

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

Development of participatory evacuation simulation system for Live Design

有友春樹*, 白木渡**, 井面仁志***

Haruki ARITOMO, Wataru SHIRAKI, Hitoshi INOMO

*香川大学大学院, 信頼性情報システム工学専攻 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

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

*** 博 (工) 香川大学助教授, 信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

In this study, the participatory evacuation simulation system is developed to achieve a speedy evacuation using Live Design approach in emergency. In construction of the system, a simple CA(Cellular Automata)-model is used to grasp the pedestrian dynamics in emergency. The simulation process can be visible by using JAVA applet, and the simulation conditions can be changed in real time. Using this system, therefore different persons concerned with disasters such as inhabitants, the persons concerned with fire fighting, the facilities manager, the administrations, the experts and so on can exchange opinions about the evacuation with a different point of view, and then those opinions can be immediately reflected in simulation. The effectiveness of this system is discussed through some simulations example.

Key Words: evacuation simulation, participatory system, live design, CA-model

キーワード: 避難シミュレーション, 参加型システム, ライブデザイン, CA モデル

1. はじめに

近年, 国内外を問わず大規模地震や台風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。これまでの防災対策では, 建造物の耐震補強や防波堤の設置などハード的な対策が主として行われてきた。このようなハード防災対策では, 過去の災害をもとに建造物の耐震基準の改訂や防波堤の高さの変更などが行われ, 想定内の災害には一定の効果を発揮してきている。

しかし, 従来の施設・設備だけに頼ったハード防災対策だけでは阪神淡路大震災に代表されるような想定外の災害については対応することが出来ない。このような想定外の災害が発生した場合は, 被災した建造物あるいは地域から如何に迅速かつ効果的に人々を避難誘導し, 人的被害を軽減させるかというソフト的な防災の考え方が重要となる。

このソフト防災対策としては, 事前教育や防災訓練など様々な形で行われている。しかし, 災害発生時において時々刻々と変化する避難状況を把握し, 適切な避難行動を考えることは困難である。このような時々刻々と変化する災害にライブ (Live) (リアルタイム) に対応し, 最適な避難を実現する考えに Live Design がある¹⁾。

本研究では, Live Design の考え方に基づいて, 災害時における最適な避難を実施するために, まず時々刻々と変化する災害

時の避難行動を再現できるシミュレーションシステムの開発を行う。システム開発の手法としては, 複雑系のシミュレーションに有効なソフトコンピューティングの1つであるセルオートマトン (以下 CA)²⁾⁹⁾を用いる。まず, CA を使用して災害時における人々の避難行動をモデル化し, 想定外の災害時における避難について様々な観点から検討可能な避難シミュレーションモデルを構築する。CA を用いた避難シミュレーションのシステムの開発については, これまでも多くの研究⁹⁾¹⁰⁾が行われているが, 防災にかかわる様々な主体が参加して, 事前に防災・減災について検討するツールとして研究開発されたものは少ない⁹⁾¹⁰⁾。そこで本研究では, 地域や施設の防災に関する様々な主体が参加して意見交換が可能で, 時々刻々と変化する災害に対して迅速な避難を実現する Live Design のツールとして活用可能な参加型避難シミュレーションシステムの開発を行う。

そして, 開発したシステムを用いて一般的なオフィスフロアにおいて防災訓練時の避難状況と実際の災害時を想定した避難状況の再現を行い, 災害時に起こりうる避難状況と適切な避難方法に関する検討を行った。この検討結果をもとに, 本研究で提案している Live Design による参加型避難シミュレーションシステムの有効性を検証する。

2. システム開発のコンセプト

2.1 Live Design の考え方

従来の防災の考え方は、大地震のように予想困難な大災害に対しては、建物や構造物自体の耐震性能を向上させて被害の軽減を図るというものである。しかし、2001年9月11日にアメリカ・ニューヨークで発生した同時多発テロについていえば、最新の防災設備が整っているはずの世界貿易センタービルにおいてさえ多数の死者が発生することを防げなかった。

