

避難シミュレーションの 実社会への応用

■ 山下倫央^{*1,2} ■ 野田五十樹^{*1,3}

^{*1} (独) 産業技術総合研究所サービス工学研究センター

^{*2} 科学技術振興機構さきがけ ^{*3} 科学技術振興機構 CREST

避難シミュレーションの利用背景

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、人々を迅速に危険な状況から遠ざけ、安全な場所まで誘導することができれば、人的な被害を大きく軽減することが期待できる。災害状況に合わせた避難誘導が必要であるが、事前の準備なしに発災直後に統一的な行動をとることは困難であるため、事態に適した誘導計画が求められる。そのために、災害時の人々の行動を計測・分析し、避難誘導計画が多数の災害状況に対してどのように機能するかを事前に検証しておくことが必要となる。

自治体や施設管理者が誘導計画を立案することが多いが、災害の種別、被害規模、避難者数、歩行能力、避難行動といった条件が変動することが見込まれるため、事前にその効果を検証することは容易ではない。さらに、避難完了時間、災害による負傷者数、道路および避難所の混雑状況といった複数の項目に対して定量的な評価を行うことが求められる。避難シミュレータは、実行する予定の施策の定量的な評価を行うことを可能とするため、的確な誘導計画の立案支援に適している。

また、避難シミュレータの重要な機能の1つとして、シミュレーション結果の画像または動画による可視化が挙げられる。災害が起こったときに、どこでどのような行動をとった人が被害を受けるかというシミュレーション結果を俯瞰することができるため、施策の被害軽減効果を直感的に把握しやすい。そのため、2011年3月11日に発生した東日本大震災以降は、津波避難に関するシミュレーションが自治体の主導で行われており、その結果をWebサイ

トを通じて閲覧することができる。

本稿では、このような背景を踏まえて、避難シミュレーションに用いられる歩行者シミュレータをまとめ、その事例紹介を行う。そして、これからの避難シミュレーションに求められる事項と展開の方向性に関してまとめる。

歩行者シミュレーション

本章では、避難シミュレーションにおいて人の動きを再現する歩行者シミュレーションの基本機能について説明する。従来研究で提案された歩行者モデルの特徴をまとめ、既存の歩行者シミュレータを概観する。また、歩行者シミュレータが避難シミュレータとして機能するためには災害による被害状況を扱う必要があるため、避難シミュレータにおいて利用される災害データについて説明する。

■ 基本機能

歩行者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。これらを作成・編集するためのエディタが付属するシミュレータもある。また、建築物における避難を扱うために、CADデータをシミュレータ用データに変換するツールが準備されていることも多い。

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までの移動時間、指定個所の流量や密度の推移、タイムステップごとの歩行者の座標、速度、状態が挙げられる。シミュレーションの結果をビューアを用いて2次元や3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。

■ 歩行者モデル

既存の歩行者モデル

近年、数多くの歩行者シミュレーション¹⁾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2次元連続空間モデル^{2), 3)}、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⁴⁾、ネットワークモデル^{5), 6)}を採用している。

図-1に、2次元連続空間モデル、セルオートマトンモデル、ネットワーク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2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、連続空間上で他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²⁾、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³⁾、等が挙げられる。

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上下左右のセル4個または斜め方向を加えた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⁴⁾。

