

都市エリアにおける河川氾濫避難への 歩行者シミュレータの適用

Application of Pedestrian Simulator to Flood Evacuation in Urban Area

山下 倫央^{*1*2} 岡田 崇^{*1*2} 野田 五十樹^{*1}
Tomohisa Yamashita Takashi Okada Itsuki Noda

^{*1}産業技術総合研究所 サービス工学研究センター

Center for Service Research (CfSR), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

^{*2}科学技術振興機構 さきがけ

Precursory Research for Embryonic Science and Technology (PRESTO), Japan Science and Technology Agency (JST)

In order to save local residents from flood and sediment disaster, it is necessary for a local government to issue evacuation order and directive of dangerous area in a timely manner. Before an evacuation situation aggravates, it is desirable to have completed refuge to the safe area, but it is also important to carry out evacuation behavior according to a disaster situation. In this paper, to verify what kind of evacuation behavior of a local government and local residents decrease the damage in flood disasters we add new function of calculation of the movement of a pedestrian in a flooded area to our pedestrian simulator CrowdWalk.

1. はじめに

日本国内の災害リスクは、東日本大震災によって地震が注目されているが、津波、台風、水害、土砂災害といった様々なリスクが挙げられる。特に、近年では台風が大型化し、ゲリラ豪雨の頻度が増しているため、各地で水害・土砂災害に関するリスクが高まってきている。広域に被害を与える災害が発生した場合、被害軽減のために、避難をおこなうことによって危険な状況から人々を遠ざけることは安全確保の観点からシンプルで有効な手段である。水害・土砂災害から住民を守るためには、状況が深刻化する前に安全な地域へ避難を完了させることが望ましいが、現実的には容易ではなく、状況に応じた避難行動を実施することも重要である。

これまでの災害対応においては、国や自治体といった公的な機関が前面に立って、防災の全てを担う傾向が強かった。国や自治体が備えている防災力を超える大規模な災害が発生した場合には、これまでは公助に頼る部分が大きかったが、各市民の生命を守るための共助や自助の枠組も形成する方向にシフトしつつある。このような公助、共助、自助のある枠組の中で、各種災害に対して有効な対応を把握しておくことは、公的機関の自治体や消防だけではなく、市民にとっても重要である。

本研究では、このような傾向を踏まえて、避難誘導を含む適切な対策を立案し、効果を共有するためのツールとして、歩行者シミュレーションを活用することを考える。いくつかの自治体においては既にシミュレーションを用いた防災教育や避難計画の評価が行われている事例もある[桑沢 11, 桑沢 08]。本稿では、河川氾濫に対する避難状況を扱うために、歩行者シミュレータ CrowdWalk [山下 12b] に河川氾濫の浸水データとの連成機能を付加し、実際の都市における河川氾濫からの避難に適用した事例を紹介する。

2. 河川氾濫からの避難

河川の周辺地区における浸水は、氾濫のメカニズムによって外水氾濫と内水氾濫に分類することができる[川池 08]。

外水氾濫は、堤防の決壊や河川水位の上昇によって起こる氾濫である。河川から大量の水が短時間で市街地に流れ込むため、家屋の倒壊や流出といった大規模な被害を引き起こす可能性が高い。しかし、近年の堤防整備により外水氾濫の発生頻度は下がってきている。

内水氾濫は、市街地に降った雨が河川へ排出できずに、下水道や水路から溢れることによって起こる氾濫である。雨量が下水道や雨水管の容量やポンプ施設の能力を超えてしまうと、建物や道路が水に浸かってしまう。近年ではゲリラ豪雨による集中的な降雨によって内水氾濫の発生頻度が上がってきている。

内水・外水氾濫が発生する可能性がある場合、地域住民の取りうる避難行動には、水平避難、垂直避難の二つが挙げられる[内閣]。一つは、安全が確保された避難所に移動する水平避難である。従来から想定されている一般的な避難方法であるが、避難開始が遅れて周辺地域が既に浸水している場合には、避難所自体が安全でも移動中に流されてしまう恐れがある。

もう一つは、マンションなどが自宅の場合には上層階に移動する垂直避難である。切迫した状況下では、屋外への避難自体が危険なことがあるため、自宅や隣接建物の2階等へ緊急的に一時避難し、救助を待つことも選択肢として考えられる。

