

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

山下 倫央^{1,2,a)} 副田 俊介³ 大西 正輝¹ 依田 育士¹ 野田 五十樹¹

受付日 2011年10月25日, 採録日 2012年4月2日

概要: 近年, オフィスビルや商業施設の大型化, 高層化が進んでいるが, このような施設で大規模な避難を行う際には, 避難対象者は数千人となることもあり, 的確な避難誘導が必要とされる. しかし, 大規模な避難行動は多くの要素が複雑に関連し, 容易に扱うことができないため, 避難誘導計画の立案・検証には高速計算が可能な避難シミュレータによる支援が必要とされている. 本論文では, 歩行者同士の干渉や障害物回避の計算を簡約化し, 移動状況の再現精度を落とすことなく, 避難過程を高速に計算するために一次元歩行者モデルを提案する. さらに, 一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータ NetMAS の開発を行い, 実際の避難訓練を実測した結果と比較することで一次元歩行者モデルの有効性を検証する. NetMAS の応用として, 大規模な複合商業施設における避難を扱い, 避難効率に影響を与える要因を検証する. 多数の避難条件を想定したシミュレーションを行い, その結果に統計的手法を適用することで NetMAS の有効性を確認する.

キーワード: 避難シミュレーション, 群集流動, 避難計画, 歩行者モデル, 空間モデル

Development and Application of High-speed Evacuation Simulator with One-dimensional Pedestrian Model

TOMOHISA YAMASHITA^{1,2,a)} SHUNSUKE SOEDA³ MASAKI ONISHI¹ IKUSHI YODA¹
ITSUKI NODA¹

Received: October 25, 2011, Accepted: April 2, 2012

Abstract: Recently, newly constructed office buildings and commercial facilities are getting larger. An emergency evacuation plan leading people away from dangerous area quickly and smoothly is required because thousands of workers and visitors use these large-scale facilities. However, it is not easy to deal with complicated evacuation process involving many factors. Therefore, an evacuation simulation has been required for supporting verification of evacuation plan. In this paper, we proposed the one-dimensional pedestrian model, which simplifies the representation of space for high-speed calculation. We developed evacuation simulator NetMAS with the one-dimensional pedestrian model. The validity of the model was confirmed by comparing simulation results with data observed from an actual evacuation drill. As application of our simulator, we took up the evacuation in a large-scale commercial complex, and verified the effective factors on the efficiency of evacuation. The effectiveness of our simulator NetMAS was confirmed by running a lot of scenarios of simulations and applying statistical method.

Keywords: evacuation simulation, flow of crowd, evacuation plan, pedestrian behavior model, spatial data model

¹ 独立行政法人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

² 科学技術振興機構さきがけ
Japan Science and Technology Agency (JST), Precursory

Research for Embryonic Science and Technology (PRESTO),
Chiyoda, Tokyo 102-0076, Japan

³ グーグル株式会社
Google Japan, Minato, Tokyo 106-6126, Japan

^{a)} tomohisa.yamashita@aist.go.jp

1. まえがき

近年の建築技術の向上とともに、オフィスビルや商業施設の大型化、高層化が進み、多くの人々が同時にこのような複合施設を利用する機会が増えている。大規模な複合施設で火災や地震のような自然災害やテロのような人為的災害が発生した場合には、避難者が意図せずに特定経路へ集中したり、遠回りしたりしてしまい、深刻な被害が生じる危険性が高い。特に、不特定多数の利用者がいる複合施設では、利用者が施設の構造に不慣れであることが想定され、利用者を危険な状況から迅速に遠ざける的確な避難誘導が必要とされている。また、大型複合施設では避難対象者は数千人となることも少なくないため、利用者への避難経路の指示や避難開始の指示の内容やタイミングが避難を完了するまでの時間に大きく影響する。

そのため、各避難者の動きを計算機上で再現する歩行者シミュレーションがさかんに研究されており、避難経路の確認や避難誘導計画の安全検証に用いられるようになってきている。歩行者シミュレーションでは、各歩行者が周辺の歩行者や障害物を回避しつつ目的地方向に進む移動過程を計算し、歩行者群全体の動きを再現している。このように歩行者シミュレーションで避難行動を再現することで、避難に使われる通路幅が混雑発生に与える影響や避難経路の選択が避難完了時間に与える影響等を定量的に扱うことができる。特に大規模な施設では多くの避難者がおり、避難者全体の取りうる避難経路群の数が非常に多いため、避難誘導計画の立案・検証には避難者の経路選択に重点を置いた高速計算が可能な避難シミュレータが必要とされる。

本論文では歩行者の移動状況の再現精度を落とすことなく歩行者同士の干渉や障害物回避の計算を簡約化し、避難過程を高速に計算するための、一次元歩行者モデルを提案する。そして、一次元歩行者モデルを利用した避難シミュレータ NetMAS を開発する。さらに、NetMAS を用いた応用例として、大規模な複合商業施設における避難を扱い、避難効率に影響を与える要因を検証する。

本論文は次のように構成される。2章では従来モデルと提案する一次元歩行者モデルを比較し、既存の歩行者シミュレータを概観する。3章において一次元歩行者モデルの詳細を明らかにし、4章では一次元歩行者モデルを用いた避難シミュレータ NetMAS について説明し、実際の避難訓練によって評価する。5章では NetMAS を用いて避難条件が異なる避難シナリオの比較と重回帰分析を用いた分析結果を説明し、最後に6章で本論文の結論を述べる。

2. 関連研究

本章では、従来研究における歩行者モデルと提案する一次元歩行者モデルを比較し、既存の歩行者シミュレータを概観する。

2.1 歩行者モデル

近年、数多くの歩行者シミュレーション [1], [2] が開発されているが、それらの多くは歩行者が移動する空間の表現方法として、連続空間上を歩行者が移動する二次元連続空間モデル [3], [4], [5], [6], [7] や空間をグリッド状に分割したセル上を歩行者が移動するセルオートマトンモデル [8], [9], [10] を採用している。

図 1 に、二次元連続空間モデル、セルオートマトンモデル、本論文で提案する一次元歩行者モデルで同一の対象(図 1(a)) をモデル化している例を示す。図 1(b) に示す連続空間モデル上での移動モデルでは、歩行者が二次元平面上で他の歩行者や障害物を回避したり、パーソナルスペースを確保したり、目的地方向へ移動するという条件を満たす移動方向、移動距離や移動速度を算出している。連続空間モデルにおける歩行者の移動モデルとして、連続空間上ではほかの歩行者や障害物がもたらす作用を集積して速度を決定するポテンシャルモデル [3], [4]、近くの歩行者や障害物から反発力を受けて加速度を決定する Social Force モデル [5]、歩行者間のパーソナルスペースの重複範囲から速度を決定するモデル [7]、要素バネと仮想バネを導入して歩行者の加速度を決定する楕円形個別要素法 [6] 等があげられる。これらの移動モデルでは、0.1 秒程度を 1 シミュレーションステップとして歩行者の移動を精緻に計算するため、多くの避難者が密度の高い状況にいる場合には移動に関する計算量が増加し、高い再現精度が期待できるものの計算に時間がかかる。

図 1(c) に示すセルオートマトンモデルでは、歩行者が移動可能の判定対象となるセルの数が歩行者のいるセル周辺のノイマン近傍の 4 個またはムーア近傍の 8 個と限られている。歩行者の移動モデルでは、目的地方向の空いたセ

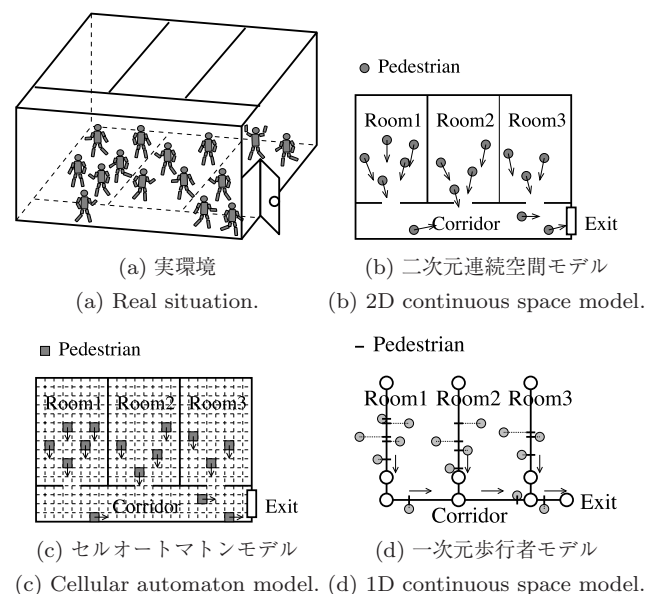


図 1 空間モデル

Fig. 1 Space model.

