $t$ は時間[s],  $x$ と $y$ は2次元座標[m],  $H$ は2次元実空間における時刻 $t$ の水位[m],  $h$ は浸水深[m],  $z$ は地盤高[m],  $u$ と $v$ は流れの速さ( $x, y$ 方向)[m/s],  $M$ と $N$ は流量フラックス[m<sup>2</sup>/s],  $r$ はManningの粗度係数[m<sup>-1/3</sup>/s],  $S$ は降雨などの流入量[m/s],  $g$ は重力加速度の絶対値で9.8[m/s<sup>2</sup>]とした。

計算には有限差分法を用い、データ構造は構造格子でStaggered格子(等間隔、直交座標)を用いた。時間微分の数値スキームはVerlet Leap Frog法、式(2)と(3)の左辺第2, 3項はDoner-cell法、式(2)と(3)の右辺第2項は局所陰解法、その他の空間微分には2次精度の中心差分法を用いた[8]。また、格子間隔は5[m], タイムステップサイズは0.1[s]とした。

地盤高 $z$ やManningの粗度係数 $r$ は、国土地理院基盤地図情報の標高や各建物、道路を基に作成し[9], 浸水シミュレーションの入力データとした。浸水シミュレーションで計算した各地点における浸水深 $h$ を避難シミュレーションで用いた。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = S \quad (1)$$

<sup>1</sup> 国立研究開発法人海洋研究開発機構  
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,  
Yokohama, Kanagawa 236-0001, Japan  
<sup>2</sup> 株式会社ベクトル総研  
Vector Research Institute, Inc., Shibuya, Tokyo 150-0002,  
Japan  
<sup>3</sup> 株式会社イマジナリーパワー  
Imaginary Power, Inc., Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan  
a) y-hiroka@jamstec.go.jp

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (3)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g r^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g r^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (5)$$

## 2.2 避難シミュレーションの概要

避難者の歩行速度などを高精度に解析するため、各避難者を連続空間における有限の大きさを持つ粒として扱った。避難者の行動は以下に示す2つのモデルを用いて解析する。

### (1) 狭域行動 (ヒューリスティックモデル)

道路や通路のような狭域での避難者の行動は、人間の視覚情報をベースにしたヒューリスティックモデルで解析する [6], [7]。避難者は他の避難者や壁面との衝突を回避するように予測して目標地点に移動するため、人間の歩行行動を精緻に再現することが可能である。図2はヒューリスティックモデルの概要である。避難者  $i$  は視野角  $-\phi \sim +\phi$  [°], 視野距離  $d_{\max}$  [m] の視野を持ち、視野内の他の避難者や壁などの障害物との衝突を予測・回避しながら、目的地  $O_1$  に進む。ここで、 $\alpha_0$  は目的地  $O_1$  がある角度 [°],  $\alpha$  は視野角内の任意の角度 [°],  $f(\alpha)$  は角度  $\alpha$  における障害物までの距離 [m],  $d(\alpha)$  は目的地までの距離 [m] を表す。

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \frac{(\mathbf{v}_{\text{des}} - \mathbf{v}_i)}{\tau} + \sum_j \frac{\mathbf{f}_{ij}}{m_i} + \sum_w \frac{\mathbf{f}_{iw}}{m_i} \quad (6)$$

$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathbf{v}_i \quad (7)$$

$$|\mathbf{v}_{\text{des}}| = \min\left(v_i^0, \frac{d_h}{\tau}\right) \quad (8)$$

$$d(\alpha) = \sqrt{d_{\max}^2 + f(\alpha)^2 - 2d_{\max}f(\alpha)\cos(\alpha_0 - \alpha)} \quad (9)$$

式(6)~(9)は避難者  $i$  の運動方程式であり、時々刻々と変化する歩行速度を計算する。ここで、 $t$  は時間 [s],  $\mathbf{x}_i$  は避難者  $i$  の2次元実空間における位置 [m],  $\mathbf{v}_i$  は歩行速度 [m/s],  $m_i$  は質量 [kg],  $\mathbf{v}_{\text{des}}$  は希望歩行速度 [m/s],  $\tau$  は衝突緩和時間 [s],  $v_i^0$  は自由歩行速度の大きさ [m/s],  $\mathbf{f}_{ij}$  は他の避難者  $j$  との接触力 [N],  $\mathbf{f}_{iw}$  は障害物  $w$  との接触力 [N],  $d_h$  は最初の障害物までの距離 [m] である。希望歩行速度の大きさ  $|\mathbf{v}_{\text{des}}|$  は式(9)を最小化する角度(最も目的地に近づける角度)  $\alpha$  を求めた後、式(8)で歩行速度の大きさを求める。なお、式(8)の  $\min$  は最小値を選択する関数である。また、目的地  $O_1$  は経路選択モデルにより選択した道路上で壁などの障害物に衝突せずに最も直線的に長く移動できる点に設定した [7]。

浸水による歩行速度の低下は式(10)を用いて考慮する。なお、本稿の浸水シミュレーションで用いた計算格子間隔は視野距離と同程度であり、視野範囲内では浸水深はほぼ

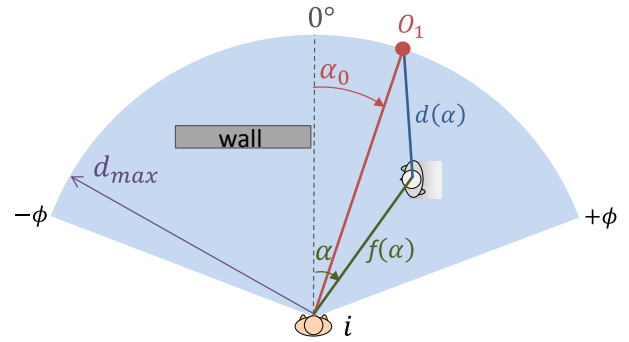


図2 ヒューリスティックモデル

Fig. 2 The overview of heuristic model.

