

浸水シミュレーション予測による浸水徒歩避難の検討

廣川 雄一^{1,a)} 西川 憲明¹ 山田 武志² 印南 潤二² 浅野 俊幸¹

受付日 2019年1月4日, 採録日 2019年7月3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, 浸水シミュレーションと連成可能な徒歩避難シミュレータを構築した. 浸水避難シミュレーション例ではIoTデバイスなどを用いた浸水状況のリアルタイム把握により避難完了率が向上することを明らかにした. 本稿では浸水の将来予測が可能となった場合, どの程度避難完了率が改善するかを検討する. 浸水避難シミュレーション例において, 目視で浸水状況を把握する場合には, 未確認の道路は被災していると予測すると避難完了率が高くなり, 対向流の発生頻度は低くなることが分かった. また, IoTセンサ群とシミュレーションにより浸水の短期予測情報を避難者に提示した場合, 避難完了率の向上だけでなく, 避難者が浸水している時間を減少できる可能性が示唆された.

キーワード: マルチエージェント, 徒歩, 避難, 浸水, シミュレーション

An Evaluation of Flood Evacuation Using Flood Forecast Based on Computational Fluid Dynamics

YUICHI HIROKAWA^{1,a)} NORIAKI NISHIKAWA¹ TAKESHI YAMADA² JUNJI IN-NAMI² TOSHIYUKI ASANO¹

Received: January 4, 2019, Accepted: July 3, 2019

Abstract: In recent years, the observed frequency of extreme weather phenomena such as torrential downpour has been increasing, which is a possibility of causing flood damage such as flooding of the river and etc. In order to mitigate the damage to the pedestrian in a flood disaster, a prior consideration of disaster prevention such as evacuation planning is considered to be one of the important topics. The authors have proposed the route choice model of pedestrians that considers pedestrian's individual map recognition: the position of refuges, routes, and the condition of roads. The authors have also developed the pedestrian simulator that can be coupled with a physical simulation such as computational fluid dynamics. In an example of pedestrian simulation during a flood evacuation, a real-time recognition of flooded area using such that Internet of Things devices has possibility to improve the evacuation completion ratio. In this paper, we investigate to what extent the evacuation completion ratio improves when the future prediction of flooding area becomes possible. An example of flood evacuation simulation for pedestrians shows that an evacuation ratio increases and the counter-flow of pedestrians decreases when a pedestrian assumes visually unconfirmed roads to be suffered. The example also shows that a short-term prediction of flooded area by physical simulation using computational fluid dynamics could improve the evacuation completion ratio and reduce the inundation time.

Keywords: multi-agent systems, pedestrian, evacuation, flood, simulation

¹ 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

² 株式会社ベクトル総研
Vector Research Institute, Inc., Shibuya, Tokyo 150-0002,
Japan

^{a)} y-hiroka@jamstec.go.jp

1. 緒言

近年, 大型の台風や集中豪雨などの発生頻度が増加しており, 洪水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, 津波が発生する恐れもある. 被災の影響を軽減するためには災害の予測だけでは

なく、災害が社会、特に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事前防災が重要である。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]。避難シミュレーションの経路探索モデルでは目的地への最短経路を解析するものが多く、各避難者が認識する道路の被災や混雑状況に基づいた動的な経路選択は考慮されていない [2]。最も基本的な徒歩避難 [3] として、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いる [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）」を持ち、個々の避難者が混雑や被災した道路を認識・判断したうえで迂回行動を取れることが特徴である。著者らは本経路選択モデルを高精度な浸水シミュレーションおよび視覚に基づく歩行行動を考慮した人流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を検討した [5]。都市部を想定した浸水避難シミュレーション例では避難者は近くの浸水状況しか把握できず、IoT デバイス群（水位センサとシングルボードコンピュータなど）で浸水状況をリアルタイムに把握することにより避難完了率が向上する可能性を示した [6]。一方、交通工学分野ではリアルタイム浸水予測を活用した経路探索システムの構築が試みられている [7]。本稿では浸水シミュレーションにより浸水範囲を予測する機能を追加した場合、徒歩による避難完了率がどの程度向上するかを検討した。

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 章に室内実験を対象としたシミュレーションと観測結果の比較、5 章に浸水避難シミュレーション、6 章に考察、7 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。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 2 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、複雑な浸水範囲の時間変化を解析することができる。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、 x と y は 2 次元座標、 H は 2 次元実空間における時刻 t の水位、 h は浸水深、 z は地盤高、 u と v は流れの速さ (x , y 方向)、 M と N は流量フラックス、 r は Manning の粗度係数、 S は降雨などの流入出力、 g は重力加速度の絶対値で $9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$ とした。

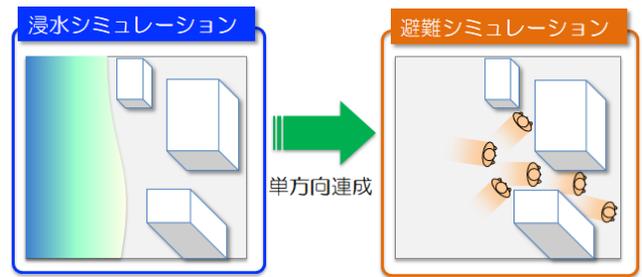


図 1 浸水避難シミュレーションの概要

Fig. 1 The scheme of simulation during a flood evacuation.

