

倒壊建物による道路閉塞と危険回避行動を考慮した 広域避難行動モデルに関する基礎的研究

○栗田 陽介^{*1} 高柳 英明^{*2} 柴原 寛子^{*3}
山田 昇吾^{*3} 木村 謙^{*4}

キーワード：広域避難シミュレーション 自律群衆モデル 避難回避行動 地域防災計画

1. 序章

1.1 研究背景と目的

建築空間内の避難安全検証及びその評価に用いられてきた群衆行動モデルを都市空間、特に地域防災計画に適切に技術移転する際に不可欠な行動要因を精査すると、道路・避難経路の閉塞という重要な環境要因があげられることが阪神・淡路大震災や東日本大震災等の被災事例調査や報告等から分かってきている。閉塞を来した避難空間に対して避難者は不安や身の危険を感じ、まわりみち等の危険回避行動をとるなど、非定常ながら一様の行動パターンを持つものと推察され、本研究はこの点を重視して、災害避難時において避難者が自律的に指定避難所を探し、避難を完了するという一連の防災行動を発現する行動モデルを構築することを目指すとした。

対して、国の発令する災害対策基本法や市町自治体のとりまとめる地域防災計画では、避難所の箇所数や収容人員の考慮がされず、具体的な広域避難計画の詳細策定には至っていないのが現状である。

そこで本研究は地震による住民の一斉避難を想定し、滋賀県大津市中心市街地を対象として、避難所の収容力・避難所へ至るまでの危険回避行動や道路状況をモデル化してシミュレーション^{注1)}に反映し、住民が避難所・避難場所へ移動する際の時間・距離等を比較・分析することで、地域防災計画における災害予防計画を再考し、広域避難計画の検討を行うことを目的とする。

1.2 既往研究と本研究の意義

広域避難シミュレーション研究に関して、森下ら¹⁾によって行われてきたネットワークモデル型・メッシュモデル型の広域避難シミュレーションは街区モデルが抽象化される点、人間を個ではなく群衆として取り扱う点において実際の現象を満足に反映させることが出来なかった。それらの問題点を改善したマルチエージェントモデル(以下 MA モデル)型の広域避難シミュレーション^{2)~5)}が盛んに行われているが、避難者が最短ルートを進み、第一目的地に到着した時点で避難完了となることが多く、主な指標として避難完了時間や距離を利用しているため避難経過の把握・分析において研究の余地を残していると言える。

また群集流動シミュレーション研究における移動個体の行動決定要因とその運動数理の体系化^{6)~8)}では、本研究で扱う建物倒壊による道路閉塞とは「遠距離の視覚情報」であり、都度の知的判断を要する解析数理モデルの構築が必要と判断されるため、本研究では心理的要因に起因する危険回避行動をシミュレーションの再現条件として取り入れる(表1)。

本研究の学術的意義として、混乱を極める災害避難時の非定常な行動を視覚的かつ事前に把握することで、地域防災計画策定の際におけるエキスパートジャッジあるいはリハーサルを容易にすることが出来る点、災害避難時の危険回避行動を反映することで災害避難時における影響を把握できる点、滋賀県大津市中心市街地における災害避難時の地理的特徴を見だし、市町自治体の策定する地域防災計画と広域避難シミュレーションの相関的な分析と評価が可能である点が意義として挙げられる。

2. 広域避難シミュレーションの初期条件

2.1 対象地域について

本研究では、滋賀県大津市中心市街地を対象地域として選定する(図1)。対象地域は百町を代表する高密度な木造市街地や行政・経済の中核機能を有する場所であり、居住者・就労者・一時滞在者が混在する場所である。分析の際は、対象地域内の町丁区分ごとに行うこととする。

2.2 滋賀県大津市の避難計画

滋賀県大津市において避難行動・各避難施設の設置計画指針は地域防災計画で規定されている(表2, 図2)。しかし、これらの規定は防災基本計画で示されている数値方針に沿って決められているのみであり、実情に即した的確な計画であるかどうかについては人員・予算不足が原因でなされていない^{注2)}。上記の観点から、本研究の対象地域の避難計画には以下のような問題点が挙げられる。

