

道路閉塞時の避難経路選択モデルを用いた 住宅耐震補強の優先順位の確率的評価

Probabilistic Evaluation of Retrofitting Priority of Houses

Using a Model of Evacuation Route Selection under Road Blockade

前田 紗季¹, 小檜山 雅之²

Saki MAEDA¹ and Masayuki KOHIYAMA²

¹慶應義塾大学大学院理工学研究科 大学院生
Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Keio University

²慶應義塾大学理工学部 准教授・博士 (情報学)
Assoc. Prof., Faculty of Science and Technology, Keio University, Dr. Informatics

We propose a new method to evaluate quantitatively the effectiveness of retrofitting of houses for evacuation. A model of evacuation route selection under road blockade is constructed based on a subject experiment and built it into an agent model for evacuation simulation. The priority of houses that should be retrofitted is probabilistically evaluated. Because evacuation behavior is considered, this method can appropriately identify houses that should be retrofitted. An index is newly introduced to evaluate retrofitting priority of houses quantitatively using improvement ratio of number of evacuees in a unit time. The proposed method can show retrofitting priority of houses effectively when the ground motion intensity is assumed as JMA Seismic Intensity 6 upper.

Keywords: evacuation, road blockade, model of route selection, retrofitting of houses

1. はじめに

(1) 研究背景

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は強烈な揺れを伴った都市直下地震であり、この地震によって多くの建物が崩壊し瓦礫が道路を覆った。そのため、都市に網の目のように張り巡らされた街路において、車両や歩行による通り抜けができなくなる道路閉塞状況が多数発生した。道路閉塞による交通障害は地震直後の救助・消火・避難活動に重大な影響を及ぼし、特に被害の大きい地域においては歩行者の通行さえできなくなることが少なくない¹⁾。このような道路閉塞が発生する要因として、耐震性の低い木造建物などの脆弱な建物の倒壊と道路幅員の狭さが挙げられる。

地震に備えて対策を施す上でも、地域の災害特性と防災性能を把握することは重要である。特に消防車両が進出できない孤立地区や救援活動が困難となる地区を予め把握しておくことは極めて重要となる。そのために街路網の防災性能を定量的に評価する手法が必要である。

阪神・淡路大震災以前は地区レベルの街路網の防災性能を評価する研究や街路の機能的障害に関する研究は少数であった。しかし、阪神・淡路大震災以降、都市防災計画上地区レベルの街路網の閉塞を減少させることが重要であると認識されるようになり、自治体による地域防災計画

においても道路閉塞問題が取り扱われ始めた。

既往研究²⁾⁴⁾では、道路閉塞に対する解決案として街路網整備案などを例示しているが、街路網整備は脆弱な建物の耐震性能を向上させるよりもコストが大きいため現実化されにくい。そのため、道路閉塞に対する具体的な地域対策として、脆弱な木造建物などの耐震性能向上がより有効である。

避難時に道路閉塞を引き起こす可能性のある道路と耐震補強すべき建物を的確に抽出する定量的な評価手法に関して、田中・小檜山⁵⁾により基礎的研究が行われている。この研究では避難経路の選択で最短距離を用いて指標の評価を行っているが、これは実際の避難行動とは異なり、また全ての経路における解析を行うため道路リンクが複雑になると解析に時間がかかるという問題がある。

今後、東南海・南海地震や都市直下地震によって、名古屋、大阪や東京といった大都市に大きな被害が発生することが懸念されている。地震は一度に複数個所での構造物損傷を引き起こす可能性があるため、耐震補強というハード面の対策だけでなく、避難行動を予測するソフト面の対策も必要であり、実際にそのための研究も行われてきている⁶⁾¹³⁾。それらの研究で多く用いられているのがエージェントシミュレーションである。エージェントシミュレーションでは、多様なエージェントが自律的に動き回るため、人間の行動特性を踏まえて避難状況を推定するのに効果的

である。

災害時の避難・救助の際に安全かつ機能的な道路網を計画するためには、避難所への到着を遅らせたり孤立地区を作り出したりする原因となっている建物を的確に抽出すべきである。そのために避難シミュレーションを用いることは非常に効果的であるといえる。

(2) 研究目的

地震時の道路閉塞が救援・消火・避難活動にもたらす影響は大きく、とくに避難経路の確保は防災まちづくりにおいて重要である。木造密集市街地では自治体の防災担当者、住民や建物所有者が個別の建物の安全性だけでなく地域の安全性をも考えて建物が保有すべき耐震性能を考慮することが大切である。

そこで、本研究では、防災まちづくりを進める上で、地域住民や防災担当者が建物耐震性と地域の避難安全性との関係を容易に把握できる情報提供手法を構築することを目的とする。具体的には、エージェントモデルによる避難経路の選択シミュレーションを行い、地震時に道路閉塞を引き起こす可能性のある道路と耐震補強すべき建物を的確にかつ比較的短時間で抽出し、その建物の耐震性能をどの程度まで向上させる必要があるのか定量的に評価する手法を開発する。そして、提案手法を仮想的な地区に適用し、その有効性について考察する。

2. 避難時の歩行者の避難行動モデルの構築

(1) シミュレーション手法の選択

避難行動のシミュレーションは、おもに建築学と計算科学の分野で行われてきたが、最近では地震防災の分野でも研究されている。それらにおける主な手法は物理モデル手法^{6), 14)}、セルオートマトン法^{15), 16)}、そしてエージェントシミュレーション^{8), 9), 17), 18)}である。

本章では、上述した3つのシミュレーション手法について、本研究で用いる場合の問題点を分析し、実際に用いるシミュレーション手法の検討を行う。

a) 物理モデル手法

群衆の物理モデル手法とは、群衆を流体としてモデル化し、速度や空間当たりの人数の変化を物理法則に則って計算するものである¹⁴⁾。そのため、建物内の動線の設計など群衆が円滑に動く場合の信頼性は高い。