3. 歩行者シミュレータへの機能追加

自治体が避難勧告・避難指示を発令し、避難を促す場合でも、地域住民自身の判断で避難を開始する場合でもどのような避難行動が安全で効果的であるかを検証することは必要である。

水害に限定しても、想定される被害状況は多様であり、一概に水平避難と垂直避難のどちらの避難行動が優れているかは判断できない。浸水による人的な被害状況を定量的に評価するために、一次元空間モデルを実装した歩行者シミュレータ CrowdWalk に浸水状況の時間変化データとの連成機能を追加する。浸水状況の時間変化データと歩行可能領域を重畳し、浸水状況が歩行者の移動速度に与える影響を実装する。

連絡先: 山下 倫央, 産業技術総合研究所 サービス工学研究センター, 〒 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2, Tel : 029-862-6722, Fax: 029-862-6548, E-mail: tomohisa.yamashita@aist.go.jp

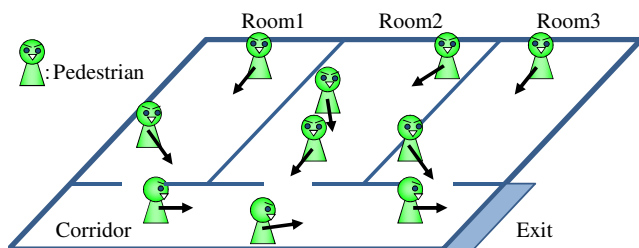


図 1: 歩行状況の例

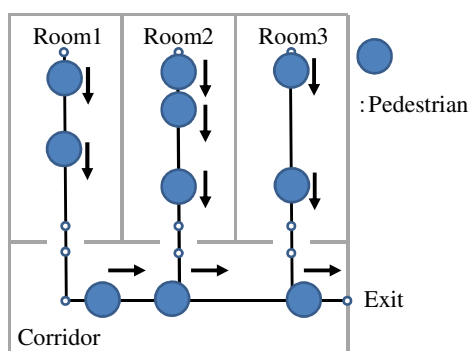


図 2: 図 1 で表される状況を一次元空間モデルで表現した例.

3.1 歩行者シミュレータ CrowdWalk

我々の開発を進める歩行者シミュレータ CrowdWalk は、空間モデルとして一次元空間モデルを採用している。

一次元空間モデルは、リンクとノードを用いて歩行動線を単純化して表現している。歩行者が移動可能な領域をリンクで表現し、リンクがノードで連結される。そのため、一次元空間モデルでは、廊下や部屋がリンクとして扱われる。

図 2 は、図 1 で示される状況を一次元空間モデルで表現したものである。歩行者密度が比較的高い場合、歩行者は先行する歩行者の直後を歩き、列を形成することが多い。この列の形成を車両用の道路におけるレーンと対応させ、仮想レーンと定義する。この仮想レーンは、廊下や部屋などを表すリンク上では並列して形成されると考え、リンクは複数の仮想レーンを持つことができるとする。

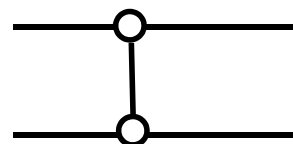
歩行者シミュレータ CrowdWalk は、ネットワークマップエディタ、シミュレーションエンジン、3D ビューアの 3 つから構成される。シミュレーションエンジンは、ユーザの指定した追従モデル、密度モデル、期待密度モデルのいずれかを用いて、全歩行者の位置を更新する。シミュレーションエンジンの特徴として、3 つの移動モデルから一つを選択可能なことが挙げられる。一次元空間モデルにおける歩行者の移動を決定する追従モデル、密度モデル、期待密度モデルの三つの移動モデルが実装されている。

追従モデルは一方方向に流れる歩行者群の動きを扱うことに適している [山下 12a]。密度モデルは対向流を含む歩行者群の動きを扱うことに適している [山下 12b]。期待密度モデルは、順方向と逆方向の対向流を含む歩行者群の動きを再現精度は下がるものの密度モデルよりも高速に計算することができる [山下 12b]。

Mesh representation for flooded area

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45
46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	58	59	60	61	62	63

