

多様な群集の雑然とした状況を想定した 地震時避難行動シミュレーション

宮嶋宙¹・堀宗朗²・小国健二³

¹学生会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)
e-mail: sora@eri.u-tokyo.ac.jp

²正会員 Ph.D. 東京大学教授 東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)
e-mail: hori@eri.u-tokyo.ac.jp

³正会員 Ph.D. 東京大学准教授 東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)
e-mail: oguni@eri.u-tokyo.ac.jp

多様な群集が雑然と避難する状況を想定したマルチエージェントシミュレーションが開発されている。エージェントは見る、考える、動くことができ、設定された確率分布にしたがって固有の運動特性を持つ。特に重要なパラメータであるエージェントの移動速度に対して、混雑時や緊急時の人々を写したビデオクリップを解析することで求めており、2005 年宮城県沖地震のビデオクリップを使用している。大規模地下空間として二つの地下鉄駅を対象に避難行動シミュレーションを行った。遅いエージェントを加えてより多様な群集を想定した。避難時間の分布をモンテカルロシミュレーションによって求め、避難行動の差を定量的に分析した。

Key Words : *multi-agent simulation, evacuation process, human walk speed distribution in emergency state, image analysis, Monte-Carlo simulation*

1. はじめに

東南海・南海地震や首都直下地震が大都市に想定外の被害をもたらすことが懸念¹⁾されている。その一因は社会環境の変化である。例えば、高齢化やバリアフリー化の結果、密集空間からの避難の際に未経験の人的被害が生じる可能性が考えられる。大地震発生後に、街中にいる高齢者や障害者の安全を検討することは重要な課題である。大規模地下街のように出口が限られた密集空間では、密集の度合いによって思わぬ大惨事が引き起こされる危険があることは否めない。

地震後の密集空間からの群集避難を考える際、火災が発生した高層ビルからの避難²⁾が参考となる。延焼を防ぐ防火扉等のハードウェア対策、館内放送施設・避難誘導灯等のソフトウェア対策が具体化されており、避難経路の確保と出口への誘導が有効であることが知られている。しかし、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が発生し、さらに、そこから火災が発生する場合もある。耐震補強というハードウェア対策とは別に、危険性を分析し円滑な避難をもたらすソフトウェア対策を検討することは必要であろう。しかし、群集の避難行動に関する研究^{3),4),5),6)}は限られており、特定の密集空間の危険性を分析することすら容易ではない。

上記を背景として、著者のグループは、多様な群集が雑然と避難する状況を想定したシミュレーション手

法^{7),8)}の開発を行ってきた。この手法はマルチエージェント^{9),10)}を使うもので、実際の密集空間に対応した避難経路モデル内を運動・判断能力が異なる多様なエージェントが自立的に動き群集の避難行動を模擬するものである。シミュレーションに信頼性を与えるためには、手法の合理性もさることながら、シミュレーションに使うパラメータの妥当性も重要な要因となる。群集行動シミュレーションでは緊急時の歩行速度が重要なパラメータである⁷⁾。2005 年宮城県地震発生後の繁華街での人々の動きを撮影したビデオ画像を解析することで、緊急時の歩行速度の計測を行い、このデータを基にエージェントの移動速度を設定した。

本論文はこの測定結果を説明するとともに、開発されたシミュレーション手法を大規模地下街に適用した例を紹介する。本論文の構成は、第 2 章で避難行動シミュレーション手法の現状を説明する。第 3 章でビデオ画像を使った群集の歩行速度の計測手法を説明し、この手法で得られた緊急時の人の歩行速度を示す。大規模地下空間での避難行動シミュレーションの例は第 4 章で説明する。