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]。

既往研究では格子間隔は 10 [m] 、タイムステップサイズは 10 秒 程度であり、時々刻々と変化する浸水状況を解析するには精度が不足する [9]。本稿では格子間隔は 5 [m] 、タイムステップサイズは 0.1 [s] とし、浸水範囲の時間変化をより高精度に解析することが可能である。

地盤高 z や Manning の粗度係数 r は、国土地理院基盤地図情報データの標高や建築物の外周線、道路を基に作成し [10]、浸水シミュレーションの入力データとした。建物については、単位面積あたりの建物占有率に応じた Manning の粗度係数を設定し、局所的に建物の占有率に応じた流れやすさを変更した。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。

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

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

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

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

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

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 [11], [12]。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。既往の避難シミュレーションにおける歩行モデルは2次元ネットワークモデルを用いたものが多く、避難者の対向流などが発生した際の歩行速度低下を解析することが難しい。本稿のヒューリスティックモデルでは視覚情報に基づいた歩行行動をモデル化しており、対向流などが発生した際に群集の自律的な歩行速度低下を解析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} 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、 α_0 は目的地 O_1 がある角度、 α は視野角内の任意の角度、 $f(\alpha)$ は角度 α における障害物までの距離、 $d(\alpha)$ は目的地までの距離を表す。人は有限の大きさを持つ円、障害物は外周形状の2次元ポリゴンとして扱い、タイムステップごとに各ポリゴンの衝突を判定する。

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、 \mathbf{x}_i は避難者*i*の2次元実空間における位置、 \mathbf{v}_i は歩行速度、 m_i は質量、 \mathbf{v}_{des} は希望歩行速度、 τ は衝突緩和時間、 v_i^0 は自由歩行速度の大きさ、 \mathbf{f}_{ij} は他の避難者*j*との接触力、 \mathbf{f}_{iw} は障害物*w*との接触力、 d_h は最初の障害物までの距離である。希望歩行速度の大きさ $|\mathbf{v}_{des}|$ は式(9)を最小化する角度(最も目的地に近づける角度) α 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(後述)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[12]。

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

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

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

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

浸水による歩行速度の低下は式(10)を用いて考慮する。 $h_i(t)$ は時刻*t*における歩行者*i*の浸水深、 $v_i(t)$ は時刻*t*における歩行者*i*の歩行速度の大きさ、 $v_i'(t)$ は浸水による速度低下を考慮した歩行速度の大きさ、maxは最大値を選択する関数、 H_{limit} は歩行限界浸水深である。

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

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。

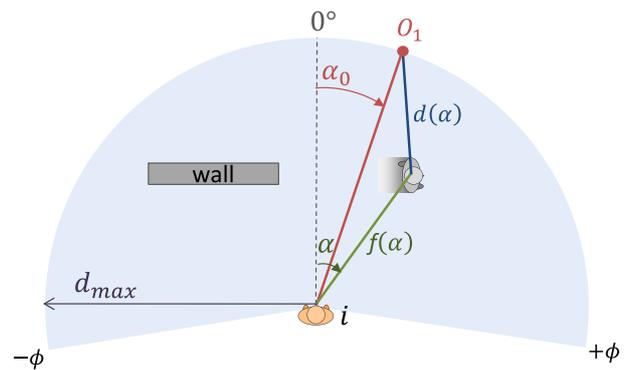


図2 ヒューリスティックモデル
Fig. 2 The overview of heuristic model.

(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、避難者は各道路の被災や混雑状況を考慮して経路の選択を行う。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道路状況認識をタイムステップごとに更新していく。また、避難者は自分の道路状況認識に基づき、目的地や経路を決定する。3.1節に道路状況の認識、3.2節に道路状況の認識項目、3.3節に経路選択アルゴリズムを示す。

3.1 道路状況の認識

交差点をノード、2つのノードを結ぶリンクを1本の道路とした。避難者が最後に通過したノードと次に目指すノードをつなぐリンクを現在所属しているリンクと判定し、避難者とノードの位置座標から算出した距離が道路(リンク)の幅員以下となった場合に当該ノードに到着したと判定する。なお、被災状況を目視で確認する場合には、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(図3)。なお、避難者がIoTデバイスなどを使用した場合には全道路の被災状況または被災状況予測をリアルタイムに把握できることとした。また、避難者間の情報伝達は考慮しない。

3.2 道路状況の認識項目

道路状況の認識項目として道路延長認識の正確性、混雑度、被災度を避難者ごとに考慮する。

(1) 道路延長認識の正確性

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[13]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