このテロを契機にアメリカでは、防災の考え方が大きく変わった。すなわちLive Designの考え方が注目されるようになった。Live Designとは、テロや大地震のように予想困難な大災害に対しては、建物の被害軽減を図るだけではなく、災害発生時にIT技術を効果的に活用し、ライブ（リアルタイム）に情報収集を行い、その情報をもとに最適な避難経路の確保および避難経路への誘導を行って人的被害の軽減を図るというソフト防災の考え方である。Live Designの考え方は、コロンビア大学（米国）のG Dasgupta教授により提唱された、新しい減災の考え方である¹⁾。

Live Designの考え方による防災の主な観点としては、

- ①災害時の安全性の確保
- ②災害時の情報伝達方法の検討
- ③防災教育の実施

が挙げられる。これらの観点を考慮してハード防災の観点だけでなく減災というソフト防災の観点からも構造物の設計、維持、管理の在り方を考えるのがLive Designである。

2.2 参加型システムのコンセプト

これまでも防災対策としてシミュレーション技術が用いられてきているが、それらの多くは、被害の規模・範囲等のハード的な防災に対応するためのシミュレーションであり、人々の避難誘導というソフト的な防災への対応は十分とは言えない。また、膨大なデータ処理のもとに詳細なシミュレーションを行うため、処理能力の高いコンピュータを使用する必要があり、手軽に利用できる環境ではない。そこで、本研究では、避難に関する活用を主目的として、市販されているパソコンで手軽に利用できるシミュレーションシステムの開発を目指す。

システムの開発に際しては、住民・技術者・消防関係者・施設管理者・行政・専門家等防災に携わる多様な主体が、様々な視点で避難に関する意見交換・反映・設計が可能な機能を備える。さらに、Live Designの考え方のもと、迅速な避難の実現が可能となるよう施設・設備設計、避難計画等へ具現化させることを目指す。そのため、様々な場所において、想定被害や地域の状況等をシミュレーション可能にし、シミュレーション実行中においても条件変更・付加をライブで対応可能なシステムを構築する。

本研究で開発する参加型避難シミュレーションシステムの主な特徴を以下に示す。

(1) CAモデルの採用

災害時の人の避難行動は予測困難で、複雑系として取り扱う必要がある。そこで、本研究の避難シミュレーションでは、複

雑系のモデル化・シミュレーションに有効なCAを用いて、災害状況、人の避難状況を再現する。

CAでは、全体の状態変化を局所的な状態変化の組み合わせで再現するため、様々な災害や人の避難行動等について局所的なルールを設定するだけで、シミュレーションが可能となり、様々な災害、人の避難行動を再現することができる。

(2) JAVAを用いたシミュレーションの可視化

時々刻々と変化する災害状況、人の避難状況等について、時間ステップごとに可視化を行う事で、様々な立場の人々がその状況を見ながら意見交換をスムーズに行えるよう考慮している。また、シミュレーションの構築にJAVAを採用することにより、Webブラウザが利用可能なコンピュータであれば、シミュレーションが利用できるようにしている。

(3) リアルタイムでの条件変更

マウス等の使用により、シミュレーションの条件をリアルタイムで変更可能にする。これにより、Live Designの考え方のもと様々な立場の人の意見をその場で取り入れ、その影響を確認することができ、スムーズな意見交換・合意形成が可能となる。

3. CAによる避難シミュレーションモデルの設定

想定外の災害発生時にLive Designを効果的に実践し、適切な避難誘導を行うためには、想定外の災害発生時に起こりうる現象を予測して、効果的な避難をLive（リアルタイム）に実施できるシステムが必要である。そこで本研究では、空間・時間ともに離散であり、シミュレーション実行中においても状態の変更が可能なCAを用いてシステムを構築する。

3.1 CAの特徴

CAは空間的なセルの離散的な格子で構成されており、各セルは有限な状態の1つを有し、以前の時間ステップにおける状態と近傍の状態、ならびに遷移規則によってその状態を変化させ、全体としての現象を表現する手法である。このモデル化手法の特徴は、解析対象の支配方程式を求めする必要がなく、すべての計算が整数演算であることにあり、現象だけがコンピュータ画面上にクローズアップされることである。

CAの具体的な特徴を以下に示す²⁾。

- 1) 空間的に離散である。
- 2) 時間的に離散である。
- 3) 離散状態をとる。
- 4) セルの均一性。
- 5) 同期的な状態更新。
- 6) 決定論的な規則。
- 7) 空間的に局所的な規則の適応。
- 8) 時間的に局所的な規則の適応。