一定とみなせるため、浸水による進行方向への影響はないものとしてモデル化した。 $H_{\text{limit}}$  は歩行することが可能な限界浸水深 [m] で、流速の大きさに応じて設定する。 $h_i(t)$  は時刻  $t$  における歩行者  $i$  の浸水深 [m],  $v_i(t)$  は時刻  $t$  における歩行者  $i$  の歩行速度の大きさ [m/s],  $v'_i(t)$  は浸水による速度低下を考慮した歩行速度の大きさ [m/s],  $\max$  は最大値を選択する関数である。

$$v'_i(t) = \max\left\{0.1, \left(1.0 - \frac{h_i(t)}{H_{\text{limit}}}\right)v_i(t)\right\} \quad (10)$$

本稿では避難者の視野角は  $200$  [°], 視野距離は  $10$  [m], 衝突緩和時間は  $0.5$  [s] とし、質量は平均  $60$  [kg], 標準偏差  $5$  [kg] の正規分布, 自由歩行速度の大きさは平均  $1.5$  [m/s], 標準偏差  $0.3$  [m/s] の正規分布で与えた。また、国土地理院の基盤地図情報で道路と定義されている部分を歩行空間とし、それ以外の部分は壁面とし、障害物として扱った。

### (2) 広域行動 (経路選択モデル)

市街地や大規模商業施設内といった広域における避難者の行動は経路選択モデルを用いて解析する。このモデルは道路認識状況が避難者ごとに異なっているのが特徴であり、来街者や地域住民といった避難者の属性(土地鑑)を考慮することが可能である。また、避難者は浸水した道路を回避しながら経路を選択する。3章に経路選択モデルの詳細を示す。

## 3. 経路選択モデル

避難者の土地鑑は避難場所と道路の認識率に影響するとしてモデル化を行った。避難者は1人1人異なる地図認識を持ち、周囲の環境を認識しながら避難者固有の土地鑑(避難場所位置や道路、道路状況の認識)をタイムステップごとに更新していく。また、避難者は自分の土地鑑に基づき、目的地や経路を決定する。3.1節に避難場所の認識、3.2節に道路の認識、3.3節に道路状況の認識、3.4節に経路選択を示す。

### 3.1 避難場所の認識

避難場所認識の有無は、避難者が避難場所の位置を把握しているかどうかで判断する。地域住民であれば、避難場



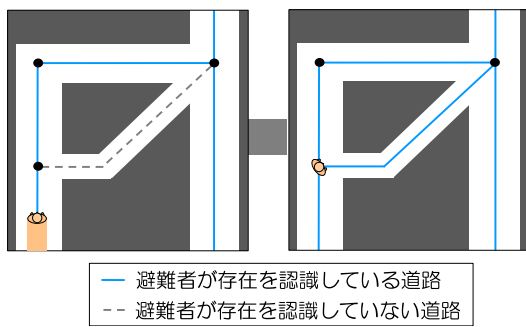


図 3 道路の認識

Fig. 3 The cognition of a road.

所の位置を把握している可能性が高い。一方、来街者は避難場所の位置を把握していない可能性が高い。避難場所がどこにあるのか分からない場合、各避難者は、随時、

- (a) 目視範囲内で避難場所を探索
- (b) 避難場所の位置を知っている避難者が目視範囲内であれば避難場所の位置を瞬時に共有

のいずれかにより避難場所の位置を認識することとした。なお、(a)については簡略化のため、避難場所に一番近い交差点に到達したときに当該避難場所を認識することとし、(b)については2.2節(1)の視野距離内にいる全避難者から避難場所の情報を取得することとした。

複数の避難場所を認識している場合には、現在位置と直線距離が最も短い避難場所を目的の避難場所にする。距離が同じ避難場所が複数ある場合にはランダムに選択をする。

### 3.2 道路の認識

交差点をノード、2つのノードを結ぶリンクを1本の道路とし、各道路の認識の有無を判定した。避難者が交差点に到達した際、認識していない道路があれば、認識することとした(図3)。図3左では避難者は破線の道路を認識していないが、図3右の交差点到着時には点線の道路の存在を認識する。また、避難者が目的の避難場所へ至る経路を把握していない場合、随時、

- (c) 目的の避難場所が同じで、かつ避難経路を知っている避難者が目視範囲内であれば避難経路を瞬時に共有することとした。なお、避難者は2.2節(1)の視野距離内にいる全避難者から避難経路の情報を取得することとした。周囲の避難者から同一の避難経路を共有するため、情報提供者と情報収集者間で歩行速度の大きさが同程度であれば吸着誘導に近い避難行動となる[10]。

### 3.3 道路状況の認識

道路の状況として道路延長の認識、混雑度、被災度を考慮した。なお、各避難者は交差点に到着した際に交差点につながる各道路の状況を把握する。また、道路状況については避難者間での情報共有は行わない。

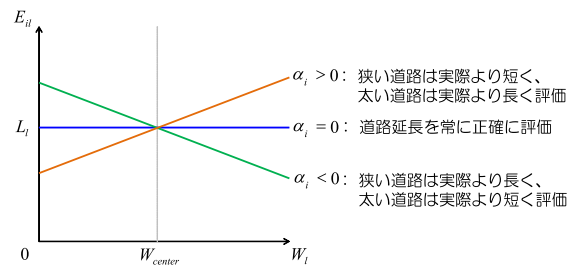


図 4 道路幅員と認知距離の関係

Fig. 4 The cognition model of road length.

#### (1) 道路延長認識の正確さ

幅員が広い道路の延長を実際よりも短く認識するなどの錯覚[11]を簡易的なモデルを用いて考慮した。避難者*i*が認識している道路延長の正確さを考慮するため、道路幅員に関する認知距離を導入した。避難者*i*が認識している道路*l*の延長を認知距離  $E_{il}$  [m] とし、式(11)を用いて求める。

$$E_{il} = \{\alpha_i(W_l - W_{center}) + 1.0\}L_l \quad (11)$$

ここで、 $L_l$  [m] は実際の道路延長、 $\alpha_i$  は認知の正確さに係る無次元のパラメータ、 $W_l$  は幅員 [m]、 $W_{center}$  は基準幅員 [m] (全道路の幅員の平均値など) である。図4の横軸は幅員、縦軸は認知距離であり、傾き  $\alpha_i$  の値によって避難者の道路の認知状態を変更することができる。たとえば、 $\alpha_i < 0$  の場合には幅員が大きいほど、道路の延長を短く認識する状態となる。