しかし、本研究において対象とする状況は道路閉塞の存在する地震時避難であり、歩行者が各々の避難ルートを選んで目的地に向かうので、多数の歩行者を一つの群衆として避難させるケースとはなっていない。したがって、この手法は適さないといえる。

b) セルオートマトン法

セルオートマトン法とは、確率を使ったルールに従ってセルの状態変化を計算する手法である^{15), 16)}。ルールは単純であるが、多数のセルを使うことで複雑なパターンを模倣することができる。そのため、定性的なパターンの分類には適しているが定量的な予測には限界がある。

本研究では、避難行動モデルを用いて避難安全性を確率的に評価する。しかし、最終的には耐震補強すべき建物を定量的に評価したいため、この手法は適さないといえる。

c) エージェントシミュレーション

エージェントシミュレーションとは、「多数の自立した主体からボトムアップにシステムを構築する」手法である^{17), 18)}。システムの個々の要員をエージェントとし、エージェントを自律的に行動させ、システム全体のシミュレーションを行う。セルオートマトン法と同様、複雑なシステ

ムであっても、要因のモデルであるエージェントを上手く設計することで、システムの特徴の分析や挙動の予測・再現が可能となる。

本研究では避難者が道路閉塞に直面したときの避難経路の選択行動にシミュレーションを用いるため、歩行者のモデルは単純であるといえる。そして、歩行者の避難経路の選択行動をより現実に近付けることで、最終的に提示する耐震補強すべき建物の指標の精度を向上することができる。したがって、本研究では、自立した主体によるシミュレーションであるエージェントシミュレーションが適しているといえる。

以上より、本研究では評価指標の算定において道路閉塞時の代替ルートの選択を行うエージェントシミュレーションを用いることとする。

(2) 避難歩行者エージェントの設計

避難経路選択のためのエージェントの情報として最も重要となるのは、道路閉塞に直面した場合のエージェントの迂回行動である。しかし、エージェント構築のための歩行者の歩行速度や障害物の回避行動についてのパラメータに関する研究は多くなされているものの¹⁰⁾⁻¹³⁾、道路閉塞時の迂回経路の選択に関する研究は行われていない。

そこで、本研究では歩行者の迂回経路の選択を確率的に行うエージェントを設計する。避難経路選択モデルの構築にあたって、被験者実験を行い、人の迂回行動についての統計データ取得する。被験者実験の概要については次章で述べる。

3. 被験者実験の統計データに基づく避難行動パラメータの同定

(1) 本実験の目的

群衆避難行動の予測のために既往研究⁸⁾⁻¹³⁾においては、客観的パラメータのみに基づく数値シミュレーション手法の開発が行われている。しかし、これらのシミュレーション手法は、地震時に起こりうる予測不可能な道路閉塞が発生した場合の歩行者の行動ルールまでは考慮していない。

そこで本実験では、地震により発生した道路閉塞に直面した場合の歩行者の迂回行動に関して迷路ゲームを複数の被験者に体験してもらい迂回行動の統計データを収集する。それにより、歩行者の迂回行動を確率的に示し、エージェントモデルの行動ルールに組み込むことを目的とする。

(2) 実験方法

道路閉塞に直面した歩行者が迂回行動を起こす状況として考えられるのは、以下の2パターンである。

- i) 進行方向の道路リンクが閉塞している場合 (図1 a))
- ii) 曲がり角を曲がった際に道路が閉塞している場合 (図1 b))

この2パターンの道路閉塞時に、歩行者がどのような迂回経路を選択するのかを調べるために簡略な迷路ゲーム (図2) を作成し、被験者実験を行う。

上記2パターンの実験を始める前に、被験者にこの迷路ゲームの操作に慣れてもらうため、統計とは関係のないサンプル経路1ケースで体験してもらう。その後、前述のパターンi), ii)の場合の迂回の様子を調べるためにそれぞれについて各4ケース、サンプル経路を含めた合計9ケースの経路を被験者に体験してもらう。

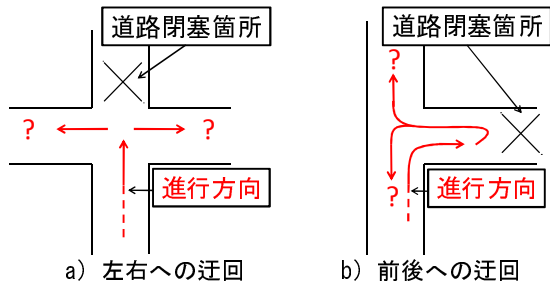


図1 道路閉塞時に起こりうる歩行者の迂回行動

地震時避難の切迫した状況にできるだけ近い状況で現実的な結果を得るために、出発点から目的地に辿り着くまでの時間を計り、全ての被験者に対して実験開始の前に「できるだけ早く目的地に辿り着くように」という指示を与えてこの実験に臨んでもらう。