ルへ確率的に移動したり、過去の通過した歩行者の移動傾向を模倣するといった比較的単純なアルゴリズムが採用されているため [8], [9], [10], 移動の計算に負荷がかからない場合が多い。実際の計算機上で計算する場合には、歩行者が移動可能な全領域を 50 cm 四方程度のセルに分割し、歩行者の有無、周囲のセルとの隣接状況、歩行者の通過履歴等を計算機のメモリ上に確保する。避難の対象とする領域の拡大に従ってセル数が二乗に比例して増加するため、高層ビル群や大規模な商業施設といった広範囲にわたる避難を扱う場合には必要なメモリの確保が困難になる場合がある。

連続空間モデルやセルオートマトンモデルでは扉の幅や通路上の障害物に応じた流率を算出できるため、レイアウトの形状が混雑発生に与える影響の評価に適している。本論文で提案する図 1 (d) に示される一次元歩行者モデルは他の空間モデルとは異なり、歩行者の移動可能範囲が長さを持つリンクとして表現され、部屋や廊下はリンクとして扱われる。移動モデルとして、直前の歩行者との距離から移動速度を決定する速度関数を採用する。一次元歩行者モデルは二次元平面上における近傍の歩行者の判定や移動方向を決定する計算過程を省略できるため、様々な避難誘導計画を短時間で検証することができる。歩行者の二次元平面上での歩行者間の相互作用を一次元に写像しているため、二次元連続空間モデルやセルオートマトンモデルと比較してボトムアップな混雑現象の再現精度という点では劣る。たとえば、一次元歩行者モデルでは渋谷駅前のスクランブル交差点で見られる対向流における櫛状の列が形成される過程やその際の速度減衰、多数の避難者が扉に殺到した際の一時的に流量が低下するアーチ現象を直接的に再現することはできない。しかし、これらの現象も発生条件とその影響や継続時間が明確であれば、一次元歩行者モデルに織り込むことは可能である。

2.2 歩行者シミュレータ

本節では歩行可能領域の編集用のエディタや試行結果の可視化用のビューアを備えた統合的なシミュレーション環境としての歩行者シミュレータを概観する。

シミュレーションを行うためには歩行者が移動可能な領域に関する空間データ、各歩行者の発生時間・位置や移動経路、最大歩行速度やパーソナルスペース等に関する歩行者データ、位置の更新時間間隔や終了条件等のデータが必要となる。これらの作成・編集するためのエディタが付属するシミュレータもあり、空間データを建築物の CAD データから作成可能なエディタもある。各種データが歩行者シミュレータに入力されると、タイムステップごとに全歩行者の位置の更新を終了条件が満足されるまで繰り返す。出力データとしては、各歩行者の出発地点から目的地点までの移動時間やタイムステップごとの座標データ、速

度、状態、各地点での歩行者の密度の推移等があげられる。また、シミュレーションの結果はビューアを用いて二次元や三次元形式で見ることができ、歩行者の動きを俯瞰することができる。

すでに利用可能なものとして、下記の歩行者シミュレータがあげられる。日本のエーアンドエー株式会社が開発している SimTread [11], [12] は歩行者モデルとして二次元連続空間におけるポテンシャルモデルを採用しており、劇場、ビル、病院等からの避難といった数多くの事例を扱っている。株式会社ベクトル総研が開発している D-MACS [13], [14] も二次元連続空間におけるポテンシャルモデルを採用しており、高層ビルからの避難や駅構内の旅客動線の検証といった事例を扱っている。スイスの Savannah Simulations AG 社が開発している SimWalk [15] は二次元連続空間における Social Force モデルを採用しており [16], 鉄道ダイヤと連携する機能を持っている。イギリスの火災安全工学グループ (FSEG) が開発している EXODUS [17], [18] は移動可能領域を表す正方のノードとノード間の接続状態を示すアークで表される空間モデルを採用しており、高層ビルからの避難のほかにトンネル火災時の避難、航空機や船舶からの避難を扱っている。イギリスの Legion International Limited 社が開発している Legion Studio [19] はシドニーオリンピックやアテネオリンピックが開催されたスタジアム周辺の誘導方法の検証に用いられた等の豊富な利用実績がある。

3. 歩行者モデル

本論文では歩行者が移動する空間を一次的に表現した一次元歩行者モデルを提案する。本章では空間モデルを説明した後、歩行速度の計算方法を明らかにする。

3.1 空間モデル

ある空間内での避難行動を考えた場合、歩行者はその空間の出口へと向かって流れていく。部屋からは扉へ向かい、通路からはより出口に近い方向へと向かっていく。そこで、本論文では部屋や通路等の歩行者のいる空間を歩行者の流れに平行な一次元の位置で表現できると仮定する。このように考えると、通路や部屋のつながりはネットワーク構造ととらえることが可能で、図 1 (a) は (d) のように部屋や廊下、扉をリンクとして扱うことができる。ここでは、リンクを $L_1, L_2, \dots, L_m, \dots, L_M$ で表現する。

文献 [20] では通路や部屋を整然と移動する歩行者は、ある程度の密度になった場合には列を形成することが指摘されている。そこで、この各列を自動車のレーンに見立てて仮想レーンと呼ぶ。仮想レーン数は部屋の幅に比例し、各リンクは 1 本以上の仮想レーンを持つものとする。図 1 (d) のそれぞれの部屋に 2 本の仮想レーンがあり、廊下と扉に 1 本の仮想レーンがある場合の様子を図 2 に示す。仮想

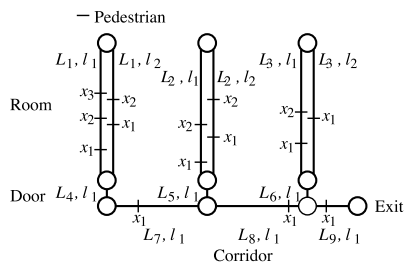


図 2 一次元歩行者モデル

Fig. 2 One-dimensional pedestrian model.

レーンは $l_1, l_2, \dots, l_n, \dots, l_N$ で表現する. なお, 時刻 t においてリンク L_m の仮想レーン l_n にいる, 先頭から i 番目の歩行者の位置は $x_i^{(L_m, l_n)}(t)$ で表す. 出発したノードを原点に取り, 進行方向を正とする. なお, リンク L_m と仮想レーン l_n に関しては適宜省略して $x_i(t)$ で記述する.

3.2 歩行速度モデル

Helbing らは文献 [5] で一般的な歩行者にかかる仮想的な力として, (1) 歩行者推進力, (2) 社会的作用, (3) 壁や障害物の影響力, (4) 集団凝縮力, (5) その他の力の 5 つの要素をあげている.

