

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

STUDY ON DEVELOPING SIMULATION METHOD FOR
PREDICTION OF EVACUATION PROCESSES AFTER EARTHQUAKE

堀 宗朗¹・犬飼 洋平²・小国 健二³・市村 強⁴

¹Ph.D. (応用力学) 東京大学教授 地震研究所 (E-mail:hori@eri.u-tokyo.ac.jp)

²M.S. (工学) JR西日本 路線保安部 (E-mail:inukai@eri.u-tokyo.ac.jp)

³Ph.D. (応用力学) 東京大学助教授 地震研究所 (E-mail:oguni@eri.u-tokyo.ac.jp)

⁴博士 (工学) 東京工業大学助教授 工学部 (E-mail:t-ichim@civil.t-tech.ac.jp)

地震時の緊急避難を予測するため、マルチエージェントシミュレーションのプロトタイプを開発した。KISS原理に則り比較的簡単なルールが設定されているが、混雑によって低下する群集の速度を再現することができる。人の運動という力学現象の制約も考慮したことで、物理シミュレーションとしても相応に合理的なものである。地震動と構造物応答のシミュレーションと連成させ、損傷を受けた構造内での緊急避難シミュレーションを行った。応答計算に使われる構造物モデルから避難経路モデルが作られ、一連のシミュレーションがシームレスに実行できるようになっている。避難行動のシミュレーション結果の妥当性の検証は難しいものの、定性的には納得できるものである。

キーワード：マルチエージェントシミュレーション、緊急避難行動、地震災害、人的被害、構造物被害

1. はじめに

東南海・南海地震や首都圏直下地震の発生によって、名古屋・大阪や東京といった大都市の地震災害¹⁾が懸念されている。その一つに人的被害がある。構造物の損壊に伴って死傷者が出る直接的な被害の他に、高層ビルや大規模地下街が損壊した場合、中に残された人々の避難が困難になり、避難の過程で新たな被害が生じる可能性がある。例えば、阪神・淡路大震災²⁾で被害を受けた地下鉄駅では、早朝のため利用客が少なく人的被害は無かったが、地震の発生時刻が通勤・通学時であった場合には相当の人的被害が生じた可能性が指摘されている。この被害には直接的な被害のほかに、群集がパニック状態になることで発生する経路の閉塞やさらには圧死等、二次的な被害を含んでいる。実際、建物の火災や事故から多数の人々が避難する場合、避難経路に支障があるとパニック状態となって二次的な人的被害を増加させた例³⁾は多数挙げられている。

高層ビルの火災に対しては、延焼を防ぐために構造的な対策を施す他に、館内放送施設や避難誘導灯の設置等、円滑な避難のための対策⁴⁾も検討されている。一箇所から発生する火災と違い、地震による構造物損傷は複数箇所でも発生することもある。地震によって火災が発生する場

合には、経路がさらに限定されて避難がより困難になる状況も考えられる。したがって、地震時の緊急避難に対して、少なくとも避難を円滑にする方策を検討することは必要であろう。

群集の緊急避難は常にパニック状態になる訳ではないが、一度、パニック状態になると人的被害が劇的に拡大する可能性がある。群集が多かれ少なかれ整然と避難する場合とは避難の様子は大きく異なる。後述するように、避難行動に関する研究は前者を想定しており、後者を対象としたものは見当たらない。緊急避難行動のデータが蓄積されておらず、また取得が難しいことが原因である。火災の避難行動に対しては館内放送や誘導灯が効果的であり、後者を想定する必要性が低いことも事実である。しかし、大都市に多数存在する高層ビルや大規模地下街において、地震時の円滑な避難対策を検討するためには、パニック状態にもなりうる緊急避難行動も想定することは必要である。2004年のスマトラ島地震⁵⁾では、津波から群集が逃げる様子がビデオ画像によって多数捉えられている。整然とした避難では決してなく、パニック状態に近い緊急避難行動の例となっている。

上記を背景とし、著者のグループは緊急避難行動をシミュレートする数値解析手法⁶⁾の開発を行っている。地震時の緊急避難行動の予測を最終的な目標とするが、本論

文では、開発に際しての基礎的検討と開発された数値解析手法の現状を報告する。本論文は以下のように構成される。第2章において既往の数値解析手法を整理した後、第3章において数値解析手法の概要を説明する。マルチエージェントシミュレーションを採用し、行動ルールとその妥当性を検証する。第4章において、実測データに基づいて、エージェントのパラメータを決定した例を紹介する。本研究で開発するエージェントは人を模擬したものであるが、避難行動という人の運動を対象とするため、力学現象としての制約も無視できない。現実的なシミュレーション結果を得るためには、群集内の人の動きに関する実測データは不可欠である(例えば⁷⁾)。第5章において、開発されたマルチエージェントシミュレーションのプロトタイプを、地震被害を受けた地下構造物での避難行動に適用した例を紹介する。シミュレーションの結果とエージェントの特性を議論する。なお、地下構造物の地震被害は著者のグループが開発しているシミュレーションシステムで計算されたものであり、マルチエージェントシミュレーションを組み込むことで、このシステムは地震動、構造物被害、そして対応行動としての群集避難がシームレスに計算できるようになっている。