2. エージェントの設計

群集の避難行動のシミュレーションは、主に建築学と計算科学の分野で行われている。最近では津波地震防災の分野^{5),4)}でも活発に研究されている。主な手法は、群

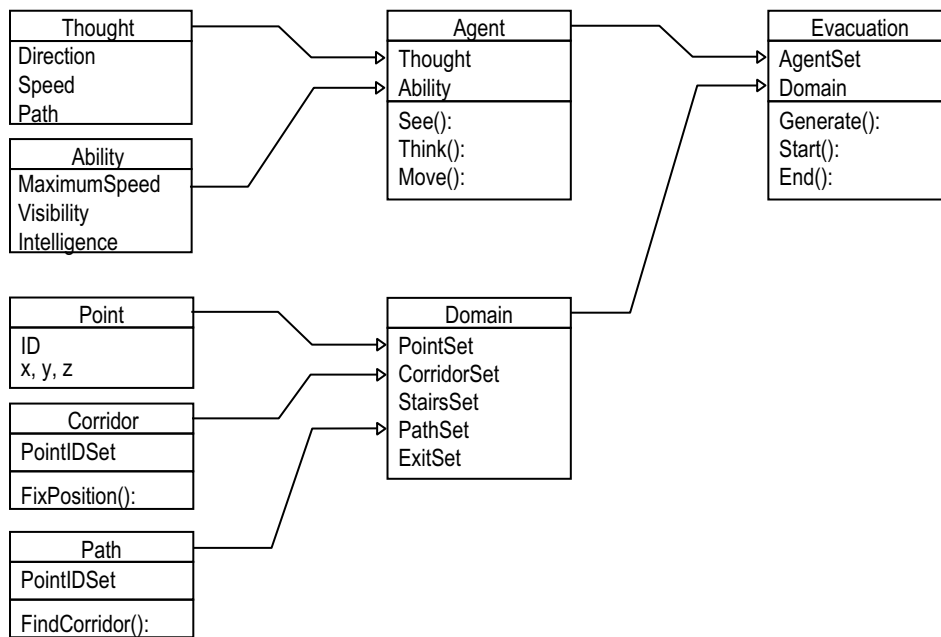


図-1 シミュレーションで使われるクラス

集の動きを人の流れとしてモデル化する物理モデル手法、簡単な移動ルールを設定し多数の群集の動きを扱うセルオートマトン法が挙げられる。しかし、このような手法は、多様な群集が雑然と避難する状況には適していない。

エージェントシミュレーションは、セルオートマトン法の拡張とも目されるが、地震防災の分野¹¹⁾では先駆的な研究が進められている。マルチエージェントとは、「多数の自律した主体からボトムアップにシステムを構成する」手法であり、システムを構成する個々の要因をエージェントとし、エージェントを自律的に行動させ、システムの挙動をシミュレートする。

著者のグループが開発しているマルチエージェントシミュレーション手法は、多様なエージェントが避難経路モデルを移動する。エージェントは「見る」、「考える」、「動く」という三つの機能を持ち、その多様性は思考能力と運動能力に対応する属性、「思考」と「能力」,)に現れる。さらに、雑然とした避難を考慮して動くという機能には、前方のエージェントを追い越すという追越も加えている。エージェントが動く避難経路モデルは「領域」と呼ばれ、GISやCAD等の利用できるデジタルデータから自動構築される。完全な自動構築には成功していないが、本論文で紹介される例は自動構築されたモデルである。領域は、エージェントが動く多角形の「回廊」と回廊を結ぶ「通路」の組を属性としている。各々、「点」の集合として定義されており、エージェントが通路を通して隣の回廊にたどり着けるよう、関連が付けられている。シミュレーション

で使われるクラスの概略を図1に示す（コーディングにはc++を使用）。

3. ビデオ画像を利用した歩行速度の計測手法

年齢等が多様な群集に対して歩行速度の分布を計測するため、歩行の様子を撮影したビデオ画像を解析することを試みた。ビデオ画像からは毎秒30枚のデジタル画像が得られる。デジタル画像内の個人個人の位置を特定することで歩行速度を計算し、その分布から群集の歩行速度分布が得られるのである。