- 各地区の避難人口と避難所の配置・収容力の関係について未検討である点。
- 避難圏域 500[m]の包含から外れている地区(避難困難区域)が存在する点(図3)。
- 官・民の地域避難場所についてその位置・箇所が明確に規定できていない点。

なお、現状の大津市地域防災計画では地域避難場所の

指定がないことから現状の地域防災計画の分析の際には指定避難所を地域避難場所として想定し、シミュレーションを行う。

2.3 避難者の想定

本研究では地域防災計画に倣い、地震による一斉避難を想定し、避難者の初期与件を決めるため滋賀県大津市地域防災計画の被害想定を用いる。なお本研究では避難者を2種類に分けて定義する。

○ 一時避難者：地域避難場所へ避難することで避難完了とする。

○ 収容避難者：地域避難場所へ避難した後、家屋の損傷等で自宅への帰宅が困難であるため、避難所への避難をもって避難完了とする。

本研究では、避難者を対象地域内で生活する人とし、圏外からの来訪者は除外するとした。また自家用車、自転車等での避難は考慮せず、歩行による避難を想定する。避難者数^{注3)}については、一時避難者：4,154[人]、収容避難者：1,697[人]とし、避難者の最大歩行速度については横山らの避難行動解析結果⁹⁾を参考にして、1.2[m/sec]・1.5[m/sec]・1.8[m/sec]をそれぞれ1:3:1の割合で分布すると想定する。

3. 危険回避行動モデルの構築

3.1 モデルの定義

既存の広域避難シミュレーションでは、避難者が一斉に避難し、目的地に向けて最短経路を進むことを最適行動とするものが多いが、現実の避難者の行動は、平時とは異なり、心理的な要因の影響を大きく受けるため、全避難者が最適パターン・最短経路において移動することはない。本研究では、このような心理的な要因や避難所の再探索行動を広域避難シミュレーション条件として適用し、より現実に近い分析が可能となるように、次の2つの事象を「危険回避行動」として定義し、MAモデルの行動数理に当てはめるとした。また、この複雑な危険回避行動を離散化し、概念モデルの作成を行う(表4)。

- A) 経路再探索行動…避難行動中の、遠距離の視覚情報として得られた危険箇所と道路閉塞の状態

を把握し、回避する行動

- B) 避難所再選択行動…先んじて避難完了した避難者による避難所の収容人数超過を把握し、他なる避難所への道のりの教示を受け再避難する行動

3.2 道路閉塞が生じる道路について

災害発生時において、道路閉塞の要因となる事象として道路に面する建物や塀の崩壊・損傷や住宅火災が考えられる。そこで本研究では対象地域内において実地調査を行い、閉塞する可能性がある道路の抽出を行った。実地調査より、a)障害物による閉塞が高確率で起きると考えられる幅員4.0[m]以下の道路(以下、狭隘道路)、b)崩落危険性があるアーケードの架かる道路、c)階段を含む道路を歩行者の通行が困難となる閉塞避難経路として定義した。なお本研究では対象地域内において約2割となる33本の道路を閉塞避難経路と指定し、広域避難シミュレーションモデル上で反映させる(図4)。

4. 広域避難シミュレーションの試行

4.1 広域避難シミュレーションモデルの構築

本研究で用いる歩行者行動シミュレーションは全て汎用CAAD環境において試行を行った。またシミュレーション演算用の離散空間ジオデータおよび危険回避行動を考慮した避難行動モデルの構築はSimTreadプラグイ