道路閉塞に直面した際の画面の様子を図3に示す。

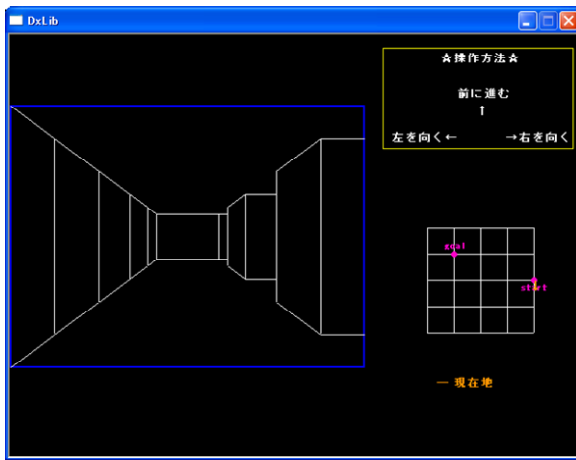


図2 作成した迷路ゲーム

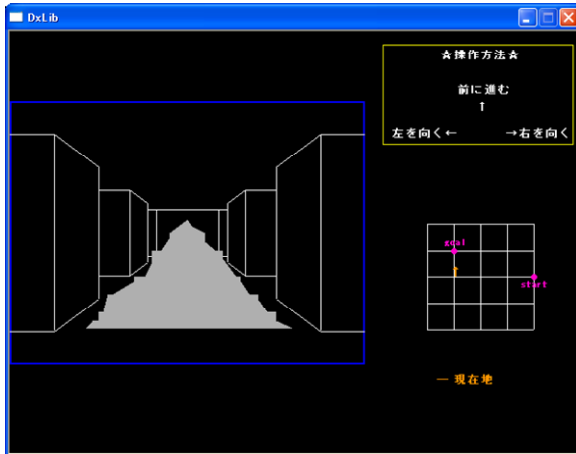


図3 迷路ゲームにおける道路閉塞時の画面の様子

a) 実験1～左右方向への迂回

前述のパターンi)の場合の迂回行動の観察のために、図4に示す5×5の簡易な道路リンクを用いて被験者実験を行う。L_nは道路リンクnを表す。

図4においてL₁₀, L₁₁, L₁₄, L₁₅, L₁₈, L₁₉, L₂₂, L₂₆, L₂₉, L₃₄, L₃₈が閉塞しているとする、ノード8における左右方向の迂回の様子を観察することができる。

上記の例の出発点、目的地、閉塞状況の相対的な位置関係を保持したまま、90°ずつ回転させ、左右方向への迂回が必要な道路リンクを4ケース用意する。

これを被験者30人に体験してもらい、そこから得られる

データを基に左右方向への迂回行動を確率的に表し、エージェントモデルに組み込む。

今回は、22歳～24歳の女性14名、男性16名に対して被験者実験を行った。そのため、高齢者や子供など、異なる年齢層では違った避難特性となることも考えられるが、本研究では簡単のため考慮していない。

b) 実験2～前後方向への迂回

実験1と同様に、パターンii)の場合の迂回行動の観察のために、図5に示す5×3の簡易な道路リンクを用いて被験者実験を行う。

図5においてL₁, L₄, L₅, L₈, L₁₀, L₁₇が閉塞しているとする、ノード6における前後方向の迂回の様子を観察することができる。このモデルにおいて、ノード6を経由する前にノード9からノード8へ進みゴールに到着してしまう場合が考えられるが、本研究で用いるモデルの構築のための行動としては考慮しないこととする。

前後方向への迂回が必要な道路リンクも、図6に示すように、4ケース用意する。

パターンi)と同じ被験者30人に体験してもらい、そこから得られるデータを基に前後方向への迂回行動を確率的に表し、エージェントモデルに組み込む。

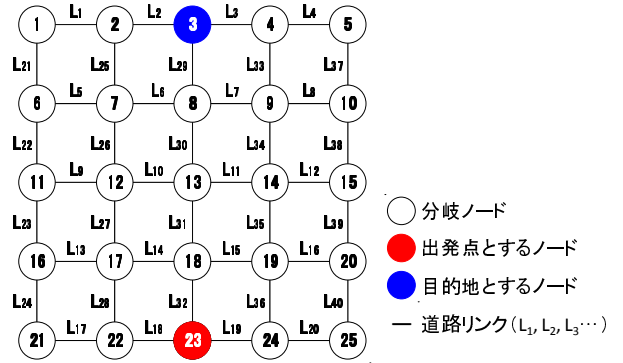


図4 実験1に用いた道路リンク

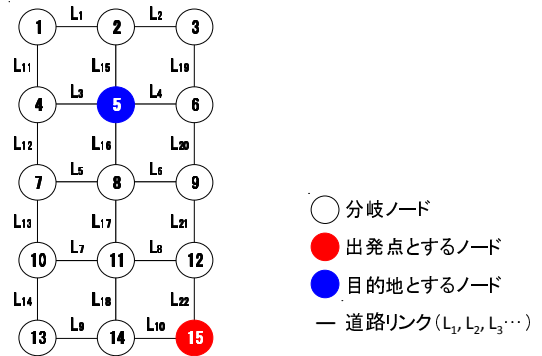


図5 実験2に用いた道路リンク

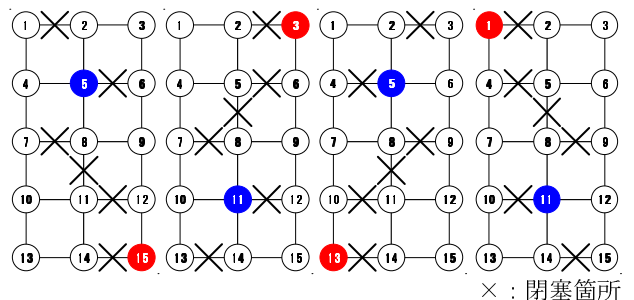


図6 実験2に用いた道路閉塞パターン

(3) 実験結果と考察

実験1, 2で得られたデータを分類して集計した結果をそれぞれ表1, 2に示す. ここで, 表2の「遠回り」はゴールに直結するノードにいるにも関わらず, それと気づかないで別の迂回経路を探してゴールに辿り着く人のサンプル数である(図7 a)~c)). これらの実験結果を元に, 左右方向への迂回と前後方向への迂回の確率について考えていく.

まず, 左右方向への迂回について考える. 表1より右方向と左方向の迂回の確率比を6:5とする. これより道路閉塞時の右左への避難経路選択確率としてそれぞれ6/11, 5/11を与え, これから構築するエージェントモデルに組み込む.