デジタル画像の画像解析にはマッチング法を使う。これは、対象となる個人の頭部等、特徴のある箇所を選択し、最初のデジタル画像からその箇所のピクセルデータのパターンを得て、他のデジタル画像内でそのパターンに最も合う箇所を選び、デジタル画像内での特徴となる箇所の位置を求める方法である。マッチング法は単純である。簡単のため、特徴のある箇所は 5×5 ピクセルの正方形領域をターゲットとする。画像解析に必要な計算量を減らすため、RGBのピクセルデータをグレースケールに変換し、ターゲットの25のピクセルデータを $[G_{ij}]$ ($i, j = 1, 5$) という 5×5 のマトリクスとする。第 n 番目のデジタル画像 (640×480 ピクセル) のピクセルデータを $g_{ij}^{(n)}$ とすると、

$$E(i, j) = \sum_{k,l=1}^5 (g_{i+k}^n j + l - G_{kl})^2 \quad (1)$$

として定義される誤差 E を最小とする (i, j) が、第 n 番目の画像でのターゲットの位置となる。ピクセル単位

の (i, j) を実際の位置に変換することで、 $n/30$ 秒後の実空間での個人の位置が分かる。

(1) 混雑した状況での群衆の歩行

2004 年 7 月 18 日に横浜みなとみらいで行われた花火大会において、混雑した状況での群衆の歩行を撮影し、マッチング法によって歩行速度の分布を計測した。解析した個人の人数は 198 人である。ビデオカメラが固定されているため、画像内にある長さ 16[m] の横断歩道を基準として、ピクセル単位で与えられるデジタル画像内の位置を実空間の位置に変換する (1 ピクセルは $16/640 = 0.025$ [m])。

図 2 に計測された歩行速度の分布を示す。混雑の影響を受けた歩行者と受けていない歩行者の速度分布であり、横軸に歩行速度、縦軸に総数で正規化した累積度数をとっている。また、混雑の影響を受けた歩行者と受けていない歩行者の速度分布に、それぞれ平均と標準偏差が $(1.08, 0.55)$ [m/s]、 $(1.40, 0.57)$ [m/s] の正規分布の累積確率密度曲線を併せてプロットしている。混雑の影響を受けている歩行者は、目視によってスムーズに歩いていないと思われる歩行者や信号によって止まった歩行者である。どちらの場合も歩行者の速度分布が正規分布と良好に一致することが分かる。

エージェントの最大移動速度が、混雑の影響を受けていない歩行者の速度分布 (平均と標準偏差が $(1.40, 0.57)$ [m/s] の正規分布) に従うことを仮定し、シミュレーションによって混雑の影響を受けた歩行者の速度分布の再現を試みた。実測との比較のため、エージェントの数を合わせる他、実際の歩道の信号と同じタイミングで変化する信号も使っている。シミュレーションの結果を表 reffig:yokohama:simulation に示す。混雑の影響を受けた歩行者と受けていない歩行者に対応して、追越によって速度を修正したエージェントと修正していないエージェントを区分し、各々のエージェントの速度分布を示している。なお、速度が遅いところでは混雑の影響を受けたエージェントと受けていないエージェントの速度が逆転しているが、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ていないエージェントに区分し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歩行者の速度分布が概ね良好に再現されている。表 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。混雑の影響の有無によらず 10%以下度の誤差で速度分布が得られている。簡単ではあるが効果的な追越のルールを使った結果であると考えられる。