表1 移動個体の行動決定要因とその運動数理

項目			歩行運動の基本要素	行動の結果	
行動決定要因	A	目的地への到達意欲		目的地到達行動	目的地に着く
	B	接触に寄る知覚情報		圧迫・衝突に対する抵抗	状況や姿勢の維持
	C	中・近距離の視覚情報	近距離	回避行動	衝突することなく擦れ違う
				追従行動	流れを乱さず歩く
				追跡行動	最適な速度を保つ
				随行行動	壁に沿って歩く
				隙間探索行動	無理なく割り込む、追い越す
	D	意図的な方向転換		立ち寄り行動	券売機で切符を買う、店で買物をする
	E	遠距離の視覚情報		知覚判断	目前の建物倒壊状況から危険回避行動をとる、別のルートを探索する
	F	意図的に取得した大域情報	ローカルナビゲーション	情報取得による予測・判断	直感的な歩行支持による歩行転換、ウェイファインディング
グローバルナビゲーション			カーナビゲーションでの情報取得に寄る渋滞の回避		
G	内部意識		気分・思考	偶発的行動	

表2 滋賀県大津市の都市防災施設計画指針

避難場所の区分	広域避難場所	(学区) 避難場所	地域避難場所
施設規模	概ね10ha以上	概ね1ha以上	任意
避難圏域	歩行距離2km以内	歩行距離500m以内	歩行距離500m以内

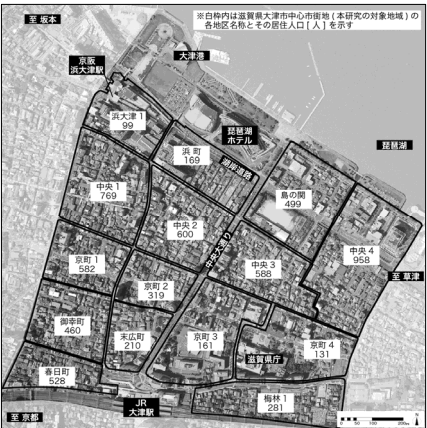


図1 対象地域における地区区分

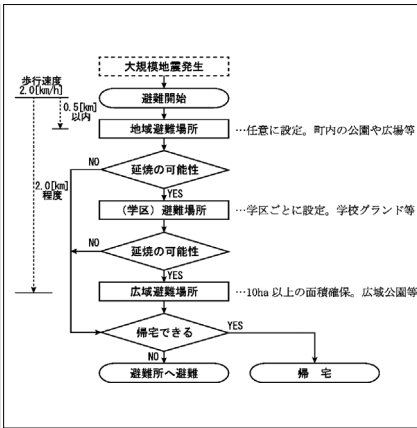


図2 大津市避難フローチャート

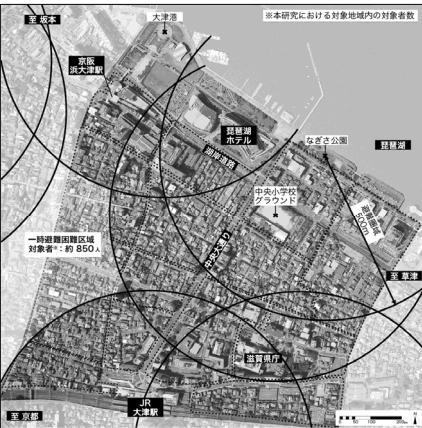


図3 対象地域における避難圏域

ン・プログラムをベースにし、全エージェントの逐次個体位置をテキストログとして蓄積できるよう配慮した。その際、経路再探索行動を歩行速度 $0.2[m/sec]$ を $6.0[m]$ の継続発動、同様に避難所再選択行動は、歩行速度 $0.5[m/sec]$ を $15.0[m]$ 継続発動するよう数理モデルとして実装した。後者はすなわち同位置において $30.0[sec]$ の立ち止まり行動を行うことになる（図 5, 6）。

4.2 広域避難シミュレーションの試行

初期与件をもとに、表 3 に示す 5 つのケースについて試行する。図 7 は本研究における避難想定領域を示しており、これがシミュレーション空間となる。なお、各避難施設・要素の位置はこの図の通りである。