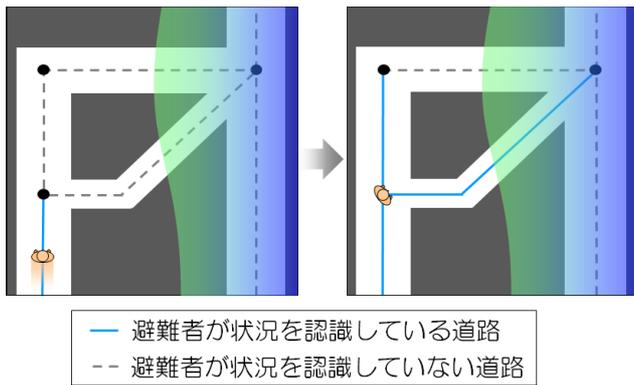


図 3 目視による道路状況の認識

Fig. 3 The cognition of a road condition with pedestrian's vision.

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} とし、式 (11) を用いて求める。

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

ここで、 L_l は実際の道路延長、 α_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、 W_{center} は基準幅員 (全道路の幅員の平均値など) である。傾き α_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 [14] 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 $J_{il}(t)$ を用いて考慮した。 $J_{il}(t)$ は式 (12) を用いて求める。

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

ここで、 t は時刻、 β_i は混雑度の影響に係る無次元のパラメータ、 $\rho_l(t)$ は時刻 t における道路 l 周辺の群集密度である。 ρ_{center} は混雑による影響の増加と減少が逆転する群集密度である。 $\beta_i > 0$ 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 [15] 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。

$$U_{il}(t) = A_i h_{il}(t + P) + 1.0 \quad (13)$$

ここで、 A_i は避難者 i 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。 $h_{il}(t + P)$ は避難者 i が認識している時刻 $t + P$ の道路 l の最大浸水深である。また、 P は時刻 t からの浸水予測時間 (リーディングタイム) である。

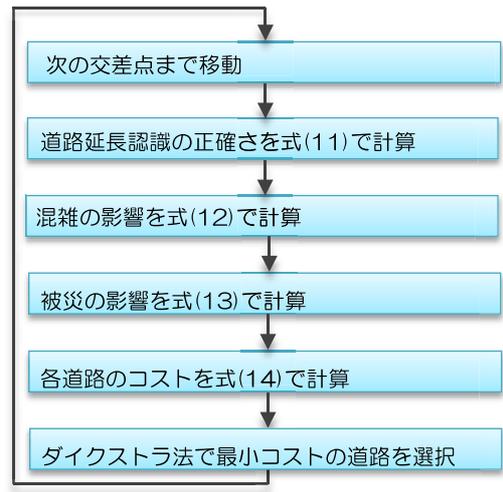


図 4 経路選択モデルのアルゴリズム

Fig. 4 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。

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

3.3 経路選択アルゴリズム

経路選択については避難者が交差点に到着するごとに図 4 のフローチャートに従い、次に選択する道路を決定する。式 (13) 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 [16]。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 α_i と β_i 、 A_i 、および W_{center} と ρ_{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未確認の道路については混雑していないと想定すると仮定し、道路 l の群集密度 ρ_l の初期値は $0.0 [\text{m}^{-2}]$ に設定した。道路の被災状況については、未確認の道路が健全であると予測する楽観主義者と未確認の道路が被災していると予測する悲観主義者の 2 つを考慮した。避難者 i が認識している道路 l の浸水深 h_{il} の初期値は楽観主義者の場合は $0.0 [\text{m}]$ 、悲観主義者は $1.0 [\text{m}]$ 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道路 l の被災影響度 $U_{il}(t)$ を更新する。

4. 室内実験を対象とした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、

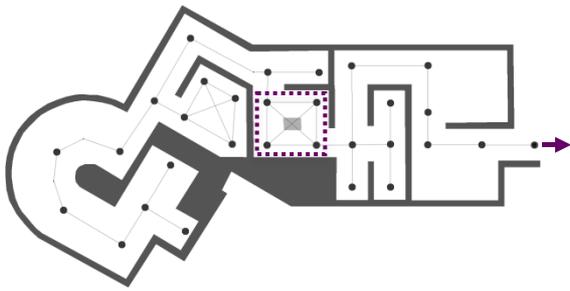


図 5 室内概略図および経路ネットワーク

Fig. 5 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 ρ_{center}	0.2 [m ⁻²]
道路延長の認識に係るパラメータ α_i	0
混雑の影響に係るパラメータ β_i	1.5
被災の影響パラメータ A_i	100
避難者の自由歩行速度	1.5 [m/s]
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]

室内実験における観測結果 [17] とシミュレーション結果の比較を行った。

図 5 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ーションで用いた避難者の設定を示す。観測と条件をあわせるため、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 [18] は考慮せず、避難時を想定した自由歩行速度とした。