One-dimensional space model for pedestrian movement



overlay

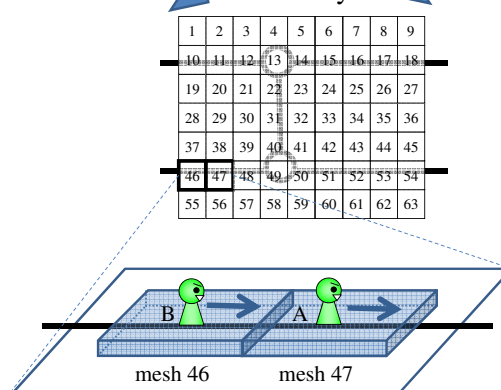


図 3: 一次元空間モデルと浸水データの重畳.

表 1: 各属性の歩行限界水深および限界流速と自由流速度

	限界水深 (m)	限界流速 (m/s)	自由流速度 (m/s)
成人男性	0.7	2.5	1.5
成人女性	0.5	2.0	1.3
子供・高齢者	0.3	1.5	1.0

3.2 浸水エリアの表現

河川が氾濫し、浸水が発生する範囲は一次元空間モデルにおける歩行可能領域と重ね合わせて、浸水が歩行者へ与える影響を表現する。図 3 に示されるように、浸水想定範囲をメッシュ状の区画に区切り、各メッシュにおける浸水データを設定する。各メッシュに対する浸水データは浸水深と流速の二つを想定している。歩行可能領域を表すリンクがメッシュと重複している場合に、そのメッシュに割り当てられている浸水深や流速が歩行者の歩行速度に影響を及ぼす。浸水データである浸水深や流速は時間変化することを前提とし、メッシュ内での浸水深や流速は同一とする。

図 3 では、あるリンクにいる歩行者が重複するメッシュの浸水データから影響を受ける例を示している。歩行者 A は mesh47 と重複しているリンクにいるため、歩行速度を算出する際に mesh47 の浸水データに基づく影響を受ける。同様に歩行者 B は mesh46 の浸水データに基づく影響を受ける。

3.3 浸水データとの連成

津波や河川氾濫による浸水深や流速によって歩行速度は低下する。本論文では、浸水による歩行速度の減衰に関して、岡本

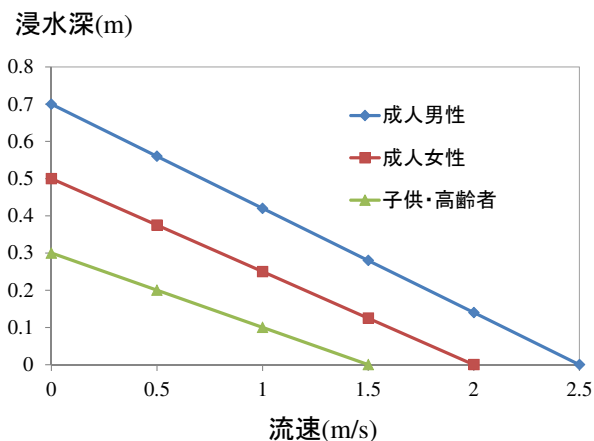


図 4: 浸水エリアにおける水深と流速による自由流速の減衰モデル

ら [岡本 07] が文献 [利根 95] に基づいてモデル化した設定を利用する。表 1 に示される歩行限界水深および限界流速と自由流速の設定と、図 4 に示される自由流速の減衰モデルを利用する。

自由流速の減衰率は、図 4 に示される直線を用いて算出する。成人男性の場合であれば、(0, 0.7), (2.5, 0) の二点間を結ぶ直線を $A(y = 0.28x + 0.7)$ とすると、歩行者のいるメッシュの浸水深と流速からなる点 P が直線 A よりも上方にあれば、そのメッシュにいる歩行者は移動不可能となる。成人女性、子供・高齢者の場合も同じく、メッシュの浸水深と流速からなる点 P が直線よりも上にある場合はそのメッシュでは移動不可能となる。

成人男性の場合、メッシュの浸水深と流速からなる点が直線 A よりも下方にある場合、メッシュの浸水深と流速からなる点 P と直線 A の距離を d 、直線 A と直線 $A'(y = 0.28x)$ の距離を D とすると、そのメッシュにおける自由流速の減衰率は $1 - d/D$ と表すことができる。成人男性の場合、自由流速が $1.5 (m/s)$ と設定されているので、 $1.5(1 - d/D)$ がそのメッシュにおける自由流速となる。