#### (2) 混雑影響度

混雑した道路を回避する行動[12]を簡易的なモデルで考慮した。道路*l*の混雑が避難者*i*にどの程度影響を与えるかは、混雑影響度  $J_{il}(t)$  [ $m^{-2}$ ] を用いて考慮した。 $J_{il}(t)$  は式(12)を用いて求める。

$$J_{il}(t) = \beta_i\{\rho_l(t) - \rho_{center}\} + 1.0 \quad (12)$$

ここで、 $t$  は時刻、 $\beta_i$  は混雑度の影響にかかわる無次元のパラメータ、 $\rho_l(t)$  は時刻  $t$  における道路*l*周辺の群集密度 [ $m^{-2}$ ] である。 $\rho_{center}$  は混雑による影響の増加と減少が逆転する群集密度 [ $m^{-2}$ ] である。 $\beta_i > 0$  の場合には群集密度が高いほど、混雑した道路を避けて迂回をする状態となる。

#### (3) 浸水影響度

被災した道路の迂回行動[13]を簡略化したモデルで考慮した。避難者*i*が受ける道路*l*の浸水影響度合い  $U_{il}(t)$  は式(13)を用いて求める。

$$U_{il}(t) = Ah_l(t) + 1.0 \quad (13)$$

ここで、 $A$  は避難者の浸水影響度合いにかかわるパラメータであり、値が大きくなるほど避難者の浸水範囲を避ける行動が強くなる。 $h_l(t)$  は時刻  $t$  の道路*l*の最大浸水深 [m] である。

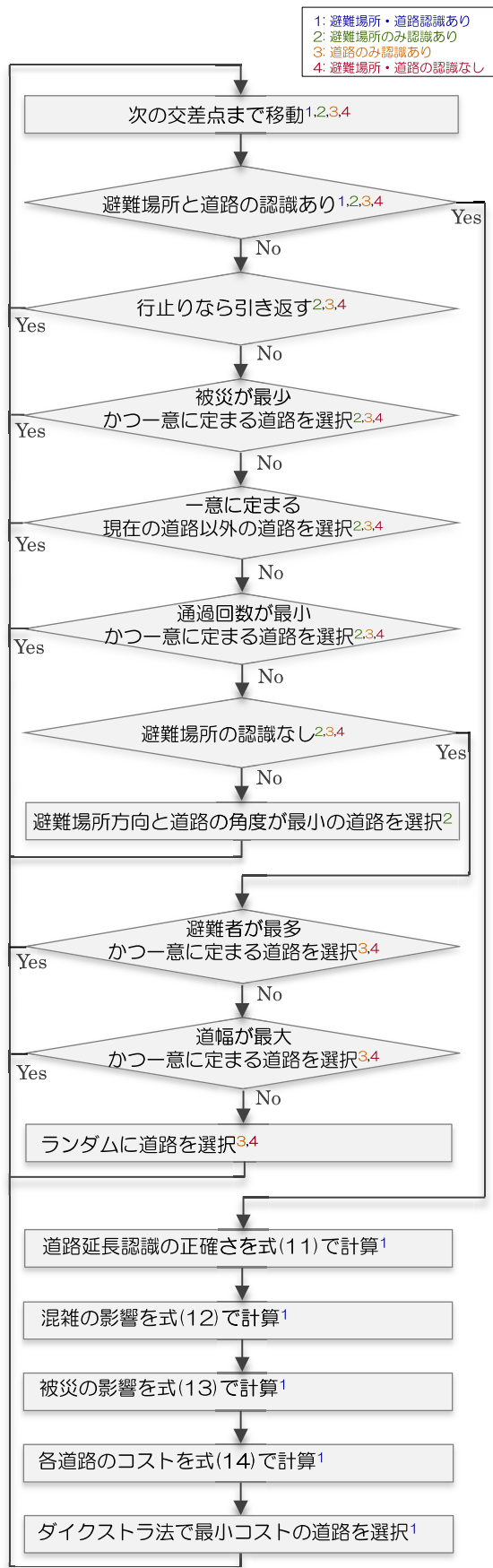


図 5 経路選択モデルのアルゴリズム

Fig. 5 The algorithm of route choice model.

(4) 各道路のコスト

時刻  $t$  における避難者  $i$ , 道路  $l$  のコスト  $C_{il}(t)$  は式 (11)~(13) で求めた  $E_{il}$ ,  $J_{il}(t)$ ,  $U_{il}(t)$  を用い, 式 (14) で求める. 簡単のため, 災害による道路延長や幅員の変化は考慮しない.

$$C_{il}(t) = E_{il} J_{il}(t) U_{il}(t) \tag{14}$$

3.4 経路選択モデル

経路選択についてはアンケート結果 [14] を参考に避難者がとりうる行動をモデル化した. また, 避難開始時点における避難者の土地鑑は避難場所認識あり/なし, 道路認識あり/なしの組合せで 4 種類に分類した. 各避難者は交差点に到着するごとに図 5 のフローチャートに従い, 次を選択する道路を決定する. 条件分岐では, 条件を満たすものが 1 つだけある場合は Yes, それ以外は No を選択する. 図中の数字は避難者の土地鑑で, 1 は避難場所と道路を認識, 2 は避難場所のみ認識, 3 は道路のみ認識, 4 は避難場所と道路の認識なしを表す.

避難場所と道路を認識している場合には, 式 (14) で求めた各道路のコストを用い, 避難先へのコストが最少となる経路をダイクストラ法で探索する [15]. その後, 最短コスト経路の最初の道路を選択する. 経路の探索では, 避難者  $i$  が認識している道路のみを探索対象とする. 式 (11)~(13) においてパラメータ  $\alpha_i$  と  $\beta_i$ ,  $A$ ,  $W_{center}$ ,  $\rho_{center}$  は計算目的に応じて設定する. 本稿では, 避難者は状況を把握していない道路については混雑や被災がないと想定すると仮定し, 道路  $l$  の群集密度  $\rho_l$  と最大浸水深  $h_l$  の初期値は 0 に設定した. これらの値を用いて求める避難者  $i$ , 道路  $l$  のコスト  $C_{il}(t)$  は, 避難者  $i$  が道路  $l$  につながる交差点に到着したときに更新する. なお, IoT デバイスなどが利用できる場合はタイムステップごとに既知の道路  $l$  の被災影響  $U_{il}(t)$  を更新する.