3.2 空間のモデル化

シミュレーションモデルを構築するにあたり、本研究では2次元CAモデルを採用し、空間は2次元の格子状のセルに分割する。各セルのサイズは避難者1人の大きさを考慮して1辺を50cmと設定する。

3.3 セルの状態

セルの状態としては、以下の4種類の状態を設定する。

(1) 避難者

避難者は、セルの取りうる状態の1つとして設定する。すなわち、格子状にモデル化した1つのセルに1人の人間が存在できる。

(2) 壁

避難者はこのセルへの移動は不可能であり、避難者の視野が妨げられる空間を表す。

(3) 障害物

避難者はこのセルへ移動することは不可能であるが、避難者の視野が妨げられない空間を表している。

(4) 歩行可能空間

歩行可能空間は、障害物等が何も存在しない空間、扉、階段などの避難者が移動可能な空間を表している。なお、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。標識は通常、避難者の歩行の妨げとなる位置に設置されていないため、標識のあるセルも歩行可能空間とする。

本研究では平面空間だけを想定しているため、セルの状態として階段などは想定していない。なお、1個のセルには上述した状態のいずれか1つの状態しか存在しないものとする。

3.4 シミュレーションの原則

避難シミュレーションの基本的な原則として以下の4つの原則を設定する。

(1) 空間： 平面空間

平面の2次元空間を想定し、階段等で上下に移動することはない。

(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： 1ステップに1セル

全ての避難者が行動を終えた時間を1ステップとする。時間ステップ t が1つ進むごとに、避難者は時間ステップ t において存在するセルに隣接するセルから1つのセルを選択して移動する。選択できない場合、その場のセルに留まる。

3.5 時間のモデル化

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。原則では、避難者は1ステップの間に1セル移動するとした。そのため本研究では、避難者の避難時の歩行スピードを早歩きのスปีド(時速5km)と仮定した場合、セルの1辺を50cmと設定しているため1ステップ0.36秒となる。従って、シミュレーションにおけるステップ数に0.36秒を掛け合わせることでより実際の時間と対応させることが可能である。

3.6 人間行動の基本ルール

(1) 避難者の目的行動

避難者は周りの状況に応じて動く方向に違いが生じる。そこで、避難者に視野を設定し、避難者が自らの視野の中に目的物を確認した場合に目的物に応じた目的行動をとる。以下に目的

行動の定義を示す。

- 視野の中に何もなければ向いている方向に進む。
- 視野の中に出口を確認すると出口に近づく。
- 視野の中に標識を確認すると標識に従う。
- 視野の中に人を確認すると人に追従する。

(2) 避難者の回避行動

避難者の目的行動で決定された次に移動するセルが歩行可能空間セルならばそのまま移動する。しかし、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場合に、避難者は回避行動を行う。図-1の中央のセルに避難者が存在し矢印の方向に進む場合、障害物がない場合には①のセルに移動を行うが、障害物がある場合、図中の①~④の順に障害物を検索し、回避行動を行う。

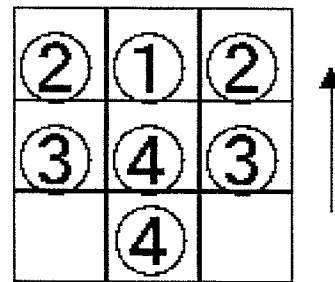


図-1 避難者の回避行動

3.7 避難者の種類

本研究では、災害時に予想される人間の避難行動をもとに、以下に示す5つのパターンの避難者を設定する。

(1) 避難者1 (冷静型)

上述した避難者の目的行動の a)~c)の行動を冷静に行う。この行動を行うことで避難者自ら出口を発見し避難することが出来る。

(2) 避難者2 (追従型)

避難者の目的行動の a)と d)の行動を主に行う。d)の行動により避難者2は避難者1に追従しながら出口を探していく。出口を確認すると b)の行動を行い避難することが出来る。

(3) 避難者3 (遅延型)

避難者1と同様の行動を行う。しかし、50%の確率でその場に立ち止まるために避難のスピードが遅い。

(4) 避難者4 (パニック型)

避難時にパニックを起こしている避難者である。避難者の目的行動を一切行わずにランダムに行動するため、避難できる確率は非常に低い。

(5) 避難者5 (要救助型)