次に, 前後方向への迂回について考える. 本実験において求めたいのは前後方向への迂回確率なので, 表2の「前方への迂回」と「後方への迂回」の合計91のサンプルから求める. 表2より前方と後方の迂回の確率比を20:3として, これより前後方向への避難経路選択確率をそれぞれ20/23, 3/23として用いる.

実験結果から得られた迂回確率を表3に示す. 今回得られた実験結果では, 性別による迂回行動の偏りはほとんど見られず実験で得られた迂回確率をそのまま避難行動選択モデルに用いた.

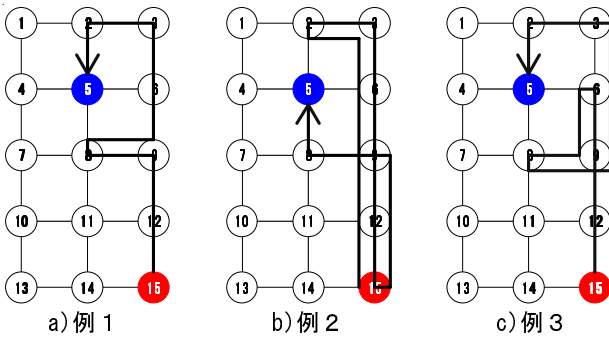


図7 遠回りの例

表1 実験1の集計結果

右方向への迂回	左方向への迂回	合計サンプル数
67 (55.8%)	53 (44.2%)	120 (100%)

表2 実験2の集計結果

前方への迂回	後方への迂回	手前で右折・左折	遠回り	合計サンプル数
79 (65.8%)	12 (10.0%)	23 (19.2%)	6 (5.0%)	120 (100%)

表3 迂回確率

左右の迂回確率	右:左=6:5
前後の迂回確率	前:後=20:3

4. 提案する評価手法

初期条件として, 評価モデルのノード番号, リンク番号, 全街路網の距離, 各ノードからの出発人数, 道路連結情報を与える. 各道路リンクには10mに一棟の建物が存在し, それぞれの建物から4人が避難すると仮定する. 各出発点ノードからの避難人数は, ノードに連結した道路リンクを出発点とする人数の半分とする.

本研究では, 簡単のために建物被害は全壊のみとし, 道路幅に関係なく各々の道路リンク沿いの建物が1棟でも倒壊した場合にがれきの散乱により道路閉塞状況となると考える. 現実には建物の被害程度も半壊など様々あり, 道路の交通障害の程度も様々あると考えられるが, 本研究では基礎的検討を目的としているため簡略化している. このとき, 道路リンク数が j_{max} ある場合のがれき散乱による道路閉塞状況は $2^{j_{max}}$ 通り存在する. そのうちのある道路閉塞状況を k ($k=1, 2, \dots, 2^{j_{max}}$)とし, 道路リンク L_j 沿いの建物が被害(倒壊)が発生する場合, $A_{jk}=1$ とし, 被害(倒壊)が発生しない場合を $A_{jk}=0$ として行列 $\mathbf{A}=[A_{jk}]$ を設定すると, 行列 \mathbf{A} は以下の式で表される.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad [1]$$

本研究では, 全ての道路閉塞状況の中から5000パターンを抽出し, それぞれの状況で30人のエージェントによる避難経路選択をシミュレーションする. シミュレーションは, 評価する道路リンクそれぞれについて評価地域内のすべてのノードから30人の経路選択を行うため, 各道路リンクに対して $(i_{max}-1)$ 回の経路選択シミュレーションを行う. ここで, i ($i=1, 2, \dots, i_{max}$)はノードの数であり, 本研究では, $i=1$ のときを目的地ノードとしている.

このとき, 道路閉塞状況をランダムに2グループに分け, 評価する道路リンクに閉塞があるグループ($A_{jk}=1$)とないグループ($A_{jk}=0$)の2通りを考える. それぞれの道路閉塞状況 k になる確率 q_k は以下の式で表される.

$$q_k = \prod_{j=1}^{j_{max}} \{A_{jk} r_j + [(1-A_{jk})(1-r_j)]\} \quad [2]$$

ここで r_j は各道路リンク L_j のがれき散乱確率であり, 個々の道路リンクに注目すると, 道路が閉塞する確率は r_j , 閉塞しない確率は $(1-r_j)$ となる. r_j は建物1棟の被害発生確率 q , 道路リンクの長さ l_j , 道路リンクに沿った建物棟数 b_j から次式で求められる.

$$r_j = 1 - (1-q)^{b_j} \quad [3]$$

ここで, 建物は2階建て木造建物を想定し, 耐震等級と震度階に応じ, 表4の被害発生確率に従うものとする.

表4の被害発生確率は, 震度階に対し正規分布の累積分布関数に従った値となっている. 耐震等級は「住宅の品質確保の促進等に関する法律」において, 建築基準法の耐震基準を満たすものを等級1, 基準値を1.25倍, 1.5倍とした耐力を有するものをそれぞれ等級2, 等級3としている. 表4の等級1~3は, 基準値最低限の耐力を有している場合に対応し, 耐震基準を満たさない等級0は, 耐力の倍率が等間隔となるよう, 等級1のモデルの0.75倍の耐力とする. ただし表4の確率は, 全壊発生確率に対応しており, 道路閉塞が生じるような倒壊の発生確率はより小さいと考えられるが, この値を用いるものとする.