(1) 歩行者推進力は, 混雑等によって減速した歩行者が, 周囲からの影響を受けない場合の歩行速度 (自由歩行速度) に戻ろうとする力を表現している. 時刻 t における i 番目の歩行者への歩行者推進力 $f_i^{dr}(t)$ は歩行者の質量を m_i , 自由歩行速度を v_i^0 , 速度を $\dot{x}_i(t)$, 自由歩行速度に戻る時間を表すパラメータ τ_i を利用して次のように表現できる.

$$f_i^{dr}(t) = m_i \frac{v_i^0 - \dot{x}_i(t)}{\tau_i} \quad (1)$$

次に, (2) 社会的作用は i 番目の歩行者が周囲の歩行者との間にパーソナルスペースを取ろうとする力を表現している. i 番目の歩行者が j 番目の歩行者から受ける社会的作用 $f_{i,j}^{soc}(t)$ は, 2 人の歩行者の中心間の距離 $d_{i,j}(t)$, 歩行者の半径の和 $r_{i,j}$, パラメータ A, B を用いて次のように表現できる.

$$f_{i,j}^{soc}(t) = A \exp \frac{r_{i,j} - d_{i,j}(t)}{B} \quad (2)$$

なお, 歩行者 i にかかる社会的作用は次式のように周囲のすべての人から受ける力の和で表現される.

$$f_i^{soc}(t) = \sum_j f_{i,j}^{soc}(t) \quad (3)$$

一方, 一次元歩行者モデルでは進行方向に平行な力のみを考えるため (3) 壁や障害物の影響力は無視できると仮定する. また, 単純な避難行動を考えているため, 家族等のグループで固まる傾向を示す (4) 集団凝縮力や, 購買行動等で見られるショッピングウィンドウに引き寄せられる現象等を表現している (5) その他の力も無視できると考える.

さらに, 社会的作用に関しては仮想レーン内の直前にいる歩行者だけの影響を受けると仮定すると, 式 (3) の i 番目の歩行者の受ける社会的作用は次式で表現できる.

$$f_i^{soc}(t) = A \exp \frac{r_{i,i-1} - (x_{i-1}(t) - x_i(t))}{B} \quad (4)$$

以上より, 一次元歩行者モデルにおける歩行者の運動方程式は次式で表現できる.

$$\begin{aligned} m_i \ddot{x}_i(t) &= f_i^{dr}(t) + f_i^{soc}(t) \\ &= m_i \frac{v_i^0 - \dot{x}_i(t)}{\tau_i} \\ &\quad + A \exp \frac{r_{i,i-1} - (x_{i-1}(t) - x_i(t))}{B} \end{aligned} \quad (5)$$

ただし, すべての歩行者の質量や半径, 自由歩行速度, パラメータ τ_i は同じであるとして $v^0, r/2, m, \tau$ に統一し, $a_1 = 1/\tau, a_2 = A/m, a_3 = B$ と置くことで, 次式の歩行者の加速度が得られる.

$$\ddot{x}_i(t) = a_1(v^0 - \dot{x}_i(t)) - a_2 \exp \frac{r - (x_{i-1}(t) - x_i(t))}{a_3} \quad (6)$$

ここからシミュレーションに実装するために次式の差分方程式を得ることができる.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t + \Delta t) - \dot{x}(t) &= \left\{ a_1(v^0 - \dot{x}_i(t)) - a_2 \exp \frac{r - (x_{i-1}(t) - x_i(t))}{a_3} \right\} \Delta t \end{aligned} \quad (7)$$

3.3 ノードをまたがった相互作用

式 (7) では直前の歩行者が同一リンクの同一仮想レーン内にいる場合について説明した. 仮想レーンにおける先頭の人に関しては, ノードをまたがった社会的作用の影響を考慮することで歩行速度を算出する. ここでは図 3 のようにリンク L_m の先頭にいる歩行者がリンク L_{m+1} に進む場合, 社会的作用を及ぼす歩行者との距離の算出方法について説明する. リンク L_m の仮想レーン数を $\text{LANE}(L_m)$ とすると, 今いるリンク L_m と次に進むリンク L_{m+1} の仮想レーン数 $\text{LANE}(L_m)$ と $\text{LANE}(L_{m+1})$ の違いによって 3.3.1~3.3.3 項の 3 つの場合に分けて考える.

3.3.1 仮想レーン数が等しいリンクに移動する場合

$\text{LANE}(L_m) = \text{LANE}(L_{m+1})$ の場合, 図 3(a) に例示されているように, 仮想レーンの先頭の歩行者は次のリンクにおける仮想レーンの最後尾の歩行者から社会的作用を受ける. この場合の社会的作用を与える歩行者との距離 $d(t)$ は次式で定義される.

$$d(t) = \text{LENGTH}(L_m) - x_1^{(L_m, l_n)} + x_{last}^{(L_{m+1}, l_n)} \quad (8)$$

ただし, $x_1^{(L_m, l_n)}$ はリンク L_m の仮想レーン l_n の先頭の歩行者の位置を表し, $x_{last}^{(L_{m+1}, l_n)}$ はリンク L_{m+1} の

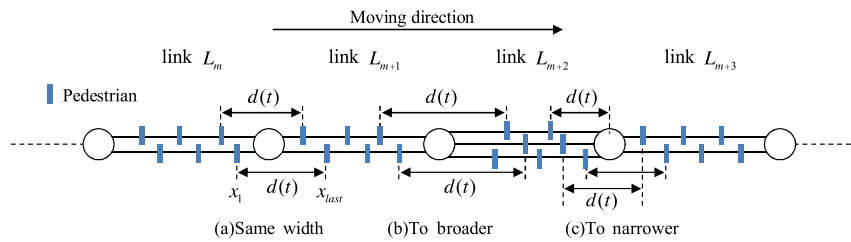


図 3 ノードをまたがる社会的作用

Fig. 3 Social force across nodes.

仮想レーン l_n の最後尾の歩行者の位置を表す. また, $\text{LENGTH}(L_m)$ はリンク L_m の長さを表すものとする. これは, 2つのリンクが繋がった1つのリンクの場合と同じ結果となる.

3.3.2 仮想レーン数が多いリンクに移動する場合

$\text{LANE}(L_m) < \text{LANE}(L_{m+1})$ の場合は, 図 3 (b) に例示されているように, リンクの先頭から k 番目までの歩行者は次のリンクの最後尾から $\text{LANE}(L_{m+1}) - k + 1$ 番目の歩行者から社会的作用を受ける. リンクの先頭から k 番目までの歩行者と社会的作用を与える歩行者との距離 $d(t)$ は次式で定義される. ここで, k は $k \leq \text{LANE}(L_m)$ を満たすとする.

$$d(t) = \text{LENGTH}(L_m) - x_k^{(L_m)} + x_{\text{last-LANE}(L_{m+1})-k+1}^{(L_{m+1})} \quad (9)$$

ただし, $x_k^{(L_m)}$ はリンク L_m にいる先頭から k 番目の歩行者の位置を表し, $x_{\text{last-LANE}(L_{m+1})-k+1}^{(L_{m+1})}$ はリンク L_{m+1} の最後尾から $\text{LANE}(L_{m+1}) - k + 1$ 番目の歩行者の位置を表す.

仮想レーンが複数ある場合, ある仮想レーンにおける先頭の歩行者が必ずしもそのリンクにおける先頭の歩行者になるとは限らない. そのため, たとえば, $x_1^{(L_m, l_1)} = x_1^{(L_m)}$, $x_1^{(L_m, l_2)} = x_2^{(L_m)}$, $x_1^{(L_m, l_3)} = x_3^{(L_m)}$, \dots , $x_1^{(L_m, \text{LANE}(L_m))} = x_{\text{LANE}(L_m)}^{(L_m)}$ のようになることに注意されたし.

3.3.3 仮想レーン数が少ないリンクに移動する場合

$\text{LANE}(L_m) > \text{LANE}(L_{m+1})$ の場合は, 仮想レーンの先頭においてもリンク L_m における先頭からの順番によって社会的作用を与える歩行者との距離 $d(t)$ の算出方法が異なる. リンク L_m における先頭から k 番目までの歩行者に関しては, 図 3 (c) に例示されているように, 社会的作用を与える歩行者との距離 $d(t)$ は式 (9) で定義される. ここで, k は $k \leq \text{LANE}(L_{m+1})$ を満たすとする.

また, リンク L_m の先頭から数えて $\text{LANE}(L_{m+1})$ 番目から $\text{LANE}(L_m)$ 番目の歩行者 i には, リンク L_m の仮想レーンの先頭にいるがリンク L_{m+1} に社会的作用を与える歩行者がない. この場合, 社会的作用を与える距離 $d(t)$ はリンク L_m の進行方向の終端までの距離となり, 次式で定義される.

$$d(t) = \text{LENGTH}(L_m) - x_i^{(L_m)} \quad (10)$$

4. 避難シミュレータの開発と評価

一次元歩行者モデルを避難シミュレータ NetMAS に実装した. 本章では避難シミュレータ NetMAS の詳細について説明する. さらに, パラメータの推定方法について述べ, 実際の避難訓練の観測結果を利用して本シミュレータを評価する.