浸水の影響を考慮する場合には、自由流速は浸水深と流速を引数とする動的なパラメータとなる。各移動モデルにおける自由流速の参照のされ方に関しては、文献 [Yamashita 13] を参照されたい。

4. 適用事例

浸水状況の時間変化データと歩行可能領域を重畳し、歩行者の速度減衰をする機能の適用事例を紹介する。本稿では、適用事例の対象として福岡県北九州市小倉北区を取り上げ、図 5 に示される JR 小倉駅を含む南北 3.9km・東西 3.4km のエリアを取り扱う。地図の中央を流れているのが紫川で、紫川の東側が河川氾濫想定地域に想定されている。

歩行可能領域に関しては、アルプス社が発行したナビゲーション道路地図に記載されている道路データから道路を歩行可能領域として抽出し、CrowdWalk 用のネットワークマップファイルに変換する。

浸水エリアに関しては、北九州市が公開している防災情報



図 5: 適用事例の対象：福岡県北九州市小倉北区 (JR 小倉駅を含む南北 3.9km・東西 3.4km のエリア)

マップ [北九] に記載されている河川氾濫想定地域に基づいて浸水エリアとして編集する。図 5 に示される地域内の河川氾濫想定地域を $25m \times 20m$ のメッシュ 1,469 個で表現した。^{*1} 図 6 は、歩行可能領域と浸水エリアの重畳したものの一部を示している。

図 7 は、テスト用の浸水データを利用して、CrowdWalk の 3D ビューアで浸水地域を描画した例を示している。図中の青色の濃淡が浸水データの浸水深を表しており、濃ければ濃いほど浸水深が深いことを表している。図 7 は、図の中央部分にある紫川の東岸において、浸水が進んだ状況を示している。

図 7 に示される浸水エリア付近に避難者 2,000 人を配置する。避難先は浸水エリアから遠ざかる北東方向と南方向の二か所を設定する。

浸水データと連携した歩行者シミュレータの利用例として、避難開始の遅れが避難完了時間と避難完了者数に与える影響を検証例を示す。今回の浸水データは内水氾濫を想定しているため、浸水速度が比較的速い状況を扱っている。図 8 は、各避難開始時間に対する避難完了時間と避難完了者数を示している。図中のグラフは、横軸が時間を表し、縦軸が避難を完了者数を表している。各系列は避難開始時間を表しており、ここでは 5 つの避難開始時間 (18:00, 18:05, 18:10, 18:15, 18:20) が設定されている。グラフからは避難開始が 18:00 から遅れるほど、避難完了者数が減ってしまう、つまり浸水深の深い場所で移動不能になる被災者が増えてしまう状況が示されている。

5. おわりに

本稿では、浸水による人的な被害状況を定量的に評価するために、一次元空間モデルを実装した歩行者シミュレータ Crowd-

^{*1} 河川氾濫想定地域は防災情報マップに基づいて編集したデータであるが、浸水エリア、浸水速度、浸水深等のデータは架空のデータである。



図 6: 歩行可能領域と浸水エリアの重畳

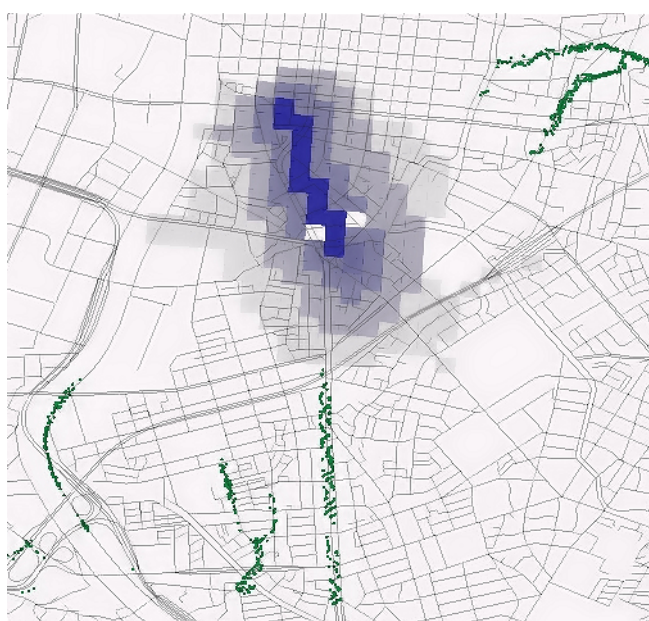


図 7: 紫川東岸における浸水状況 (浸水地域拡大後 10 分後のスクリーンショット)