図 6 (上) は観測結果 (文献 [15] の p.205 図 5 を基に著者が手を加えて作成した)、図 6 (下) 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であり、避難開始地点の差異により初期の経路選択結果が異なり、歩行軌跡に若干の差は見られるが、その他は良く一致している。

表 2 はこのときの移動距離であり、1 割の誤差で実験結果を再現できることが確認できた。移動時間については非常時の自由歩行速度を想定したため、平常時における室内歩行実験との差異が発生している。

道路延長認識の正確性に係るパラメータ α_i は [-1.5, 1.5]

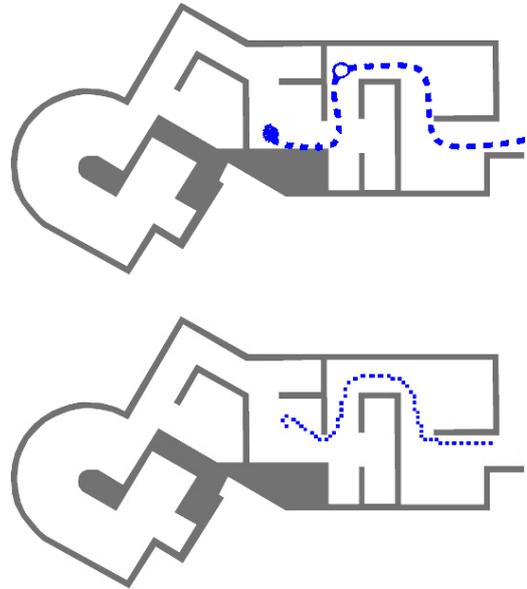


図 6 経路選択結果 (上) 観測 (下) シミュレーション

Fig. 6 Walking trajectory (Upper) Experiment (Lower) Simulation.

表 2 移動距離と移動時間の結果

Table 2 The tripmeter and time of experiment and simulation.

	観測	シミュレーション
移動距離[m]	9.76	8.85
移動時間[s]	25.00	8.40

の間で変更をしたが、 $\alpha_i = 0$ と同様の結果となった。

5. 浸水避難シミュレーション

浸水発生時において道路状況の把握方法が避難行動に与える影響を評価するため、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、5.3~5.5 節に避難シミュレーション結果を示す。5.3 節では目視、5.4 節は IoT デバイス群、5.5 節では浸水シミュレーションにより道路状況を把握する。

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 [19]。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 [20]。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 [21]。図 7 にシミュレーションで用いる対象市街地と道路ネットワークを示す。図中の青い線が道路ネットワークであり、幅員の大きい道路を幹線道路とした。また、避難場所は 3 カ所とし、一時避難場所 Refuge1 および 2、域外避難につながる交差点 Refuge 3 を設定した。

浸水避難シミュレーションに用いた条件を表 3 に示す。

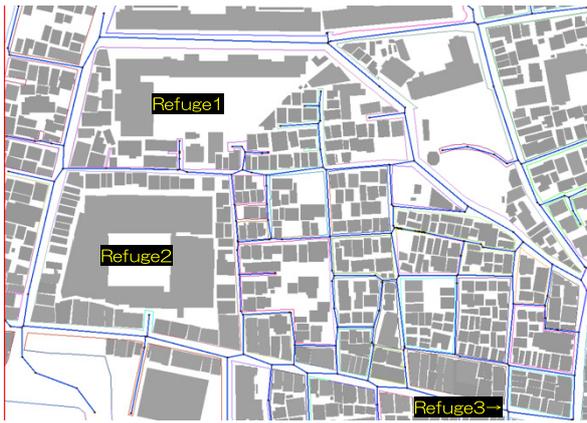


図 7 対象市街地および経路ネットワーク
Fig. 7 The street map with the network of routes.

表 3 浸水避難シミュレーションの諸元

Table 3 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
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]
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	1,800 [s]

避難シミュレーションの実経過時間は 30 分間とした。その他の条件は 4 章の表 1 と同じである。

図 8 は浸水がない場合の避難完了率の推移を示したものである。避難完了率は約 11 分で 100%となり、平常時の避難訓練時の 40 分（以上）と比較すると避難完了時間が早くなっている [22], [23]。これは平常時と非常時による自由歩行速度の差異が原因と考えられる。

5.2 浸水シミュレーション

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直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 9 は 1,800 [s] 経過時の浸水状況であり、色は浸水深を

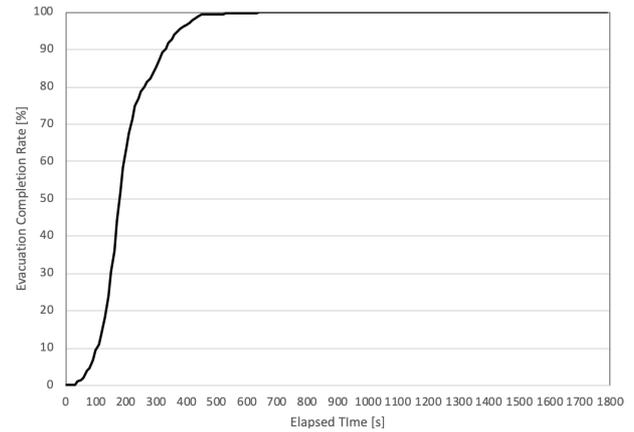


図 8 浸水がない場合の避難完了率の推移
Fig. 8 A time-dependent evacuation completion rate without flood.

