

防災教育のための避難シミュレーションの在り方

Functions in evacuation simulation system for education for disaster prevention

森本愉美子*, 白木 渡**, 井面仁志***, 保田敬一****, 伊藤則夫+, 堂垣正博++

Yumiko Morimoto, Wataru Shiraki, Hitoshi Inomo Keiichi Yasuda, Norio Ito and Masahiro Dogaki

* (株)ゴールドクレスト (〒100-0004 東京都千代田区大手町 2-1-1)

** 工博 香川大学教授, 工学部信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

*** 工博 香川大学准教授, 工学部信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

**** 博(工) (株)ニュージェック 東京本社道路グループ (〒135-0007 東京都江東区新大橋 1-12-13)

+ 博(工) (有)シー・エー・イー (〒680-8064 鳥取県鳥取市国府町分上 2-210)

++ 工博 関西大学教授, 環境都市工学部都市システム工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

In this study, we examine the matter which a system should possess for effective prior education for disaster prevention. A fire assumes the situation that occurred to be concrete in a school building. We use a evacuation simulation system with cellular automaton and reproduce the influence that the differences of various evacuation conditions such as a evacuation instruction mark number and the difference of the setting position, a difference of the evacuation speed by the number of the evacuation, a difference of the number of the evacuation from the loft give to evacuation.

Key Words: evacuation simulation, participatory system, education for disaster prevention, CA-model

キーワード: 避難シミュレーション, 参加型システム, 防災教育, CA モデル

1. はじめに

災害に対する都市の安全性を議論する際に、従来は構造物の安全性の確保が主たる課題とされてきた。しかし、地下の大規模利用など、都市システムの高度化、複雑化が進みつつある今日、総合的な防災体制を構築する際には、構造物自体の防災化などのハード面と合わせて、人間行動などのソフト面における安全性評価も必要である。さらに、1995年の阪神淡路大震災以降、緊急時の避難行動については特に注目が集まっており、構造物の耐震性、免震性、耐火性などに加え、災害発生時にITの効果的な活用によってリアルタイムに最適な避難経路の確保や誘導などを行う避難計画といったソフトな防災面が構造物のハードな防災性と関連づけて総合的に検討すべきであるということが強く認識されるようになった。

また、これからは災害に対する安全性を議論する際に、防災という考え方に加えて災害を減らす減災という考え方が重要になってくる。近年、国内外を問わず大規模地震や台風・ハリケーンなどの自然災害により、人的なら

びに物的に多大な被害が発生している。大規模な災害は、想定外な状況に陥る場合がほとんどで、これまで有効な防災・減災対策が行われていない。事前の防災・減災対策として、災害時の人間の行動を予測しておくことは極めて重要である。しかし、設計段階で人の動きを実際に検証することは不可能であり、また災害時の避難行動などは実際に検証するには危険を伴う。そこで人間の歩行行動をシミュレーションする試みがなされている^{1)~4)}。

災害時における避難状況をシミュレーションするためのシステム構築については、これまで多くの研究が行われてきており、著者らの研究グループにおいても実施してきている^{3), 4)}。実際の避難状況に近づけるため、あるいは迅速な避難を実現するために、避難者の行動パターンなどのパラメータ設定が検討されている。しかし、事前の防災教育に直結する地域防災力向上の技術提案は少ないのが現状である。事前の防災教育が重要であり、避難に効果があることはこれまでの研究でも言及されているが、どの程度の効果があるのか、防災教育上何が必要で何が重要なのかについてはこれまでほとんど報告され

ていない。

本研究では、学校建物内で火災が発生した状況において、避難誘導標識数や設置位置の違い、避難者数による避難速度の違い、上層階からの避難者数の違いなど、様々な避難条件の違いが避難に及ぼす影響をセルオートマトン⁵⁾による避難シミュレーションシステムを用いて再現し、効果的な事前防災教育のためにシステムが具備すべき事項について検討する。本研究での検討事項は主に防災計画に関するものであるが、防災教育と防災計画とは密接に関連しており、防災計画を正しく反映させた防災教育が今行われていないことも事実である。よって、防災計画をうまく防災教育に反映していくことが教育上是非必要と考えた。