緊急避難行動の予測は、地震時の円滑な避難の検討に供されるものである。マルチエージェントシミュレーションによる予測の結果、火災と同様、建物内の動線的设计や改良が促進され、館内放送や誘導灯を使った地震時の避難誘導システムの高度化⁹⁾が期待される。逆に言えば、このような応用に足るように、シミュレーションの予測結果の信頼度を確保しなければならない。人命に関わる問題であるだけに、十分な信頼度を得ることが手法開発の重要な課題である。

2. 避難行動シミュレーションの現状

火災や津波等の状況に応じて、群集の避難行動のシミュレーションはさまざまな研究開発が行われている。パニック状態も視野に入れた緊急避難行動の予測手法を開発するために、本章では数値解析手法の点からその現状を整理する。

2.1. 物理モデル手法

本論文で称する群集の物理モデルとは、群集内の個人が、仮定された法則にしたがって行動する手法を意味する(例えば⁸⁾)。建物内の動線的设计では、群集を流体とみなし、速度や空間当たりの人数を計算する手法が使われる。群集が円滑に動く場合、この手法は効果的であり、信頼度も高い。計算に使われるパラメータを適切に設定することで、人の流れが閉塞する状況も再現することは

可能である。しかし、建物の構造にも依存するため、パラメータの設定は難しい。

高度な物理モデルとしてポテンシャルモデル⁹⁾とそれを使ったシミュレーション手法が提案されている。経路の空間特性、避難する個人の特性、災害状況等に対し、適切なポテンシャルを設定することで、閉塞等も含め、さまざまな避難行動のシミュレーションが可能である。しかし、結果の信頼性は設定されたポテンシャルの質に依ってしまう。状況を再現することは可能であるが、客観的にポテンシャルを決定する原理や方法がないため、信頼度の確保が重要な緊急避難行動を予測するには適していない。

2.2. セルオートマトン法

セルオートマトン法とは、確率を使った単純なルールに従ってセルの状態変化を計算する手法である。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が形成される。避難行動の場合¹⁰⁾、円滑に流れるパターンや閉塞するパターンを計算することができる。定性的なパターンの分類には適した手法であるものの、定量的な予測には限界がある。ルールを複雑にすることでより定量的な予測も可能ではあるが、セルオートマトン法の強みではない。

2.3. マルチエージェントシミュレーション

本論文で称するマルチエージェントとは、「多数の自立した主体からボトムアップにシステムを構成する」¹¹⁾手法である。システムを構成する個々の要因をエージェントとし、エージェントを自立的に行動させ、システムの挙動をシミュレートする。

適切なエージェントを設計すれば信頼度が高い結果が得られるため、現在、マルチエージェントシミュレーションはさまざまな研究がされている。災害用に限っても、火災時の避難行動のマルチエージェントシミュレーション¹²⁾が開発されており、他の災害状況への転用も図っている。社会技術研究の中でも、原子力発電所の危機管理用のマルチエージェントシミュレーション¹³⁾も開発されている。地震災害用に、消防や警察等の行動を予測するためのマルチエージェントシミュレーション¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾も研究されている。

3. 緊急避難行動用エージェントの設計

原理的にも、先行研究の例からみても、パニック状態も想定される緊急避難行動の予測にはマルチエージェントシミュレーションが適していると判断される。シミュレーションは、地震被害を受けた建物を使った仮想空間

を作り，その中でエージェントを動かすことになる．物理モデル手法やセルオートマ法にも共通する点であるが，シミュレーションの結果の信頼度を得ることは決して容易ではない．マルチエージェントシミュレーションの場合，エージェントの設計がその鍵を握る．

KISS(Keep It Simple and Stupid)原理に則り，緊急避難行動用とはいえ，開発するエージェントの機能と属性はできるだけ簡単なものにしなければならない．地震災害用のマルチエージェント¹⁵⁾では「見る」、「話す／聞く」、「考える」、「動く」の3つの機能を持たしている．それぞれ，外部状況を把握し，外部状況の情報を伝達し，情報を基に行動オプションを選択し，それを実行する，というものである．緊急避難行動の場合，「話す／聞く」は原則として無用であるため，プロトタイプでは「見る」、「考える」、「動く」の機能のみとした．なお，外部状況は構造物内の通路と周囲のエージェントであり，行動オプションは目的地と歩行の速度と方向である．エージェントは速度等の行動属性と同じ通路を二度通らないための記憶属性とした．建物の構造データからの転用が容易となるように，通路の属性は幾何形状に関するもののみである．