災害が起こった時に負傷等により動けなくなった避難者を想定しており、避難者1に救助されるまで自らは行動を行わない。避難者1はその視野に避難者5を確認すると近くまで寄っていき救出を行う。その際、避難者1と避難者5は避難者3となりゆっくりと避難を開始する。

4. 参加型避難シミュレーションシステム

4.1 システムにおける対象の設定

システムの開発にあたり、シミュレーションの対象となるフィールド、災害形態、防災関連主体の設定を行う必要がある。それについて以下に述べる。

(1) 対象フィールドの設定

参加型避難シミュレーションシステムの開発は、パソコン画面上に映し出される避難シミュレーションをもとに意見交換を行うことが出来るシステムを目指している。このため、対象フィールドが市区町村全域など広域である場合、避難シミュレーション上の人の動きは、参加者にとって非常に見づらいものになってしまい、意見交換が困難になる可能性がある。従って、システムに使用する対象フィールドは、表-1 示すように設定した。

表-1 対象フィールドの設定

対象フィールド		
	対象	使用する図面の例
フィールド1	集合施設の1フロア (デパート、ホテル、オフィスビル、駅のホーム等)	建物平面 建物フロア平面図
フィールド2	地域コミュニティ (町内会、集合住宅等)	町丁目地域、小字・町内会 1/2,500都市計画図 住宅地図

(2) 災害形態の設定

避難シミュレーションを行う上で、避難方法や避難経路は、想定する災害形態により変化する。このため、設定した対象フィールドごとに、想定する災害形態を設定する。

避難シミュレーションモデルの開発において、本研究ではCAを用いており、対象空間は2次元セルにより構成されている。よって、ハザードのセル間の移動・拡散により災害形態に応じた災害の様相を再現することが可能となる。災害形態特有の様相としては、以下に示す状況が想定される。

避難シミュレーションの実行中に、火災の延焼状況の設定や道路被害、危険物の落下による通行不能箇所の発生状況をライブに反映できるようにすることがLive Designの実践を目指すうえで重要なポイントである。通行不能箇所は、画面上に障害物を設定することにより通行不能とする。

本研究では、各災害において想定される状況をもとに、表-2に示すような災害形態を設定した。

(3) 対象とする防災関連主体

対象とする防災関連主体は、対象とするフィールドに左右される。設定する対象フィールドと対象とする防災関連主体との関係を表-3に示す。

防災専門家は、避難シミュレーションを基に展開される意見をまとめ、避難シミュレーションに反映させる役割を持つ。また、一般住民、建物管理者、設計・設備等の技術者等の関係機関、行政機関は、それぞれの専門の立場から意見交換を行うが、全ての関連主体が参加する必要はない。例えば、「防災専門家と一般住民」、「防災専門家と関係機関」、「防災専門家と行政」といった参加者の構成においても、意見交換が成り立ち防災啓発、

防災教育、防災課題の検討等につながると考えられる。

表-2 災害形態の設定

災害形態	想定される状況	対象フィールド	
		フィールド1	フィールド2
地震	地震災害 ・地震による火災延焼状況 ・危険物の落下等による通行不能箇所の発生状況 ・土石流の流出状況 ・液状化の発生による道路陥没等の道路被害状況	○	○
		○	○
		-	○
		-	○
津波災害	津波の襲来状況	-	○
風水害	洪水災害 ・豪雨・河川の破壊による浸水状況 ・土石流の流出状況	-	○
		-	○
		-	○
高潮災害	高潮の襲来状況	-	○
火山災害	火山噴火による通行不能箇所の発生状況 ・火山噴火による火砕流・土石流の発生状況	-	○
		-	○
人的災害	人的による火災延焼状況 ・有害物質等の拡散状況	○	○
		○	○

表-3 対象とする防災関連主体

対象フィールド		対象とする防災関連主体	
フィールド1 集合施設の1フロア (デパート、ホテル、オフィスビル、駅のホーム等)	一般	施設利用者	
	関係機関	建物管理者、設計・設備等の技術者 防災専門家	
	行政	消防関係者	
	一般	地域住民、町内会長、集合住宅の理事長等	
フィールド2 地域コミュニティ (町内会、集合住宅等)	一般	地域住民、町内会長、集合住宅の理事長等	
	関係機関	建物管理者、設計・設備等の技術者 防災専門家	
	行政	消防関係者、市区町村職員等	
	一般	施設利用者	