また、図-1(d)に示されるネットワークモデルでは、歩行者の移動可能範囲が長さを持つリンク

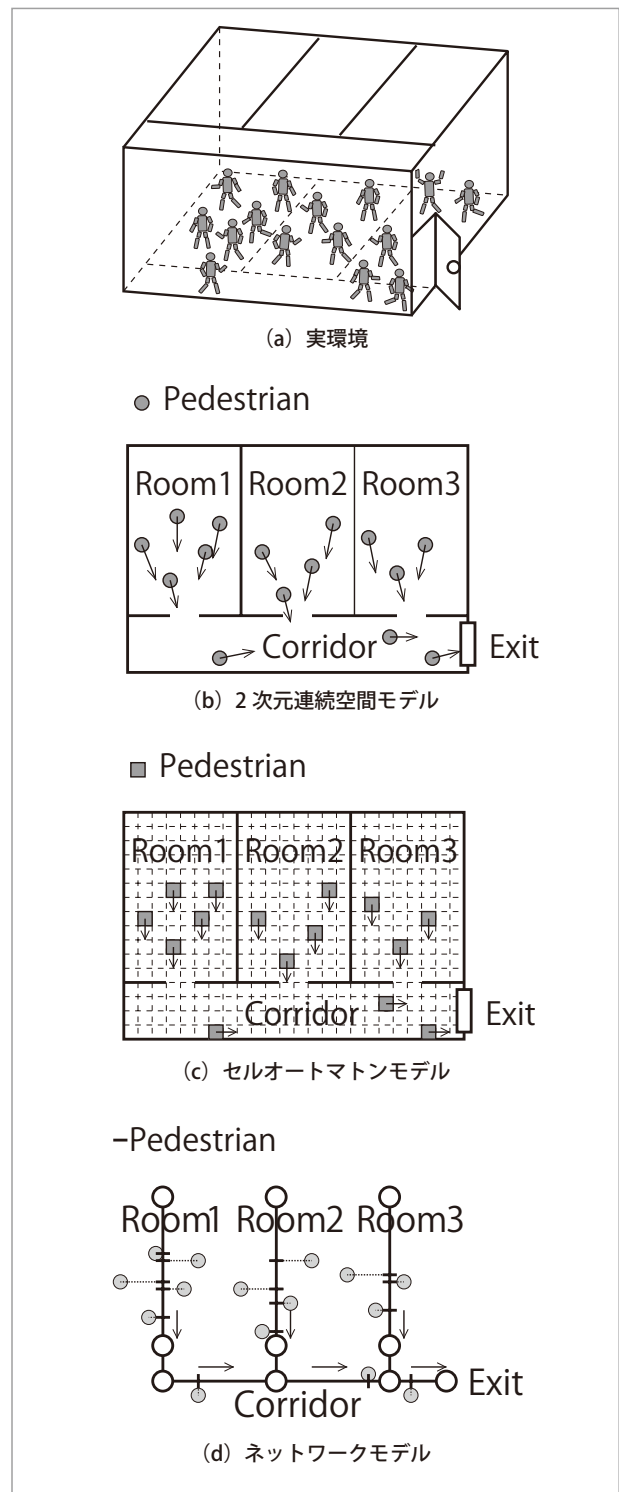


図-1 空間モデル

クとして表現され、道路、部屋、廊下等も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や前方の歩行者密度から移動速度を決定する速度関数が用いられる。

空間モデルの比較

図-2では、各空間モデルに適した現象が示されており、縦軸が歩行者間の直接的な相互作用の影響の大きさ、横軸がその現象に含まれる歩行者の規模を表している。

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、これらのモデルは渋谷駅前のスクランブル交差点で見られる交錯流において櫛状の列が形成される過程や多数の避難者が扉に

殺到して流量が低下するアーチ現象を扱うことに適している。ネットワークモデルは再現性で劣るものの、2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、大規模イベントの来場者の流動や首都圏の帰宅困難者の流動といった大規模で広域の避難誘導を短時間でシミュレートすることに適している。

また、現状の歩行者モデルでは、群集密度 10 人/m² 以上になり、雑踏事故に至る可能性が高くなる「超高密度群集滞留」や、そこで発生する集団と個人による危機回避行動に起因して発生する複雑な揺れである「限界群集波動現象」⁷⁾ を扱うことが困難であるため、今後の研究展開が望まれる。

歩行者シミュレータ

本節では、前述の空間モデルを実装した既存の歩行者シミュレータを概観する。市販の歩行者シミュレータ、市販ではないが研究やコンサルティングに用いられている歩行者シミュレータ、歩行者シミュレーションを含むシミュレーションプラットフォームに分けて紹介する。