避難行動という人の運動を扱うため，物理現象としての制約が課せられることは注意が必要である．この点は，本研究で開発するマルチエージェントシミュレーションの特徴である．開発するエージェントの速度は，混雑時の群集の歩行速度を実測したデータを参考として決定する．速度のようなパラメータとは別に，エージェントの機能のルールにも物理現象としての制約が与えられる．例えば，エージェントの速度や向きを変える際に，過度の加速度が発生することは現実的ではない．また，シミュレーションの時間間隔を変えても，同じ結果が得られることが望ましい．KISS原理と合わせて，この二つの条件を物理現象の制約とし，ルール設定の際に考慮した．

群集の中の人の歩行行動には追い越しがある．速度の速い人が前の人を追い越すことはより自然である．また，無理な追い越しは閉塞等の混乱をもたらすので，緊急避難行動用のエージェントは追い越しができることが望ましい．ルール設定の際にはこの点も考慮した．

開発されたエージェントの三つの機能を以下のように設定した(Fig. 1参照)．

見る：半径 $R[m]$ 内にある通路と他のエージェントの位置を見る．通路は出口や他の通路への連絡の様子も見る．

考える：出口を目的とし方向を決める．エージェントの進行方向に $D[m]$ ，左右に $D[m]$ の $D \times 2D[m]$ の長方形領域の中にある他のエージェントの有無によって，方向と速度 $v[m/sec]$ を修正する．右／左前方にエージェントがいる場合には逆の方向に角度を $\theta[deg]$ 修正し，両方にいる場合は速度を $m\%$ 低減する．速度変

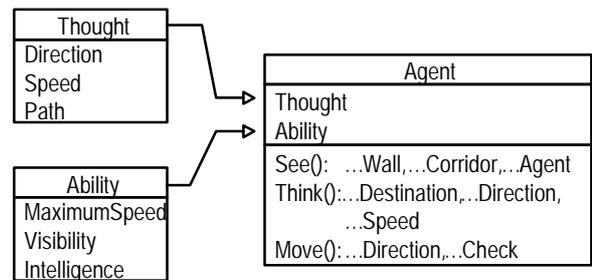


Fig. 1. エージェントの概要

化に伴う加速度を計算し，加速度が許容値 $(a[m/sec^2])$ 内にあるようにする．通路の壁がある場合も同様の修正をする．

動く：速度と方向通りに移動する．通路の壁にぶつかった場合には壁に沿って運動する

上記で説明されたエージェントのパラメータの内，視野半径 R は $2.5[m]$ 以上であればシミュレーション結果が変化しないため，計算効率を上げるためこの値とした．次章で説明するように， v は実測データを用いて設定する．許容加速度 a は速度 v の状態から所定の時間 $(0.5[sec])$ で静止するために必要な加速度 $(a=v/0.5)$ として設定した．長方形領域のサイズ D は $0.5[m]$ とした．残りのエージェントのパラメータは，方向修正角 θ と速度低減率 $m\%$ であるが，これは「考える」のルールに合わせたものである．他のルールも試行したが上記のルールが簡単であり，また，後述するように結果も妥当である． m と θ の値は全エージェントに共通であり，幾つかの組を設定したシミュレーション結果から適当な値を選ぶ．なお，パラメータがある範囲にあれば，結果はさほど敏感に変化しない．

設定されたルールの妥当性を検証するため，真っ直ぐな通路と，曲がった通路の二つの例で避難シミュレーションを行った．真っ直ぐな通路では，混雑による速度の低下を検討した．エージェントの数と，速度の平均値をFig. 2に示す．混雑による群集の速度低下が再現され，パラメータの値によってその度合いも修正できることが分かる．なお，物理モデル手法では，群集の平均速度は単位面積当たりの人の関数として与えられる場合がある．これは動線設計に使われる円滑な通行状態の平均速度である．マルチエージェントシミュレーションでは，適切なルールを与えることで，混雑度と平均速度の関係を再現することになる．なお，この関係の再現は重要であるが，必要条件の一つにしか過ぎない．曲がった通路では，エージェントが通路の角を自然に曲がることを検証することが目的である．パラメータの値によっては，不自然な曲がり方となる．しかし，パラメータ，特に方向修正角 θ が $60 \sim 90[deg]$ の範囲にあれば，曲がり方は概ね自然である．例として，Fig. 3に時間毎に避難したエージェン