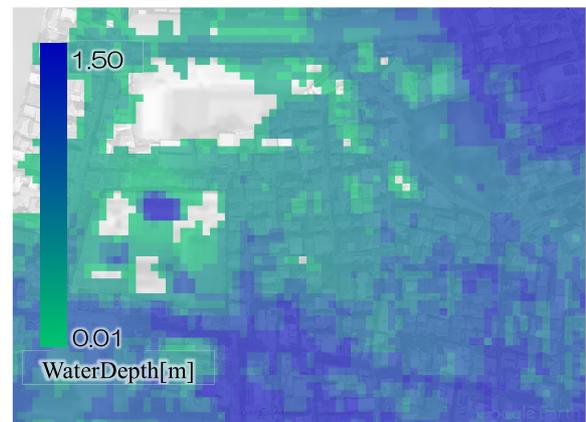


図 9 浸水深の空間分布
Fig. 9 A distribution of water depth.

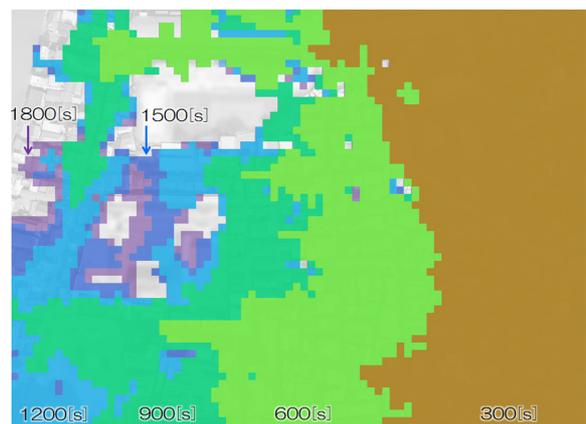


図 10 浸水範囲の時間発展
Fig. 10 A time-dependent contour of the flooded area.

表している。幹線道路（幅員の大きい道路）に浸水深が大きい領域が存在している。図 10 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おり予測が難しいことが分かる。

浸水の平均流速は 0.25 [m/s] であり、安全に避難できる浸水深は 0.7 [m] である [24]。本稿では安全率を 5 割ほど見込んで歩行限界浸水深 $H_{limit} = 0.3$ [m] とし、浸水による歩行速度の低下は式 (10) で求めた。

5.3 目視による局所被災把握

地域住民もしくは携帯端末などを使用した避難を想定し、全避難者が避難場所と避難経路を把握している設定とした。

(1) 楽観主義者

避難者は状況を把握していない道路については被災していないと想定するものとし、式 (13) で避難者 i が認識している道路 l の浸水深 h_{il} の初期値は 0.0 [m] に設定した。

図 11 は 30 分間のヒートマップ (単位面積当たりの群集密度の累積値) である。図 10 に示した 30 分間の浸水深カラーコンターをあわせて図示している。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。

域外避難用の交差点 Refuge3 周辺の細い道路で群集密度が高い部分が発生している。これは避難者が浸水を避けて引き返したためである。

表 4 は 30 分間の浸水避難状況である。避難完了率は 30 分間で避難を開始した避難者が避難場所に到達できた割合で 66%にとどまっている。また、浸水していた時間は避難者が水に浸かっている時間の平均値であり、10 分弱の間浸水した道路を移動している。対向流発生道路の本数は避難者の対向流が 1 回以上発生した道路を 1 ステップ間カウントし、ピーク値を記録した。群集密度分布は 1 ステップ間の $1 [m^{-2}]$ あたりの人数のピーク値である。

避難完了率が低かった要因として、未確認の道路は被災していないという正常性バイアスと最短経路の知識が合わさることにより、被災した道路を適切に回避できなかったためと考えられる。

(2) 悲観主義者

避難者は状況を把握していない道路については被災していると想定するものとし、式 (13) で避難者 i が認識している道路 l の浸水深 h_{il} の初期値は 1.0 [m] に設定した。

図 12 は 30 分間のヒートマップ (単位面積あたりの群集密度の累積値) である。Refuge3 に通じる道に群集密度の集中している。これは避難者が同じ経路を移動しているためである。

表 5 は 30 分間の浸水避難状況である。避難完了率は 84%に向上し、対向流発生道路の本数は大幅に削減した。避難者の対向流を減少させることで避難者同士の衝突などの 2 次被害を軽減することができる。ただし、浸水していた時間については大きな改善はみられなかった。浸水していた時間が改善されなかった要因としては、Refuge3 付近で動線が集中したため、群衆密度が上昇し、浸水による歩行速度低下が加わったためと考えられる。

