

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

Development of measurement-based multiagent simulator for evacuation process

犬飼洋平*・小国健二**・堀 宗朗***

Yohei INUKAI, Kenji OGUNI and Muneo HORI

*正会員 修士 (工学) 西日本旅客鉄道株式会社 (〒 530-8341 大阪市北区芝田 2-4-24)

**正会員 Ph.D. 東京大学助教授 東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

***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)

This paper presents the development of measurement-based multiagent simulator for evacuation process. The major features of the simulator are i) the capability of simulating nonlinear phenomena in the evacuation process such as congestion, ii) the objective input parameters for an agent. The simulation result and measured behavior of a crowd walking on an intersection show good agreement. Also, the result from multiagent simulation coupled with the structural analysis is presented.

Key Words : evacuation process, multiagent simulation, sensing & simulation

1. はじめに

高層ビル・大規模地下構造物など、出口の少ない閉空間において災害が発生した場合、人的被害を軽減するために群集の流れ・動きといったものを予測し、これに基づく安全な避難誘導を行う必要がある。このような現象の実験は倫理上の問題等により非常に困難であり、現象の計測と計算による予測に基づいたダイナミックな避難誘導の実現のためには、計算機上での数値シミュレーションが重要な役割を果たす。

シミュレーションを行う際に気を付けなければならないのは、シミュレーションで用いる行動ルールのパラメータの妥当性とその客観性である。実際の群集の動きの計測結果から客観的に抽出されるルールやパラメータのみを入力とするシミュレーションが理想的である。しかし現在のところ、行動ルールのパラメータを抽出することを可能にするほどの精度の高い人流計測をするための研究はあまりされていない。これは一つには現在主流である単純な画像解析による手法の限界、もう一つには現在行われている人流計測の目的が駅構内での利用人数調査などであり、そもそも精度の高い計測である必要がなかった、という事が挙げられる。

避難行動を予測するための数値シミュレーションの現状を見ると、ポテンシャルモデルを用いた手法¹⁾、セルオートマトンを用いた手法²⁾、個別要素法に基づく手法^{3),4),5)}など様々な手法が存在している。これらの手法は計算の単純化による計算効率の高さや簡単な追従行動の再現能力などの長所を持っている。しかし、ポテンシャルモデルでは設定されるポテンシャルの客観性の低さ、通路閉塞のような非線形現象の予測の困難さ、といった問題がある。また、セルオートマトンを

用いた手法ではルールの妥当性・客観性に問題がある。個別要素法に基づく手法は、人が密集する場合まで扱えるという利点はあるが、ここでもやはりルールを客観的に決定することが難しい。

以上の考察から、本研究では大規模な閉空間からの群衆避難行動を対象とし、現象の予測のために客観的な入力パラメータのみに基づく数値シミュレーション手法を開発することを目的とする。シミュレーションの最終到達目標は、低い確率ではあるが発生すれば甚大な被害をもたらす非線形現象（他に出口があるにもかかわらず細い通路に群集が殺到する事により発生する閉塞、各自がばらばらの方向に避難することによる避難時間の増大など）の予測能力の獲得である。

この目的達成のための第一段階として、画像解析による人流計測を行い、この計測データに基づく客観的なパラメータを入力とするマルチエージェント⁶⁾を用いた群集歩行シミュレーションを提案する。論は以下のようにすすめる。2節において画像解析による群集内歩行の計測とそれに基づく客観的なパラメータの抽出を行う。3節においては、シミュレーションで用いるエージェントの行動ルールを述べ、2節の計測から抽出された客観的なパラメータを用いた平常時の群集歩行シミュレーションの結果を実測データと比較し、その妥当性を検証する。最後に、大規模地下空間の地震応答解析と避難行動シミュレーションを組み合わせたものを示す。ここで示す結果は、平常時の入力パラメータをもつエージェントが粛々と避難するものであり、災害時の避難行動の予測になってはいない。このシミュレーションは、本研究の最終目標を示し、そこへの客観的なマルチエージェントの適用性を評価するための材料の提供を目的としたものと位置づけられる。

2. 群集内での人の位置同定手法

本節では群集内での Lagrange 的人流計測手法として、ビデオカメラで撮影した映像を画像処理で解析する手法で行った人流計測の概要と結果を述べる。

ビデオカメラ等で撮影された群集の映像を処理することで解析する手法はパッシブソース&アクティブセンシング手法の一種であり、大勢の群集に対して固有の信号を出させるよう働きかける必要がなく、ある程度の密度までの人流計測が可能であるという利点がある。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際、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、およそ35分間撮影を行った。この映像を後日コンピュータによって解析した。