4. 経路選択シミュレーションと観測結果の比較

3 章で提案した経路探索モデルの妥当性を評価するため, 室内実験における観測結果 [16] と経路選択シミュレーション結果の比較を行った. 本章では 4 種類の土地鑑 (避難場所の認識あり/なし, 経路の認識あり/なしの組合せ) が経路選択に与える影響を評価する. 避難時における経路選択の観測データがないため, 経路選択結果を土地鑑と対応させた. また, 観測と条件を合わせるため, 混雑や浸水は発生しないものとして計算を行った. 屋内と屋外の歩行速度の差 [17] は考慮せず, 経路選択と移動距離のみを比較した.

図 6 は実験の概略図であり, 点線で囲った部分は避難開始地点, 矢印は避難場所を表す. 被験者を 1 人ずつ避難させ, その軌跡を記録する. 点と線はシミュレーションに用いた道路ネットワークである. 表 1 に経路選択シミュレ

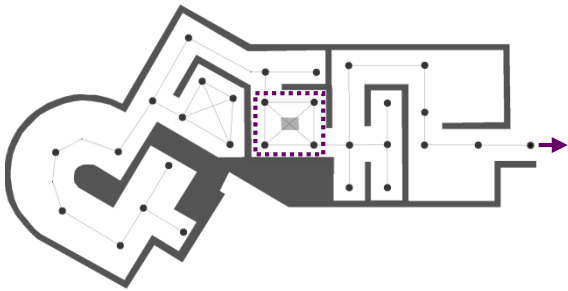


図 6 室内概略図および経路ネットワーク

Fig. 6 The building shape with the network of routes.

表 1 経路選択シミュレーションの諸元

Table 1 The configuration of simulation in a route choice.

評価項目	設定値
避難場所数	1
道路の本数	35
避難者数	1
避難開始時間	0 [s]
認知距離に係る基準幅員 $W_{center}$	6.0 [m]
混雑の影響に係る群集密度 $\rho_{center}$	0.2 [m <sup>-2</sup> ]
道路延長の認識に係るパラメータ $\alpha_i$	0
混雑の影響に係るパラメータ $\beta_i$	1.5
被災の影響パラメータ $A$	100
タイムステップサイズ	0.1 [s]
シミュレーション実経過時間	90 [s]

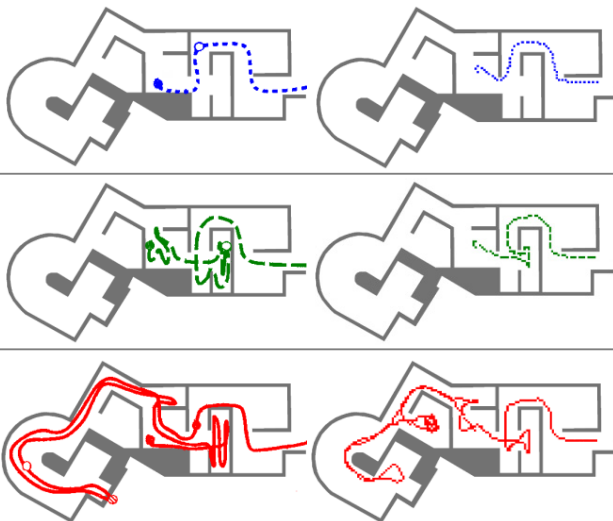


図 7 経路選択結果 (左) 観測 (右) シミュレーション

Fig. 7 Walking trajectory (Left) Experiment (Right) Simulation.

シミュレーションで用いた避難者の設定を示す。

図 7 (左) は観測結果 (文献 [16] の p.205 図-5 を基に著者が手を加えて作成した), 図 7 (右) はシミュレーション結果である。図中の各線は避難者の歩行軌跡を表し, 上段

表 2 移動距離の結果

Table 2 The tripmeter of experiment and simulation.

移動距離[m]	観測	シミュレーション
避難場所・道路認識あり	9.76	8.85
避難場所のみ認識あり	24.06	12.49
避難場所認識なし	55.06	48.14

表 3 局所経路選択特性

Table 3 The local characteristic of route choice.

道路を引き返した回数	観測	シミュレーション
避難場所・道路認識あり	0	0
避難場所のみ認識あり	4	2
避難場所認識なし	6	8

は避難場所・道路認識あり, 中段は避難場所のみ認識あり, 下段は避難場所認識なしの結果で歩行軌跡に若干の差は見られるものの, 歩行軌跡の空間分布はよく一致している。

表 2 はこのときの移動距離, 表 3 は局所的な経路選択性 (道路を引き返した回数) であり, 差異はあるものの定性的に再現できていることが確認できた。なお, 避難場所認識なしの避難者はランダムに経路を選択する可能性があるため, 10 個の物理乱数を擬似乱数の SEED 値とした 10 回のシミュレーションを行い, 移動距離の平均値および中央値に近いケースを図 7 に示した。また, 避難場所のみ認識なし (道路のみ認識) は避難場所認識なしと同じ結果のため, 図 7 の歩行軌跡と表 2 の移動距離は省略した。これらの結果より, 3 章で提案した経路選択モデルは観測結果を定性的に再現できることが確認できた。

道路延長の認識に係るパラメータ  $\alpha_i$  については  $[-1.5, 1.5]$  の間で変更をしたが,  $i = 0$  と同様の結果が得られた。

## 5. 浸水避難シミュレーション

浸水発生時の土地鑑による避難行動の差異を比較するため, 浸水避難シミュレーション例を検討した。5.1 節に被災シナリオ, 5.2 節に浸水シミュレーション結果, 5.3~5.6 節に浸水避難シミュレーション結果を示す。なお, 避難者の初期配置は 5.3~5.6 節ですべて同じ設定とした。

### 5.1 被災シナリオ

都市部の市街地を対象として, 浸水が発生する場合を想定した。避難者は堅牢建物にいる場合は垂直避難し, それ以外の建物にいる場合は浸水から避難するために一時避難場所を目指して移動する [18]。避難場所は国土数値情報避難施設データを参考に設定した [19]。また, 各建物の避難者数は, 総務省統計局国勢調査の町丁目の世帯数と人口を参考に作成した [20]。



表 4 浸水避難シミュレーションの諸元

Table 4 The configuration of simulation in a flood evacuation.