4.1 避難シミュレータ NetMAS

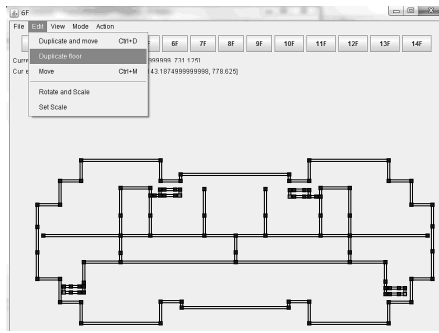
避難シミュレータ NetMAS は避難者の移動可能領域を編集するためのネットワークマップエディタ, 避難シミュレーションエンジン, 避難状況を表示するための三次元ビューアで構成される. 避難シミュレーションエンジンには前章で説明した一次元歩行者モデルを実装している. 図 4 に移動可能領域のリンクを編集しているネットワークマップエディタと避難者の移動状況を表示する三次元ビューアのスクリーンショットを示す.

避難シミュレーションエンジンはシミュレーションステップごとに全避難者の位置を更新する. 終了条件を満足した後, 全体としての避難完了時間, 各避難者の各避難完了時間や指定した経路地点の通過時間, 各リンク上のタイムステップごとの避難者数の推移をファイルに出力する. 火災発生時の煙や毒性物質の濃度変化や津波の被害範囲の時間変化データが記述されたファイルを読み込むことで, 各避難者の移動中の曝露量や環境からの影響を算出し, 歩行速度の減衰や移動停止といった各避難者の被害を避難行動に反映することも可能である.

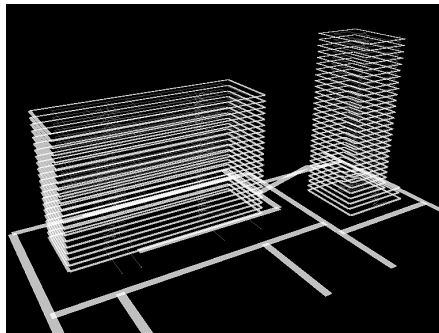
著者らは北九州市消防局と連携し, 開発した避難シミュレータ NetMAS をターミナル駅の有害危険物質の拡散への対処行動の評価に利用した [21]. また, 著者らはインドネシアのシャクアラ大学やバンドン工科大学と連携し, インドネシアの都市 Meulaboh のスマトラ島沖津波に対する避難誘導計画の検証にも利用している [22].

4.2 パラメータ設定

式 (7) をシミュレーションに用いるためには, 自由歩行速度 v^0 と歩行者の半径 r , パラメータ a_1, a_2, a_3 が未知



(a) ネットワークマップエディタ
(a) Network Map Editor.



(b) 三次元ビューア
(b) 3D Viewer.

図 4 避難シミュレータ NetMAS のスクリーンショット
Fig. 4 Screenshots of NetMAS.

であり、具体的な数値が必要とされる。

本論文では、これらのパラメータを算出するためにベクトル総研の開発した二次元連続空間モデルを採用している歩行者シミュレータ D-MACS [13] を利用する。D-MACS は群集流動再現による都市環境評価や津波や災害の避難シミュレーション、ショッピングモールにおける回遊性評価等に利用されている。ここでは D-MACS で T 字路における合流を再現し、一次元の空間モデルに射影した後、歩行者 i の速度 \dot{x}_i 、前の歩行者との距離 $x_{i-1} - x_i$ のデータ列を算出する。歩行者の速度を最適化するように山登り法を用いて、シミュレーションステップを 0.5 [sec] で未知パラメータを探索した。その結果、パラメータセット $v^0 = 1.023$, $r = 0.522$, $a_1 = 0.962$, $a_2 = 0.869$, $a_3 = 0.214$ が得られた*1。

得られたパラメータセットによって歩行者がどのように振る舞うかを確認するために、NetMAS 上で長さ 2.5 [m] のリンクに均一に 5 人の歩行者を初速度 0 [m/sec] で発生させ、同一方向に移動する状況の密度-速度分布を取得した。

*1 一次元歩行者モデルのパラメータの設定には、後述する避難訓練の実測値 (4.3.1 項) を用いることが妥当な方法であると考えられる。ただし、今回の避難訓練における実測では、混雑発生箇所計測対象箇所を絞っていたため、自由流速度に近い移動速度やその場合の訓練参加者同士の距離を計測しなかった。そのため、論文中で行っている別のシミュレータの結果を用いたパラメータの探索・設定を行った。今後の課題として、歩行者モデルのパラメータ設定に必要なデータを計測する方法論の確立があげられる。

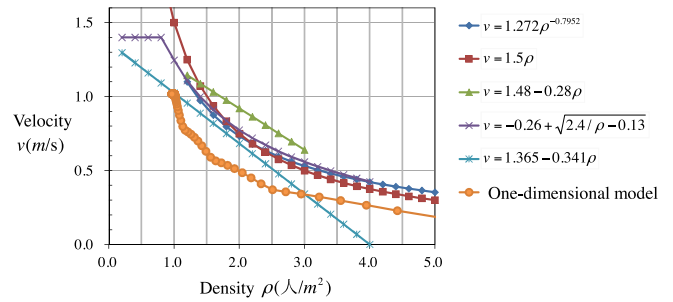


図 5 従来研究における密度-速度分布との比較
Fig. 5 Comparison of density-velocity distributions.

図 5 には、NetMAS 上で得られた密度-速度分布と従来研究 [23] における歩行者の密度-速度分布の比較が示されている。密度が 1.0~3.0 [人/m²] において、NetMAS 上で得られた速度分布は従来研究の速度分布に比べて傾向は似ているものの 20%程度値が小さい。この理由は、従来研究では長い直線の通路において速度-密度分布を求めているが、本研究では T 字路の合流というやや複雑な状況において密度-速度分布を求めているためである。一般の複合施設においては T 字路や十字路等の合流箇所が散見されるため、本論文では前述の一次元歩行者パラメータを採用する。

本論文で提案した一次元歩行者モデルは避難行動を対象としており、歩行者が同じ方向に進むことを仮定している。合流や対向流を含むより一般的な混雑現象を扱うためには、現状のモデルの拡張やパラメータ推定のための歩行者の行動データが必要となるため、今後の課題とする。

また、一次元歩行者モデルは直前の歩行者との距離に基づいて歩行速度を算出するモデルである。経路選択に関しては、歩行者は周辺状況に依存した経路選択は行わず、シミュレータの利用者が事前に指定した経路 (事出発地点、経由地、目的地を結ぶ最短経路) を移動する。そのため、より一般的な経路選択を表現するために、各歩行者の持つ情報や知識に基づいて経路を選択したり、周囲の歩行者への追従行動や危険からの回避行動に基づいて経路を選択するモデルを構築し、シミュレータへ実装することも今後の課題とする。

4.3 シミュレータの評価

避難シミュレータ NetMAS を実際の避難訓練の実測値を用いて評価する。

4.3.1 避難訓練の概要

2009 年 2 月 11 日にリバーウォーク北九州 (以下、RW) にある北九州芸術劇場の中劇場において 570 人の参加した実動避難訓練を行った [24]。中劇場の客席数は 700 で、1 階には前後左右の 4 カ所に扉があり、2 階には左右の 2 カ所に扉がある。中劇場の 1 階は RW 7 階部分に相当する。中劇場から出た後は通常の入退場に利用されるエスカレータのほかに 2 カ所の非常階段が設置されている。エスカ

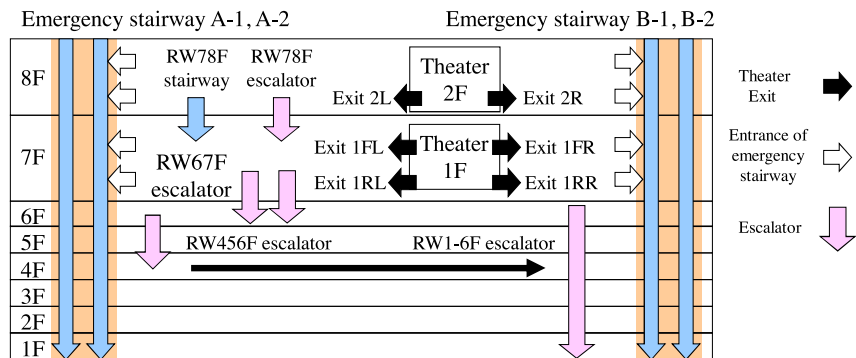


図 6 中劇場からの避難経路

Fig. 6 Evacuation routes from the mid-theater.