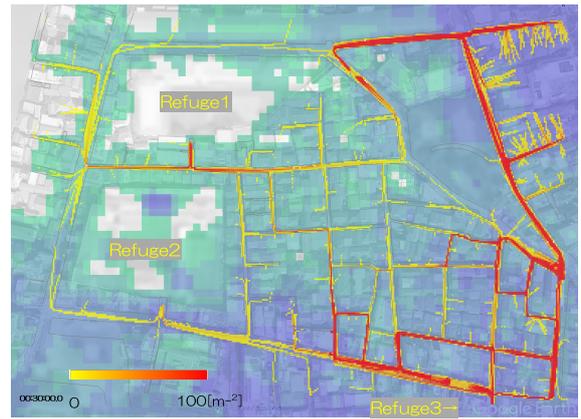


図 11 動線分布 (楽観主義者)

Fig. 11 Flow diagram (Optimist).

表 4 避難状況 (楽観主義者)

Table 4 Evacuation status (Optimist).

評価項目	計算値
避難完了率	65.89 [%]
浸水していた時間(平均値)	589.24 [s]
対向流発生道路の本数(瞬間ピーク値)	19
群集密度分布(瞬間ピーク値)	2.50 [m^{-2}]

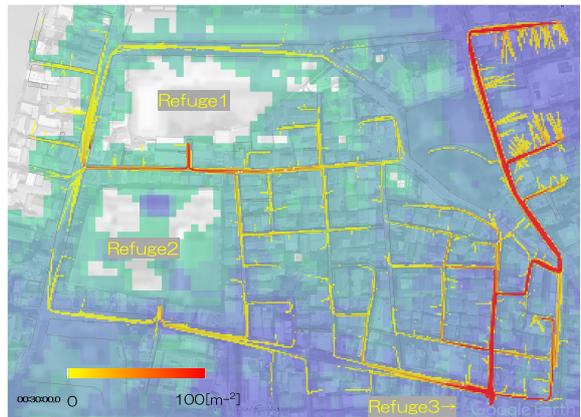


図 12 動線分布 (悲観主義者)

Fig. 12 Flow diagram (Pessimist).

表 5 避難状況 (悲観主義者)

Table 5 Evacuation status (Pessimist).

評価項目	計算値
避難完了率	84.29 [%]
浸水していた時間(平均値)	402.30 [s]
対向流発生道路の本数(瞬間ピーク値)	1
群集密度分布(瞬間ピーク値)	4.38 [m^{-2}]

5.4 IoT センサ群によるリアルタイム被災把握

全避難者が AR デバイスまたはデジタルサイネージなどにより、IoT センサ群で観測した浸水状況をリアルタイムに把握した場合、避難状況に与える影響を検討した。

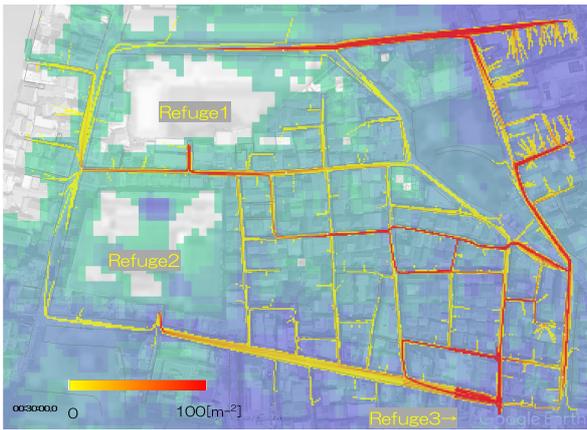


図 13 動線分布 (IoT センサ群)
Fig. 13 Flow diagram (IoT sensors).

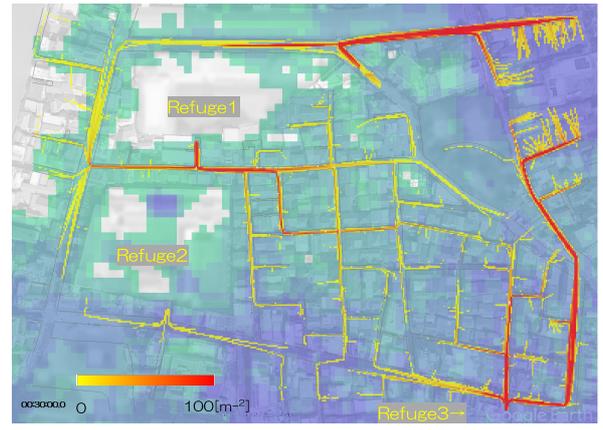


図 14 動線分布 (シミュレーション予測)
Fig. 14 Flow diagram (Simulation forecast).

表 6 避難状況 (IoT センサ群)
Table 6 Evacuation status (IoT sensors).