2. CA による避難シミュレーションモデル

2.1 セルラオートマトンの条件設定

セルの状態としては、以下に示す状態を設定した。これらの状態は、1つのセルに1つの状態しか存在しないものとする。

(1)避難者

避難者は、メッシュの1つのセルに1人の人間が存在できるようなモデルとする。一般に、人体の平面図は人間楕円とよばれる楕円で表され、その寸法は縦45cm×横60cmである。しかし、セルは正方形の格子状で表現するため一辺の寸法を人間楕円に近い50cmと設定した。さらに、避難者に方向の情報を付加し、その方向に合わせて視野を設定した。

(2)ハザード

ハザードは、設定したルールで拡散していくハザードを想定している。

(3)壁

避難者の視野が届かず、かつ、避難者が移動できない空間を表している。

(4)障害物

避難者が移動できない空間を表している。

(5)歩行可能空間

歩行可能空間は、障害物等が何もない空間や扉などの避難者が移動できる空間を表している。そして、避難誘導のための標識は歩行可能空間内に指定している。

2.2 避難シミュレーションの原則

(1)空間：立体空間

平面の2次元空間を組み合わせ、階段等で高さ方向に移動した場合を想定する。

(2)避難者：局所的なルールに従う

全ての避難者は決められたルールに従って行動する。

(3)避難者の目的：空間からの脱出

全ての避難者の目的は、現在いる空間からの脱出で統一する。

(4)避難者の移動：隣接する8つのセル

時間 t が 1step 進むごとに、避難者は時間 t において存在するセルに隣接する8つのセルから1つのセルを選択して移動する。

2.3 時間のモデル化

2.2 に記述したシミュレーションの原則をもとに時間のモデル化を行う。避難者は時間 t から時間 $t+1$ の間に隣接する8つのセルまたはその場のセルに留まるという行動をとる。その時間間隔を 1step と設定した場合、避難者は 1step の間に1歩動く状態となる。避難している避難者のスピードを普通の早歩きのスピードとし、時速5kmと仮定する。本研究では、1つのセルの大きさは一辺50cmと設定していることから、避難者が1歩動くスピードは、1step=0.36秒と設定した。

2.4 基本ルールの設定

(1) 避難者の回避行動

本来、避難者の対人回避行動は、自身と衝突の可能性のある時に相手の行動を予測した上で行われるが、本研究ではシミュレーションの単純化を図るため、次に移動するセルに他の避難者や障害物が存在している時に回避行動を行うものとした。回避の行動に関しては実際には様々な状況が考えられるが、現実の対応に関する検証は行っていない。回避行動は、避難者の周り8セルのすべてに対して設定した。各避難者の方向の情報をもとに8つのセルから1つを選択して移動する。避難者の回避行動の例を示す。図-1の(a)、(b)共に9つのセルの中心「灰色セル」を現在避難者がいるセルとする。避難者の回避行動は、①、②、③、④の順番に選択され行われる。それぞれ(a)は避難者が上を向いている場合、(b)は右上方向を向いている場合の例を示している。

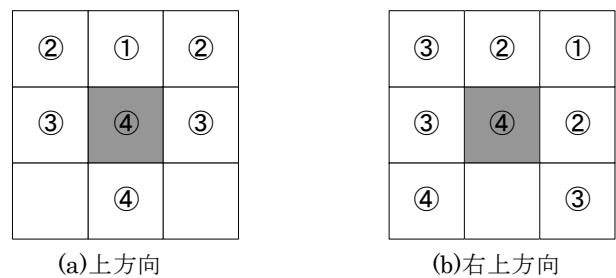


図-1 避難者の回避行動例

(2) 避難者の視野

各避難者の方向情報をもとに、避難者の視野を設定した。視野は避難者の持つ8方向すべてに設定した。避難者の視野の例を図-2に示す。視野の設定に関して、避難者の身長(子供等)は考慮していない。図-2では、避難者が上方向で視界が n セルの場合である。なお、壁などの高い障害物がある場合には、障害物背面は見えないように設定した。