表4 2階建て木造建物の被害発生確率¹⁹⁾

	震度5弱	震度5強	震度6弱	震度6強	震度7
等級0	1.4×10^{-9}	2.3×10^{-6}	3.3×10^{-3}	5.7×10^{-2}	5.1×10^{-1}
等級1	1.5×10^{-11}	7.0×10^{-8}	3.7×10^{-4}	1.3×10^{-2}	2.8×10^{-1}
等級2	3.3×10^{-14}	5.2×10^{-10}	1.3×10^{-5}	1.1×10^{-3}	7.9×10^{-2}
等級3	1.6×10^{-16}	9.4×10^{-12}	1.1×10^{-6}	2.1×10^{-4}	3.5×10^{-2}

本研究では、 $N_p = 5000$ パターンの道路閉塞状況に限って評価の対象としたため、

$$\sum_{k=1}^{k_{\max}} q_k = 1 \quad [4]$$

を満たさない。そこで、以下の式[5]のような補正を行う。

$$\sum_{k=1}^{k_{\max}} \Delta P q_k = 1 \quad [5]$$

ここで、補正係数 $\Delta P = \frac{N_p}{2^{j_{\max}}}$ 。

各エージェントの選択した経路から避難経路の長さを算出し、エージェント a_h ($h = 1, 2, \dots, h_{\max}$) の避難に要した時間 $T_{k,i}(h)$ を求め、道路閉塞状況 k における単位時間当たりの避難所到着人数の期待値 $m(k)$ を求める。文献(20)を参考に、簡単のためにエージェントの歩行速度を 80 m/min で一定とする。また、この経路選択シミュレーションにおいて道路閉塞を起こしているリンクは通行不可とするため、一定時間（ここでは60分）内に目的地に到着することのできないエージェントや道路閉塞状況 k が存在するが、その時の所要時間は $T_{k,i}(h) = \infty$ として考えることとする。道路閉塞状況 k における単位時間当たりの避難所到着人数の期待値 $m(k)$ は次のようになる。

$$m(k) = \sum_{i=1}^{i_{\max}} m_i \left\{ \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \frac{1}{T_{k,i}(h)}}{h_{\max}} \right\} \quad [6]$$

ここで、 m_i はノード n_i を出発点とする人数、 i_{\max} は解析モデルのノードの数、 h_{\max} はシミュレーションを行うエージェントの人数である。

これを用いて求められる単位時間当たりの避難所到着人数の期待値を \bar{M} とし、以下の式で求める。

$$\bar{M} = E[m] = \sum_{k=1}^{k_{\max}} \{m(k) \times q(k)\} \quad [7]$$

評価地区内の任意の街路 j ($j = 1, 2, \dots, j_{\max}$) 沿いの建物の耐震補強前の \bar{M}_0 と後の \bar{M}_j を式[8]のように比較した μ_j を耐震補強の優先順位の評価指標として用いる。

$$\mu_j = \bar{M}_j / \bar{M}_0 \quad [8]$$

μ_j が大きいほどその道路リンクに沿った建物が耐震補強を施すことで被災時の避難環境の向上に及ぼす効果が大きいといえる。

評価指標としては、単位時間当たりの避難所到着人数の期待値の他に、解析モデル内の避難者全てが目的地に到着するのにかかる時間についても検討も行った。しかし、道路閉塞により避難所まで到着することのできないエージェントが存在すると、全避難者が到着するまでの避難時間が無限大となってしまう。一方、単位時間に多くの避難者が避難所に到着できれば安全性が高いと言えるので、単位時間当たりの避難所到着人数の期待値による指標が妥当であるといえる。

5. 評価手法の有効性の検討

本研究では、横浜市のある地区を参考とした仮想地区⁵⁾における評価を行う。仮想地区における道路網をモデル化したものを図8に示す。建物モデルは2階建て木造建物とし、補強前は耐震基準を満たさない等級0（等級1の0.75倍の耐力）、補強後は等級1、2、3の3ケースとする。想定震度階は震度5弱、5強、6弱、6強、7の5ケースで

ある。

まず、抽出パターン数10000のときと10~5000の各抽出パターン数のときの μ_j の順位相関係数を求め、道路閉塞状況の抽出数の妥当性について検討を行った。ここで、ピアマンの順位相関係数は、2つの変量の順位についてピアソンの積率相関係数を求めたものである。抽出パターン数0から50までを10パターンずつ、50から1000までを50パターンずつ、1000から3000までを100パターンずつ、3000から5000までを200パターンずつ増やしたときの順位相関係数を合計54個求め、プロットしたものを図9に示す。抽出パターン数が4000のあたりから順位相関係数のばらつきが小さくなり1に収束してきていることから、抽出数は5000パターンで妥当であるといえる。

算出された指標 μ_j を地図に表したものを図10に示す。想定震度階が震度6弱以上では、避難所付近の道路リンクの耐震補強の効果が大きく、目的地から遠くなるほど小さくなるという結果を得た。これは、避難者が多く通るためである。また、ノード間の距離が長い道路リンクは迂回できないため補強効果が高くなった。補強効果を地図情報により分かりやすく示すことができたといえる。

また、本研究で用いたモデルでは道路リンクの長さに応じた建物棟数を与えたことも、ノード間の距離が長い道路リンクの方が補強効果が高くなった理由として挙げられる。このモデルでは、道路リンクが長ければ長いほどその道路リンクに存在する建物棟数も多くなり、地震による被害を受ける確率が上がる。そのため耐震補強の効果が強く影響する結果となった。このことから、街路網における耐震補強の効果は、道路リンクの長さだけでなく、建物棟数にも依存しているといえる。

震度階と耐震補強のレベルについて比較し考察する。図10 b), c) より、震度6弱においてはそれぞれの等級で補強の効果は見られるものの、等級を上げたことによる違いはあまり見られなかった。これは、震度6弱における建物被害があまり大きくないためと考えられる。震度5弱・5強の地震においても同様の傾向が見られた。これらの想定震度階では等級1への補強で避難安全性が十分に向上するためといえる。一方、図10 e), f) より、震度6強においては等級1よりも等級2に補強するほうがより効果が高くなっている。想定震度階により十分な補強レベルが変わるため、この点を考慮した情報提供の方法について今後検討する必要がある。