評価項目	計算値
避難完了率	77.59 [%]
浸水していた時間(平均値)	425.86 [s]
対向流発生道路の本数(瞬間ピーク値)	8
群集密度分布(瞬間ピーク値)	11.25 [m ²]

表 7 避難状況 (シミュレーション予測)
Table 7 Evacuation status (Simulation forecast).

評価項目	計算値
避難完了率	86.43 [%]
浸水していた時間(平均値)	330.74 [s]
対向流発生道路の本数(瞬間ピーク値)	1
群集密度分布(瞬間ピーク値)	10.00 [m ²]

図 13 は 30 分間のヒートマップであり、5.3 節で見られた Refuge1 の上にある幹線道路の群集密度が増加している。

表 6 は 30 分間の浸水避難状況であり、避難完了率は 78%，対向流発生道路の本数は 8 本となり、浸水していた時間についてもあまり改善していない。5.2 節で示したように浸水は道路など摩擦の低い部分や標高が低い部分から進むため、浸水が進む方向は複雑に変化し、避難者が将来の浸水範囲を予測するのが難しいためと考えられる。

5.5 シミュレーション予測を含む被災状況把握

IoT センサ群によるリアルタイム浸水状況把握に加えて浸水予測シミュレーションの情報を配信した場合、避難状況がどの程度改善するかを検討した。簡単のため、各タイムステップで 20 分後の浸水状況を浸水シミュレーションにより 100% 予測できると仮定した。

図 14 は 30 分間のヒートマップであり、Refuge3 周辺の細い道路で群集密度が低くなっている。これは将来の浸水状況を把握し、事前に浸水する道路を回避したためである。

表 7 は 30 分間の避難状況であり、5.4 節と比較して 1 割避難完了率が向上している。また、対向流発生道路の本数はほぼなくなっている。浸水していた時間は 5 分程度となり、改善が見られた。これらの結果から浸水状況のリアルタイム把握に浸水シミュレーション予測を加えることで避難完了率が向上し、避難者が浸水している時間を軽減でき

ることが分かった。

6. 考察

浸水シミュレーションによる 20 分後の浸水範囲予測により避難完了率の向上、浸水していた時間および避難者の対向流を軽減できるが、浸水を 100% 予測しているにも関わらず避難完了率は 86% にとどまった。また、3.1 節 (1) の道路延長認識の正確性にかかわるパラメータ α_i については $[-1.5, 1.5]$ の間で変更をしたが、 $\alpha_i = 0$ とほぼ同じ結果となった。

図 15 は浸水予測のリードタイムと避難完了率を示したグラフであり、横軸は現時点から何分後まで浸水を予測するかを表し、縦軸は避難完了率を表す。0 分は IoT デバイス群によるリアルタイム浸水把握の結果を表す。5 分間の浸水予測では避難完了率は 7 割程度で浸水のリアルタイム把握とほぼ同じ結果となり、浸水シミュレーション予測の効果は認められなかった。10 分のリードタイムでは避難完了率が向上するが、それ以上リードタイムを増やしても避難完了率は向上しないことが分かる。

避難完了率が一定以上に向上しない理由としては下記の 2 点が考えられる。

1) 群集密度分布の上昇

リアルタイム浸水および浸水予測の把握により、各避難者が最短経路を選択した結果、特定の道路に避難者が集中することで移動速度が低下する。

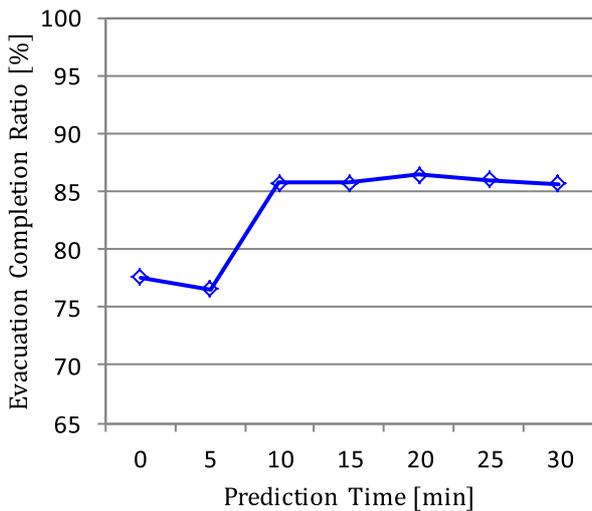


図 15 シミュレーションのリードタイムと避難完了率

Fig. 15 A relation between prediction duration and evacuation completion ratio.