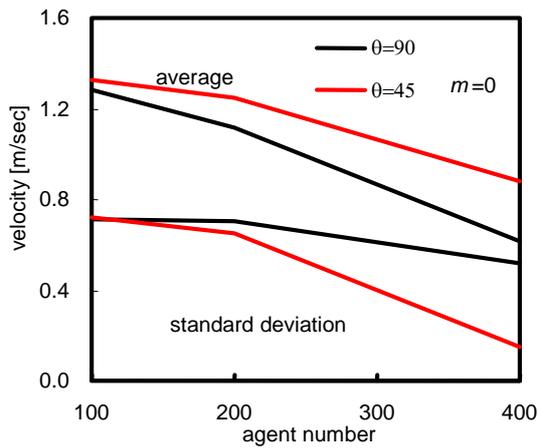


Fig. 2. エージェントの数と速度の関係

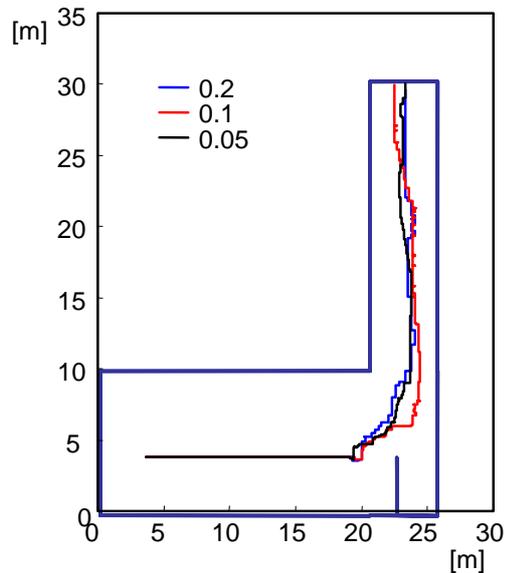


Fig. 4. エージェントの軌跡

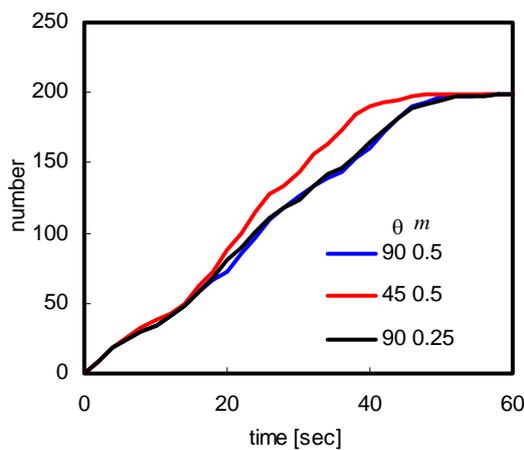


Fig. 3. 避難したエージェントの累積値

トの数の累積値を示す。θが90[deg]であればmには依存しないことがわかる。最後に、シミュレーション結果が時間間隔に依存しないことを検証した。曲がった通路において時間間隔を0.2, 0.1, 0.05[sec]としたシミュレーションを行った。角を曲がったエージェントの軌跡をFig. 4に示す。軌跡は完全に一致せず、距離にして10[cm]程度、移動速度にして数パーセントの差がある。緊急避難行動を検討するという目的からみて、この程度の差は小さい。設定されたルールが物理的にも許容できる結果を出すことが分かる。

4. エージェントの物理パラメータの計測

マルチエージェントシミュレーションで設定されるパラメータの中で、エージェントの速度 v は時間の次元を持

ち、避難の所要時間等の時間に関する予測結果の精度を左右することは自明である。シミュレーション結果の信頼度を高めるためには、この速度を正しく設定する必要がある。このため、群集の速度を計測し速度を求めた。動線設計に使われる速度分布の利用も考えられるが、精度を高め、同時に、個人差に起因する人の速度の分布も調べるには実測が望ましい。

計測の対象は2004年7月18日に横浜みなとみらいで行われた花火大会の群集である。大桟橋入口交差点においてデジタルビデオカメラを用いておよそ35分間撮影を行った。この映像を画像解析し、画像内での一人一人の移動の軌跡を求め、平均速度を計算した。画像解析はパターンマッチングを使う。デジタルビデオの映像をビットマップ画像(640x480ピクセル)にデコードし、対象となる人の適当な部分(5x5ピクセルの領域)をターゲットとし、パターンマッチングによって各画像でこのターゲットの位置を決める。この位置をたどることで人の軌跡が求まる。解析には0.1[sec]ごとの画像を使い、画像内の横断歩道の長さを16[m]としてピクセルを距離に換算する。解析したサンプル数は198人である。