図 7 リバーウォーク北九州での実働避難訓練

Fig. 7 Evacuation drill in RIVERWALK KITAKYUSHU.

レータは上りと下りの2系統がある。非常階段は二重らせん構造であるため各2系統、合わせて4系統の避難経路がある。中劇場からの避難経路を図6に示す。中劇場にいる避難者には爆破予告があったため速やかにRW1階広場に避難するように指示した。図7に避難訓練の様子を示す。

避難行動は8台のステレオカメラと39台のRFIDレシーバで記録した。ステレオカメラは中劇場にある6カ所すべての出入り口と、エスカレータ前、非常階段に設置し、文献[25]の手法を用いて避難動線を記録し、避難者の扉や廊下、階段の通過時間を計測した。一方、RFIDタグをおよそ440人の参加者に持たせることで避難経路を測定した。アクティブRFIDシステムを用いたため、RFIDタグを持った参加者がRFIDレシーバの付近にいと、そのタグIDと検知時間が記録される。RFIDタグを持っていない参加者の経路は39台のRFIDレシーバの中から経路選択に有効な28台を用いて補完することで推定した。

避難者の経路に関しては、ステレオカメラから得られた結果を用いて中劇場のどの扉から避難するかの割合と通過時間を求め、それ以降の経路についてはRFIDタグから得られた結果をサンプリング調査することで全避難者の経路を推定した。

4.3.2 実測とシミュレーションの比較

避難シミュレータNetMASを用いて実測と同様の割合で避難者が経路を選択するようにシミュレーションを実行し、避難完了時間を評価した。なお、一次元歩行者モデル

においては、4.2節で探索したパラメータセットを用いる。また、シミュレーションにおいては、0.5[sec]を1ステップとし、リンクの幅0.6[m]あたりに仮想レーン1本を割り当てた。

実測とシミュレーションの避難完了時間を図8に示す。図8(a),(b)は中劇場1階の扉からの避難完了時間と中劇場1階から避難した人数の関係を表しており、80~90秒程度で中劇場から出ていることが分かる。また、図8(c)は中劇場2階の扉からの避難完了時間と避難した人数の関係を表している。1階に比べて2階の避難者数は3分の1程度であり、扉から出るのに必要な時間は1階の半分程度であることが分かる。図8(d)にはRW1階までの避難完了時間を示す。すべての人が避難を完了するのに700秒程度かかっていることが分かる。なお、(a)~(c)の実測はステレオカメラを用い、(d)はRFIDを用いて結果を算出した。

実測とシミュレーションの比較結果を表1に示す。表では避難が完了した人数を20%刻みで離散化し、実測値とシミュレーションの避難完了時間および誤差を示している。なお、誤差は|実測 - シミュレーション結果| / 実測 × 100%で評価した。避難完了時間に関しては途中で誤差が大きくなるが、最大でも15%以下であり、全員の避難完了時間の誤差は5%以下と高い精度で再現できている。

さらに精度の高いシミュレーションを行うためには、対象とする集団に対して適切なパラメータセットを用いることが求められる。4.2節では直線、T字路、十字路等によ

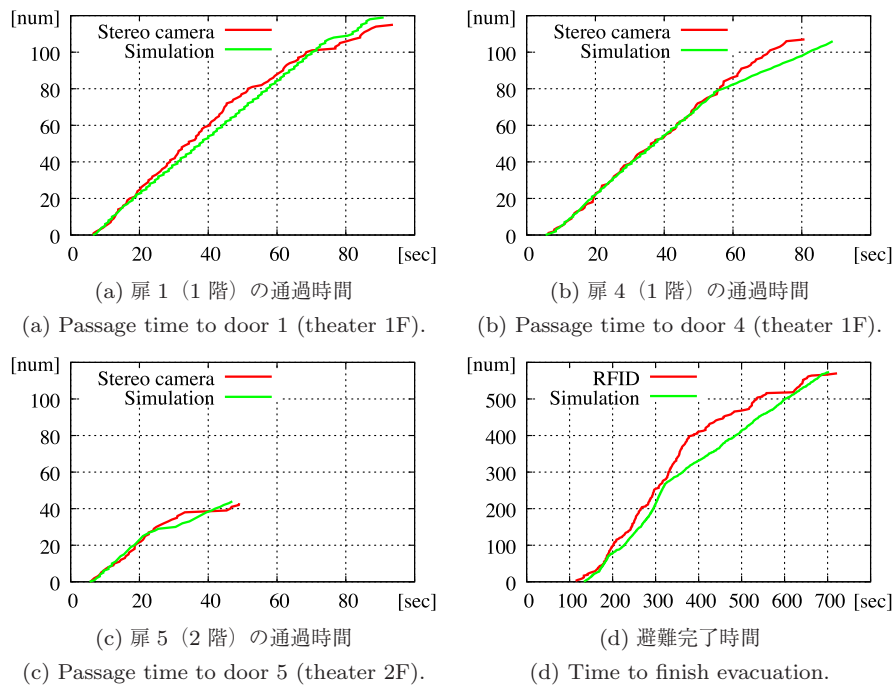


図 8 実測とシミュレーションの避難完了時間の比較
 Fig. 8 Comparison of evacuation times measured and simulated.

表 1 避難完了率の推移の比較

Table 1 Comparison of the transitions of the ratio of evacuated persons.

	20%	40%	60%	80%	100%
Measured time [sec]	200.9	283.5	351.8	470.0	723.5
Simulation time [sec]	214.0	286.5	399.0	530.5	688.0
error [%]	6.52	1.07	13.42	12.87	4.91

表 2 条件 3. 扉 (1 階) の前後への分散

Table 2 Evacuation condition 3: Dispersion of passage doors of the theater 1F.

Condition	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5
Exit 1F-FrontRight (1FR)	0.40	0.33	0.25	0.17	0.10
Exit 1F-FrontLeft (1FL)	0.40	0.33	0.25	0.17	0.10
Exit 1F-RearRight (1RR)	0.10	0.17	0.25	0.33	0.40
Exit 1F-RearLeft (1RL)	0.10	0.17	0.25	0.33	0.40

てパラメータの値が変動することが示唆されており、今後の課題として様々な環境での歩行データの収集とパラメータチューニング手法の検討があげられる。

5. 避難シミュレータの応用

NetMAS の最大の特徴は高速なシミュレーションによって数多くの試行から適切な避難誘導方法を検証することができる点である。本章では、北九州芸術劇場における効率的な避難誘導方法に関する知見を得るために、複数の避難条件を設定し、避難完了時間への影響を検証する。さらにシミュレーション結果に対して重回帰分析を適用し、各条件の避難完了時間への影響を定量的に比較する方法を明らかにする。シミュレーションの結果をふまえて、次元歩行者モデルや NetMAS を用いた分析に対して有用性や実用性を考察する。

5.1 避難条件の設定

北九州芸術劇場や RW の運営スタッフや消防関係者へインタビューを行った結果に基づいて、下記に示す 4 つの避難条件を設定する。

- 条件 1. 避難者数 (6 通り) : 188, 294, 414, 534, 594, 654 人
- 条件 2. 扉の開き具合 (2 通り) : 全開, 半開
- 条件 3. 扉の前後への分散 (5 通り) : 表 2 を参照
- 条件 4. 避難経路の選択 (8 通り) : 表 3 を参照

条件 1 の避難者数はシミュレーションの対象となる人数を表している。条件 2 の扉の開き具合は、扉が半開の場合は中劇場 1 階と 2 階にある 6 つの扉が全開の場合に比べて流量が半分になることを表している。全開の場合は扉に対応する部分のリンクの仮想レーン数を 4 レーンとし、半開の場合は 2 レーンとする。条件 3 の扉の前後への分散は、中劇場 1 階にいる避難者が避難時に通過する前方 2 つの扉と後方 2 つの扉への偏りの程度を表している。条件 4 の避難経路の選択は、中劇場の避難経路には、エスカレータ含む経路と劇場の左右に 2 系統の非常階段があり、いずれかの経路に避難者が集中したり、分散して避難した場合を表している。中劇場の 2 系統の各非常階段内にはさらに 2 系統の階段があるため、それらが片方だけ、または両方使われる場合 (条件 4-1, 4-2) を考える。RW 7 階から 6 階へ

表 3 条件 4. 避難経路の選択

Table 3 Evacuation condition 4: Choice of passage routes.