4.2 入力データの作成

(1) フィールドデータの作成

フィールドデータの作成は、対象とするフィールドの図面に現地踏査結果を反映し、出口方向、避難方向など基本的な人の流れを設定する。そして、地域住民のヒアリング結果や施設の平常時の利用者人数を図面上に反映させる。このデータは避難シミュレーションを行う基本画面となる。

1) 対象フィールドの図面の入手と現地踏査

建物平面図、住宅地図、都市計画図など対象フィールドに合わせた図面を入手し、現地踏査を行う。現地踏査では、まず全体を歩き回り、図面と現況との相違点を確認する。確認にあたっては、写真の撮影、図面への書き込みなどを行う。

その後、施設フロアや住宅の出口方向の確認、生活道路等日常利用する通路、想定される避難方向等の確認を行う。

2) 対象人数の設定

地域住民や建物管理者へのヒアリング、住宅地図等をもとに対象人数を図面上に配置する。

3) フィールドデータの作成

現地踏査結果をシミュレーション上に反映するため、図面をスキャニングしデータ化する。さらに、出口位置、避難方向や対象人数のデータの設定を行う。

(2) シミュレーション条件の設定

1) 想定災害の付与

シミュレーション条件の設定は、作成した基本画面をもとに想定災害のシナリオを作成し付与する。想定災害は、表-2にて示したような災害を発生させる。さらに、避難を始めるタイミングや火災の発生、防火扉の閉鎖、通行不能箇所の発生等二次的災害については時間差を付与させて設定する等、想定シナリオを数ケース設定する。

2) 意見交換・結果の反映

以上の入力データを基にして、シミュレーションを行う。この結果得られた意見をもとに通行不能箇所や最適な避難経路などをライブ（リアルタイム）にシステムに反映させていき、さらに意見交換を行う。図-2に本システムの利用イメージを示す。



図-2 システム利用イメージ

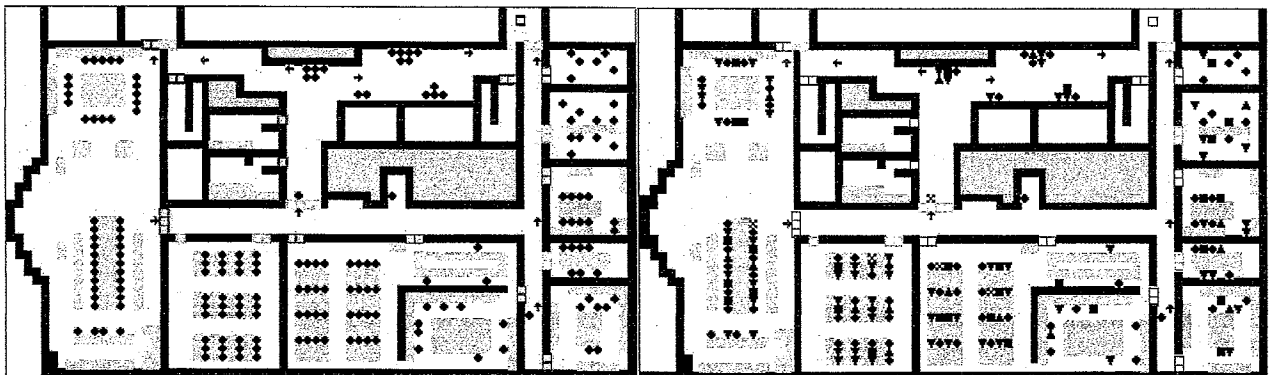
5. システム適応事例

身近な防災訓練の1つとして、災害の発生を想定して建物などから避難を行う避難訓練が良く実施されている。この避難訓練では、災害発生時の避難経路の確認、非常口、消火栓の位置など日常あまり意識していない施設の位置確認等が行われ、防災に対して非常に有効な訓練である。しかし、訓練では実際に災害が発生していないため、全ての避難者は冷静に避難を行っている。しかし、災害発生時には、全ての避難者が冷静に避難を行うとは考えられない。そこで、本研究で開発した参加型避難シミュレーションシステムを用いて、オフィスフロアを対象に避難訓練時の避難行動と災害発生時の避難行動のシミュレーションを行う。このシミュレーション状況を、実際にフロアを使用している学生に確認してもらうことにより、災害発生時の迅速な避難行動に関する議論を行った。図-3に0step時点(今回のケースの初期値)のシミュレーションの実行画面を示す。