既存の歩行者シミュレータ 1

日本のエアンドエー（株）が開発している SimTread^{☆1} は歩行者モデルとして2次元連続空

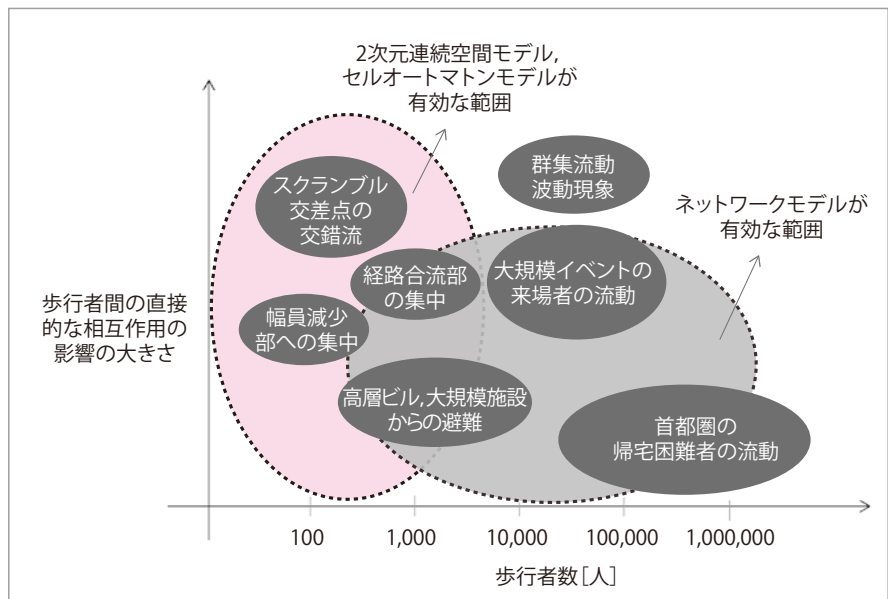


図-2 各空間モデルに適した現象

間における距離格子点を用いた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。

スイスの Savannah Simulations AG が開発している SimWalk^{☆2} は2次元連続空間における近傍の歩行者や障害物から斥力を受けて進行方向と加速度が決まる Social Force モデルを採用しており、鉄道ダイヤと連携する機能を持っている。

イギリスのグリニッジ大学火災安全工学グループ (FSEG) が開発している buildingEXODUS^{☆3} は移動可能領域を表す正方のノード（セル）とノード間の接続状態を示すアークで表わされるセルオートマトンモデルの拡張モデルを採用しており、高層ビルからの避難のほかにもトンネル火災時の避難といった建築環境における避難を扱っている。

イギリスの Legion International Limited が開発している Legion Studio^{☆4} は2次元連続空間モデルを用いており、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

☆1 エアンドエー（株）：SimTread, <http://www.aanda.co.jp/products/simtread/index.html>
 ☆2 Savannah Simulations AG: SimWalk, <http://www.savannah-simulations.com/simwalk/index.html>
 ☆3 FSEG, University of Greenwich: EXODUS, <http://fseg.gre.ac.uk/exodus/index.html>
 ☆4 Legion International Limited: Legion Studio, <http://www.legion.com/>

の検証に用いられた等の豊富な利用実績がある。

イギリスの Oasys Limited が開発している MassMotion^{☆5} は、2次元連続空間モデルを採用している。精細な3次元動画像が出力可能であることを特徴としており、ショッピングセンターやスタジアムからの避難を扱っている。

既存の歩行者シミュレータ 2

東京理科大学総合研究機構火災科学研究センターと東京消防庁が共同で開発した EVATUS⁸⁾ は、2次元連続空間におけるポテンシャルモデルを採用している。このポテンシャルモデルでは連続的に危険度を設定し、避難者はポテンシャルの高い危険な地点から、ポテンシャルの低い安全な地点に移動する。EVATUS は建物の火災時の避難安全性評価手法に用いられ、東京消防庁の行っている「優良防火対象物認定表示制度（優マーク制度）」の審査システムとして使用されている。

I.D.A 社会技術研究所の桑沢らが開発しているシナリオシミュレータ⁹⁾ は避難者と車両が混在可能なモデルを採用しているが、他の避難者や車両と近接しても速度低下が起こらない非常に単純なモデルである。津波避難や洪水避難といった広域の避難行動の検証に用いられている。

既存のシミュレーションプラットフォーム

マルチエージェントシミュレーションプラットフォームとして、(株)構造計画研究所が開発している artisoc 3.0 や^{☆6} アメリカの Argonne National Laboratory が開発している Repast Simphony^{☆7} が挙げられる。これらのプラットフォームを用いることで、シミュレータになかった機能をユーザ自身が実装可能である（いずれも利用言語は Java である）。そのため、これまでシミュレータにはなかった歩行者の移動モデルや意思決定モデルをユーザ自身が実装して追加することができる。

■ 災害データとの連動

歩行者シミュレータが避難シミュレータとして発災後に避難者が移動する状況を扱うためには、災害によって生じる被害状況を取り込む必要がある。避難シミュレータと連携する災害として、下記の項目が挙げられる。