Fig. 5に計測された群集内の歩行速度の分布を示す。横軸に歩行速度、縦軸に累積度数を正規化したものをとっている。平均値1.21[m/s]分散0.343[(m/s)²]の正規分布曲線を併せてプロットしている。解析したサンプルには、信号が青に変わった直後に動き出した人や、他の歩行者が少ない状況で自由に動いている人等、混雑の影響を受けていない歩行者がいる。主観的ではあるが、混雑の影響を受けていないと思われる歩行者と、影響を受けていると思われる歩行者に区分し、各々の速度の分布を示す。混雑の影響を受けない場合、速度の平均と分散はそれぞれ

れ1.40[m/s]と0.315[(m/s)²]であった。

エージェントの速度 v が混雑の影響を受けていない人の速度分布(平均1.40[m/s]分散0.315[(m/s)²]の正規分布)に従うことを仮定し、マルチエージェントシミュレーションを行い、混雑の影響を受けている場合の速度分布の再現を試みた。なお、実測との比較のため、シミュレーションでは実際の歩道の信号と同じタイミングで変化する信号を仮想空間に置き、エージェントの数も合わせて行っている。混雑の影響で速度を修正したエージェントとそうでないエージェントで区分し、シミュレートされたエージェントの速度の分布をFig. 6に示す。速度が遅い部分では混雑の影響を受けたエージェントと影響を受けていないエージェントの速度が逆転している。これはもともと速度が遅いエージェントが、混雑の影響を受けたエージェントに区分されたことが原因である。この点を除き、シミュレーションでは混雑の影響を受けた群集の動きが概ね良好に再現されている。Table 1に速度の実測データとシミュレーション結果を整理する。混雑の影響を受けていない場合、分散に関してはシミュレーションの相対誤差は10%程度である。一方、混雑の影響のある場合でも同様の精度で速度の分散が得られている。これは簡単ではあるが効果的なルールを使った結果である。

5. 地下空間の緊急避難行動シミュレーション

開発されたプロトタイプを使って、地下空間での緊急避難シミュレーションを行った。対象とした地下空間は、200x80x80[m]の5層の地下鉄駅である(Fig. 7参照)。最下層はプラットフォームであり、4層目には長い階段がある。階段を使って地下3階から外へ出る緊急避難を想定する。シミュレーションの概要は、最初に、地震動解析¹⁸⁾を行って地盤の揺れを計算し、次いでそれを地下構造物に入力し地震応答を計算¹⁹⁾し、損傷発生の有無を計算する。最後に、応答を計算した構造物から避難経路モデルを作り、適当な数のエージェントを発生させて緊急避難シミュレーションを行う。なお、地震シミュレーションで用いられる簡単な模擬地震動(リッカー波)を入力した。

構造モデルは3次元であるが、避難経路モデルは2次元である。通路は壁に囲まれた四角形とし、この通路を連結させて避難経路モデルを作る。地下構造に特有の階段モデルを作り、この階段を通してエージェントは地上階を目指す。構造損傷は対応する通路モデルに反映させる。プロトタイプでは、構造物の各部材の応力が強度を超えた場合を損傷発生とし、損傷箇所では歩行速度が低減することを設定した。同様に、階段モデルにおいても、歩行速度を低減するルールを設定した。