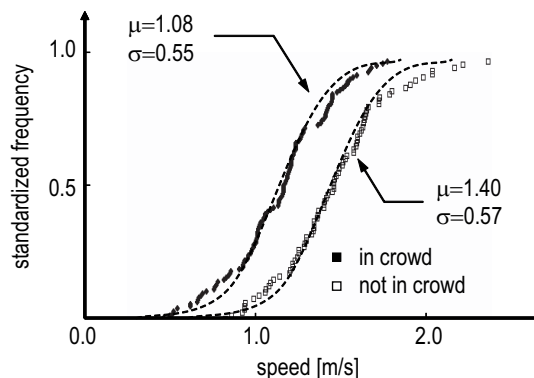


図-2 計測された歩行速度の分布

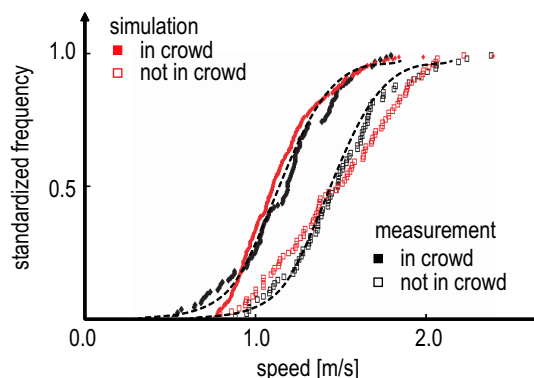


図-3 シミュレーションによって得られたエージェントの歩行速度の分布

表-1 歩行速度の分布の比較

	measured value		simulation	
	in crowd	not	in crowd	not
average [m/s]	1.08	1.40	1.06	1.39
S.D. [m/s]	0.55	0.57	0.51	0.59

(2) スマトラ沖地震の津波から避難する人の速度

2004 年のスマトラ沖地震では津波から避難する群衆を映したビデオが多数撮影された。このビデオ画像を画像解析して緊急時の人間の歩行速度を計測した。なお、解析したビデオ画像はカメラのぶれがあるため、マッチング法によって得られたデジタル画像の中で人の位置を実空間の位置に変換するためには工夫が必要である。デジタル画像に写った建物の柱の端部を基準点とし、各画像における人の相対的な位置を追った。この例を図 4 に示す。ビデオ画像では人が建物に沿って動いているため、二次元の画像でありながら人の位置を三次元のベクトルとして計測することができる。しかし、当然のことであるが、画像の面内方向の成分に比

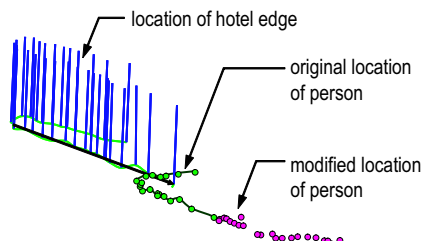


図-4 スマトラ沖地震時に撮影されたビデオ画像の例

表-2 画像解析によって得られた個人の歩行速度

	speed [m/s]
fast	3.3 ~ 4.7
middle	2.8 ~ 4.0
slow (1)	2.4 ~ 3.3
slow (2)	2.2 ~ 3.1

ベ面外方向の成分の計測精度は落ちる。

画像解析から計測された4名の速度を表2に示す。歩行速度の変化や、画像解析には半ピクセル程度の誤差があることを考慮し、確定値ではなく範囲を示している。表1と比較すると、この表に示された歩行速度のばらつきは大きい。津波からの避難という対応行動に大きな違いが起きていることが伺える。

(3) 宮城県沖地震で避難する人の速度

2005年8月16日の宮城県沖地震の際に、繁華街(一番町一番街商店街ぶらんどーむ)で人々が避難する様子を撮影したビデオ画像をNHKより入手した。このビデオ画像は、立ち並ぶ店舗から大勢の御客が逃げ出し、画面手前方向に走って避難する様子を捉えている。マッチング法が適用できそうな、比較的鮮明に映っている人15人を選び、その歩行速度を計測した。個人の軌跡の一例を図5に示す。この図から明らかなように、なお、スマトラ島地震のビデオ画像と比べビデオカメラのぶれは小さかったため、デジタル画面内の基準点を使った補正はしていない。

画像解析によって計測された15人の速度を表3に示す。平均は約4[m/s]、標準偏差は1[m/s]である。常時の歩行速度の平均が1.3[m/s]程度であるため、ビデオ



図-5 宮城県沖地震で避難する歩行者の軌跡の例

表-3 画像解析によって得られた個人の歩行速度

male	speed [m/s]	female	speed [m/s]
A	5.9	A	3.1
B	3.3	B	3.2
C	5.9	C	4.0
D	3.0	D	4.2
E	4.5	E	2.7
F	3.0	F	3.0
G	3.9	G	2.8
H	3.0		

画像から得られた緊急時の速度の平均は大分速いことがわかる。しかし4[m/s]では100メートルに25秒かかることになり、「全速力で走って逃げる」ということではない。15人分のデータではあるが、1[m/s]という標準偏差は速度のばらつきが常時に比べ大きいことがわかる。スマトラ島地震の結果と同様、避難行動の仕方に大きな違いがあることが伺える。