- 地震：道路閉塞，建物倒壊
- 火災延焼：発火地点，延焼範囲，延焼速度・方向
- 津波・浸水：浸水範囲，浸水速度，流速，浸水深

これらの災害データは、地域によってはすでに計算されてデータ化されており、国や自治体を通じて入手することが可能なものもある。

災害データは歩行者シミュレーションで扱うスケールとは大きく異なることがある。避難における歩行者の動きは、2次元連続空間モデルを用いて詳細な計算を行う場合には1シミュレーションステップ当たり数ミリメートルの移動を計算することもある。それに対して、浸水データや火災延焼といった災害データは50mメッシュにおいて内部状況の変化が1時間刻みで表されることもある。この場合には、メッシュ内の災害状況は浸水状況が均一とされていたり、延焼状況が割合で表されている。そのため、避難シミュレータのユーザが避難シミュレーションと災害データの時間スケールと空間スケールを一致させる必要がある。

避難シミュレーションと災害データを連携する場合、火災や浸水による歩行者の移動速度の低下といった災害状況から歩行者の受ける影響を歩行者シミュレータに記述しておく必要がある。さらに、歩行者が火災延焼箇所や浸水地域を認識し、回避するための経路を選択するといった災害データに基づく歩行者の意思決定を実装する必要もある。

避難シミュレーションの応用

前章で紹介したように歩行者シミュレーションと災害データと連成することで、災害発生時の被害状況を考慮した避難シミュレーションとして利用することができる。本章では、自治体や研究機関が避難

☆5 Oasys Limited : MassMotion, <http://www.oasys-software.com/products/engineering/massmotion.html>

☆6 (株) 構造計画研究所 : artisoc 3.0, <http://mas.kke.co.jp/index.php>

☆7 Argonne National Laboratory : Repast Simphony, <http://repast.sourceforge.net/repast-simphony.php>

シミュレーションを実施した具体的な適用事例を紹介する。

■ 津波避難

宮城県仙台市の「津波避難施設の整備に関する検討委員会」では、人と自動車の混在する避難行動シミュレーションを用いて、津波避難施設を整備することによって、沿岸部の22,700人の住民が徒歩や自動車を利用して津波が到達する45分以内に避難を完了できるという結論を得ている^{☆8}。

自動車による避難をする人の割合が高い場合には、自動車が歩行者の避難の妨げとなる可能性が高いという指摘もしている。自動車による避難をする人の割合を下げることで避難完了時間を短縮するには効果的であり、自動車による避難は、徒歩での避難が困難な人とその支援者などとするのが重要と指摘している。

■ 水害避難

人口65万人の東京都江戸川区を対象として荒川の決壊を想定したシミュレーションを実施している¹⁰⁾。住民の行動意向調査の結果に基づいて自動車や徒歩で区内の避難場所に避難を行う際のシミュレーションを行い、被害発生特性の把握、被害低減に向けた対応策の検討、対応策の効果検証を行っている。都市部の洪水被害を回避する対策として、自宅待避者や垂直避難を含む多角的な避難形態を取り入れることが効果的であることが確認されている。

■ 帰宅困難者

2008年に中央防災会議「首都直下地震避難対策等専門調査会」は対象範囲は東京、埼玉、千葉、神奈川と茨城南部とした帰宅行動シミュレーションを行った^{☆9}。

大地震発生後の人々の帰宅に関する選好に基づいて、首都地域の道路ネットワーク上を人々が徒歩で帰宅する状況を扱った結果、直ちに帰宅する必要のない人が帰宅せずに一時とどまることが一斉帰宅の抑制につながるため、1) 速やかな安否確認、2) 「む

やみに移動を開始しない」ことの呼びかけ、3) 翌日帰宅、時差帰宅の促進等を図るための各種対策が必要であるとしている。

このシミュレーションでは、帰宅する人々によって満員電車並みに混雑する道路が数多く発生する、という結果が出ているが、このモデルでは混雑に巻き込まれた人の心理や回避行動を反映していないため、留意が必要である。

さらに、前述の帰宅行動シミュレーションを行った三菱総合研究所が東日本大震災発生当日における首都圏の帰宅行動の再現シミュレーションを行い、公共交通機関が停止した際の混乱防止策を提案している^{☆10}。

■ 高層建築物からの避難

(株)構造計画研究所と森ビル(株)が超高層ビルで火災が起きた際に避難者個々の特性を考慮した「超高層ビル用火災時避難シミュレーションシステム」に関する特許を取得している^{☆11,12}。

artisocを用いた避難シミュレーションでは、東京消防庁が策定した「高層建築物における歩行困難者等に係る避難安全対策」^{☆13}を踏まえて、火災時における安全が確保されたエレベーターの利用を含めた避難誘導を扱っている。本特集8「日本におけるマルチエージェントシミュレーション活用の動向」の「防災分野：避難計画策定支援」の節も合わせてご覧いただきたい。