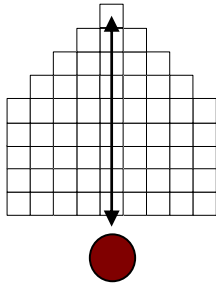


図-2 避難者の視野

(3) 避難者の目的行動

避難者は周りのセルの状況に応じて動く方向に違いが生じる。そこで、上記に示した視野をもとに、避難者が自らの視野の中に目的物を確認した場合、確認した目的物の種類ごとに目的行動を行うように設定した。本研究では、以下の6つの目的行動を設定した。

- () 視野の中に出口を確認すると出口に近づく動き
- () 視野の中に要救助者を確認すると要救助者を助ける動き
- () 視野の中にハザードを確認するとハザードを回避する動き
- () 視野の中に標識を確認すると標識に従う動き
- () 視野の中に人を確認すると人に追従する動き
- () 視野の中に何もなければ向いている方向に進む動き

(4) 避難者の種類

避難者の種類は、表-1に示す5つのパターンを設定した。

表-1 避難者の種類

| 避難者の種類 | 行動規制 |
|--------|----------------------------|
| 通常型 | 通常の大人の行動を想定（冷静に目的物を確認） |
| 追従型 | 人に追従して動く人を想定（あまり周りが見えていない） |
| 遅延型 | 子供やお年寄りを想定（通常型に比べて速度が半減） |
| 乱型 | パニックに陥った人を想定（ランダムに行動する） |
| 要救助者 | 怪我人や病人を想定（通常型の助けが必要） |

(5) ハザードのルール

地震発生時の火災における炎拡散のルール化を行う。炎も避難者同様に時間ごとに、その範囲が変化するため炎の拡散のルールを設定した。実際の炎の拡散は複雑である。例えば、炎の回りに燃えやすいものがあれば延焼範囲は急激に拡大する。さらに、炎の温度により燃え方も様々に変化する。このような現象を詳細に反映したシミュレーションを行う場合は、これらを踏まえてルールを設定しなければならないが、ここではシミュレーションの簡略化のために、燃え広がりやすさを確率で設定し、燃え広がるなら上下左右に一定の確率で炎が拡散していくようなルールを設定した。

まず燃え広がりやすさを確率で設定した。3段階に設

定した確率を表-2に示す。この燃え広がりやすさの情報をシミュレーションに加えて実行する。

表-2 燃え広がりやすさの確率例

| 確率 | 燃えやすさ | 建物内 | 地域 |
|-----|---------|---------|---------|
| 確率1 | 燃えやすい | 紙、机等 | 木造の建物 |
| 確率2 | やや燃えやすい | プラスチック等 | 非木造の建物 |
| 確率3 | 燃えにくい | 壁等 | 道路等、その他 |

次に、燃え広がる方向のルールについて示す。表-2で燃え広がりやすさの確率の判定で、燃え広がると判断された場合、上下左右のセルのどちらに燃え広がるかを決定する。上下左右の拡散は、一定の確率（25%）で設定している。拡散が一定確率の場合は、無風の場合を設定している。風向きを考慮する場合は、炎の拡散確率を変動させる。

3. 避難シミュレーション実施例

学校内で災害が起きた場合を想定し、大学研究棟の2階フロアのマップを使用した。避難者の数は実際にそのフロアにいる学生・教職員を想定して100人とする。避難者は災害が発生し、一斉に避難を開始する状況を想定している。図-3に使用した建物のフロアマップを示す。

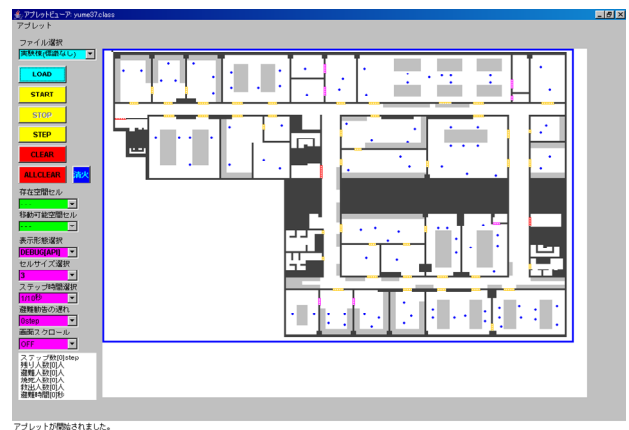


図-3 建物フロアマップ

3.1 標識設置の必要性

建物フロア内の廊下の交差点に出口の方向を指し示す標識を設置し、標識数の違いにより避難時間にどの程度の差が生じるかを比較する。表-3にそれぞれのCaseにおける標識設置数と設置場所を示す。