4. 大規模地下空間での避難行動シミュレーションの例

大規模地下空間を対象に、開発されたマルチエージェントシミュレーションを使って、多様な群集が雑然と避難する状況を想定した避難行動をシミュレートする。避難行動シミュレーションは、乱数によって発生したエージェント群が避難経路モデルを動くというモンテカルロシミュレーション(MCS)を行う。エージェントの総数を設定し、各エージェントの最大移動速度等の運動属性と最初の位置をランダムに設定する。これが多様な群集に対応する(図6参照)。最大移動速度の分布は前章で計測された、混雑時や緊急時の人の歩行速度の分布を使う。また、避難行動はエージェントが出口

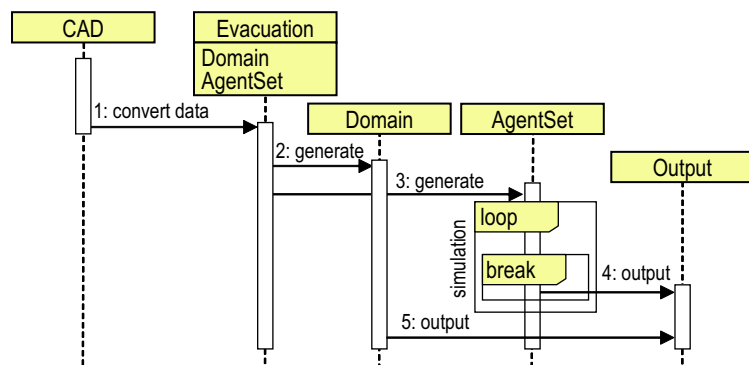


図-6 MCS の手順

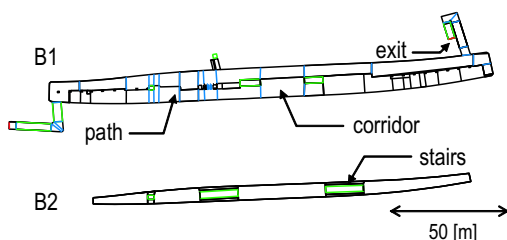


図-7 小型駅の避難経路モデル

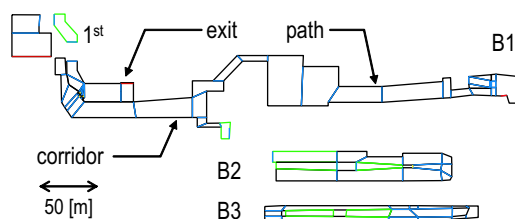


図-8 大型駅の避難経路モデル

表-4 MCS のパラメータ

number of agent	70/200/300	
ratio of slow agent [%]	0/20	
average of speed [m/s]	normal	1.4
	slow	1.1
S.D. of speed [m/s]	normal	0.6
	slow	0.3
stop probability at passing	normal	0.0
	slow	0.5

を抜けて避難経路モデルの外に出るまでの時間、避難時間によって評価する。MCS によって避難時間の確率分布が計算されるが、全エージェントが避難する避難完了時間の分布は特に重要な出力となる。なお、MCS では 200 ケースのエージェント群を使う。このケース数で避難完了時間の平均と分散が収束するためである。

大きさの異なる二つの地下鉄駅を対象に避難行動シミュレーションを行った。小型の地下鉄駅の避難経路モデルは図 7 に、大型駅の避難経路モデルを図 8 に示す。一例として、表 4 に示すパラメータを使った MCS の結果を示す。なお、地下鉄駅の 1 日の乗降人数は大型駅でも 80,000 人余りであり、駅の営業時間を 18 時間として 1 時間当たりの平均を換算すると 4,500 人と

なる。ラッシュ時を除けば、地震発生時の駅利用者は 100 人のオーダーと考えられる。このためエージェントの数は 70, 200, 300 人の 3 通りとした。また、高齢者等に対応する遅いエージェントを導入する。その割合は 0 ないし 20% とする。通常のエージェントの移動速度は、前章で説明された群集の歩行者の速度分布を参考に正規分布とし平均値と分散を設定している。遅いエージェントも正規分布を仮定し、健常者と高齢者の常時の歩行速度の比を使って平均値と分散を設定している。前方が塞がっている場合に、無理な追越をせずに停止する確率を通常のエージェントは 0%, 遅いエージェントは 50% とした。