■ 「東京消防庁認定避難算定方法」の認定

東京消防庁の「優良防火対象物認定表示制度」^{☆14}

☆8 仙台市：津波避難施設の整備に関する検討委員会、http://www.city.sendai.jp/fuzoku/1203537_2699.html
 ☆9 中央防災会議：「首都直下地震避難対策等専門調査会」について、<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutohinan/>
 ☆10 三菱総合研究所：東日本大震災における首都圏の帰宅困難状況を踏まえた今後の帰宅困難者対策のあり方、<http://www.mri.co.jp/news/press/teigen/2011/001774.html>
 ☆11 (株)構造計画研究所、<https://www.mori.co.jp/img/article/131003.pdf>
 ☆12 森ビル(株)、<https://www.mori.co.jp/company/press/release/2013/10/2013100313300002704.html>
 ☆13 東京消防庁：高層建築物等における歩行困難者等に係る避難安全対策、<http://www.tfd.metro.tokyo.jp/hp-yobouka/high-rise.html>
 ☆14 東京消防庁：優良防火対象物認定表示制度、<http://www.tfd.metro.tokyo.jp/hp-yobouka/yuryobouka1807.html>

は、建物関係者が行った防火安全対策の向上に係る自主的・意欲的な取組みを消防機関が評価し、防火安全性の高い優良な建物へ誘導するとともに、その結果を防火安全に関する情報として都民に提供することにより、安全・安心の確保を実現することを目的とした制度である。この制度において、前章の「既存の歩行者シミュレータ1」の項で紹介した歩行者シミュレータ SimTread, Legion Studio, building-EXODUS が東京消防庁の火災避難シミュレーションと同等の精度を持つことを認められて、「東京消防庁認定避難算定方法」に認定されている。

建物の所有者等が消防署長に申請し、優良な建物として消防署長の認定を受けたときは、優良な建物の証である優良防火対象物認定証（通称：「優マーク」）を建物の見やすい場所に表示することができる。

課題と展望

本章では、避難シミュレーションおよび歩行者シミュレーションに関して、シミュレータの動作保証と性能比較の環境整備、災害データとの連携、知見の還元方法といった観点から課題と展望をまとめる。

■ 動作保証と性能比較の環境整備

シミュレータの動作保証

避難シミュレータが誘導計画の立案支援のツールとして用いられるためには開発者の意図通りにシミュレータが実行され、実際の避難状況を再現していることが必要である。避難シミュレータの基礎的な設定項目である歩行者の自由流速度、近接している歩行者および障害物による速度減衰、歩行者密度の増加による速度減衰、経路地を含む初期位置と目的地までの移動経路が意図通りに動作していることを確認することが求められる。

次に、実際に計測した避難者の行動データと避難シミュレーション結果を比較し、その結果が実用上問題のない程度の誤差内に収まっていることを確認する。地震工学会では、被災者の方々に対してヒアリングを行い、東日本大震災の際の津波からの避難

者数や避難経路のデータをまとめている^{☆15}。このようなデータを動作保証の標準的なデータとすることができれば、避難シミュレータを開発した際に容易に動作の検証を行うことができる。

車両を対象とした道路交通シミュレータの分野ではシミュレータの動作検証や性能比較に関する試みはすでに行われている。交通工学研究会によって、交通シミュレータの特徴の比較結果、仮想データを用いた各シミュレータの基本性能の確認と、実測データを用いた実用性の評価の結果が公開されている^{☆16}。歩行者シミュレーションの動作保証の枠組みを整備する際には参考になると思われる。

性能比較の環境整備

これまでに、複数のシミュレータに関して概説してきたが、現状ではシミュレータを選択するための性能評価に関する統一的な指標がないため、複数のシミュレータから1つを選択することは容易ではない。ユーザにとって適切なシミュレータを選ぶためには、歩行者シミュレータの取り扱い可能な災害の種別、空間的な範囲、避難者の規模、避難者の知識、コミュニケーション能力、意思決定機構、取り得る行動といったモデルとしての観点とシミュレータの動作環境や標準的なシナリオの計算所要時間といったアプリケーションとしての観点から判断して、ユーザの目的に適合していることが求められる。

さらに各避難シミュレータが前節の動作保証の要件を満たしていても、表現できるシナリオには違いが生じることが考えられる。複数の避難シミュレータで同一の現象をシミュレートすることを通じて、各避難シミュレータの特徴を把握することが求められる。動作保証や性能比較の環境整備の取り組みは避難シミュレータの開発者や研究者、避難シミュレータを業務に利用している企業や自治体が連携することが望まれる。