さらに、速度が遅く、追い越しの際に50%の確率で0.5

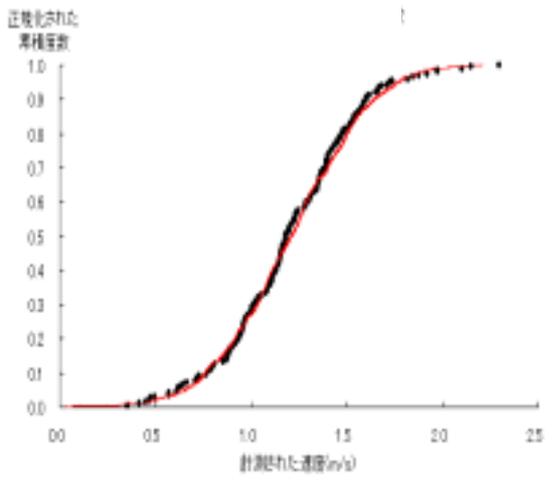


Fig. 5. 計測された群集の速度分布

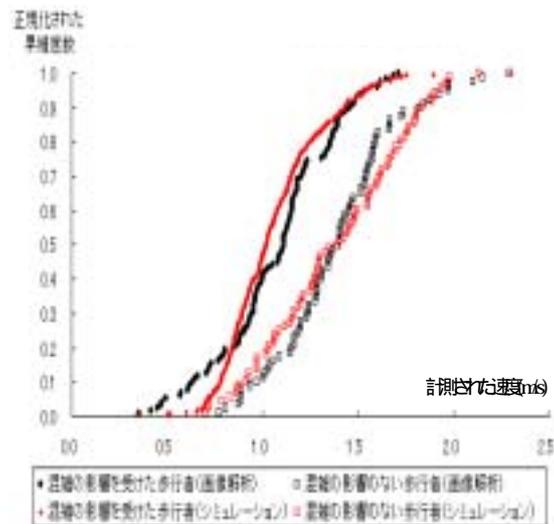


Fig. 6. エージェントの速度分布の比較

Table 1. 計測データとシミュレーション結果の比較

	計測		シミュレーション	
	混雑の影響有	混雑の影響無	混雑の影響有	混雑の影響無
速度の平均[m/s]	1.08	1.40	1.06	1.39
速度の分散[(m/s) ²]	0.30	0.32	0.26	0.35

秒間停止する特性を持つエージェントを作った．このような低速のエージェントは避難時間が長くなると同時に，円滑な群集の緊急避難を妨げる原因となる．設定された低速エージェントと普通のエージェントの速度特性をTable 2に整理する．

一例としてエージェントの数を3000人とした場合の，結果をFig. 8に示す．下段が地下5階，中央が地下4階の階段の踊り場，上段が地下3階部分である．普通エージェントは濃い灰色，低速エージェントは薄い灰色の点である．損傷箇所は地下4階の右端である．エージェントは滑らかに通路を歩き，階段を登り，脱出をしている．

Fig. 9にエージェントの数と避難の平均所要時間をプロットした．避難時間には，避難開始の時点でのエージェントの配置も影響する．人数を固定したままエージェントの配置を変えたシミュレーションを10回行い，その平均を取ることで，配置の影響を除くことを行った．薄

い灰色の丸は損傷がない場合，濃い灰色の丸は損傷がある場合の平均所要時間である．なお，塗りつぶされた丸は全エージェントの平均所要時間であり，白抜きの丸は所要時間が長かった下位20名の平均所要時間である．下位のエージェント，すなわち逃げ遅れそうになったエージェントは，避難の所要時間が大きくばらつくため，20名を選んでその傾向を調べたのである．したがって，下位20名の平均所要時間には，10回のシミュレーションで得られた最大値と最小値も示している．縦線の長さがその範囲を示し，20名の平均でも避難の所要時間が大きくばらつくことがわかる．

Fig. 9に示されたシミュレーション結果の特徴として，人数に応じてほぼ線形に所要時間が増加すること，損傷の有無は下位のエージェントの所要時間を増やすこと，が挙げられる．直感的にはこの結果は納得がいくが，妥当性を検証することは難しい．実際に不意の避難訓練を

Table 2. 低速エージェントと普通エージェントの速度特性

	低速エージェント	普通エージェント
通常の通路での移動速度[m/s]	1.000	1.000
階段での移動速度[m/s]	0.625	0.800
破損した通路での移動速度[m/s]	0.800	0.800
破損した階段での移動速度[m/s]	0.500	0.640