Condition	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6	4-7	4-8
Stairway A-1	0.50	0.25	0.0	0.0	0.33	0.17	0.33	0.25
Stairway A-2	0.0	0.25	0.0	0.0	0.0	0.17	0.0	0.25
Stairway B-1	0.50	0.25	0.0	0.0	0.33	0.17	0.14	0.15
Stairway B-2	0.0	0.25	0.0	0.0	0.0	0.17	0.0	0.15
RW67F Escalator 1	0.0	0.0	0.0	0.50	0.33	0.17	0.53	0.10
RW67F Escalator 2	0.0	0.0	1.0	0.50	0.0	0.17	0.0	0.10

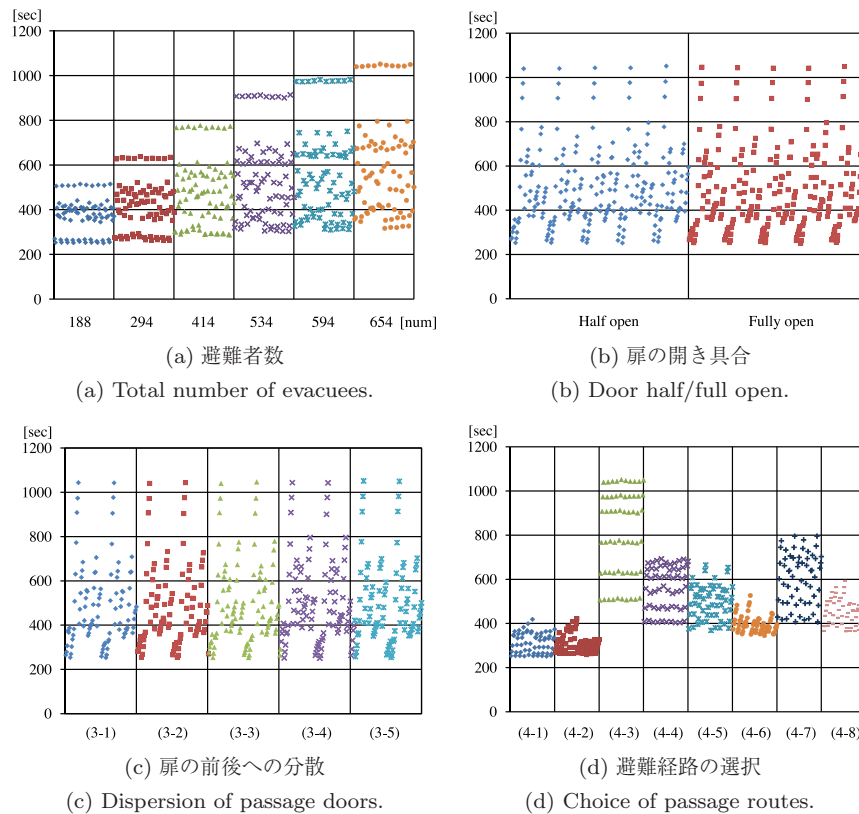


図 9 避難完了時間に与える避難条件の影響

Fig. 9 Influence of evacuation conditions on evacuation time.

のエスカレータ (RW67F エスカレータ) も 2 系統あるため、片方だけ、または両方とも下りの場合 (条件 4-3, 4-4) を考える。その他の条件は、各避難経路を均等に選択し、各階段、エスカレータの 1 系統だけ、または 2 系統使われる場合 (条件 4-5, 4-6) と避難訓練で計測された避難経路の選択状況 (条件 4-7, 4-8) を表している。これらの 4 つ条件を組み合わせると、480 通り (= 6 × 2 × 5 × 8) の条件下で試行する。

5.2 シミュレーション結果

シミュレーションに使用した計算機の CPU は Intel Core i7 860 (2.8 [GHz] HT 有効), Memory は 4 [GB], OS は Ubuntu Linux 10.04 (64 bit 版) である。Java J2SE 1.60 でプログラムを実装した。全 480 通りの計算に 11 分 54 秒かかった。これは現実世界のおよそ 480 倍の速さの計算を実現していることに相当し、十分に高速である。

図 9 に条件ごとに避難完了時間をプロットしたグラフを示す。横軸が条件、縦軸が避難完了時間を表している。図 9(a) は条件を避難者数によってソートした結果である。人数が増えるほど避難完了時間が長くなり、ばらつきが大きくなっている様子が分かる。実働避難訓練では 570 人の避難に 723 秒必要であったが、654 人の避難でもその他の避難条件によっては半分以下の時間 (300 秒程度) で避難が完了することが分かる。また、最も人数が少ない場合 (198 人) でもその他の避難条件によっては人数が多い場合 (654 人) よりも避難完了に時間がかかることが分かり、避難条件の整備が重要であることが示唆されている。

図 9(b) は扉の開き具合によってソートした結果であり、(c) は利用する扉の前後への分散状況によってソートした結果である。条件の違いごとの避難完了時間のパターンは類似しているため、扉の全開・半開 (条件 2) と扉の前後への分散 (条件 3) は避難完了時間に大きな影響を与えていな

表 4 重回帰分析の結果

Table 4 Result of multi-regression analysis.

	Intercept	Condition 1	Condition 2	Condition 3	Condition 4
Regression coefficient	13.914	0.470	15.463	13.407	468.965
Standard error	12.703	0.021	7.056	31.709	11.410
t-value	10.541	21.987	2.191	0.422	41.100

いことが分かる。また、(d) は避難経路選択によってソートした結果である。条件 4-1 と条件 4-2 からエスカレータを使わない場合には総じて避難完了時間が短くなるのが分かる。

次節で重回帰分析を用いて定量的に比較する方法とその結果について説明する。

5.3 統計的分析手法の適用

避難シミュレータによって得られた知見を実際の避難誘導に反映するためには、避難条件が避難時間に与える影響の傾向を知るだけでなく、定量的な分析が必要である。そこで、設定した避難条件と避難時間を重回帰分析することで避難条件が避難完了時間に与える影響を定量的に把握する方法を明らかにする。重回帰分析は目的変数が説明変数によって説明できるかを定量的に分析する方法である。避難完了時間を目的変数、避難条件を説明変数として重回帰分析を行う。

説明変数について順に説明していく。条件 1 の避難者数はそのまま説明変数に用いる。条件 2 の扉の開き具合はダミー変数を用いて、全開を 0、半開を 1 とする。条件 3 は、前方と後方への集中を同一と見なし、全避難者数に対する前後への偏り度合いを説明変数とする。条件 3-1 と条件 3-5 は 0.30 (= 0.40 - 0.10)、条件 3-2 と条件 3-4 は 0.16 (= 0.33 - 0.17)、条件 3-3 は 0 (= 0.25 - 0.25) とする。条件 4 は全避難者数に対する RW67F エスカレータの通過率を説明変数とし、条件 4-1 から条件 4-8 を 0.0, 0.0, 1.0, 0.50, 0.33, 0.17, 0.53, 0.10 とする。