評価項目	設定値
建物数	575
避難場所数	3
道路の本数	168
避難者数	3,768
垂直避難者数	2,648
水平避難者数	1,120
避難開始時間	0 [s]
建物 1 棟の避難者数(最大値)	158
30～60[s]の避難開始確率(累計)	10 [%]
60～120[s]の避難開始確率(累計)	80 [%]
120～300[s]の避難開始確率(累計)	100 [%]
避難者の自由歩行速度(平均値)	1.5 [m/s]
避難者の自由歩行速度(標準偏差)	0.3 [m/s]

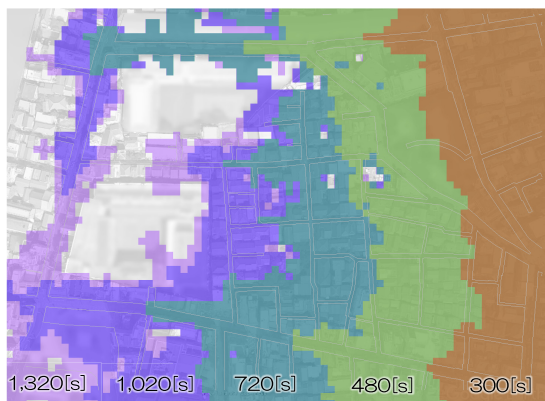


図 8 浸水範囲の時間発展

Fig. 8 A time-dependent contour of the flooded area.

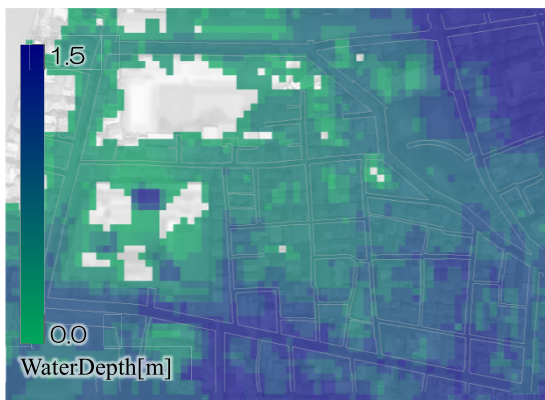


図 9 浸水深の空間分布

Fig. 9 A distribution of water depth.

浸水避難シミュレーションに用いた条件を表 4 に示す。避難場所は域外避難を含む 3 カ所を設定した。その他の条件は 4 章の表 1 と同じである。また、浸水による歩行速

度の低下は式 (10) を用いて考慮する。5.2 節の浸水シミュレーションにおける浸水の平均流速は 0.25 [m/s] であり、実験結果 [22] を基に歩行限界浸水深  $H_{limit} = 0.7$  [m] と設定した。

### 5.2 浸水シミュレーション結果

河川堤防決壊などにより計算領域右側から浸水が広がっていく状況を想定した。シミュレーション開始 120 [s] 後から計算終了時まで計算領域右側の境界条件として浸水深  $h = 1$  [m] を設定した。

図 8 は浸水の時系列データであり、カラーコンターは何秒間までに浸水したかを示している。浸水は道路や標高の低い部分から進展するため、浸水の進行方向は時間的に変化している。図 9 は 1,800 [s] 経過時の浸水状況であり、色は浸水深 [m] を表している。太い道路（以下、幹線道路とする）に浸水深が大きい領域が存在している。

### 5.3 避難場所・道路の認識なし

来街者を想定し、避難開始時点において全避難者は避難場所と全道路の存在をまったく認識していない設定とした。全避難者は避難場所を探してさまよう状態となる。

図 10 は 30 分経過時の単位面積あたりの群集密度分布 [m<sup>-2</sup>] の平均値である。表示の都合上、浸水範囲の描画を省いているが、避難者は時々刻々と変化する浸水の影響を受けながら避難する。避難場所は Refuge 1 と 2、および域外避難の Refuge 3 の 3 つとした。なお、図中の四隅にある道路については Refuge 3 以外は行き止まりとして扱った。Refuge 3 付近の道路に動線が集中しており、避難先を探索する人が特定の道路に集中していることが分かる。また、Refuge 1 右側にある道路は行き止まりであるが、動線が多い。これは避難者が行き止まりかどうかを把握しておらず、行き止まりの道路に入り込んだためである。

表 5 は 30 分経過時の避難状況である。避難完了率は避難を開始した者のうち避難場所に到達した人数の割合を示しており、避難完了率は 84% である。また、避難完了時間は避難開始から完了までの経過時間 [s] であり、移動距離は避難開始地点から避難場所までの総移動距離 [m] である。また、群集の双方向流が 1 回以上発生した（1 人が他人と 1 回以上すれ違った）道路を対向流発生道路としてカウントし、瞬間ピーク値と累積値を算出した。歩行者が 1 対 1 で衝突した場合でも転倒などが発生し、怪我をする可能性が指摘されている [22]。また、避難の場合には歩行速度が高くなる可能性があり、より危険性が高くなるため、本稿では対向流を避難安全上の 1 指標とした。避難者は避難場所を探して徘徊するため、対向流発生道路本数の累積値は約 1 万 5 千本となった。浸水道路の直前回避数は、次の道路を選択する際に浸水の影響を最も重要視した回数である。

3.1～3.2 節で示した避難者間での情報共有回数について

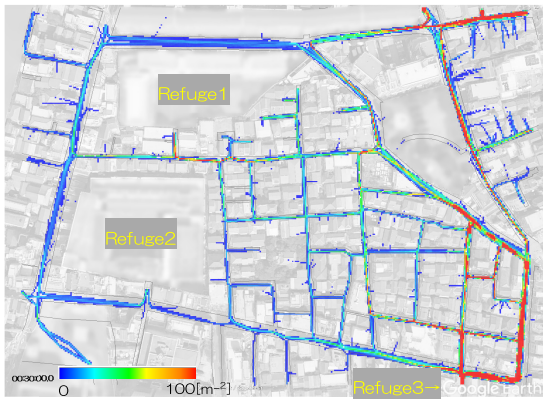


図 10 群集密度分布 (避難場所・道路認識なし)

Fig. 10 Flow diagram (no cognition of routes and refuge).

表 5 避難状況 (避難場所・道路認識なし)

Table 5 Evacuation status (no cognition of routes and refuge).