人流計測をする場合、本来は他の動体と被ることを避けるため、撮影する角度は可能な限り高い角度の方が、また、頭上から撮影する場合、毛髪である黒色部分で動体を認識するため、背景となる床は白色に近い方が、周囲は明るい方が動体と背景の差が見やすいため望ましい。今回の計測は時間は夜であり、また、それほど高くない場所からの計測であり、人流計測するには良い条件ではなかったと考えられる。

2.1 解析手法

まずデジタルビデオの映像をビットマップ画像にデコードする。元のデジタルビデオの映像は1秒あたり30フレームだが、解析は1秒あたり10フレームでおこなった。まず移動経路解析の対象となる人を決める。解析する映像の1フレーム目の画像において対象となる人の中の任意の5×5ピクセルをターゲットとし、5×5ピクセルの部分の(red, green, blue)情報を得る。解析を簡略化するためこれを式(1)によってグレイスケール情報に変換する。

$$Gray = 0.299red + 0.587green + 0.144blue \quad (1)$$

次フレームの画像において元の5×5ピクセルのグレイスケール情報と比較して最も誤差の小さいグレイスケール情報をもつ5×5ピクセルを探し、この5×5ピクセルをそのフレームにおける人の位置とする。探す範囲は解析の対象となる人の移動速度によるが、数ピクセルから数10ピクセルの範囲となる。 t 番目のフレームにおける5×5ピクセルの左から i 番目、上から j 番目のピクセルのグレイスケール情報を G_t^{ij} とすると、誤差 ϵ は

$$\epsilon = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 (G_t^{ij} - G_{t-1}^{ij})^2 \quad (2)$$

と定義される。

このフレームで特定した5×5ピクセルを解析の対象となる人の新たな位置として更新し、そのグレイスケール

ル情報をもとに次フレームの画像の解析へ移る。以下これを繰り返し、解析の対象となる人が他の人の陰になったり、画像の外へ出たりした時点で解析を終える。各フレームにおける解析の対象となる人の位置を示す点の集合をその人の移動経路として出力した。また、単位時間あたりに移動したピクセル数も求めた。

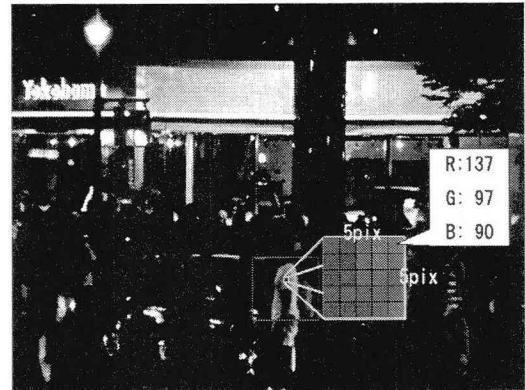


図-1 移動経路の解析手法

2.2 結果

この解析では歩行者の速度は単位時間当たり移動したピクセルによって表されるため、歩行者の移動速度を求める際にはピクセルを実際の距離に換算する必要がある。山下公園から横浜公園へ向かう方向の横断歩道の長さがおおよそ16m、また、横断歩道で半分を歩いた人の移動ピクセルがおおよそ800ピクセルであったので、これを基準として換算した。解析したサンプル数は198人で、先の基準で換算した速度の分布を正規分布とみなし、その平均値と分散を求めたところ、平均値が1.21(m/s)で、分散が0.343(m/s)であった。

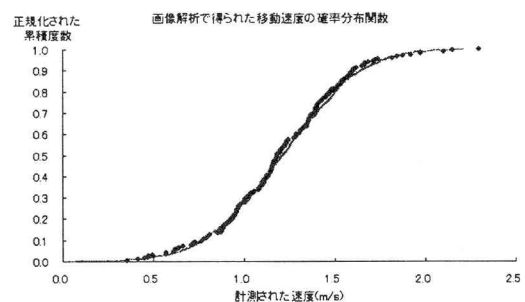


図-2 画像解析で得られた移動速度の確率分布関数

図-2に画像解析で得られた移動速度の分散を示す。点のプロットは横軸に計測された移動速度を、縦軸に累積度数を正規化したものをとっている。また参考として平均値1.21 分散0.343の正規分布の分散を示す曲線を記した。