図-3(a)は避難訓練時 (Case1) を想定しており、全ての避難者が冷静に避難を行う避難者1 (冷静型) として185人配置した。一方、図-3(b)は実際に災害が発生した状況 (Case2) を想定し、避難者の行動パターンとして避難者185人中、避難者1 (冷静型) は75人、避難者2 (自従型) は15人、避難者3 (遅延型) は60人、避難者4 (パニック型) は30人、避難者5 (要救助者) は5人とし、ランダムに配置した。

図-4は100step時点でのシミュレーションの実行画面である。

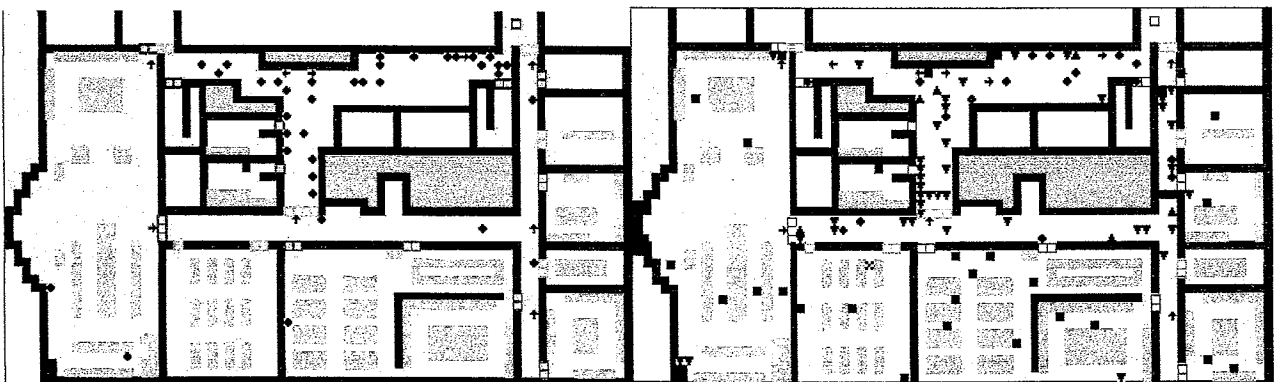
●: 避難者1, ▲: 避難者2, ▼: 避難者3, ■: 避難者4, ×: 避難者5



(a) 避難訓練時 (Case1)

(b) 災害発生時 (Case2)

図-3 シミュレーションの実行画面 [0step]



(a) Case1 の避難状況 (100step 時点)

(b) Case2 の避難状況 (100step 時点)

図-4 シミュレーションの実行画面 [100step]

図-4(a)に Case1 の避難状況 (100step 時点), 図-4(b)に Case2 の避難状況 (100step 時点) を示す。これらの結果より, 避難訓練時のように冷静に避難することにより避難がスムーズに行われることが明らかである。

さらに, このシミュレーションをもとに学生と避難状態に関して議論を行った結果, 以下に示す意見が出された。

- 1) 避難者 1 (冷静型) が避難者 3 (遅延型) や避難者 4 (パニック型) に通路を防がれ, 扉付近で邪魔をされてうまく避難行動が行えない状況が発生している。
- 2) 避難者 1 (冷静型) が動きの遅い避難者 3 (遅延型) を追い抜いて避難する状況が発生している。
- 3) 避難者 1 (冷静型) が出口とは違う方向に避難者 5 (要救助型) を救助に向かう場合に, 他の避難者の妨げになるという状況が発生している。

このように, 実際に災害が発生した場合, 避難訓練時には想定できないような様々な状況が発生していることがわかった。そこで, これらの意見をもとに, 人的被害の軽減を図るために必要な迅速な避難行動に関して, 学生を交えてさらに検討を行った結果, 以下のような意見が出された。