以上の説明変数を用いて重回帰分析を実施した。表 4 に重回帰分析の結果を示す。表には各説明変数の一単位の変化が避難完了時間に与える変化の推定値を表す係数、推定の不確かさを表す標準誤差、係数の当てはまり具合を示す t 値が示されている。重回帰分析全体の結果は、表 4 に示されている係数からなる回帰式の当てはまり具合を表す決定係数が 0.821、自由度調整済み決定係数が 0.819 と高く、分析全体として十分な精度を持つ結果といえる。

各説明変数を見ると、条件 1 (避難者数) と条件 4 (避難経路の分散) に関する t 値が突出して大きい。 t 値は係数の当てはまり具合を示す指標であり、条件 1 と条件 4 は避難完了時間の減少に有効性があると判断できる。条件 1 の避難者数に関しては、避難者数が増加するにつれて 1 人当たりの避難完了時間が約 0.5 秒増加し、満席の場合には避難

完了時間が最大で 5 分以上増加する。条件 4 に関しては、避難者数に対する RW67F エスカレータの通過率が増加するにつれて 1% 当たり避難完了時間が約 5 秒増加し、満席の場合に 700 人全員が RW67F エスカレータを通過する場合には、避難完了時間が最大で 8 分近く増加することが試算できる。

一般に t 値が絶対値で 2 を超えれば効果のある説明変数であるといわれており、条件 2 (扉の開き具合) は 2 を少し超えている。確かに、半開の場合には避難完了時間は増加するが、その増分は 15 秒程度であるため、条件 1 や条件 4 に比べればきわめて影響が小さいことが分かる。中劇場からの避難では、避難者は劇場の扉を通過してからエスカレータを通過して階下に移動する。その際、エスカレータの流量が小さくボトルネックになっていたため、劇場の扉が半開から全開になって流量が倍に増加しても、避難完了時間の大幅な短縮にはつながらなかった。そのため、条件 2 (扉の開き具合) は避難完了時間に対しては影響が小さい。

避難条件を説明変数とした重回帰分析結果から、避難者数と避難経路の選択が避難完了時間に与える影響が大きいことが定量的に示された。施設を運営する観点からは来場者数が多いことは望ましいことであるため、避難者数 (来場者数) を減らすという対応を取ることは難しい。そこで、避難完了時間を短くするためには避難経路の選択が重要な要因となる。具体的には RW67F エスカレータを使わずに、近くの非常階段を使うように避難誘導することが避難完了時間を短くする上で有効な対応であるといえる。この理由は、RW67F エスカレータ前では混雑が発生しやすいことと、RW67F エスカレータを使う経路は非常階段を使う経路に比べて長く避難に時間がかかるためである。一般的には非常階段とエスカレータを併用すると混雑が緩和され、避難完了時間が短くなると考えやすい。しかし、たとえ中劇場が満席で混雑していたとしても全員を非常階段に誘導することができれば、避難者数の増加による避難完了時間の増加への影響を上回って避難時間を短縮できることが本分析によって明らかになった。

5.4 考察

本節では、次元歩行者モデルと避難シミュレータ NetMAS、さらに NetMAS を応用した分析に対して有用性や実用性の観点から考察を行う。

本論文で提案した次元歩行者モデルは、直前の歩行者

との距離による速度減衰以外の相互作用を簡略化しているため、実際の避難者の行動に比べて整然とした避難を想像させる。しかし、本論文では連続空間モデルを用いたシミュレーション結果を参照して、一次元歩行者モデルのパラメータを設定しているため、全体の避難完了時間という観点では現実との乖離は小さい。また、局所的な過密状態(混雑)の発生という観点では、連続空間モデルやセルオートマトンモデルといった複数の障害物や多人数との相互作用を含めたモデルに比べて、一次元歩行者モデルでは速度を減衰させる要因が直前の歩行者との相互作用だけであるため、局所的な混雑は発生しにくい。そのため、一次元歩行者モデルを用いて混雑が発生した場合は、その他のモデルを用いた場合や現実の避難においては、さらに悪化した混雑が発生する可能性を考慮する必要がある。ただし、現状では、実際の避難時の歩行を含む行動全般の実データは不足しているため、災害時の行動を表現するモデルはある程度恣意的にならざるを得ず、一般論としてモデルが現実の災害時の避難行動をどの程度再現しているか、また、モデルが現実からどの程度乖離しているかを定量的に議論することは困難である。そのため、歩行者モデルの構築に必要なデータを計測・蓄積するための方法論の確立が今後の課題としてあげられる。

現在多くの避難シミュレーションに用いられている連続空間モデルやセルオートマトンモデルのように歩行者モデルの表現力を優先した場合、他の歩行者との相互作用や障害物の回避といった詳細な歩行動作を扱うため、局所的な流量評価には適しているが、計算量が増加するため大規模な避難行動を高速に扱うことが困難になる。それに対して、本論文で提案した一次元歩行者モデルは歩行者間の相互作用の簡潔さを優先したため、大規模な避難行動の経路選択の結果を検証することには適しているが、詳細な歩行動作の局所的な影響評価には向いていない。従来の歩行者モデルと一次元歩行者モデルの間には、このようなトレードオフが存在する。

多くの従来研究においては、局所的な混雑の発生メカニズムの解明が扱われており、連続空間モデルやセルオートマトンモデルを実装した多くの歩行者シミュレータが検証用ツールとして開発されてきた。それに対して、施設運営者や自治体には避難対象者の経路選択に関する施策を検証したいという強いニーズがあったにもかかわらず従来研究で扱われることはなく、ニーズに応えるシミュレータも開発されることもなかった。そのため、一次元歩行者モデルを実装した NetMAS には、従来研究で扱われていなかった大規模な避難行動の経路選択を分析可能にしたという新規性および有用性があり、施設運営者や自治体のニーズに即した実用性がある。

前節までに、リバーウォーク北九州内の北九州芸術劇場を対象とした避難行動の分析を一次元歩行者モデルを実装

した避難シミュレータ NetMAS を用いて行った。同様の分析は従来モデルを用いたシミュレータでも原理的には可能である。しかし、シミュレータがすべての試行を完了するまでの計算時間に大きな違いがある。NetMAS では全 480 試行を 12 分で終了したが、他のモデルを用いたシミュレータでは数倍から数十倍の試行時間がかかることが考えられる。そのため、北九州芸術劇場と同様の規模を持つ施設を対象する場合でも、シミュレーションを用いて数百通りの条件下での避難行動を分析する研究はなかったが、NetMAS を用いることで複数の避難条件の組合せに対する網羅的な分析を容易にした。高速計算の実現は、その前段階における避難設定の妥当性の検証作業に対しても作業時間の短縮に大きく貢献するため、実際の業務において NetMAS は非常に有用なツールである。

また、本論文で提案した一次元歩行者モデルによる高速計算は、単なるシミュレーション時間の短縮が目的ではなく、複数の避難条件が存在する状況ですべての組合せを網羅的に分析することを目的としている。事前にある程度、避難に関する振舞いが明らかになっていれば、直交表を用いて試行する避難条件の組を絞り込めるため、試行数を減らした効率的な分析が可能となる。しかし、避難条件の組合せがどの程度避難完了時間に作用するかは明らかではなく、避難条件の組合せを絞りこんだ場合、試行しなかった避難条件の組合せにおいて避難完了時間が増大する可能性は否定できない。そのため、すべての避難条件の組合せに対して避難完了時間を算出し、どの要因がどの程度避難完了時間に影響を与えているかを検証する網羅的な分析を行った。

重回帰分析の結果、ボトルネックとなるエスカレータの利用を控え、非常階段の利用を促進する避難誘導ができれば、満席の状態でも避難完了時間の増大は防ぐことが可能であることを確認した。ただし、「エスカレータを使わず、非常階段のみを使う方が、避難完了時間が短くなる」という分析結果は、今後も実際の避難訓練において実証的かつ継続的に検証されるべきである。避難誘導は人命にかかわる重要な事項であるため、訓練参加人員の構成や人数、災害による被害想定、避難指示の方法等を変えても安定的に同様の結果が得られるかという検証も必要で、より良い避難誘導を実現する取り組みを続けていくことが求められる。