表-3 標識設置数と設置場所

| | |
|--------|---|
| Case1 | 標識なし |
| Case2 | 標識3個（出口の直前に設置した場合） |
| Case3 | 標識4個（通路の交差点に設置した場合） |
| Case4 | 標識5個（Case2の状態からさらに通路の交差点に設置した場合） |
| Case4' | 標識7個（現在の非常出口標識がある場所に設置した場合） |
| Case5 | 標識10個（Case7の状態からさらに廊下の中央に出口直前の標識に誘導するように設置した場合） |

それぞれの Case において 10 回のシミュレーションを行い、そのステップ数と平均残り避難者数のグラフを図-4 に示す。

Case1, Case2, Case4 では避難者全員が避難できず、1000step を区切りにシミュレーションを終了した。避難者全員が避難できた Case3, Case4', Case5, Case6 の平均避難ステップ数から平均避難時間を計算した結果を表-4 に示す。

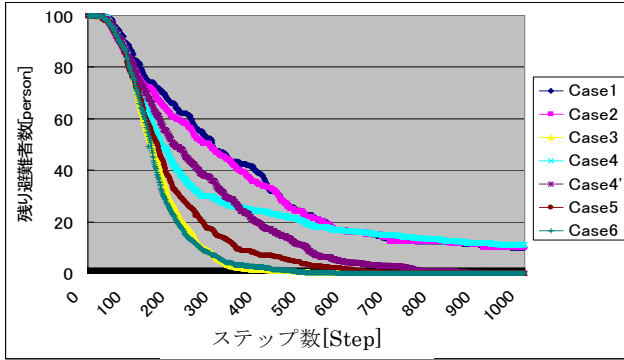


図-3 標識数の違いによる残り避難者数の比較

表-4 平均避難時間の比較

| | 平均避難ステップ数 | 避難時間 |
|--------|------------|---------|
| Case3 | 470.8 step | 169.5 秒 |
| Case4' | 816.7 step | 294.0 秒 |
| Case5 | 622.8 step | 224.2 秒 |
| Case6 | 459.2 step | 165.3 秒 |

3.2 シミュレーションの階層化

3.1 では、平面の 2 次元空間でのシミュレーションを行い標識設置数がどのように影響しているのかを検討した。この 2 次元空間シミュレーションを組み合わせることで、2 階から 1 階へ避難者が移動する 3 次元空間でのシミュレーションを行うことにより、より現実的な状況を作り出す。

ここでは、3.1 で実施した 2 階部分のシミュレーションに新たに 1 階部分を追加したシミュレーションを行う。階段部分歩行の時間のモデル化に関しては、本来、平地と階段での各歩行速度を測定し、1step 毎の速度を決定する必要があるが、本研究では降りる場合だけなので、通常の平地走行と同じ速度と仮定した。2 階の標識数は 3.1 の標識設置場所の検討で用いた Case5 (標識数 7) である。1 階の標識数は現在ある非常出口標識と一致させた 8 箇所とした。1, 2 階ともに避難者を 100 名配置し、シミュレーションを行った。なお、1 階には地下へ下りる階段があるが、シミュレーションを行う際地下へ降りる階段は使用しないものとする。

シミュレーション条件として、2 階の避難者は 100step 後から順々に 1 階に到着するものとし、階段からは出口を目指して移動するのみとする。各階のシミュレーション結果を図-4 に示す。