評価項目	計算値
避難完了率	84.38 [%]
避難完了時間(平均値)	267.57 [s]
移動距離 (平均値)	273.76 [m]
対向流発生道路本数(瞬間ピーク値)	70
対向流発生道路本数(累積値)	14,958
浸水道路の直前回避数	6,001
避難場所の情報交換回数	1,106
避難経路の情報交換回数	70,714



図 11 群集密度分布 (避難場所のみ認識なし)

Fig. 11 Flow diagram (no cognition of refuge).

表 6 避難状況 (避難場所のみ認識なし)

Table 6 Evacuation status (no cognition of refuge).

評価項目	計算値
避難完了率	72.05 [%]
避難完了時間(平均値)	177.56 [s]
移動距離 (平均値)	205.81 [m]
対向流発生道路本数(瞬間ピーク値)	70
対向流発生道路本数(累積値)	37,305
浸水道路の直前回避数	6,085
避難場所の情報交換回数	1,103
避難経路の情報交換回数	0

は避難場所が約 1 千回、避難経路が約 7 万回で活発に情報交換が行われている。避難者は偶然、避難場所を発見し、避難者間で情報共有をしたため、高い避難完了率となった。

#### 5.4 避難場所のみ認識なし

防災意識が低い地域住民を想定し、避難開始時点において全避難者は全道路の存在を認識しているが、避難場所を認識していない設定とした。

図 11 は 30 分経過時の群集密度分布であり、避難場所・道路の認識なし (5.3 節) と類似しているが、Refuge 2 右側にある細い道路への動線の集中がみられる。

表 6 は 30 分経過時の避難状況であり、避難完了率は 72% に低下した。また、対向流発生道路本数の瞬間ピーク値は避難場所・道路の認識なし (5.3 節) と同じであるが、累積値は約 4 万本であり、避難場所探索時と浸水迂回行動時において避難者のすれ違いが長時間生じている。避難者は避難場所を認識した後、道路の知識を基に最短経路を選択するため、最短経路が混雑する。また、道路が浸水していた場合には、浸水を回避する避難者のすれ違いが最短経路上で生じる。避難者間での情報共有回数については避難場所が約 1 千回で活発に情報交換が行われている。

#### 5.5 避難場所のみ認識あり

避難開始時点で避難場所の大まかな位置は把握しているが、そこに至る経路を把握していない状況を想定した。避難者全員が避難場所の位置を認識しているが、道路の存在をまったく認識していない設定とした。

図 12 は 30 分経過時の群集密度分布である。避難者は避難場所を目指して経路を選択するため、Refuge 1 下側の幹線道路や Refuge 3 付近の道路に動線が集中している。また、Refuge 1 上側の道路も動線が多いが、これは避難者が道路上ですれ違ったためである。

表 7 は 30 分経過時の避難状況である。避難完了率は 99% となった。また、対向流発生道路本数の瞬間ピーク値および累積値は避難場所の認識がない場合 (5.3 節と 5.4 節) に比べて大幅に減少している。避難者間での情報共有については、避難経路の情報交換が約 9 万回であり、活発に情報交換が行われている。

避難場所の認識がない場合 (5.3 節と 5.4 節) と比較すると避難完了率が向上していることから、避難場所の認識は重要であることが分かった。

#### 5.6 避難場所・道路の認識あり

防災意識が高い地域住民、もしくは携帯端末などの避難場所と経路情報を基に避難する状況を想定し、避難者全員





図 12 群集密度分布 (避難場所のみ認識)

Fig. 12 Flow diagram (cognition of the refuge only).

表 7 避難状況 (避難場所のみ認識)

Table 7 Evacuation status (cognition of the refuge only).

評価項目	計算値
避難完了率	98.66 [%]
避難完了時間(平均値)	163.10 [s]
移動距離 (平均値)	174.59 [m]
対向流発生道路本数(瞬間ピーク値)	16
対向流発生道路本数(累積値)	2,784
浸水道路の直前回避数	3,775
避難場所の情報交換回数	0
避難経路の情報交換回数	87,065

が避難場所と全道路の存在を認識している設定とした。なお、本設定は従来手法に近い状態であるが、道路の状況は目視範囲内で収集する点が異なっている。

図 13 は 30 分経過時の群集密度分布である。避難者は最短経路を選択するため、細い道路に動線が集中している。また、道路を認識しているため、Refuge1 右側にある行き止まりの路地に入り込む避難者はいなくなっている。

表 8 は 30 分経過時の避難状況である。避難完了率は 92%であり、避難場所のみ認識あり (5.5 節) と比較して約 1 割低減した。これは確認していない道路は浸水していないという楽観的な予測に基づいて最短経路を優先的に選択した結果、(a) 少し浸水した道路の通行、(b) 浸水回避による移動距離増大、(c) 移動中の周囲道路浸水が生じたためである。対向流発生道路本数の瞬間ピーク値は避難場所のみ認識あり (5.5 節) と同程度であるが、累積値は約 7 千本で 3 倍に増加しており、すれ違いが長時間続いている。これは最短経路を選択した避難者が浸水避けるために道路を引き返した際、後続の避難者とすれ違ったためである。また、全員が避難経路を認識しているため、避難者間の情報共有は行われなかった。

## 6. 浸水状況リアルタイム把握の有効性

5.6 節では避難者が避難場所と道路を把握しているにも



図 13 群集密度分布 (避難場所・道路認識あり)

Fig. 13 Flow diagram (cognition of routes to the refuge).

表 8 避難状況 (避難場所・道路認識あり)

Table 8 Evacuation status (cognition of routes to the refuge).

評価項目	計算値
避難完了率	91.61 [%]
避難完了時間(平均値)	126.49 [s]
移動距離 (平均値)	164.99 [m]
対向流発生道路本数(瞬間ピーク値)	10
対向流発生道路本数(累積値)	7,453
浸水道路の直前回避数	2,224
避難場所の情報交換回数	0
避難経路の情報交換回数	0

かかわらず、避難完了率が低下する結果となった。本節では避難者が IoT デバイスと携帯端末などにより街区の浸水状況を把握する場合を想定し、避難者が街区全体の浸水状況をリアルタイムに把握できる設定とした。浸水状況のリアルタイム把握の有効性を検証するため、5 章と同じ被災条件で浸水避難シミュレーションを検討した。なお、避難者は避難場所と全道路の存在を認識しているもの (5.6 節と同様の設定) とする。

図 14 は 30 分経過時の群集密度分布であり、避難場所・道路の認識あり (5.6 節) と比較して動線が集中する道路が減少している。

表 9 は 30 分経過時の避難状況であり、避難完了率は 99%で避難場所・道路の認識あり (5.6 節) と比べて約 1 割向上した。移動距離は避難場所・道路の認識ありの結果 (5.6 節) と比較して約 1 割増加しており、避難完了時間は 2 割程度増加している。これは浸水道路を避けるために迂回をしたためである。また、浸水道路の直前回避数は 1/3 以下に減少しており、効果的に浸水道路を事前回避できていることが分かる。対向流発生道路本数の瞬間ピーク値は約 1/3、累積値は 1/30 以下に減少しており、スムーズに避難できていることが分かった。リアルタイムに浸水状況を把握することでより安全な避難経路を選択可能になるほ



図 14 群集密度分布 (周辺の浸水状況把握あり)

Fig. 14 Flow diagram (cognition of disasters and routes to the refuge).