また、図10 h), i), j) より、震度7のとき道路リンク1と2の μ_j の値が大きくなっている。これは、震度7の地震では、耐震補強前の等級0の建物が倒壊する確率が高いため、避難所である目的地ノードに到着できる人数がほとんど存在しない状態になる。そのため、 \bar{M}_0 が非常に小さい値になってしまう。一方で、耐震補強をして等級を上げると、避難できる人数が急激に増えるため、 \bar{M}_j の値も大きな値となり、 \bar{M}_0 と \bar{M}_j の比である μ_j が非常に大きな値となるためと考えられる。

震度階別に等級を上げたときの各道路リンクの μ_j の様子を図11に示す。図11 a), b), c) より、震度5弱、5強、6弱において、等級を上げて耐震補強することによる違いはあまり見られない。これは、震度5弱、5強、6弱における建物被害があまり大きくないため、補強のレベルが等級1で十分であるためだと考えられる。

また図11 e) より、震度7では目的地ノードに直結する道路リンクにおける等級毎の違いは見られたものの、それ以外の道路リンクについては等級を上げたことによる大きな違いは見られなかった。これは、震度7の地震による建物被害が甚大なため、等級3に耐震補強しても建物破壊が起こってしまうためであると考えられる。

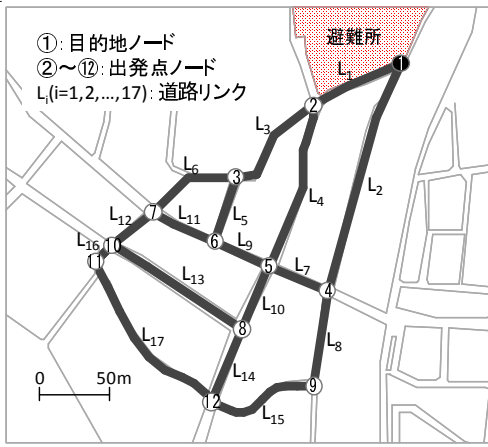


図8 モデル化した道路網

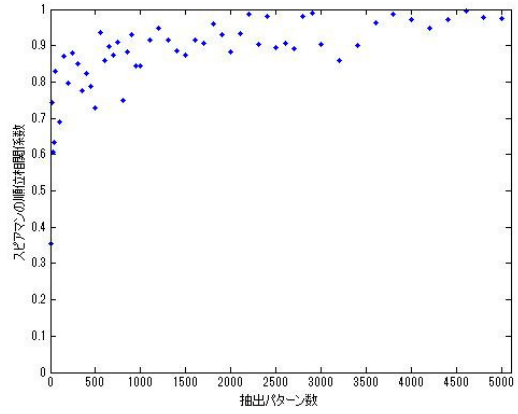


図9 抽出パターン数と抽出パターン数10000と各抽出パターン数の順位総関係数

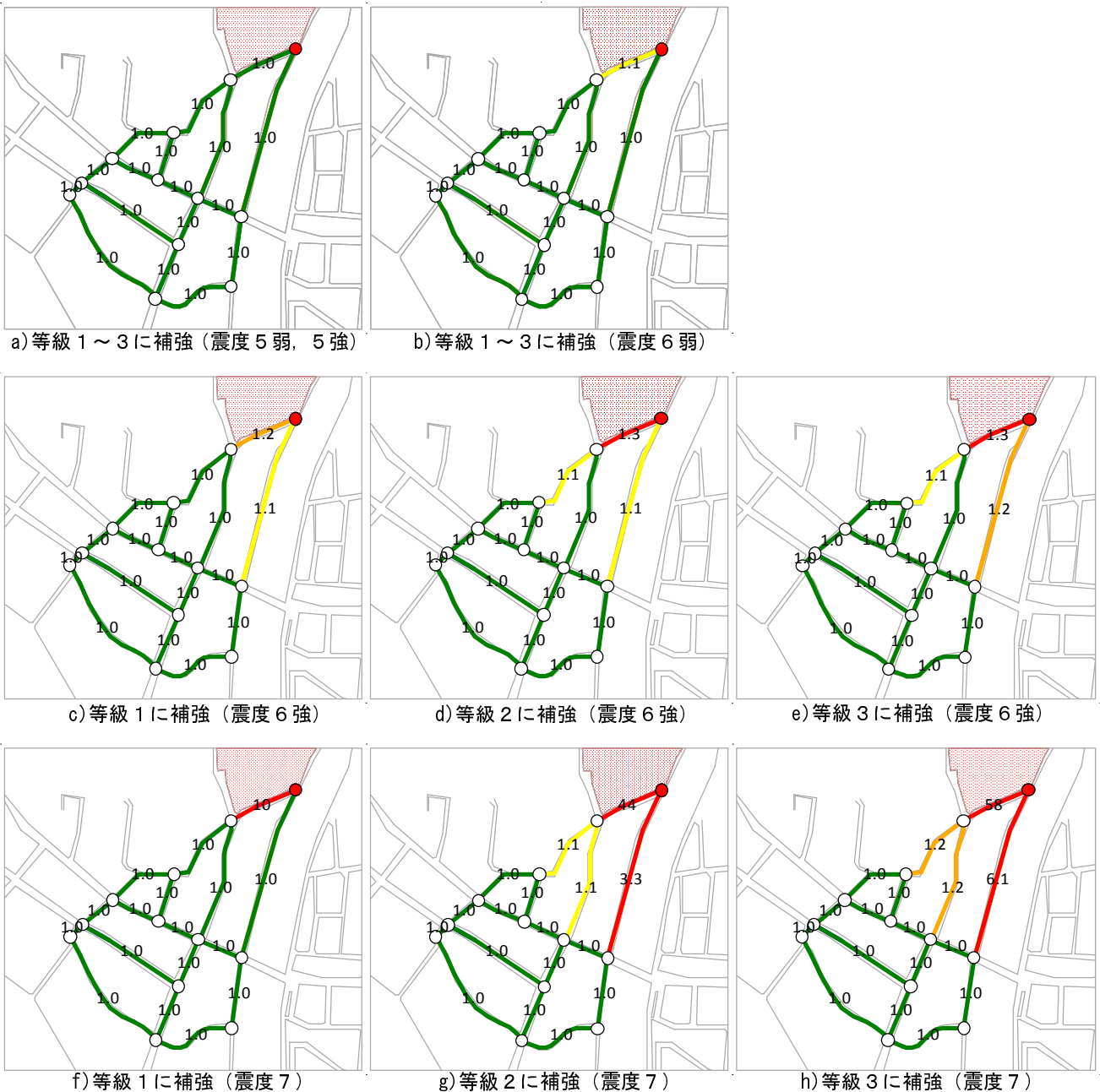
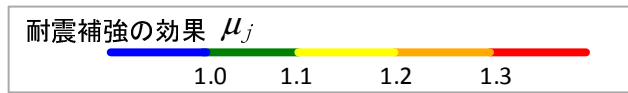


