

河川氾濫に対する避難計画の検証に向けた 歩行者シミュレータの機能拡張

山下 倫央^{1,†1,a)} 岡田 崇^{1,†1,b)} 野田 五十樹^{1,†1,c)}

概要： 水害・土砂災害から住民を守るためには、適切なタイミングで対象地域に避難勧告等の発令することが求められる。状況が深刻化する前に安全な地域へ避難を完了していることが望ましいが、状況に応じた避難行動を実施することも重要である。本稿では、河川が氾濫し、浸水が発生する可能性がある状況において、どのような避難行動を取ることが被害軽減につながるかを検証するために、新たに追加した歩行者シミュレータ CrowdWalk と浸水データの連成機能に関して概説する。

キーワード： 歩行者シミュレータ, 浸水地域, 連成シミュレーション, 避難計画

Function Enhancement of The Pedestrian Simulator for Verification of Evacuation Plan against Urban Flood Disaster

TOMOHISA YAMASHITA^{1,†1,a)} TAKASHI OKADA^{1,†1,b)} ITSUKI NODA^{1,†1,c)}

Abstract: 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.

Keywords: pedestrian simulation, flooded area, coupled simulation, evacuation plan

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に東日本大震災が起きた際には、東北地方沿岸部を中心として、死者・行方不明者計約 1 万 9 千人という深刻な被害が発生した。特に津波による被害に関

しては、各地で堤防が築かれていたにもかかわらず、地域住民がインフラを過信したが故の避難開始の遅れなどもあり、結果として被害の軽減にはコストに見合うだけの効果を発揮しなかった。

これまで災害に対して公的な機関が前面に立ち、インフラの整備を行い、国や自治体が防災の全てを担う傾向が強かった。しかし、3.11 以降、北九州市防災会議 [1] の地域防災計画の変更に見られるように、災害の規模が国や自治体が備えている防災力を超えた場合でも、各市民が最低限自分の生命を守るようにするために、公助、共助、自助の枠組を形成する方向にシフトしつつある。今後広まるであろうこのような枠組の中で、公的機関である自治体や消防が、どのような災害であれば、どの程度の対応を取るこ

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, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan

^{†1} 現在, 科学技術振興機構 さきがけ
Presently with JST, PRESTO

^{†2} 現在, 科学技術振興機構 CREST
Presently with JST, CREST

a) tomohisa.yamashita@aist.go.jp

b) takashi.okada@aist.go.jp

c) i.noda@aist.go.jp

とができるか、限られた機材や人的資源でどこまで地域住民の支援を行うことができるのか、を把握することが重要になってきている。

広域に被害をもたらす災害が発生した場合、危険な状況から人々を遠ざける避難は被害軽減のために単純かつ有効な手段である。日本全国を対象とした場合、地震だけではなく、津波、台風、水害、土砂災害といった災害のリスクがある。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。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。

避難誘導を含む適切な対策を立案するためには、歩行者シミュレーションは非常に有用なツールとなる。そのため、歩行者シミュレーションによる避難計画の立案支援が適用可能な状況は数多くある。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 [2], [3], [4]。本稿では、このような背景を踏まえて、河川氾濫や浸水に対する避難計画を検証するために歩行者シミュレータ CrowdWalk [5] に付加する浸水データとの連成機能に関して概説する。

2. 氾濫における避難

2.1 氾濫の種類

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 [6]。

外水氾濫は、堤防が決壊したり、河川の水位が上昇すること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。

2.2 取りうる避難行動

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 [7]。

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、避難開始が遅れてしまい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あって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の機能拡張

自治体が避難勧告を発令し、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状況において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。ここでは特に、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する。

3.1 歩行者シミュレータ CrowdWalk

我々の開発した一次元空間モデルを実装した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。CrowdWalk は一次元空間モデルにおける追従モデルのみを実装した歩行者シミュレータ NetMAS [8] の後継にあたる。特に、ネットワークマップエディタと3D ビューアでは継承されている部分が多い。

CrowdWalk のユーザは、ネットワークマップエディタを使って歩行者の移動可能領域を記述するネットワークマップファイルを編集する。3D ビューアは、歩行者の動きを三次元表示し、歩行速度や属性によって歩行者の色を変更することもできる。

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を用いて、全歩行者の位置を更新する。また、シミュレーションエンジンは、ネットワークマップファイル、歩行者データファイル、シミュレーション設定ファイルが初期の入力ファイルとなる。歩行者データファイルには、歩行者の発生場所と時間、経由地(複数指定可)、目的地が記述されている。シミュレーション設定ファイルには、利用する歩行者の移動モデル、1シミュレーションステップに対応する時間、シミュレーションの終了条件、出力データの種類の記述されている。