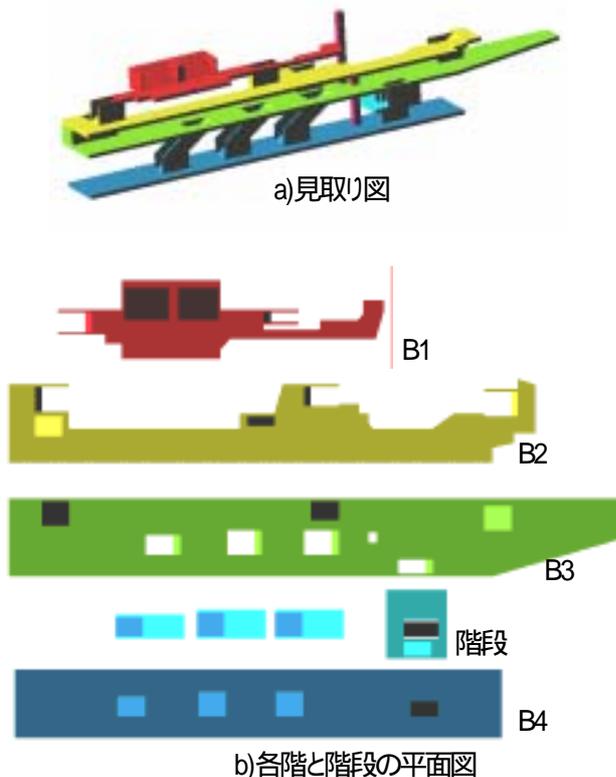


Fig. 7. 地下空間のモデル

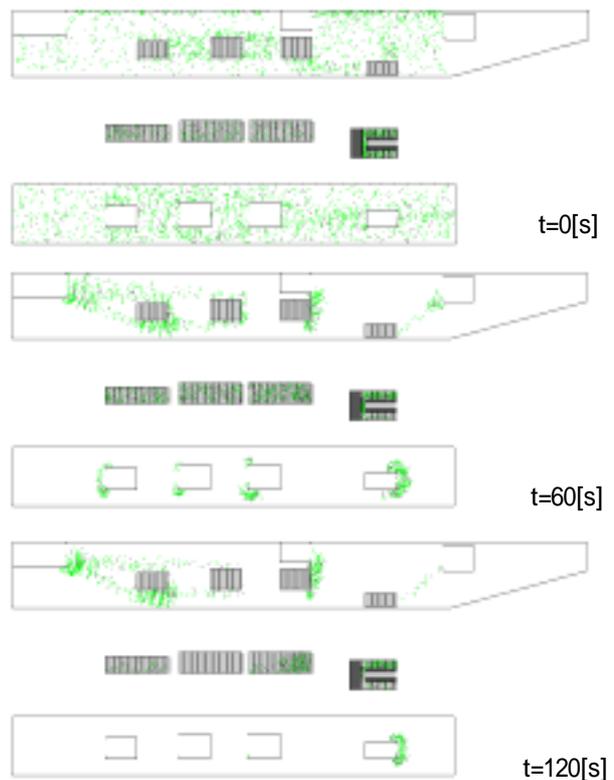


Fig. 8. エージェントの避難の様子

する等の方法が考えられるが、危険も伴うため、実現は難しい。本論文で示したように、既知のデータを再現するなど、シミュレーション手法の合理性を示して、結果が信頼に足るものであるという信頼性を勝ち得ることが、妥当性の検証の代替である。

6. おわりに

高層ビルや大規模地下街での緊急避難行動を予測するため、マルチエージェントシミュレーションのプロトタイプを開発した。人の運動を対象とするため、エージェントのルールやパラメータには物理現象としての制約が課せられる。この点がプロトタイプの特長である。また、パラメータの設定に実測データを使うことで、実測された群衆行動の良好な再現に成功している。開発されたプロトタイプは、地震動・構造物応答の計算結果を使ったシームレスなシミュレーションを実現している。

緊急避難行動の予測結果の信頼性を勝ち得るために、群衆の歩行、特に、パニック状態での歩行を所定の精度で再現することを示す必要がある。本論文では再現の一例を示しているが、より複雑な状況の再現が必要である。スマトラ島地震で撮影された、群衆が津波から逃げる様子の再現を試みている。また、質の良いデータを入手するために、群衆内の人の位置を高精度で計測する手法が必要である。携帯電話を使った位置同定手法⁹⁾を開発中である。

参考文献

- 1) 文部科学省 (2002), 「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」, http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jishin/04031203.htm.
- 2) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会 (1999), 『阪神・淡路大震災調査報告(建築編)』, 日本建築学会.
- 3) 日本火災学会編 (2002), 『火災と建築』, 共立出版株式会社.
- 4) EDM川崎ラボラトリー (2005), 「密集空間を対象とした総合避難誘導シミュレーションシステム研究」(末松 孝司), http://www.kedm.bosai.go.jp/japanese/kenkyukaiatsu/005_misshukukan.html.
- 5) International Tsunami Information Center (2005), <http://ioc3.unesco.org/itic/>.
- 6) 犬飼洋平, 小国健二, 堀宗朗 (2005), 「避難行動のマルチエージェントシミュレーションの開発」, 『応用力学論文集』, (投稿中).
- 7) F. Zhao, R. Shibasaki, (2005), A Novel System for Tracking Pedestrians using Multiple Single-row Laser Range Scanners, *Journal of IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, IEEE, Part A*, 35, 2, 283-291.
- 8) D. Helbing, M. Isobe, T. Nagatani and K. Takimoto (2003), Lattice Gas simulation of experimentally studied evacuation dynamics, *Physical Review, E*, 67, 067101-1-4.
- 9) 目黒公郎, 津波災害時の避難行動シミュレーションモデルの開発, 大都市大震災軽減化特別プロジェクト成果報告書, -2, 3. 3. 4, 2003.
- 10) A. Kirchner, A. Schadschneider, (2002), Simulation of