2) 物理的な制約

浸水状況および浸水予測を把握しても、浸水の進展が避難速度よりも速い場合、浸水を回避することができない。

1) については 5.4~5.5 節で示したように群集密度分布の瞬間ピーク値が高いことから、群衆の避難経路を適切に分散させる必要がある。なお、浸水予測シミュレーションの情報を取得できる避難者の割合を変更しても大きな変化はなく、避難経路を分散させる効果は認められなかった。また、各避難者がどの避難場所を目指し、どの経路を通るかを事前に把握することは難しい。群集密度を考慮したうえで、局所領域ごとに異なる避難誘導指示を提示し、避難経路を分散させることが現実的と考えられる。

2) については浸水シミュレーションのリードタイムを大幅に増やし、避難者に浸水予測結果を示して事前避難を促すことが必要であると考えられる。事前避難をした場合、避難完了率は 100%となる。

本稿では被災状況の収集・配信や予測結果が即時に求められると仮定している。情報の配信にはタイムラグが発生する可能性があり、実応用にあたってはタイムラグが避難状況に与える影響を検討する必要がある。実際の運用では、計測・配信を行う機器の 1 台あたりコストを下げることで大量に配置し、集約は避難者の端末上で行う形が想定される。一例として、水位センサと通信機能を搭載したシングルボードコンピュータを各地点に配置し、水位のデータを遠距離まで到達する Low Power Wide Area などの無線ネットワークで配信する。また、各センサのデータを集約するノート PC などを設置し、センサのデータを集約したうえで浸水予測データを配信する。避難者はこれらのデータを携帯端末で受信し、携帯端末上で処理・表示する。シングルボードコンピュータは太陽光などで駆動させ、

浸水予測はバッテリーを搭載したノート PC などで行うことで、被災時に電源やネットワークが使用不可となっても可用性を保てる確率が高まると考えられる。

なお、5.3 節の結果より、浸水シミュレーション予測結果が取得できず、目視で被災状況を確認する場合には、未確認の道路は被災していないと仮定して避難することにより、避難完了率が向上する可能性が示唆された。

移動時間については非常時における屋外の自由歩行速度を想定したため、平常時における屋内実験や屋外実験とは異なる結果となった。非常時における屋内および屋外の自由歩行速度分布のデータ取得が可能となった場合、移動時間の予測精度を向上させることが期待できる。

7. 結言

本稿では、浸水時徒歩避難において目視による被災状況把握の場合、未確認道路が健全であると予測する楽観主義者は避難完了率が低く、未確認道路が被災していると予測する悲観主義者は避難完了率が高くなるとともに対向流の発生頻度が低くなりうることを示した。また、浸水状況のリアルタイム把握では避難者が浸水している時間はあまり改善しないことを明らかにした。浸水シミュレーションを用いた浸水予測結果を避難者に示すことで避難完了率が向上し、浸水している時間を軽減できる可能性を示した。

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] 高橋 保, 中川 一, 東山 基：洪水氾濫解析とリンクした避難のシミュレーション, 第 33 回水理講演会論文集, pp.355-360 (1989).
- [3] 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).
- [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, 山田武志, 印南潤二, 浅野俊幸：火災避難時における土地鑑を考慮した徒歩経路探索モデルの提案, 人工知能学会論文誌, Vol.32, No.5, AG16-G-1-11 (2017).
- [6] 廣川雄一, 西川憲明, 山田武志, 印南潤二, 坂井隆志, 浅野俊幸：土地鑑を考慮した浸水避難時における徒歩経路探索モデル, Joint Agent Workshops & Symposium 2017, pp.1-8 (2017).

- [7] 井上卓也, 中谷 剛, 矢部浩規: リアルタイムの浸水予測を考慮した経路検索の試み, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, p.L1291-L1296 (2018).
- [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] 桑沢敬行, 細井教平, 片田敏孝: 津波避難場所の誘導効果とそれを踏まえた設置場所のあり方に関する研究, 土木学会論文集 (土木計画学), Vol.71, No.3, pp.117-126 (2015).
- [10] 国土地理院: 基盤地図情報, 入手先 (<http://fgd.gsi.go.jp/download/>) (参照 2018-12-28).
- [11] Moussaïd, 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 2011)*, Vol.108, No.17, pp.6884-6888, HighWire Press (2011).
- [12] 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, AG16-H.1-11 (2017).
- [13] 足達侑介, 佐藤慶明, 長 篤志: 道路画像角度作詞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).
- [14] 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.A187-A196 (2015).
- [15] 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).
- [16] 宇野圭亮, 鏡 麻衣, 壺山和男: 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, pp.1-2 (2015).
- [17] 山崎文雄, 永田 茂, 横山秀史, 大槻 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).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] 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 2018-12-28).
- [21] 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 2018-12-28).
- [22] 戸川直希, 佐藤翔輔, 今村文彦, 平間 雄: 津波避難を繰り返すことによる効果の検証—宮城県亘理町の事例, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp.L1585-L1590 (2016).
- [23] 宍戸直哉, 宇川弘明, 今村文彦: 津波来襲時における住民の避難過程を考慮した人的被害評価手法の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.1311-1315 (2010).
- [24] 利根川研究会 (編), 須賀克三 (監修): 利根川の洪水—語り継ぐ流域の歴史, 山海堂, pp.94-117 (1995)



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。



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。