6. まとめ

本論文では、歩行者が移動する空間を一次元的に表現した一次元歩行者モデルを提案した。二次元平面上での近傍の歩行者を探索したり、移動方向を決定する計算過程を省略しているため、多数の歩行者の挙動を高速に計算することが可能とした。

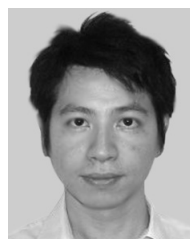
リバーウォーク北九州内の北九州芸術劇場中劇場からの避難訓練を対象として実際の避難訓練の結果と NetMAS に

よるシミュレーション結果の比較を行い、一次元歩行者モデルが高い精度で再現できていることを示した。計算速度に関しては、実際の避難行動の約 400 倍の速さに相当する計算速度でシミュレーションを実行できることを確認し、一次元歩行者モデルの利用によって十分な高速計算を実現できていることを示した。北九州芸術劇場からの避難完了時間の短縮要因の検討をシミュレーションの対象として取り上げ、高速計算を生かして得られた多数の試行結果に対して重回帰分析を適用することで、各避難条件の影響力を定量的に把握することを可能とした。

謝辞 避難訓練の実証実験に関して協力を得た北九州芸術劇場、リバーウォーク北九州および北九州市消防局の関係者に深く感謝する。本研究の一部は、JST 戦略的創造研究推進事業さきがけの一環として行われたものである。

参考文献

- [1] Kuligowski, E.D. and Peacock, R.D.: Review of Building Evacuation Models, Technical Report, NIST (2005).
- [2] 池島由華: シミュレーションベンチマークの結果, 日本火災学会「避難シミュレーションモデルの現状とこれから」に関するシンポジウム予稿集, pp.38-55 (2010).
- [3] 木村 謙, 佐野友紀, 林田和人, 竹市尚広, 峯岸良和, 吉田克之, 渡辺仁史: マルチエージェントモデルによる群集歩行性状の表現, 日本建築学会計画系論文集, Vol.74, No.636, pp.371-377 (2009).
- [4] 浅野美帆, 井料隆雅, 桑原雅夫: 交錯交通の容量評価のためのミクロ歩行者行動モデル, 交通工学, Vol.43, No.4, pp.80-89 (2008).
- [5] Helbing, D. and Molnár, P.: Social force model for pedestrian dynamics, *Phys. Rev. E*, Vol.51, No.5, pp.4282-4286 (online), DOI: 10.1103/PhysRevE.51.4282 (1995).
- [6] 杉本太一, 目黒公郎: 楕円形個別要素法を用いた避難行動解析に関する基礎的研究, 土木学会地震工学論文集, Vol.27, pp.1-4 (2003).
- [7] 劉 建宏, 大枝良直, 角 知憲: パーソナルスペースを用いた障害物を回避する歩行者の群集流動, 土木学会論文集 D, Vol.64, No.4, pp.513-524 (2008).
- [8] Nishinari, K., Kirchner, A., Namazi, A. and Schadschneider, A.: Simulations of evacuation by an Extended Floor Field CA model, *Proc. Traffic and Granular Flow '03*, pp.405-410 (2003).
- [9] 森下 信, 中塚直希: セルオートマトンによる緊急避難時の群衆流解析, 機械力学・計測制御講演論文集: D & D, p.308 (2002).
- [10] 大鑄史男, 小野木基裕: セルオートマトン法による避難流動のシミュレーション, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, Vol.51, pp.94-111 (2008).
- [11] エーアンドエー株式会社: SimTread (オンライン), 入手先 (<http://www.aanda.co.jp/products/simtread/index.html>) (参照 2011-10-24).
- [12] 峯岸良和: 建築設計における避難シミュレーションの利用例, 日本火災学会「避難シミュレーションモデルの現状とこれから」に関するシンポジウム予稿集, pp.38-55 (2010).
- [13] ベクトル総研: D-MACS (オンライン), 入手先 (<http://www.vri.co.jp/solution/floatsys/index.html>) (参照 2011-10-24).
- [14] 山田武志: 運用フェーズにおける避難シミュレーションの利用例, 日本火災学会「避難シミュレーションモデルの現状とこれから」に関するシンポジウム予稿集, pp.21-28 (2010).
- [15] Savannah Simulations AG: SimWalk (online), available from (<http://www.savannah-simulations.com/simwalk/index.html>) (accessed 2011-10-24).
- [16] Steiner, A., Philipp, M. and Schmid, A.: Parameter Estimation for a Pedestrian Simulation Model, *Swiss Transport Research Conference*, p.29 (2007).
- [17] FSEG, University of Greenwich: EXODUS (online), available from (<http://fseg.gre.ac.uk/exodus/index.html>) (accessed 2011-10-24).
- [18] 今泉 潤: 避難シミュレーション事例の紹介, 日本火災学会「避難シミュレーションモデルの現状とこれから」に関するシンポジウム予稿集, pp.29-37 (2010).
- [19] Legion International Limited: Legion Studio (online), available from (<http://www.legion.com/>) (accessed 2011-10-24).
- [20] Helbing, D., Molnár, P., Farkas, I.J. and Bolay, K.: Self-organizing pedestrian movement, *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol.28, No.3, pp.361-383 (2001).
- [21] Yamashita, T., Soeda, S. and Noda, I.: Evacuation Planning Assist System with Network Model-Based Pedestrian Simulator, *Principles of Practice in Multi-Agent Systems*, Lecture Notes in Computer Science, Vol.5925, Springer-Verlag (2010).
- [22] Nurdin, Y., Yuliana, D.K., Noda, I., Soeda, S. and Yamashita, T.: Disaster Evacuation Simulation with Multi-Agent System Approach using NetMAS for Contingency Planning (Meulaboh case study), *Proc. 5th Annual International Workshop & Expo on Sumatra Tsunami Disaster & Recovery 2010*, pp.77-81 (2010).
- [23] 日本建築学会編: 建築設計資料集成 [人間], 丸善株式会社 (2003).
- [24] 山下倫央, 副田俊介, 大西正輝, 依田育士, 野田五十樹: センサデータマイニングを活用した安全安心な避難誘導への取り組み, 電子情報通信学会誌, Vol.94, No.4, pp.188-190 (2011).
- [25] 大西正輝, 依田育士: ファジィクラスタリングを用いたステレオ映像からの動線抽出, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.128, No.9, pp.1438-1446 (2008).



山下 倫央 (正会員)

2000~2003 年日本学術振興会特別研究員。2002 年北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻博士後期課程修了。2003 年産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター特別研究員。2005 年同所情報技術研究部門研究員, 2011 年同所サービス工学研究センター研究員, 同年科学技術振興機構さきがけ兼任研究者, 現在に至る。社会システムシミュレーション, マルチエージェントシステム等の研究に従事。博士 (工学)。



副田 俊介 (正会員)

2006年東京大学大学院総合文化研究科博士後期課程修了。公立はこだて未来大学CRESTポストドクター研究員，2007年産業技術総合研究所特別研究員を経て，2011年グーグル株式会社に入社，現在に至る。人工知能技術とその社会への応用に興味を持つ。博士（学術）。



大西 正輝 (正会員)

2002年大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター研究員を経て，2006年産業技術総合研究所サービス工学研究センター，現在に至る。ステレオビジョンを用いた研究，ロボットの認知・知識処理に関する研究に従事。博士（工学）。



依田 育士 (正会員)

1992年東京都立科学技術大学大学院工学研究科修士課程修了。同年電子技術総合研究所入所。2001年組織再編を経て，現在，産業技術総合研究所サービス工学研究センター主任研究員。2005年筑波大学連携大学院助教授，2009年同連携大学院教授。人を中心とした実時間認識システムの研究等，コンピュータビジョンや画像認識の研究に従事。博士（工学）。



野田 五十樹 (正会員)

1992年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年電子技術総合研究所入所。組織再編により，現在，産業技術総合研究所サービス工学研究センター主任研究員。マルチエージェントシミュレーション，機械学習，災害情報システム等の研究に従事。博士（工学）。