☆15 日本地震工学会：日本地震工学会「避難の研究委員会」ワークショップ2014, <http://www.jaee.gr.jp/wp-content/uploads/2014/02/140310workshop.pdf>

☆16 交通シミュレーションクリアリングハウス, <http://www.jste.or.jp/sim/>

■ 災害データの利用方法の標準化

「災害データとの連動」で述べたように、災害データを避難シミュレーションに取り込む際には、災害データの空間的な範囲と時間発展の刻み幅が避難シミュレーションと適合していないことが多いため、災害データに処理を加える必要がある。同一の災害データを扱っていても各開発者の開発する変換方式の違いにより、バラつきが生じてしまう可能性がある。また、火災延焼の輻射熱や津波・洪水の浸水深や流速から避難者が受ける影響についても統一的なモデルはないため、異なるシミュレーション結果が出てしまう可能性がある。そのため、複数種類の災害に対して避難シミュレーションで用いることを前提とした標準的なデータ形式や変換方式、災害から避難者が受ける影響の標準的なモデルを整備することが望まれる。

■ 知見の還元方法

災害が発生した場合に、住民はどのように対応すべきか、といった点に関しては、統一的な避難方法や対応策があるわけではない。複雑な避難方法や対応策は効果が見込まれていても、実際の災害発生時には実行が困難であることが予測される。また、発生頻度の高い災害には地域差があるため、地域の状況に即した対応策が求められる。ただし、近年では、災害時の帰宅困難者の発生原因の1つである職場と住居を別々にする職住分離のライフスタイルが一般的となっているため、生活実態のある場所で災害に直面するとは限らない。そのため、地域によって発生しやすい災害を考慮しつつも、できるだけ多くの災害シナリオにおいて機能するロバストな対応策を検討する必要がある。

現状では本稿で取り上げた避難シミュレーションの結果は、論文で発表されていたり、自治体の Web サイトで公開されている。危機意識の高い住民は自ら情報を集めようとするため、このような情報に触れる可能性もあるが、子供や高齢者といった支援の対象者に情報を伝えることは困難である。避難シミュレーションによって有効な避難方法を検討した後、

その情報を利用可能な形で配信する必要がある。地元住民を対象としたワークショップで啓蒙する事例もあるが、地方都市の数十万人規模の市民を想定した場合には、新たなスキームを検討する必要がある。

参考文献

- 1) Kuligowski, E. D. and Peacock, R. D. : Review of Building Evacuation Models, Technical Report, NIST (2005).
- 2) 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).
- 3) 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).
- 4) Nishinari, N., Kirchner, Namazi, A. A. and Schadschneider, A. : Simulations of Evacuation by an Extended Floor Field CA Model, *Proceeding of Traffic and Granular Flow'03*, pp.405-410 (2003).
- 5) Christakos, C. K. : A Simple Pedestrian Simulator Using Node-Edge Graphs For Floorplan Models, *Proceedings of 38th Summer Computer Simulation Conference*, Society for Modeling and Simulation International, pp.105-109 (2006).
- 6) 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).
- 7) 貝辻正利, 北後明彦: 雑踏事故に至る高密度群集滞留下での群集波動現象に関する研究—大規模イベント事例分析を通じて—, 地域安全学会論文集, Vol.17 (2012).
- 8) 森田昌宏: 大規模施設の避難安全シミュレーション, 予防時報, Vol.240, pp.44-51 (2010).
- 9) 片田敏孝: 避難対策と防災教育のためのシナリオ・シミュレータの開発, 交通工学, Vol.48, No.1, pp.18-23 (2013).
- 10) 片田敏孝, 桑沢敬行, 信田 智, 小島 優: 大都市大規模水害を対象とした避難対策に関するシナリオ分析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.1, pp.71-82 (2013).

(2014年3月3日受付)

■ 山下倫央 (正会員) tomohisa.yamashita@aist.go.jp

2000～03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課程修了。2003年産業技術総合研究所入所。現在, 同所サービス工学研究センター主任研究員, JST 戦略的創造研究推進事業 さきがけ「情報環境と人」研究員 併任。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などの研究に従事。博士 (工学)。

■ 野田五十樹 (正会員) i.noda@aist.go.jp

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研究チームリーダー, JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「ポストパタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」研究代表者 併任。マルチエージェントシミュレーション, 機械学習, 災害情報システムなどの研究に従事。博士 (工学)。