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3つの移動モデルが実装されて

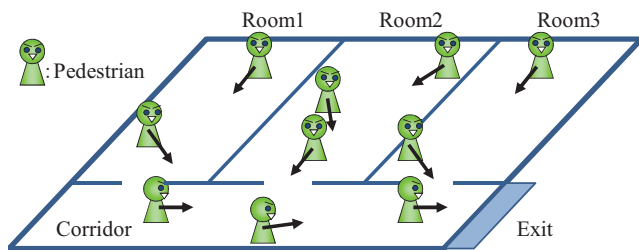


図 1 歩行状況の例

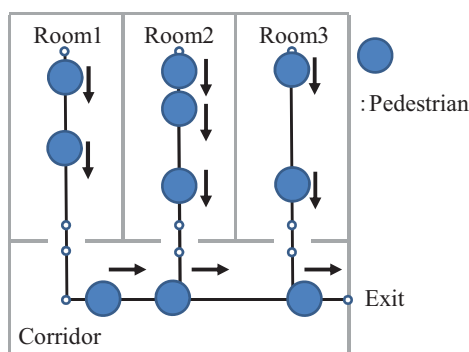


図 2 図 1 で表される状況を一次元空間モデルで表現した例。

いる。

追従モデルは一方に流れる歩行者群の動きを扱うことに適している [8]。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 [5]。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 [5]。

さらに、ユーザがどの移動モデルを選択しても、シミュレーションエンジンの入出力データの形式は変わらない。CrowdWalk のユーザはシミュレーション設定ファイルで利用するモデル名を変更するだけで、移動モデルを切り替えることができる。

また、煙や有毒ガスの拡散といった時系列データと連携する機能は既に実装されている。各タイムステップでの歩行者の曝露量を計算して、曝露量に応じた歩行速度の減衰や行動停止といった行動変化を実現することができる [9]。浸水データとの連携機能を実現するために、既に実装されているガス拡散の時系列データとの連携機能を応用する。

3.1.1 一次元空間モデル

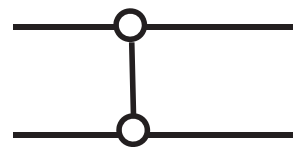
一次元空間モデルは、リンクとノードを用いて歩行動線を単純化して表現した空間モデルである。歩行者が移動可能な領域をリンクで表現し、リンクがノードで連結される。そのため、一次元空間モデルでは、廊下や部屋がリンクとして扱われる。

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、

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

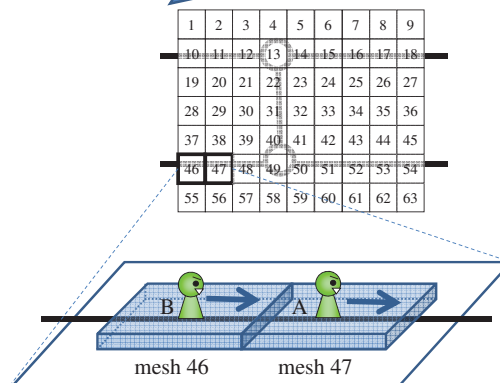


図 3 一次元空間モデルと浸水データの重畳。

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たと考え、リンクは複数の仮想レーンを持つことができるとする。

このため、一次元空間モデルはリンク上における順・逆の二方向しか表現できないため、開けた場所で多方向に移動する歩行者群がすれ違うような状況を扱うことには適していない。

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。

CrowdWalk は各メッシュにおける浸水深や流速の時間変化を表す浸水データを外部データとして読み込むだけ

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

浸水深(m)

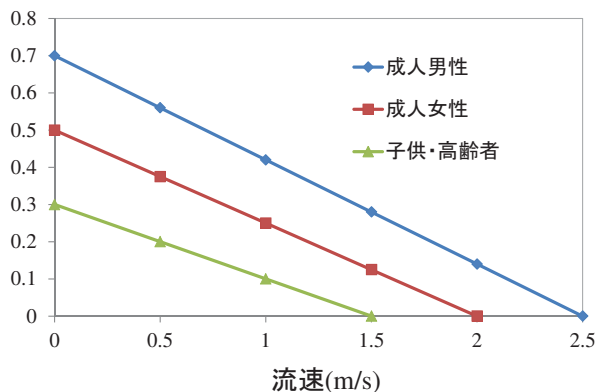


図 4 浸水エリアにおける水深と流速による自由流速度の減衰モデル

で、各メッシュにおける浸水深や流速の推移の計算は行ない。CrowdWalk が読み込む浸水データファイルの形には、CSV を採用している。浸水データが記述されたファイル内では、メッシュ i の浸水深と流速はそれぞれ $2i$ 目と $2i+1$ 番目の列に格納され、シミュレーションステップが行番号に対応している。例えば、10 列目と 11 列目のデータはメッシュ ID=5 のメッシュに浸水深と流速に対応し、その 10 行目のデータは 10 ステップ目の浸水深と流速を表している。