図10 評価マップ

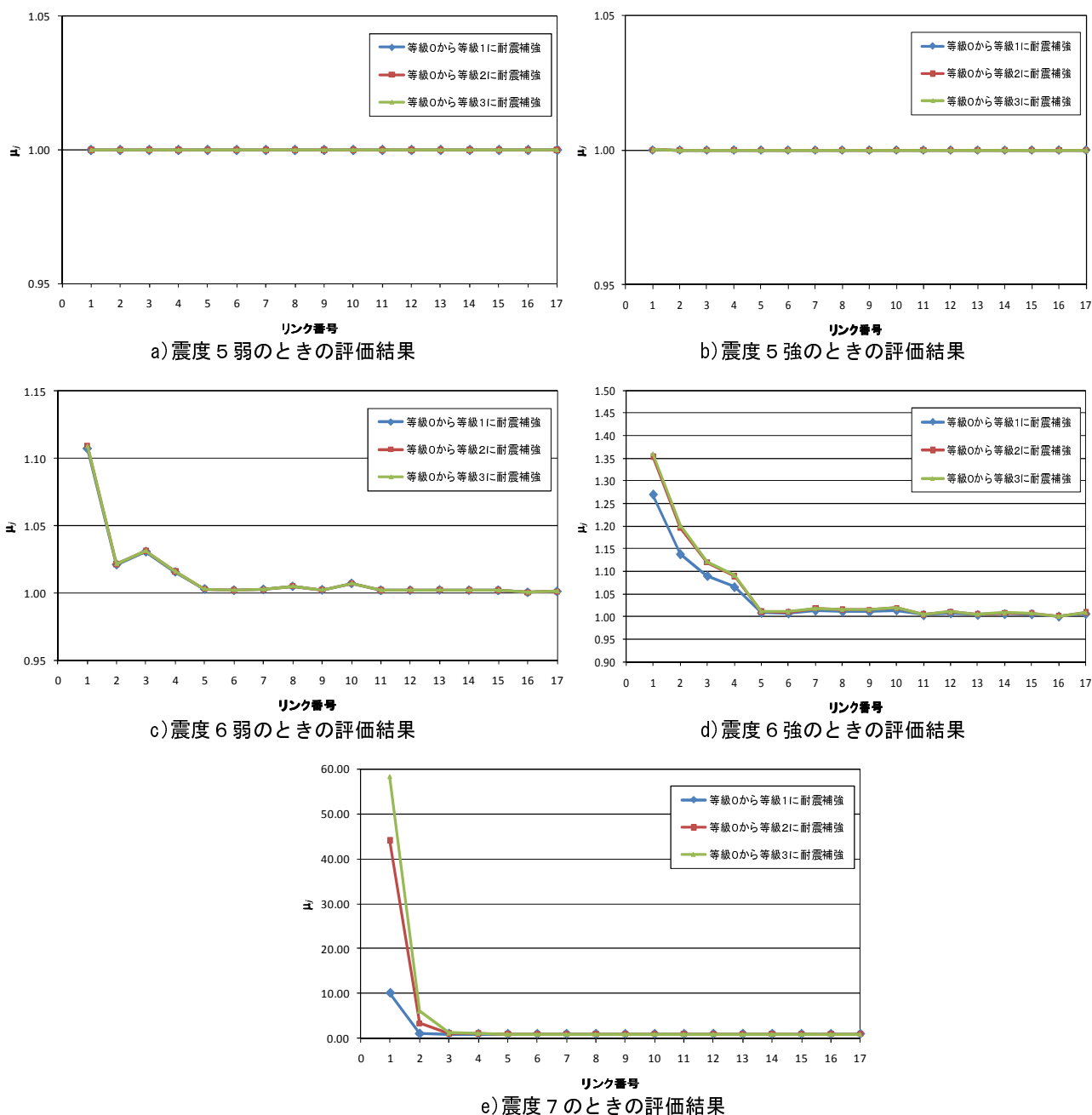


図 11 震度階別にみたときの等級毎の耐震補強の効果

図11 d)に示す震度6強においては、目的地ノードに近い道路リンクで等級を上げることによる違いが見られた。このことから、本研究で提案した手法で想定する震度階としては、震度6強程度が適しているといえる。

6. 結論

(1) 結論

本研究では、地震時の避難の観点から住宅の耐震補強効果を表す評価指標を提案した。その中で代替ルートの選択方法として、被験者実験により算出した迂回確率を元に構築したエージェントモデルによる経路選択を用いることで、文献5)の評価指標よりも現実的なものとし、さらに解析時間の短縮をはかった。