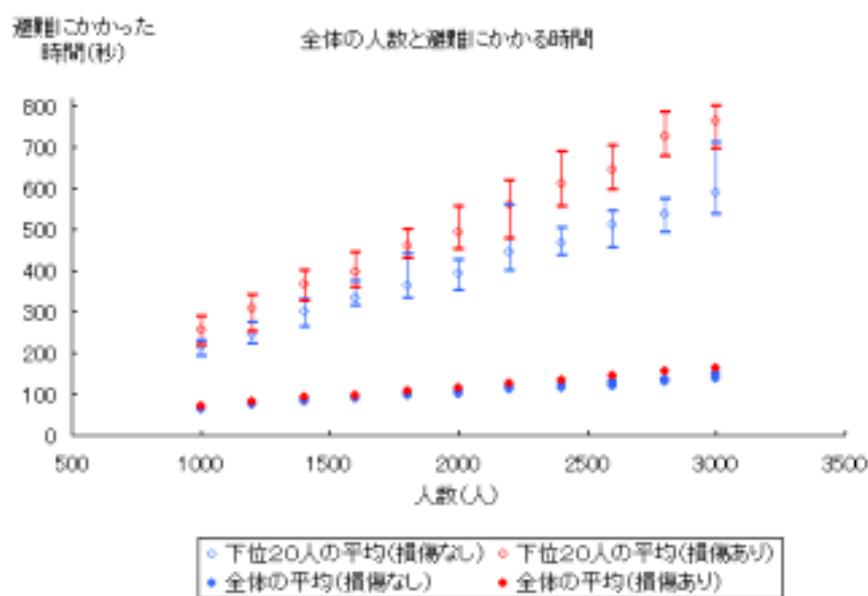


Fig. 9. エージェントの人数と平均の避難所要時間の関係

- evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics, *Physica*, A312, 260-276.
- 11) 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.
 - 12) B. Jiang (1999), SimPed: Simulating Pedestrian Flows in a Virtual Urban Environment, *J. Geo. Info. & Decision Analysis*, 3, 1, 21-30.
 - 13) 社会技術研究システム, 原子力安全Iグループ (2005), <http://diras.q.t.u-tokyo.ac.jp/>
 - 14) 高橋友一, 田所諭, 太田正幸, 伊藤暢浩, (2000.), 「大規模災害におけるマルチエージェント」 - RoboCup-Rescueにおける防災エージェントの構成 -, 第9回マルチ・エージェントと協調計算ワークショップ .
 - 15) RoboCupRescue (2005), <http://www.rescuesystem.org/robocup-rescue/index.html> .
 - 16) 文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」(2005), 『成果報告書』, III.1 震災総合シミュレーションシステムの開発.
 - 17) 生天目章, マルチエージェントと複雑系, 森北出版株式会社, 1998.
 - 18) Yang, F., Ichimura, T. and Hori, M (2002), Earthquake Simulation in Virtual Metropolis, Using Strong Motion Simulator and Geographic Information System, *Journal of Applied Mechanics*, JSCE, 5, 527-537..
 - 19) 伊丹洋人, 大保直人, 市村強, 山田岳峰, 堀宗朗, 池田清宏 (2004), 大深度地下構造物の大規模三次元的動的応答解析, 構造工学論文集,

STUDY ON DEVELOPING SIMULATION METHOD FOR PREDICTION OF EVACUATION PROCESSES AFTER EARTHQUAKE

Muneo HORI¹, Youhei INUKAI², Kenji OGUNI³ and Tsuyoshi ICHIMURA⁴

¹Ph.D. (Applied Mechanics) Professor, University of Tokyo, ERI (E-mail: horie@eri.u-tokyo.ac.jp)

²M.A. (Engineering) JR West, Maintenance Division (E-mail: inukai@eri.u-tokyo.ac.jp)

³Ph.D. (Applied Mechanics) Associate Professor, University of Tokyo, ERI (E-mail: oguni@eri.u-tokyo.ac.jp)

⁴Ph.D. (Applied Mechanics) Associate Professor, Tokyo Institute of Technology, Department of Civil Engineering (E-mail: t-ichim@civil.t-tech.ac.jp)

A prototype of multi-agent simulation is developed to predict state of emergency evacuation of crowds. Agent is designed according to KISS principle and simple rules are assigned, though they can reproduce the speed decrease due to the crowded-ness. Some physical restrictions are given to the rules such that human movement is simulated, and agents move naturally. Coupled with earthquake simulation and structure response simulation, an emergency evacuation simulation is carried out. These simulations are seamlessly made by utilizing a structure model to construct an evacuation path model. Although the validity of the simulation results is not validated, they appear intuitively reasonable.

Key Words: *Multi-Agent Simulation, Emergency Evacuation, Earthquake Disaster, Human Casualty, Structure Damage*