移動速度に正規分布を仮定することに加え、遅いエージェントを導入することでより多様な群集を想定している。また、エージェントが無理な追越や停止をすることで、雑然と避難する状況を想定している。遅いエージェントの移動速度分布や停止の確率の設定には根拠がない。データがなく、また、計測も難しい。前述のように、速度分布の設定に常時の速度分布との比を使うことが最善の努力であった。しかし、後述するように、ここで紹介するシミュレーションでは、出口がわからず大規模地下空間を迷走することが円滑な避難行動を妨げる原因であり、よほど特異な速度分布や停止確率を設定しない限り、避難行動の結果はさほど変わらない。

(1) 小型駅の避難行動

小型駅の避難経路モデルでは回廊の面積が約 3300m² であり、エージェント数が 300 でも密度は 0.09[人/m²] 程度である。出口は B1F の 2 箇所の階段である。改札口の細かい形状など複雑な箇所も自動化されている。シミュレーションの一例として、エージェント数が 200、遅いエージェントの割合が 0% の場合に計算された、MSC の全ケースの避難時間の分布を 3 次元グラフとして図 9 に示す。各ケースを比較すると、避難時間の分布のばらつきは大きいもの、概ね 160[s] 前後にピークがあることが分かる。なお計算時間を 200[s] で切っているため、回廊内を迷走して避難できなかったエージェントの避難時間を 200[s] としており、これがグラフの端のピークとなっている。ばらつきを除くため、避難をしたエージェントの累積数を時間毎に集計し、平均をとったグラフを図 10 に示す。遅いエージェントの割合が 20% の結果も示している。滑らかな分布が得られている。遅いエージェントの有無で、避難時間とエージェント数の関係が異なることは明瞭である。しかし、例えばエージェントの半分が避難する時間は 106[s] から 118[s] と 10[s] ほどの増加であり、20% の遅いエージェントが避難行動に及ぼす影響は、定量的にはこの程度の差でしかないことが分かる。

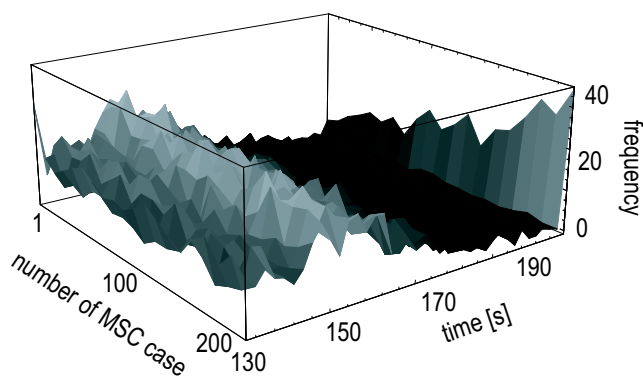


図-9 MCS で計算された避難時間の分布

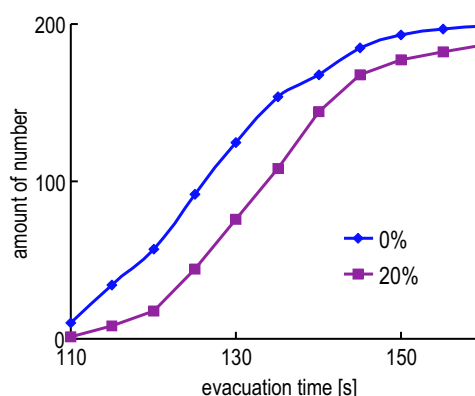


図-10 平均の避難時間の分布

(2) 大型駅の避難行動

図 10 と同様に、大型駅での避難時間の分布を図 11 に示す。エージェント数は 200 である。当然であるが、大型駅の避難時間は長く、避難時間とエージェント数の関係の傾きも緩やかになっている。これは迷走するエージェントの割合が増えているためである。なお、避難時間とエージェント数の関係は遅いエージェントの有無によって異なるが、エージェントの半数が避難する時間は 12[s] 程度の差であり、小型駅の場合と同程度である。図 12 に 80% のエージェントが避難する時間の分布を示す。正規分布に近いがややテールが大きい分布のようである。