Walk に追加した浸水状況の時間変化データとの連成機能を概説した。浸水状況の時間変化データと歩行可能領域を重畳し、浸水状況が歩行者の影響を算出する機能を実装した。福岡県北九州市小倉北区を対象として、浸水状況の時間変化データと歩行者シミュレータの連成機能を利用して、浸水エリアが拡大する中での避難状況をシミュレートした。

今回のシミュレーションでは、道路データには実際の地図データを用いたが、浸水エリアや浸水速度といった浸水データや避難者の初期位置、避難先、避難経路といったデータには架空のデータを用いた。避難方法に関しても、全員が避難所に移動する水平避難を採用しているが、実際の避難においては垂直避難が有効である場合も多いため、水平・垂直避難が選択可能な状況を考慮する。今後は、これらのデータに関して、自治体や消防機関と連携を進めることで、より実際の避難状況に近いデータを収集してシミュレーションに適用し、河川氾濫に対する避難計画の効果の検証を進める。

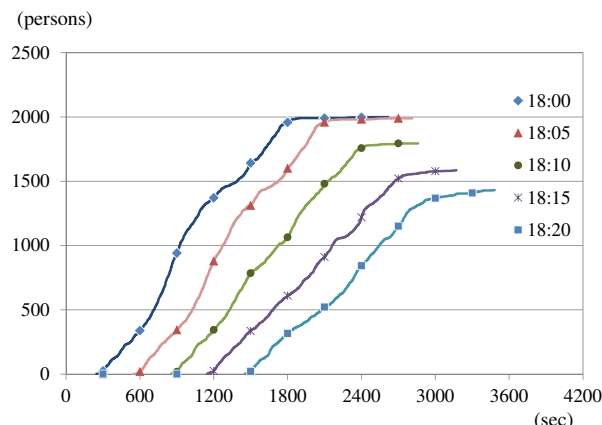


図 8: 避難開始の遅れが避難完了時間と避難完了者数に与える影響

参考文献

- [Yamashita 13] Yamashita, T., Okada, T., and Noda, I.: Implementation of Simulation Environment for Exhaustive Analysis of Huge-scale Pedestrian Flow, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 6, No. 2, pp. 137–146 (2013)
- [岡本 07] 岡本 睦, 目黒 公郎: 避難行動シミュレーションに基づく津波避難困難度マッピングシステムの開発, 生産研究, Vol. 59, No. 3-2, pp. 37–40 (2007)
- [桑沢 08] 桑沢 敬行, 片田 敏孝, 及川 康, 児玉 真: 洪水を対象とした災害総合シナリオ・シミュレータの開発とその防災教育への適用, 土木学会論文集 D, Vol. 64, No. 3, pp. 354–366 (2008)
- [桑沢 11] 桑沢敬行, 片田敏孝: 大都市大規模水害を対象とした避難対策に関するシミュレーション分析, 日本災害情報学会第 13 回研究発表大会予稿集, pp. 37–42 (2011)
- [山下 12a] 山下 倫央, 副田 俊介, 大西 正輝, 依田 育士, 野田 五十樹: 一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発とその応用, 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 7, pp. 1732–1744 (2012)
- [山下 12b] 山下 倫央, 岡田 崇, 野田 五十樹: 大規模群集流動の制御に向けたシミュレーション環境の構築, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム JAWS (Joint Agent Workshop and Symposium) 2012 予稿集 (2012)
- [川池 08] 川池 健司, 中川 一, 今井 洋兵, 山田 裕司: 都市域の内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概要集, No. 51 B, pp. 591–601 (2008)
- [内閣] 内閣府: 大雨災害における避難のあり方等検討会
- [北九] 北九州市: 北九州市防災情報マップページ 小倉北区
- [利根 95] 利根川研究会: 利根川の洪水一語り継ぐ流域の歴史, 山海堂 (1995)