各フロアの避難ステップ数から計算した避難時間と、2

階から 1 階への避難時間を表-5 に示す。

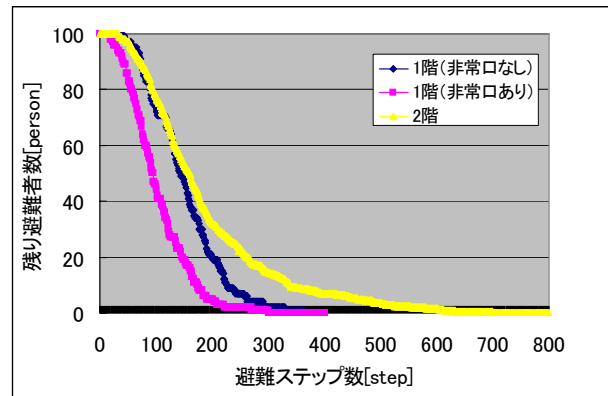


図-4 各階の避難者数

表-5 各フロアからの避難時間

| | 避難ステップ数 | 避難時間 |
|------------|----------|---------|
| 1階 (非常口なし) | 354 step | 127.4 秒 |
| 1階 (非常口あり) | 301 step | 108.4 秒 |
| 2階 | 577 step | 207.7 秒 |
| 2階から1階へ | 730 step | 262.8 秒 |

3.3 避難者数による避難速度の違い

災害が起きた場合、建物内部にいる避難者数の違いにより、避難速度がどのように変わるのかを、比較・検討した。

3.2 で開発したシミュレーションシステムを用いて、1・2 階の避難者数を変化させ、避難速度を調査することで、このシステムを活用した防災教育プログラムの開発に生かしていくことができる。各フロアの避難者数を 50, 100, 150, 200, 250, 300 名とした。なお、1・2 階の避難者は同時に避難開始したものとして、シミュレーションを行った。シミュレーション結果を図-5 に示す。

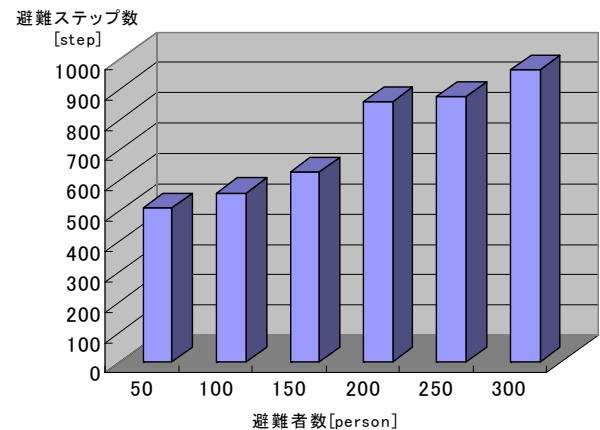


図-5 避難者数の違いによる避難ステップ数

避難者数を 50 名ずつ増やしていった場合、ある人数を境にグラフが一直線に増加しなくなることがわかる。この原因としては、以下のことが考えられる。

- ・ある一定の人数を超えると、階段や出口に人がたまり

スムーズな避難が行えない。

- 複数の避難者が同時に階段を下りようとする時、避難者同士がぶつかってしまう。

これらの結果から、避難者数の増加がいかに避難速度に影響を与えるかがわかった。今後の方針として、避難者数の増加に伴い避難速度が自動的に減少するシステム開発を行うことができれば、より現実的な状況に近くなり効果的な防災教育が可能になる。

本来、避難者数も一つの要因であるが、他にも設備や構造の要因で避難速度は変わると考えられるので、防災教育の検討には避難者数のみでなく他の要素も考慮すべきと考えられる。

4. 防災教育効果の検証

防災教育効果を検証するために、まず、3.2 で用いた 2 階から 1 階へのシミュレーションを用いてそれぞれの避難行動を把握する。各フロア 100 名ずつの避難者を配置し、通常時では避難者全員が冷静に判断できる状況とし、災害時では災害が起こったことを想定している。通常時と災害時の避難者の行動パターンを表-6 に示す。表-6 の人数構成は特に現実のデータを集めたわけではない。通常時の人数は解析結果をわかりやすくするために 100 名とし、災害時の通常型はその半分の 50 名、追従型はそのまた半分の 25 名、遅延型はけがなどをした人のある程度想定してというように仮定したものである。避難者 E (要救助者) は避難者 A (通常型) に救助してもらうことを前提にシミュレーションを行った。(a)通常時、(b)災害時のシミュレーション結果を図-6 に示す。