○ ケース 1：避難所収容人数の検証

現状の滋賀県大津市地域防災計画を用いて、避難所の収容人数の不足について、具体的な検証を行うこととする。避難未完了者率^{注 4)}を見ると、対象地域の南側に位置している地区で高くなっていることが見て取れる（図 8）。しかし歩行距離中央値を見るとこれらの地区において $500[m]$ を超えている地区が多くないことから、対象地域の南側に設置されている避難所が周辺の人口に対して少ないということがわかる（図 9）。対称的に島の関の避難未完了者率は極端に低いことが見て取れるが、これは最寄りの避難所 A の収容人数が、島の関地区人口を上回っていることが要因であると推測できる。避難所再選択行動回数をみると北西の

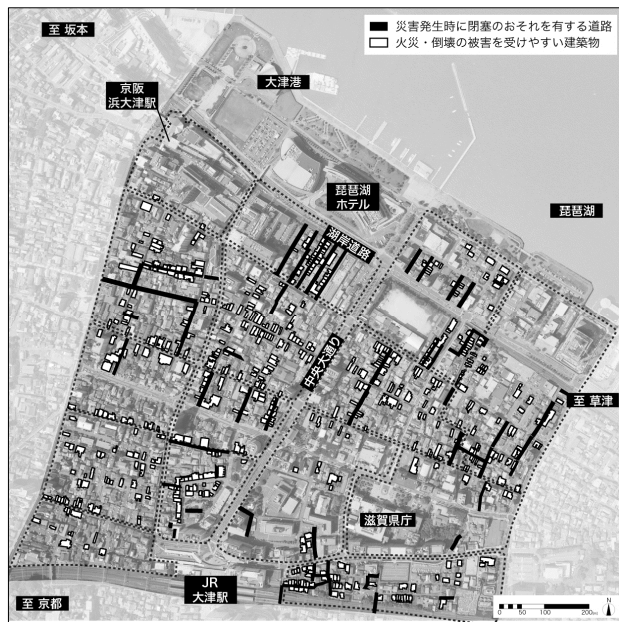


図 4 対象地域内の閉塞道路とその位置

表 3 各シミュレーションで想定する諸条件

	ケース 1 避難所 収容人数の 検証	ケース 2 避難所 再選択行動の 検証	ケース 3 経路 再探索行動の 考慮	ケース 4 地域避難場所 の追加	ケース 5 地域避難場所 の追加・経路 再探索行動の 考慮
避難形態	直接	段階	段階	段階	段階
収容避難者[人]	5,851	1,697	1,697	1,697	1,697
一時避難者[人]	—	4,154	4,154	4,154	4,154
避難所数[箇所]	6	6	6	6	6
避難場所数[箇所]	—	3	3	21	21
道路閉塞の設定	—	—	有り	—	有り

表 4 危険回避-避難所再選択-避難完了行動を考慮した
本研究の MA モデルの逐次行動ルール

モデル図	エージェントの動作	数値基準
イ	① エージェントの歩行速度 U を維持して、目的地へ向かう	$U=1.2, 1.5$ 又は $1.8[m/s]$
	② エージェントの歩行速度 U を維持して、目的地(D1)への最短距離を選択	$U=1.2, 1.5$ 又は $1.8[m/s]$
	③ 避難完了	—
ロ	① エージェントの歩行速度 U を維持して、目的地へ向かう	$U=1.2, 1.5$ 又は $1.8[m/s]$
	② 歩行速度 U に減速し、通行不可能域を避ける (経路再探索行動の再発)	$U=0.2[m/s]$
	③ エージェントの歩行速度 U を維持して、目的地(D1)への最短距離を選択	$U=1.2, 1.5$ 又は $1.8[m/s]$
	④ 避難完了	—
ハ	① エージェントの歩行速度 U を維持して、目的地へ向かう	$U=1.2, 1.5$ 又は $1.8[m/s]$
	② 歩行速度 U に減速し、通行不可能域を避ける (経路再探索行動の再発)	$U=0.2[m/s]$
	③ D1が収容人数超過の場合、経路再探索のため歩行速度 S に減速し、次の目的地(D2)へ向かう (避難所再選択行動の再発)	$S=0.5[m/s]$
	④ エージェントの歩行速度 U を維持して、目的地へ向かう	$U=1.2, 1.5$ 又は $1.8[m/s]$
	⑤ 避難完了	—
	⑥ D2が収容人数超過の場合、経路再探索のため歩行速度 S に減速し、次の目的地(D3)へ向かう (避難所再選択行動の再発)	$S=0.5[m/s]$
	⑦ 避難完了	—