ただし、移動経路を解析した歩行者全員をサンプルとした正規分布の平均と分散を元にして、シミュレー

ションでの歩行者の移動速度に関するパラメータを決定すると、混雑による移動速度の低下によって、シミュレーションの結果として得られる歩行者の速度の分布と解析した速度の分布が一致しなくなる。そのため、解析したサンプルのうち、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など、混雑の影響を受けていないと思われる歩行者、および混雑の影響を受けていると思われる歩行者だけで移動速度の平均と分散を求めた。

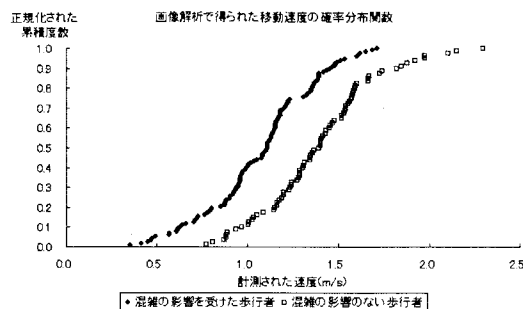


図-3 周囲の混雑状況によりパターン分けした移動速度の確率分布関数

図-3 に混雑の影響を受けた歩行者とそうでない歩行者の移動速度の確率分布関数を示す。横軸と縦軸は図-2 と同じである。混雑の影響を受けず、歩行者が自由に歩く事ができる状況での移動速度の平均と分散はそれぞれ $1.40(\text{m/s})$ と $0.315(\text{m/s})$ であった。速度計測の精度に問題を残すと思われるが、この数値を第4章以降のエージェントシミュレーションにおける歩行者のパラメータ設定に用いる。

3. 群集歩行を対象としたシミュレーション

本節では、危険な状況における避難行動シミュレーションの前に、平常時での人の動きを再現するために交差点での人の動きを再現する人流シミュレーションについて述べる。そして、前節で解析した映像との比較によりその妥当性を検証する。

3.1 外部環境

前節で解析した映像を再現するべく、交差点での人流シミュレーションを構築した。モデルとしたのは解析した映像を録画した横浜市中区の大栈橋入口交差点で、幅 16m の車道とその両側に幅 4m の歩道を備えた道が交差する。シミュレーションにおいて右側が山下公園側、左側が横浜公園に向かう方向となる。また、上側が日本大通に向かう方向で、下側は馬車道駅に向かう。山下公園側の車道は歩行者天国になっていて、人がその車道の部分を自由に歩くことができる。歩行者エージェントは上側と左側に向かう人のみが存在する。

それらの歩行者エージェントが車両等の障害物を避けつつ目的の方向に歩くというものである。歩行者エージェントは時刻 $t=0$ の時に配置され、自分の周囲に存在する他の歩行者エージェントや壁の位置情報などを更新しつつ目的地に向かって移動する。目的地にたどり着いた歩行者エージェントはそこで消滅する。混雑などの影響を受けず自由に歩く事ができる状況における歩行者エージェントの移動速度は、前節の解析の結果を元に平均を $1.40(\text{m/s})$ 、分散を $0.315(\text{m/s})$ と設定した。

本研究のシミュレーションでは空間をいくつかの四辺形に区切る。それぞれの四辺形は、車道、歩道、横断歩道のいずれかの属性を持っている。また各四辺形には、その四辺形の中にあるエージェントのその時点での向かうべき地点が定められており、その情報を元に歩行者エージェントはその時点で向く方向を定める。各時刻ごとに最初に全てのエージェントの位置情報をプロット用ファイルに書き出す。歩行者エージェントは順番に一人ずつ行動し、全てのエージェントが行動を終えると時間ステップを1つ進める。このシミュレーションでの1ステップの時間 dt は実際の時間では 0.5 秒に相当する。解析した映像から、信号は 150 秒を1周期とした。まず 50 秒間は画面の左右方向、実際の交差点では山下公園から横浜公園に向かう方向の信号が青になる。その後 50 秒は車の右折などで歩行者の信号は両方向とも赤になる。続いて 40 秒間画面の上下方向、実際の交差点では日本大通の駅へ向かう方向が青になり、最後に 10 秒間両方向とも赤になる。