表 9 避難状況 (周辺の浸水状況把握あり)

Table 9 Evacuation status (cognition of disasters and routes to the refuge).

評価項目	計算値
避難完了率	99.46 [%]
避難完了時間(平均値)	154.93 [s]
移動距離 (平均値)	178.11 [m]
対向流発生道路本数(瞬間ピーク値)	4
対向流発生道路本数(累積値)	214
浸水道路の直前回避数	632
避難場所の情報交換回数	0
避難経路の情報交換回数	0

か、避難者同士の衝突といった二次被害を軽減することが可能となる。

## 7. 考察

5章と6章の浸水避難シミュレーション例より、以下のことが明らかとなった。

- (a) 避難者が避難先を探して道路上をさまよう場合、対向流が発生する。
- (b) 避難者が避難先を把握していても道路が浸水した場合、被災を避けるために引き返した避難者が後続の避難者と交錯し、対向流が発生する。
- (c) 周辺の浸水状況を正しく把握していない場合、道路の認識(土地鑑)があるとかえって避難完了率が低下する。
- (d) 周辺の浸水状況をリアルタイムに把握できる場合、適切な経路選択により高い避難完了率が得られるとともに対向流の発生を大幅に抑制することができる。

(a)の対向流については火災避難シミュレーション例でも同様の傾向があり、浸水避難においても有効な知見であると考えられる。

(b)の浸水による対向流発生については、特に最短経路など混雑した道路で押合いや衝突などの二次災害が発生する可能性がある。複数経路への避難誘導もしくは対向流が発生しないよう誘導するなどの対策が必要であると考えられる。

(c)については、避難者には心理学的に正常性バイアスが働き、確認していない道路は日常と同じであり、被災していないと予測する傾向がある。正常性バイアスによる楽観的な被災予測および最短経路に関する知識があることにより、浸水した道路があった場合にはつど、最短経路を選択し直すことで移動距離が増加する。また、最短経路で浸水した道路の迂回を繰り返している間に周りの道路が浸水することがあり、道路の知識があるにもかかわらずかえって避難完了率が低下した。なお、本稿のモデルでは避難者は浸水を予測しないで行動するため、避難者が浸水を予測した場合には異なる結果となる可能性がある。

(d)については避難者が予想することが難しい周辺の浸水状況をリアルタイムに把握することができれば、適切な被災回避と対向流の抑制が可能になることが示唆される。河川流域や沿岸など浸水の可能性がある地域、特に密集した建物などで浸水状況が把握しにくい箇所にIoTデバイスなどを配置し、リアルタイム観測と携帯端末への情報配信をすることで、避難者は被災状況を正確に把握でき、適切な避難行動をとることが可能になると考えられる。たとえば、エナジーハーベスト技術を用いたシングルボードコンピュータと水位センサ、LowPower-WideAreaなどで浸水深をリアルタイム計測・配信し、携帯端末などで受信してオフラインGISマップ上に表示するシステムを構築すればリアルタイムに連続値を取得することが可能である。なお、特定の道路で群集密度の上昇が見られるが、本稿のシミュレーション例での影響は限定的である。局所的な群集密度がさらに上昇した場合は避難者の集中が顕在化する可能性があるため、今後のさらなる検討が必要である。

また、5.3~5.6節および6章の浸水避難シミュレーションで道路延長認識に関するパラメータ  $\alpha_i$  を  $[-1.5, 1.5]$  の範囲で変更したが、土地鑑の差異による避難状況の傾向は  $\alpha_i = 0$  のときとおおむね一致した。ただし、避難場所の認識がない場合は  $\alpha_i = 1.5$  のときに避難完了率が1~2割低下した。これは幅員の大きい道路の延長を少なく評価することで幅員の大きな道路に避難者が集まり、異なる避難場所に向かう避難者で対向流の発生が増加したためである。

本稿のシミュレーション結果の妥当性については、人流観測や実験結果との比較検証が必要である[23]。なお、被災時は高精度かつ十分なデータを収集することは困難な場合が多いため、平常時における人流観測ビッグデータの分析や人流誘導実験などに基づく比較検証が現実的であると考えられる。



## 8. 結言

本稿では浸水時の徒歩避難を対象とした浸水避難シミュレーションモデルを提案した。また、避難者の土地鑑を考慮した経路探索モデルは室内実験を定性的に再現できることを確認した。浸水避難シミュレーション例では避難場所の認識が重要であり、浸水を回避する際に対向流が発生する可能性があることが分かった。また、避難者が周辺の浸水状況を適切に把握していない場合、土地鑑があるにもかかわらず、不適切な経路選択により避難完了率が低下するケースがあることが分かった。周辺の浸水状況をリアルタイムに把握することができた場合、避難者が適切な避難経路を選択可能になり、避難完了率の向上と対向流発生の抑制ができることが示唆された。

**謝辞** 本研究は文部科学省ポスト「京」萌芽的課題2「複数の社会経済現象の相互作用のモデル構築とその応用研究(多層マルチ時空間スケール社会・経済シミュレーション技術の研究・開発)」の元で実施したものです。また、本研究の一部はJSPS科研費JP18K04676, JP17K00328の助成を受けたものです。

## 参考文献

[1] 出口 弘: エージェントベース社会システム科学的方法論的基礎: 言説と理解の地平を広げるハイブリッドシミュレーション, 研究技術計画, Vol.21, No.2, pp.170-175 (2007).