シミュレーションフィールド(避難空間)の概要

モデル図	ステータス	凡 例	エージェントの動作を規定するルール	数値基準
ニ	Sta.0		歩行速度 U を維持させる	$U=1.2, 1.5$ 又は $1.8[m/s]$
	Sta.1		前方の危険領域 (Sta.4) をエージェントへ示す	$U=1.2, 1.5$ 又は $1.8[m/s]$
	Sta.2		歩行速度 U を回復させる	$U=1.2, 1.5$ 又は $1.8[m/s]$
	Sta.3		歩行速度 U に減速させる	$U=0.2[m/s]$
	Sta.4		エージェントの侵入を制限する	—

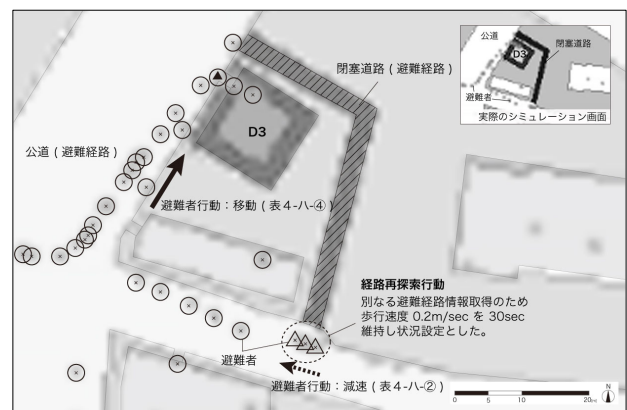


図 5 移動個体の逐次経路再探索行動

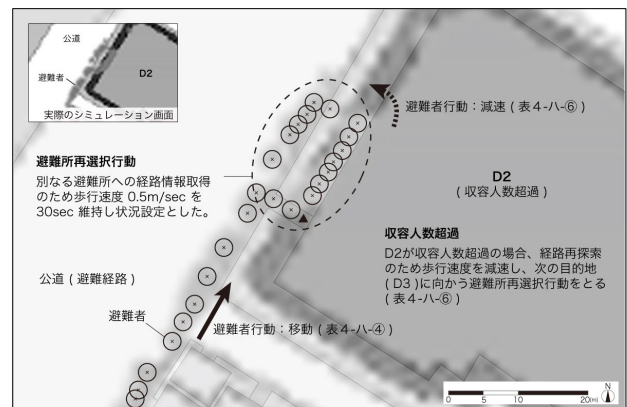


図 6 避難所再選択行動の様子

地区が他の地区に比べ多いことがわかる（図 10）。これも避難所の収容人数に対して周辺人口が多いことが要因であると考え。ケース 1 の検証により、対象地域において特に避難所の収容人数と周辺人口の関係について現状の地域防災計画では不足していることが把握できる。

○ 避難距離・避難時間に関する比較検討

避難先を現状の避難所のみとして段階避難を実施したケース 2 およびケース 3 に関して、図 9 の通りその中央値をとっていても推奨避難圏域の 500[m] を超過する地区が多く、最大で 445[m] の超過が見られた。避難距離の差について、ケース比較による最大距離差はケース 3・ケース 4 の 429.52[m] であった。また各地区で見た時の最大距離差は御幸町（ケース 3・ケース 5）の 784.65[m] であり、時間によると 585[sec] の短縮につながっている。以上より地域避難場所を新規に指定する必要があることがシミュレーションからも判断できた。