そして、新たに提案した手法による評価として、実在地区を参考に作成した仮想地区を対象に評価マップを作成

した。

以下に本研究で得られた結論を示す。

- 被験者実験により、道路閉塞時の歩行者の迂回行動を確率モデルとして得た。
- 得られた迂回確率により、エージェントシミュレーションの避難経路選択モデルの構築を行った。
- 被害発生状況を確率的にとらえた耐震補強優先順位を単位時間当たりの避難人数の改善度合いとして定量的に評価する手法を提案した。
- 震度階5弱・5強、においては被害が小さいため、また、震度7においては、被害が大きすぎるため、本研究で提案した評価指標では耐震補強の効果はあまり見られなかった。
- 本研究で提案した手法は、想定地震が震度6強のときの耐震補強の優先順位についての的確に示すことができた。

(2) 今後の課題

本研究では防災まちづくりに向けた基礎的研究を目的としているため、歩行者の避難特性、建物被害の程度、道路リンクの交通障害(道路閉塞)、歩行速度を1パターンのみに簡略化したモデルで解析を行った。今後様々なパターンを考慮したモデルに改良することで、より信頼性の高い評価を行える手法にしていきたいと考えている。

今後の課題として、本研究で提案した評価手法を改善するための項目を以下に示す。

- より多くの被験者実験を行うことによる、避難経路選択モデルの精度の向上。
 - 被験者実験の方法の改善。
 - 全ての地域の建物に個別の耐震等級を与えることによる現実性の向上。
 - 実際の地区環境に即した建物棟数の与え方の検討。
 - 各道路リンクの評価の際の道路閉塞状況の与え方の検討。
 - アンケート調査などによる評価マップの効果の検証。
- このような項目を改善していくことで、今後起こりうる地震災害に対し、住宅所有者が望ましい耐震性能を適切に判断することを支援し、自治体の防災担当者が効果的な地域防災対策を立案することできる評価手法にしていきたい。

謝辞

本研究は慶應義塾大学学事振興資金の助成を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 久貝壽之・加藤孝明・ヤルコン=ユスフ・小出治：道路閉塞からみた地区レベル街路網の防災性能評価手法の提案，地域安全学会論文集，No. 1, pp. 25-34, 1999.11
- 2) 李燕・塚口博司：到達可能ノード率による街路網防災性能評価について，阪神大震災に学ぶ—阪神・淡路大震災調査研究論文集，土木学会土木計画学研究委員会，pp. 407-414, 1997
- 3) 堀健一・石田東生：震災時の連結信頼性から見た住区内街路網構成の評価，阪神・淡路大震災調査研究論文集，土木学会土木計画学研究委員会，pp. 415-424, 1997
- 4) 李燕・塚口博司・吉野崇・田中正浩：防災性を考慮した街路網構成に関する研究，阪神大震災に学ぶ—阪神・淡路大震災調査研究論文集，土木学会土木計画学研究委員会，pp. 425-432, 1997
- 5) 田中美穂・小檜山雅之：街路の避難安全性に基づく住宅耐

- 震補強の優先順位の確率的評価法，第33回地震工学・応用地理学に関するシンポジウム，pp. 11-12, 2009.3
- 6) 横山秀史・目黒公郎・片山恒雄：人間行動シミュレーションによる地下街の安全性評価に関する研究，地域安全学会論文報告集，No. 3, pp. 160-164, 1993.5
 - 7) 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，Vol. 591, No. 1-43, pp. 365-378, 1998.4
 - 8) 藤岡正樹・石橋健一・梶秀樹・塚越功：マルチエージェント型避難モデルの特性評価，地域安全学会論文集，No. 4, pp. 57-63, 2002.11
 - 9) 橋本佳代子・大町達夫・井上修作・瓜井治郎：実避難訓練と避難シミュレーションの比較に基づく集団避難行動の特徴，第12回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 1390-1393, 2006.11
 - 10) 犬飼洋平・小国健二・堀宗朗：計測に基づく避難行動マルチエージェントシミュレータの開発，応用力学論文集，Vol. 8, pp. 629-636, 2005.8
 - 11) 堀宗朗・犬飼洋平・小国健二・市村強：地震時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法の開発に関する基礎的研究，社会技術研究論文集，Vol. 3, pp. 138-145, 2005.11
 - 12) 宮嶋宙・堀宗朗・小国健二：地震時避難行動シミュレーションのためのマルチエージェントの開発，応用力学論文集，Vol. 10, pp. 535-541, 2007.8
 - 13) 堀宗朗・宮嶋宙・犬飼洋平・小国健二：地震時避難行動予測のためのエージェントシミュレーション，土木学会論文集A，Vol. 64, No. 4, pp. 1017-1036, 2008.12
 - 14) Jiang, B.: SimPed: Simulating pedestrian flows in a virtual urban environment, Journal of Geographic Information and Decision Analysis, Vol. 3, No. 1, pp. 21-30, 1999
 - 15) Kirchner, A. and Schadschneider, A.: Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics, Physica, A: Statistical Mechanics and its Applications Vol. 312, Nos. 1-2, pp. 260-276, 2002.9
 - 16) Helbing, D., Isobe, M., Nagatani, T. and Takimoto, K.: Lattice gas simulation of experimentally studied evacuation dynamics, Physical Review E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics, Vol. 67, 067101, 4pp., 2003
 - 17) 生天目章：マルチエージェントと複雑系，森北出版，1998
 - 18) 大内東・山本雅人・川村秀憲：マルチエージェントシステムの基礎と応用—複雑系工学の計算パラダイム—，コロナ社，2002
 - 19) 佐々木健人・小檜山雅之：被害発生確率を用いた耐震等級の説明の有効性，日本地震工学学会論文集，Vol. 7, No. 6, pp. 31-47, 2007.1
 - 20) 片田敏孝・桑沢敬行・金井昌信・細井教平：津波災害シナリオ・シミュレータを用いた尾鷲市民への防災教育の実地とその評価，社会技術研究論文集，Vol. 2, pp. 199-208, 2004.10

(原稿受付 2010.9.3)

(登載決定 2011.2.28)