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、岡本ら [10] が文献 [11] 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度の設定と、図 4 に示される自由流速度の減衰モデルを利用する。

自由流速度の減衰率は、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



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)

$A'(y = 0.28x)$ の距離を D とすると、そのメッシュにおける自由流速度の減衰率は $1 - d/D$ と表すことができる。成人男性の場合は、自由流速度が $1.5 (m/s)$ と設定されているので、 $1.5(1 - d/D)$ がそのメッシュでの自由流速度となる。

各移動モデルを用いて各タイムステップにおける移動速度を算出する際には、自由流速度が静的な定数として用いられてきたが、浸水の影響を考慮する場合には、自由流速度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度の参照のされ方に関しては、文献 [5] 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、CrowdWalk の 3D ビューア状に浸水状況を描画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図 5 に示されるエリアの道路を抽出した後、CrowdWalk 用のネットワークマップファイルに変換する。図 6 は、対象エリアのネットワークマップファイルをネットワークマップエディタで表示したものである。

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マップ [12] に記載されている河川氾濫想定地域に基づ



図 6 対象エリアの歩行可能領域

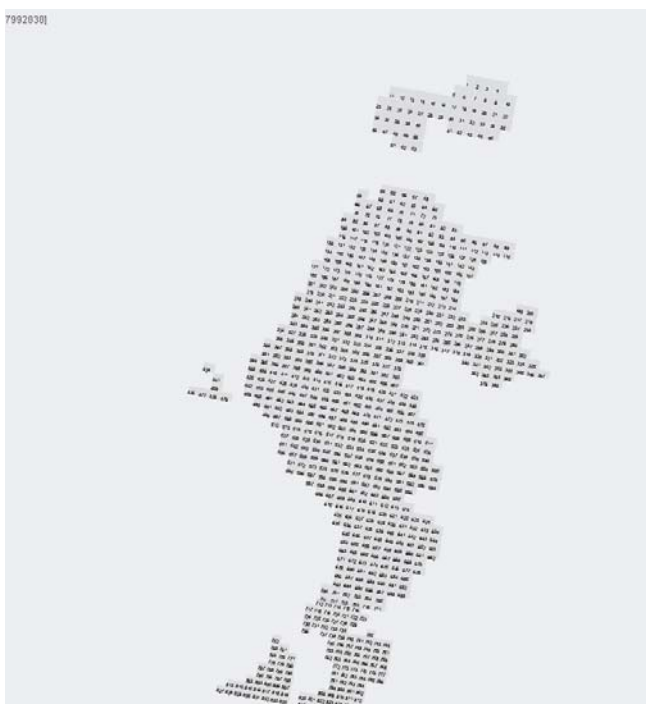


図 7 河川氾濫想定地域に基づく浸水エリア (図 6 に対応)

いて浸水エリアとして編集する。図 7 は、対象エリアの浸水エリアを表示したものである。このメッシュのサイズは 20 メートル四方で、図 7 に示される河川氾濫想定地域は 1,469 個のメッシュから構成されている。

図 8 は、図 6 と図 7 の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。浸水エリアに含まれる各メッシュには ID が割り当てられており、シミュレータの利用者は各メッシュの浸水データを設定する。



図 8 歩行可能領域と浸水エリアの重畳 (一部)

図 9 と図 10 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 9 は、図の中央部分にある紫川の東岸において、浸水エリアはごく一部で、濃度の高い部分も見当たらない初期の浸水が見られる状況を表している。図 10 は、図 9 の状況からさらに浸水が進み、紫川の東岸の広いエリアが浸水した状況を示している。^{*1}

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 CrowdWalk 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取り上げた。福岡県北九州市小倉北区を対象として、どのようなデータを用いてシミュレーションモデルを構築するかを示し、浸水エリアが拡大する状況を可視化した例を示した。浸水状況の時間変化データとの連成機能の解説に留まったが、今後はこの機能を利用して実際の河川氾濫時の避難計画の検証を進める。