○ 各ケースの避難所再選択行動回数の比較

避難所再選択行動回数の平均値を、図 10 に示すようにケース毎に見てみると、収容人数が多い避難所の近隣地区（島の関・浜大津一丁目）の再選択行動回数は、他のそれと比較しても低いことが看取される。

5. 結 章

5.1 本研究の成果

本研究により、今まで考慮されなかった「経路再探索行動」や「避難所再選択行動」といった危険回避行動を取り入れたモデルを構築したことで、より現実的な広域避難シミュレーション試行が可能となった。また動画による可視化やログによる分析を行い、避難計画の具体的な中身の理解が可能となり、現状の避難計画では不十分であることが把握できた。地域避難場所から避難所、避難所から避難所といった段階避難行動を取り入れたシミュレーションを実施し、避難計画の評価・分析を行った点についても本研究の成果であると言える。

5.2 今後の研究余地

本研究で行った広域避難シミュレーションは条件設定の変更も容易であり、個々の避難行動を動画で確認できる。最適な避難計画を動画として蓄積し、WEB 上に公開することでデジタルデバイスをを用いた避難経路の確認が可能となり、災害時の避難支援として大いに役立つツールになり得る。今後は、「危険回避行動」の数理基準を実際の災害避難時の避難行動の詳細アンケート等から更に精査すべきと考える。

※本稿の内容は、エーアンドエー株式会社と公立大学法人滋賀県立大学高柳英明研究室との共同研究成果の一部を纏めたものである。

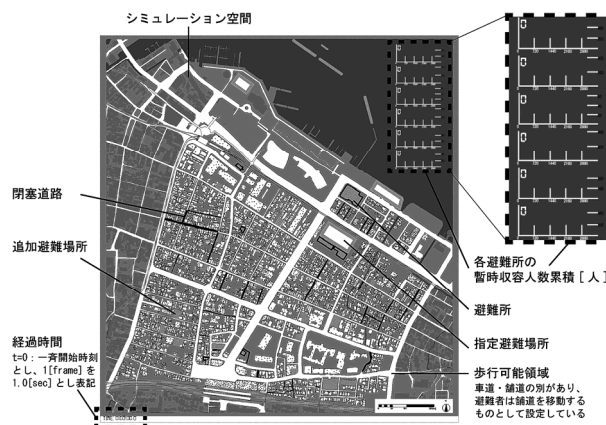


図 7 各避難施設・要素の位置関係

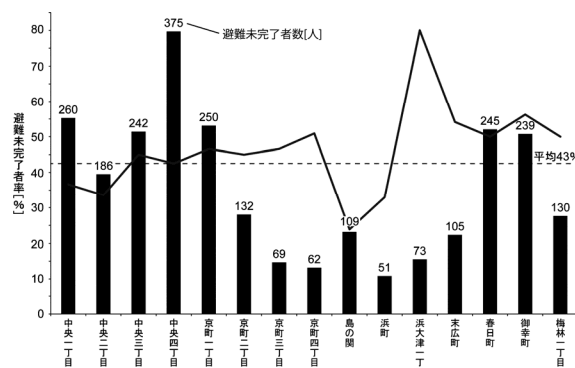


図 8 各地区の避難未完了者数とその比率 [%]