(3) 小型駅と大型駅の避難行動の比較

小型駅と大型駅の避難行動の比較を考える。なお、エージェントの数が同一であれば大型駅が遅くなることは自明である。比較では人口密度を合わせることとし、大型駅の面積が 7500m² で小型駅の面積の 2.3 倍であるため、小型駅と大型駅のエージェント数を 300 と 680 とする。遅いエージェントは 0 と 20% の二通りである。避難時間の分布を、避難時間と避難したエージェントの割合の関係として図 13 に示す。大型駅と小型駅で 10% が避難する時間は同じである。これは、両駅で出口付近にいたエージェントが避難を完了した結果で

ある。その後、同じ割合のエージェントが避難する時間は、大型駅のほうが長くなる。迷走するエージェントを除いた 80% のエージェントが避難する時間は小型駅と大型駅でそれぞれ 200[s] と 450[s] であり、大型駅は約 2.2 倍長くなっている。この比は面積と同じである。駅の通路の幅に顕著な差がなく最上階から避難するため、エージェントと最寄りの出口までの距離の平均値は面積に比例する。すなわち、迷ったエージェントを除けば、避難完了時間の比は面積の比に単純に比例することになり、図 13 の結果と一致する。

遅いエージェントの有無の影響を考えるため、20% 遅いエージェントが入ることで増加する避難時間を計算し、図 14 にいる場合の 80% のエージェントが避難する時間の差を、避難したエージェントの割合に対してプロットした。相対的に小型駅のほうに遅いエージェントの影響が出ているようである。しかし差は 10[s] 以下であり、さほどのものではない。