参考文献

- [1] 北九州市：北九州市地域防災計画 平成 25 年 1 月修正案 (2013).
- [2] 桑沢敏行，本間基寛，片田敏孝：大規模河川を対象とした洪水避難対策の総合シミュレーション分析，土木計画学研究講演論文集，Vol. 37, No. CD-ROM (272) (2008).
- [3] 桑沢敏行，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).
- [4] 桑沢敏行，片田敏孝，及川 康，児玉 真：洪水を対象

^{*1} 今回表示に利用した浸水データは架空のデータである。紫川は、通常の川の水が流れている低水路が低く、川底が周辺の土地よりも低い。そのため、外水氾濫が起きにくく、実際にはこのような広域的な浸水は起こりにくく考えられている。

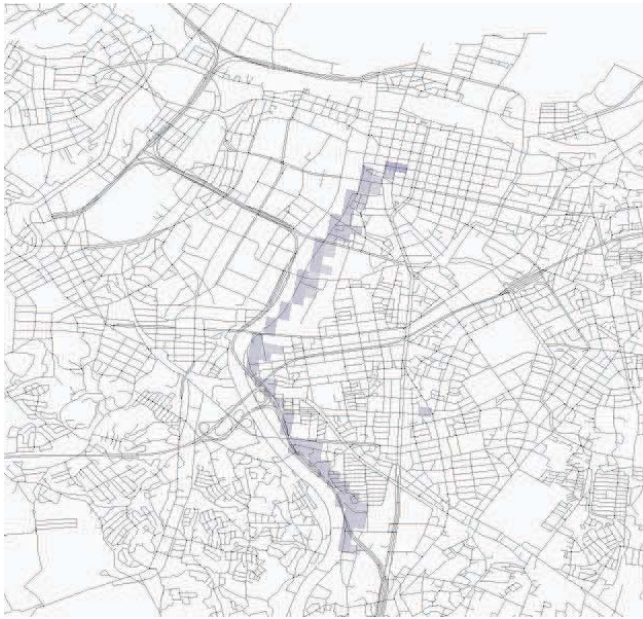


図 9 紫川東岸における浸水状況 (初期)

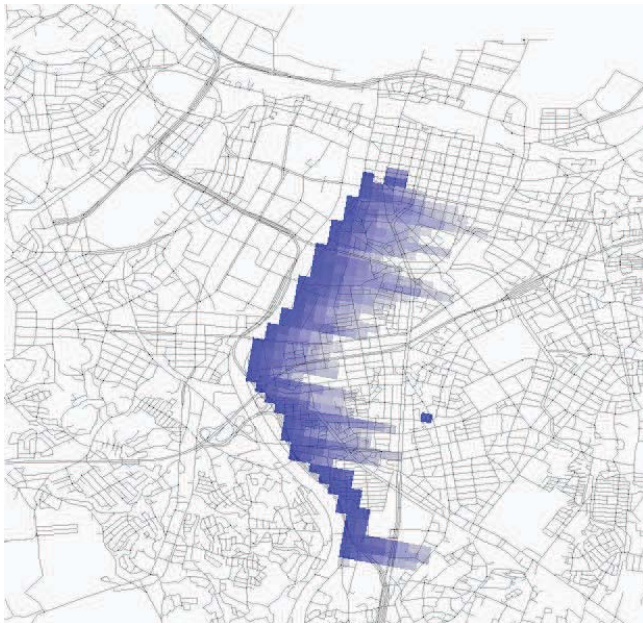


図 10 紫川東岸における浸水状況 (浸水地域拡大後)

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).

- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 内閣府: 大雨災害における避難のあり方等検討会, 内閣府 (オンライン), 入手先 <http://www.bousai.go.jp/3oukyutaisaku/kentoukai/index.html> (参照 2013-02-06).
- [8] 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).

- [9] Yamashita, T., Soeda, S. and Noda, I.: Evacuation Planning Assist System with Network Model-based Pedestrian Simulator, *Proceedings of 12th International Conference on Principles of Practice in Multi-Agent Systems (PRIMA)*, Vol. 5925, pp. 649–656 (2009).
- [10] 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).
- [11] 利根川研究会: 利根川の洪水—語り継ぐ流域の歴史, 山海堂 (1995).
- [12] 北九州市: 北九州市防災情報マップページ 小倉北区, 北九州市 (オンライン), 入手先 <http://www.mizukankyokan.jp/bosaijohomap/kokurakita.pdf> (参照 2013-02-06).