表-6 避難者の行動パターン

| | 通常時 (人数) | 災害時 (人数) |
|-------------|----------|----------|
| 避難者A(通常型) | 100 | 50 |
| 避難者B(追従型) | | 25 |
| 避難者C(遅延型) | | 20 |
| 避難者D(パニック型) | | 2 |
| 避難者E(要救助者) | | 3 |

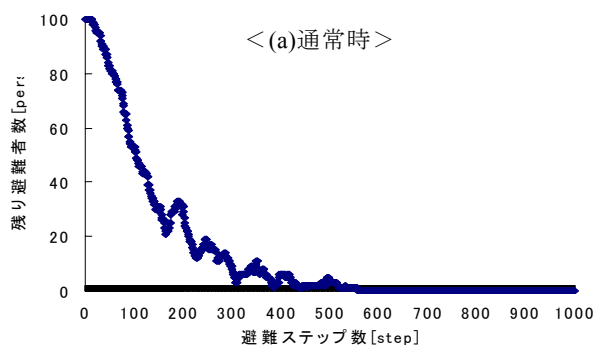


図-6 (a) 通常時の避難者数の時間変化

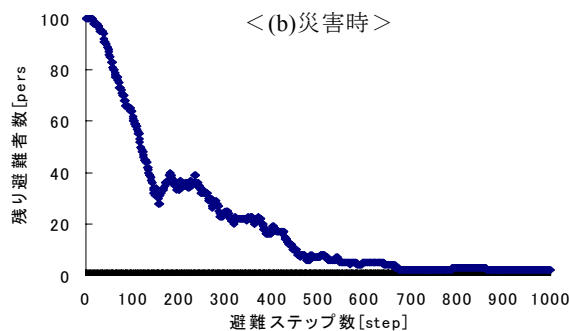


図-6 (b) 災害時の避難者数の時間変化

図-6 の(a), (b)を比較して、通常時ではグラフがなだらかに減少していることから、スムーズな避難が行われたことがわかる。一方、災害時では 150~250step 間グラフがほとんど減少していない。これは、1 つの階段に避難者が集中してしまったことが原因といえ、階段に避難者が集中しスムーズな避難を行えなかったことが避難時間に大きく影響したといえる。また、通常時、災害時における避難ステップ数から計算した避難時間を表-7 に示す。

表-7 通常時、災害時の避難時間

| | 通常時 | 災害時 |
|---------|----------|----------|
| 避難ステップ数 | 557 step | 862 step |
| 避難時間 | 205.5 秒 | 310.3 秒 |

通常時と災害時の避難時間を比較すると 104.8 秒もの差があることがわかった。通常時の避難時間が約 3 分半ということから考えてこの差は避難するには非常に大きなものといえる。

そこで、防災教育をおこなってこの差を縮小することが可能かどうか、シミュレーションを用いて検証した。先ほどと同様の条件でシミュレーションを行う。防災教育後の避難者の行動パターンを表-8 に示す。

表-8 避難者の行動パターン (防災教育後)

| | 通常時 | 災害時 | 防災教育後 |
|-------------|------|-----|-------|
| 避難者A(通常型) | 100名 | 50名 | 70名 |
| 避難者B(追従型) | | 25名 | 15名 |
| 避難者C(遅延型) | | 20名 | 10名 |
| 避難者D(パニック型) | | 2名 | 2名 |
| 避難者E(要救助者) | | 3名 | 3名 |

避難者の種類は、避難開始後から状況によりプロフィールが変化する可能性がある。本研究では、実際に防災教育を行った場合、避難の状況がどのように変わるかを人数を変えてシミュレーションすることに重きを置いている。また、どのような教育を行えばどの程度の人が冷静に行動するのかなどということは把握しておく必要がある、これは今後の課題と言える。

通常時では、避難者全員が冷静に行動できるものとし、災害時には冷静に行動できる人がその半数となると仮定

した。そこで、防災教育効果を把握するために、防災教育を行った後に、冷静に行動できる人が半数から7割まで増えたと想定して、シミュレーションを行った。シミュレーション結果を表-9に示す。

表-9 各避難時間（防災教育後）

| | 通常時 | 災害時 | 防災教育後 |
|---------|----------|----------|----------|
| 避難ステップ数 | 557 step | 862 step | 605 step |
| 避難時間 | 205.5 秒 | 310.3秒 | 217.8秒 |