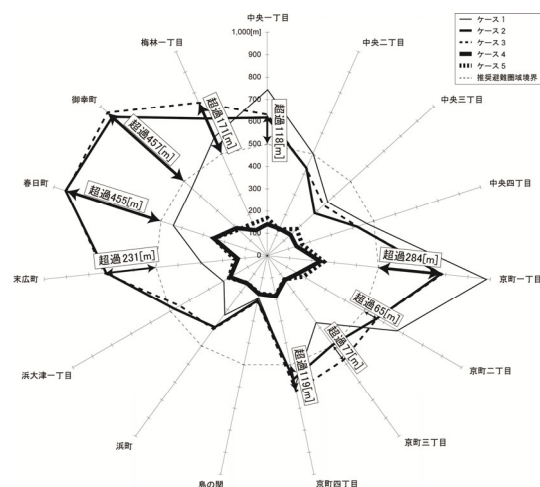


図 9 各ケースにおける各地区の避難距離中央値

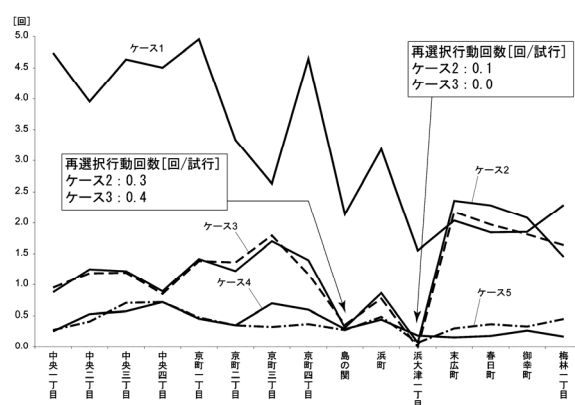


図 10 各ケース・地区から見た避難所再選択行動の回数比較



図 11 逐次避難動画のキャプチャ(ケース 1)

課と滋賀県立大学高柳英明研究室の協同にて「広域避難計画検討研究会」をもち、組織横断型の意見調整、対策実施への検討事項等に関する情報共有を行った。なお開催は2013年5/29, 6/20, 7/11, 12/4であった。

注3) 一時避難者数は式 1 にて算出する。なお、 $R_P=92.09\%$ (出典:平成 22 年国勢調査)

$$\sum E_T = \sum P \times R_P \quad \text{式 1}$$

(E_T :各地区の一時避難者数, P :各地区の人口, R_P :昼夜間人口比率)

収容避難者数は式 2 によって算出する。なお R_S は地震災害により住まいが失われ、ある期間又は長期に避難所での生活を余儀なくされる人で、兵庫県南部地震における兵庫県のピーク時の比率=29%を用いる(出典:滋賀県大津市地域防災計画)。

$$\sum E_S = \sum E_T \times R_S \quad \text{式 2}$$

(E_S :各地区の収容避難者数, E_T :各地区の一時避難者数, R_S :避難所生活者率)

注4) 避難未完了者率は避難未完了者を避難者数で除算した数値である。

- *1 中央復建コンサルタンツ株式会社 修士(環境科学)
- *2 滋賀県立大学環境科学部 准教授・博士(工学)
- *3 滋賀県立大学大学院環境科学研究科 博士前期課程・学士(環境科学)
- *4 エーアンドエー株式会社 博士(建築学)

参考文献

- 1) 森下 信, 中塚 直希:セルオートマトンを用いた避難シミュレーション(人の流れ), 日本機械学会セルオートマトン・シンポジウム講演論文集, pp. 237-241, 2001. 11
- 2) 安福 健祐:地図データベースを用いた広域避難シミュレーションシステムの開発, 日本建築学会学術講演梗概集 A-2, pp. 515-516, 2009. 7
- 3) 安福 健祐:GPU を利用した大規模避難シミュレーションシステムの開発, 学術講演梗概集 A-2, pp. 201-202, 2011. 7
- 4) 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-歩行者シミュレーションシステム SimTread の構築-, 日本建築学会計画系論文集(636), pp. 371-377, 2009. 2
- 5) 吉田 克之, 木村 謙, 峯岸 良和, 佐野 友紀:避難時間を尺度にした津波避難計画の策定, 2012 年度日本建築学会大会(東海)防火部門パネルディスカッション資料, pp. 33-36, 2012. 9
- 6) 渡辺俊, 高柳英明他:人間行動シミュレーション研究の体系化に関する研究, 日本建築学会第 26 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(報告), pp. 145-148, 2004. 12
- 7) 高柳英明, 長山淳一, 渡辺仁史:歩行者の最適速度保持行動を考慮した歩行行動モデル-追従相転移現象に基づく解析数理-, 日本建築学会計画系論文集 No606, pp. 63-70, 2006
- 8) 鈴木葉子, 森藤章光, 高柳英明, 服部岑生, 柳澤剛:待ち行列形成と混雑回避行動を考慮した実座標歩行モデルに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, E-1 分冊, pp-887-888, 2005. 9
- 9) 横山 秀史, 目黒 公郎, 片山 恒雄:避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用, 土木学会論文集(513), pp. 225-232, 1995. 4
- 10) 都市防災実務ハンドブック編集委員会:改訂都市防災実務ハンドブック 震災に強い都市づくり・地区まちづくりの手引, ぎょうせい, 2005. 9