[2] 村上ひとみ, 脇浜貴志, 小山真紀, 奥村与志弘: 津波避難における移動手段と自転車活用に関する研究—南海トラフ地震に備える愛知県田原市の訓練事例, 地域安全学会論文集, No.28, pp.1-9 (2016).

[3] 熊谷兼太郎: 2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動への津波避難シミュレーションの適用性, 国土技術政策総合研究所資料, No.742, 国土技術政策総合研究所 (2013).

[4] 宇川弘朗, 宍戸直哉, 今村文彦: 津波避難に関する認知マップを利用した評価の試み, 土木学会東北支部技術研究発表会 (2009).

[5] 廣川雄一, 西川憲明, 浅野俊幸, 山田武志, 印南潤二: 土地鑑を考慮した火災避難時における徒歩経路探索モデル, Joint Agent Workshops & Symposium 2016, pp.1-8 (2016).

[6] Moussaid, M., Helbing, D. and Theraulaz, G.: How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters, *Proc. National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, Vol.108, No.17, pp.6884-6888, HighWire Press (2011).

[7] 西川憲明, 廣川雄一, 山田武志, 印南潤二, 浅野俊幸: 意思決定プロセスモデルによる群集流動シミュレーション, 人工知能学会論文誌, Vol.32, No.5, pp.1-11 (2017).

[8] 川池健司: 都市における氾濫解析法とその耐水性評価への応用に関する研究, 京都大学大学院学位論文 (2002).

[9] 国土地理院: 基盤地図情報, 入手先 (<http://fgd.gsi.go.jp/download/>) (参照 2018-07-25).

[10] 石田 亨, 中西英之, 高田司郎: デジタルシティにおける危機管理シミュレーション, システム制御情報学会誌, Vol.46, No.9, pp.524-531 (2002).

[11] 足達侑介, 佐藤慶明, 長 篤志: 道路画像角度錯視における角度依存性と視覚ノイズの効果, 映像情報メディア

学会技術報告, Vol.40, No.6, pp.289-293 (2016).

[12] 轟 直希, 柳沢吉保, 高山純一, 長峯史弥: 歩行者行動と歩道利用状況を考慮した歩行者優先道路空間評価意識構造モデル, 交通工学論文集, Vol.1, No.2, pp.A-187-A-196 (2015).

[13] 内閣府中央防災会議: 「首都直下地震避難対策等専門調査会」: 帰宅行動シミュレーション結果について, pp.498-499 (2004).

[14] 鈴木 介, 今村文彦: 住民意識・行動を考慮した津波避難シミュレーションモデル, 自然災害科学, Vol.23, No.4, pp.512-538 (2005).

[15] 宇野圭亮, 鏡 麻衣, 榎山和男: 災害避難シミュレーションにおけるDijkstra法に基づく歩行アルゴリズムの検討, 第35回土木学会関東支部技術研究発表会 (2015).

[16] 山崎文雄, 永田 茂, 横山秀史, 大概 明: 避難行動の迷路実験結果, 土木学会論文集, Vol.1992, No.441, pp.203-206 (1992).

[17] 松本直司, 清田真也, 伊藤美穂: 街路空間特性と歩行速度の関係, 日本建築学会計画系論文集, Vol.74, No.640, pp.1371-1377 (2009).

[18] 東京都総務局総合防災部防災管理課: 東京防災, pp.40-41, 凸版印刷株式会社 (2016).

[19] 国土交通省国土政策局国土情報課: 国土数値情報, 入手先 (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>) (参照 2018-07-25).

[20] 総務省統計局: 国勢調査, 入手先 (<http://e-stat.go.jp/SG2/eStatGIS/page/download.html>) (参照 2018-07-25).

[21] 利根川研究会 (編), 須賀堯三 (監修): 利根川の洪水語り継ぐ流域の歴史, 山海堂, pp.94-117 (1995).

[22] 玉川雅章, 松浦弘幸, 中野正博, 行正 徹, 山中 真, 久保田正美: 人体の衝突・横転時の損傷評価に関する基礎的研究—各種条件下でのダミーの衝突・転倒実験による損傷パラメータの算出, 日本ロボット学会誌, Vol.31, No.8, pp.755-760 (2013).

[23] 望月祐洋, 鬼倉隆志, 福崎雄生, 西尾信彦: Wi-Fi パケット人流解析システムの実環境への適用, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集 2014, pp.1249-1257 (2014).



廣川 雄一 (正会員)

2005年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士課程修了。現在、国立研究開発法人海洋研究開発機構地球情報基盤センター研究員、博士(情報科学)。Multi-Agent Systemsを用いた歩行者のモデル化、High Performance Computing等の研究に従事。





### 西川 憲明

2005年広島大学大学院先端物質科学研究科量子物質科学専攻博士課程後期修了。現在、国立研究開発法人海洋研究開発機構地球情報基盤センター研究員。博士（理学）。マルチエージェントシミュレーション，大規模数値計算

技術の研究に従事。



### 山田 武志

2000年東京学芸大学大学院教育学研究科数学教育専攻修士課程修了。現在、株式会社ベクトル総研主任研究員。主としてマルチエージェント人流シミュレーションの研究開発と人流シミュレーションを活用した施設計画，

都市防災計画等に関するコンサルティング業務に従事。



### 印南 潤二

2008年山梨大学大学院医学工学総合教育部（現医工農学総合教育部）持続社会形成専攻博士後期課程修了。博士（工学）。同年株式会社ベクトル総研入社。主に、マルチエージェントシミュレータの開発，これを用いた分析，コ

ンサルティング業に携わる。



### 坂井 隆志

2016年デジタルハリウッド大学院ディレクター専攻修士課程修了。現在、株式会社イマジナリーパワー代表取締役社長。2000年大学を自主退学しCGスタジオを立ち上げる。以来、映画やTV，イベント等のCGやVFXの製

作に従事。近年はVR，MR等のインタラクティブリアルタイムコンテンツ開発にも携わる。



### 浅野 俊幸

2008年横浜国立大学大学院環境情報学府リスクマネジメント専攻修了。博士（工学）。2007年独立行政法人防災科学技術研究所主幹研究員，現在，国立研究開発法人海洋研究開発機構上席技術研究員，地球情報基盤センターに

おいて，地球シミュレータ等のHPCシステムの外部共用促進，マルチエージェント人流シミュレーションの研究開発と社会実装に従事。