防災教育を行えば、通常時との避難時間の差が12.3秒にまで縮まることがわかった。また、冷静に行動できる人を7,8,9割と増やしてシミュレーションを行ったが、通常時との差が約10秒とほとんど変わらない結果となった。これから、防災教育を行って7割程度の人が出口を知っているなどの知識を持ち、さらに冷静に行動を行うことが減災につながるということがわかった。

今回は、防災教育前と後に冷静に避難できる人の数をそれぞれ、5割と7割と仮定して実施したが、これはあくまでも仮定であり、現実の状況を反映したものにはなっていない。今後は、過去のデータや避難実験をもとに、災害時に冷静に行動できない人の割合を算出し、現実を反映した教育効果について検討をしていきたい。

5. おわりに

本研究では、災害時避難シミュレーションシステムを用いて、大学研究棟のフロアにおいて様々な状況を想定して避難シミュレーションを行った。避難の状況を可視化することで、災害時における避難状況がイメージしやすくなり、このことが効果的な避難につながり、事前の防災教育に効果があることを示した。また、様々な状況下でシミュレーションを行うことで、参加者が最適な避難対策を考えることが容易になり教育効果の向上が期待できる。

本研究では、避難シミュレーションシステムを用いて効果的な事前防災教育を実施するために、システムが具備すべき下記事項について検討を加えた。

- (1) 標識設置の必要性
- (2) シミュレーションの階層化
- (3) 避難者数による避難速度の違い
- (4) 防災教育効果の検証

以上のような様々な条件下でシミュレーションを行うことで、より現実に近い状況を想定することができた。また防災教育効果の検証により、シミュレーションを用いて防災教育を継続的に行うことができれば、防災意識の向上につながり、防災・減災効果向上が期待できる。

今後の課題を以下に示す。

(1) シミュレーションモデルの高度化

今後は、災害発生時における避難者の行動ルールをより現実の避難行動に近づけることが必要である。この対

応として、避難行動というあいまいで定性的データから客観化可能な部分を取り出して定量的なデータに変換し、このデータを避難シミュレーションモデルに組み込むことで、防災教育効果の向上を目指す必要がある。そのために、対象者への避難に関するアンケート等を実施し、その結果から個人の避難に関するデータを避難シミュレーションモデルの避難行動として用いる必要がある。

(2) シミュレーションを用いた防災教育の実施

事前に防災教育を行うことが防災・減災に効果的であることを示すことができたが、実際に学生や教職員を前にしてシミュレーションを使った防災教育を行うことが、防災・減災につながる。さらに、対象者と意見を交換することで、防災教育効果並びにシステム機能向上につながっていく。今回は、大学の研究棟を対象としたが、小・中学校などの校舎を対象としたシステムを構築し、そのシステムを活用した授業を実施することにより防災教育効果の向上が期待できる。しかし、シミュレーションとはいえ災害が広がっていく様子を見せることで、小学生低学年の生徒には不安な感情を抱かせてしまう可能性もあり、実際に行う際には十分な検討が必要と思われる。

参考文献

- 1) 清野純史, 三浦房紀, 八木宏晃: 個別要素法を用いた被災時の避難行動シミュレーション, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.365-378, 1998.
- 2) 近田康夫, 浅池剛成, 城戸隆良: CAを用いた避難シミュレーションに関する一考察, 構造工学論文集, Vol.49A, 2003. 3.
- 3) 有友春樹, 白木渡, 井面仁志: Live Designによる参加型避難シミュレーションシステムの開発, 安全問題研究論文集, Vol.1, pp.13-18, 2006.11.
- 4) 磯打千雅子, 田中秀宜, 本多隆範, 白木渡, 井面仁志, 有友春樹: 避難シミュレーションを活用した地域防災向上技術の取り組み, 安全問題研究論文集, Vol.1, pp.19-24, 2006.11.
- 5) 上田完次, 下原勝憲, 伊庭斎志: 人工生命の方法 — そのパラダイムと研究最前線 —, 第一資料印刷株式会社, 1995.

(2007年8月17日受付)