注

- 注1) 本研究では歩行者シミュレーションプラットフォームとして、エーアンドエー株式会社の提供する SimTread2 を用いた。
- 注2) 滋賀県防災危機管理局との広域防災に関する懇談を通じ県下現状の問題点を精査すると同時に、大津市危機・防災対策課、同建築指導

A Fundamental Study on Multi-agent Pedestrian Model Based on Risk Avoidance Behavior from Road Blockage and Evacuation Simulation of Regional Urban Disaster

○Yosuke KURITA^{*1} Hideaki TAKAYANAGI^{*2} Hiroko SHIBAHARA^{*3}
Shogo YAMADA^{*3} Takeshi KIMURA^{*4}

Keywords : Wide-area evacuation simulation, Multi-agent model, Risk avoidance behavior, Regional disaster prevention plan

From the research and reports of the Great Hanshin-Awaji Earthquake and the Great East Japan Earthquake, road blockage seems to be an important environmental factor in case of wide-area evacuation after disasters. The road blockage makes evacuees anxious and they take uniform action pattern such as they anticipate the danger or take risk avoidance behavior. The purpose of this study is to build the multi-agent pedestrian model based on risk avoidance behavior, which can express a series of disaster prevention actions that evacuees look for designed shelters autonomously and complete the evacuation.

The target area in this study is the center of Otsu-city, Shiga Prefecture. The multi-agent pedestrian model built in this study consists of a simulation field and agents which are influenced by the field. The field is built by using JPGIS data from the base map information data made in Geospatial Information Authority of Japan, which is converted and transformed by computer. It is set conditions of blockage road. The agents are also set conditions of anxiety as the risk avoidance behavior such as “the route re-seeking behavior” and “the shelter re-selecting behavior”. The former is defined as the walking speed 0.2 meters in second make continue for 6.0 meters, the latter is defined as the walking speed 0.5 meters in second make continue for 15.0 meters.

From the simulation of this study describes that the present regional disaster prevention plan is not enough about the relationship of the surrounding population and capacity of the shelters and there is necessity to increase the local shelters.

The model's advantage is as follows;

- (1) By grasping non-stationary behavior of disaster evacuation visually and in advance with this model, it is possible to facilitate the expert judge or rehearsal of the evacuation plan at the time of local disaster management planning.
- (2) By reflecting the anxiety of evacuees into the model as the risk avoidance behavior, it is possible to grasp the impact of it in a disaster and consider it whether can be a considerable factor for wide-area evacuation plan.
- (3) By comprehending the characteristics of geography of the target area at the time of a disaster, it is possible to make a correlative analysis of the regional disaster prevention plan and the wide-area evacuation simulation.

This study built the model that incorporates the anxiety as the risk avoidance behavior, which makes the wide-area evacuation simulation more realistic and useful. The specific contents of an evacuation plan are comprehended with the visible model, which describes that the present evacuation plan is inadequate. Implementation of simulation that incorporates the stage evacuation, evaluation and analysis of the present evacuation plan are also accomplishments in this study.

*1 Chuo Fukken Consultants Co., Ltd. M. Env.

*2 Assoc. Prof., School of Environmental Science, The University of Shiga Pref., Dr. Eng.

*3 Graduate Students, Environmental Science Graduate School, The University of Shiga Pref.

*4 A&A Co., Ltd. Dr. Arch.