- 1) 避難者 4 (パニック型) が部屋に残されている状況なので, 避難者 1 (冷静型) が避難者 4 に声をかけていっしょに避難することが大切ではないか。
- 2) 避難者 3 (遅延型) がいる場合, 避難者 1 (冷静型) は避難者 3 を追い抜いて行くのではなく, 避難者 3 が避難しやすいように誘導することが大切ではないか。
- 3) 避難者 2 (追従型) は通路を塞いでしまうことがあるので, 広い通路に誘導して避難させることが大切ではないか。

これらのことから, 災害時においても冷静でいられる避難者 1 (冷静型) は周りに目を配り, 相手の状況を見て適切に避難行動をとることが大切であるといえる。

その他にも, 火災が発生しそうな場所や普段よく荷物が放置されていて通行が難しい場所など, 防災環境の不備の問題点についても議論し, 実際にシミュレーション上にその状況を発生させてどのように避難をすれば適切に避難が可能かについて検討できる。例えば, 給湯室から火災が発生した場合はどうするのか, いつも重ねている荷物が倒れてきたらどうするのかなど具体的な意見を出し, 対策を考えることが可能になる。

今回のケースでは学生を対象に議論を行い, このような意見が出てきたが, 様々な主体の人々に意見を聞くとともに踏み込んだ議論ができるのではないかと考えている。

本研究で開発した参加型の避難シミュレーションシステムを用いれば, 災害時に起こりうる人間の行動を再現することが可能で, 実際に災害が起きた場合にどのような対策をとればよいのかを, 具体的なイメージを持って考えて議論することが出来た。防災・減災の議論は, このように具体的な議論のもとに合意形成が図られることが重要である。

このように, 事前防災対策上重要な事項を, 一般論ではなく具体的な場所を設定して検討できるところに, 本研究で提案しているシステムの意義がある。

6. おわりに

本システムを用いれば, これまでのソフト的防災対策では想定できなかった, 災害時に自分の周りにはどのような危険が潜んでいるのか, 自分はどのような行動をとればよいかということを考え議論することが可能となる。災害時に起こりうる状況を視覚化して具体的に見ることによって, 実際の災害時に適切な行動がとれると考えている。つまり, 災害時に起こることを前もってリハーサルすることとなり, 本番 (災害発生時) においてその経験が活かされ, 大切な人命を救うことにつながる。

災害時に発生する様々な状況を, 参加者全員で考えながらシミュレーションにより何度も再現・実行しておけば, 災害に適切な避難行動・避難誘導が可能になる。さらに, Live Design の考え方をもとに, 想定外の事態を具体的な状況下で議論しておくことによって, これまでできなかった想定外の災害時における防災・減災教育が可能となり, 教育効果が期待できる。

残された課題としては, シミュレーションで再現された避難状況の検証があるが, この問題については現在実証実験の準備を進めており, 機会を改めて報告させて頂きたい。

なお, 本研究の一部は, 平成 16 年度から 17 年度の消防防災科学技術研究所推進制度による助成を受けて実施したものである。この場を借りて関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) <http://www.columbia.edu/~gd18/livedesign/index.html>
- 2) 有田隆也: 人工生命, 三美印刷株式会社(2002)。
- 3) 上田完次, 下原勝憲, 伊庭斉志: 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。
- 4) 加藤恭義, 光成友考, 築山洋: セルオートマトン法 — 複雑系の自己組織化と超並列処理 —, 森北出版株式会社, 1998。
- 5) Andrew Ilachinski: *Cellula Automata- A Discrete Universe*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2001。
- 6) 森下信: セルオートマトン 複雑系の具象化, 養賢堂, 2003。
- 7) 近田康夫, 浅地剛成, 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。
- 8) 森下信, 中塚直希: セルオートマトンを用いた緊急避難時の群集流解析, 第 52 回理論応用力学講演会, 2003。
- 9) Shiraki, W., Inomo, H., Yasuda, K. and Aritomo, H.: Simulation of pedestrian dynamics at occurrence of disaster using CA-model, Proc. of the 2004 International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation (ICIMA), IEEE, pp.191-195, 2004-8。
- 10) Shiraki, W., Inomo, H., Ishikawa, H. and Aritomo, H.: Simulation of pedestrian dynamics in emergency for live design of buildings, Proc. of ICOSAR2005, Millpress, CD-ROM, pp.823-829, 2005-6。

(2006 年 8 月 18 日受付)