論ずるまでもないことであるが、多様な群集が雑然と避難する状況を正確に予測することは極めて困難であり、簡単なルールを使ったエージェントシミュレー

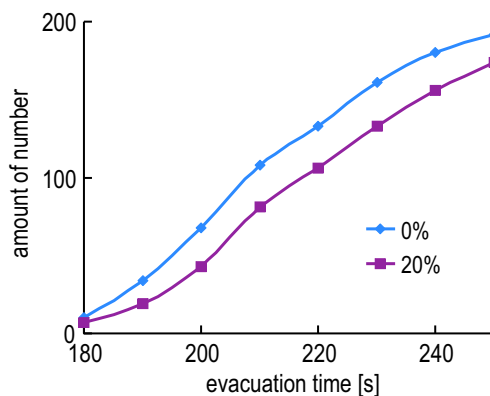


図-11 平均の避難時間の分布

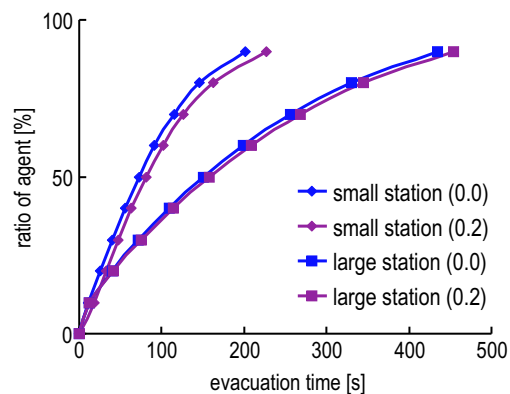


図-13 小型駅と大型駅の避難時間の分布の差

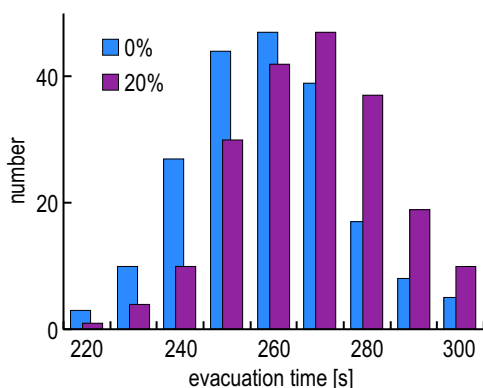


図-12 80%のエージェントが避難する時間の分布

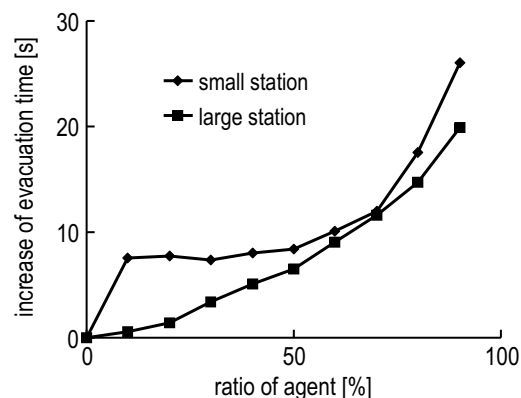


図-14 エージェントが避難時間の分布に与える影響

シミュレーションの予測には限界がある。実際、エージェントの属性に目的地を与えていない本シミュレーションの設定は、全てのエージェントが避難経路モデルに不慣れである状況を意味している。限界があることを認めた上で、小型駅と大型駅の危険性を相対的に比較することは可能であるかもしれない。これはシミュレーションの限界が相殺されることが期待されるためである。

5. おわりに

多様な群集が雑然と避難する状況を想定した避難行動シミュレーションのため、混雑時や緊急時の群集を撮影したビデオ画像を画像解析することで、人の歩行速度の分布を計測した。シミュレーションの信頼性を向上させることを目的として、計測された速度分布はエージェントの移動速度の分布に利用された。大規模地下空間として二つの地下鉄駅を対象に、避難行動シミュレーションを行った。エージェントが迷走することが円滑な避難を妨げることを示した。避難時間の遅延が求められるため、二つの駅での避難行動を定量的に

比較することが可能となっている。解析モデルの自動構築が可能であるため、シミュレーション結果の有効な利用を検討し、実用に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 文部科学省：「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」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，2007.
- 2) 日本火災学会編火災と建築，共立出版株式会社，2002.
- 3) 谷口将彦・今村文彦・首藤伸夫：，北海道奥尻島青苗地区における津波避難数値シミュレーション法の開発，東北支部技術研究発表会講演概要，232-233，1998.
- 4) 内田広明・松田泰治・大塚久哲・樗木武：セルオートマトン法を用いた地下街の避難行動シミュレーションに関する一考察土木学会年次学術講演会講演概要集，55，424-425，2000.
- 5) 片田敏孝・児玉真・桑沢敬行・越村俊一：住民の避難行動にみる津波防災の現状と課題-2003年宮城県沖の地震・気仙沼市民意識調査から-，土木学会論文集，789，2-71，93-104，2005.
- 6) 熊谷兼太郎・土田勝也・土方聡・岡秀行津波時の避難シミュレーションシステム及びモデル地域における構築，土木計画学研究・講演集，33，270，2006.
- 7) 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，8，323-330，2005.
- 8) 堀宗朗・小国健二・加納いづみ・宮嶋宙，地震時避難行動

のビデオ画像計測とマルチエージェントシミュレーション, 日本地震工学会, 2005.

- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 高橋友一・田所諭・太田正幸・伊藤暢浩: 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, 2000.

(2007 年 4 月 6 日 受付)

MULTI-AGENT SIMULATION FOR UN-ORGANIZED EVACUATION PROCESS OF MASS CONSISTING OF VARIOUS PEOPLE

Hiroshi MIYAMJIMA, Muneo HORI and Kenji OGUNI

A multi-agent simulation is developed for un-organized evacuation of process of mass consisting of various people. Speed of an agent obeys a statistical distribution which is measured by analyzing video clips of people walking in crowded or emergency situation; a video clip taken at the Miyagi-ken Oki Earthquake, 2005, is used. The simulation is applied to two subway stations as an example. The effects of agents' variability and un-organized movement on the evacuation process are discussed. Quantitative comparison is made for characteristics of the evacuation processes in the two stations.