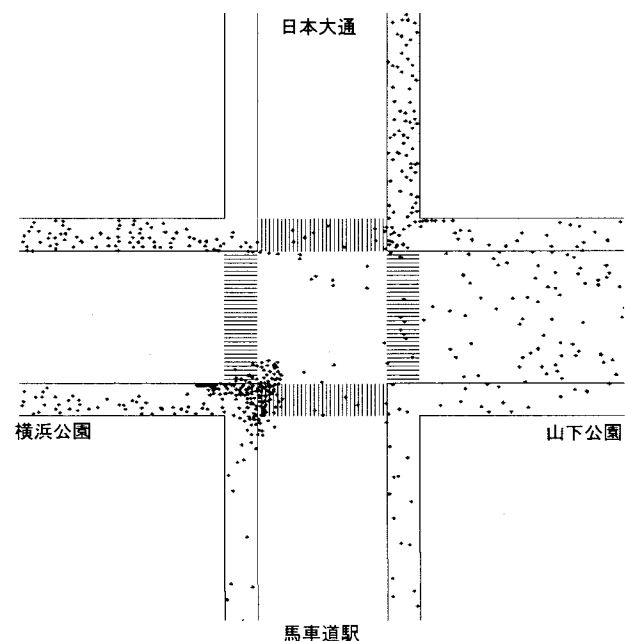


図-4 交差点での人流シミュレーション

3.2 エージェントの行動ルール

本シミュレーションにおける歩行者エージェント A^i は次のようなパラメータを持つ。これらのパラメータは歩行者エージェント A^i がシミュレーション上に配置される際に決定され、最終的な目的地に到達するまで変化しないものである。

- r^i : 1 人の歩行者エージェントが占有する範囲の半径 (m)
- V_{max}^i : 混雑の影響が無い場合の、本来の移動速度 (m/s)
- $R_{destiny}^i$: 最終的な目的地となる四角形

今回の交差点での人流シミュレーションの場合は、1 人の歩行者エージェントが占有する範囲の半径は $r = 0.25$ に固定されており、また本来の移動速度 V_{max}^i は前述のとおり平均 1.40(m/s)、分散 0.315(m/s) の正規分布となるようランダムに決定される。最終的な目的地となる四角形は画面の上方 (実際の交差点では日本大通駅の方) か左方 (実際の交差点では横浜公園の方) のいずれかであり、乱数によりランダムに決定される。

また、各時間ごとに更新されるエージェントの持つパラメータには次のようなものがある。

- 現在位置の座標
- 1 ステップ前の時刻における位置の座標
- 現在向いている方向
- 現在いる四角形
- 目的地に到達した時刻 (到達していなければ 0)

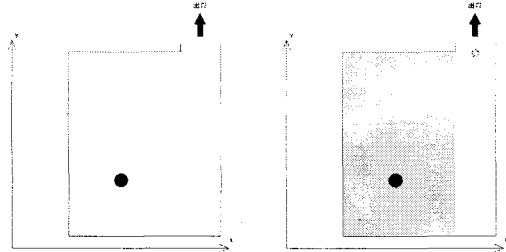


図-5 エージェントの行動
ルール 1

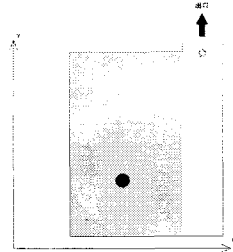


図-6 エージェントの行動
ルール 2

簡単な例を用いて歩行者エージェントの行動ルールを説明する。図-5 のような、出口のある部屋とそこに歩行者エージェントが存在する状況を考える。歩行者エージェントは毎時間ステップごとに、現在位置の (x, y) 座標をもとに今自分がいる四角形がどこか、そしてその四角形において向かうべき地点がどこかという情報を獲得する。例では図-6 の灰色の部分歩行者エージェントの現在いる四角形となり、予めその四角形において設定された灰色の星印の点が現在歩行者エージェントが向かうべき地点となる。次に、現在向かうべき地点の情報から現在向くべき方向を決定する (図-7)。さらに自分の向いている方向を u 軸、その直行方向を v 軸とし、

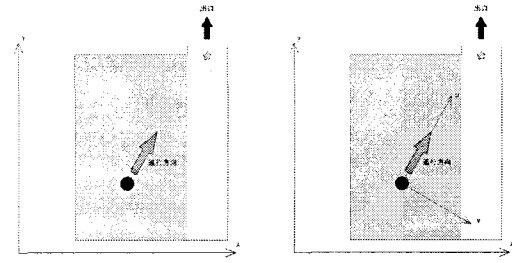


図-7 エージェントの行動
ルール 3

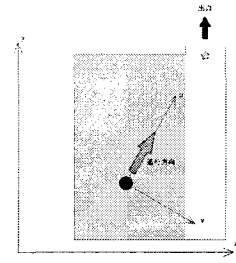


図-8 エージェントの行動
ルール 4

自分の現在地を原点とする直交座標系 (u_{Ai}, v_{Ai}) を新たに構築する (図-8)。直交座標系 (u_{Ai}, v_{Ai}) は現在向いている方向が x 軸となす角度 θ と本来の座標 (x, y) 、さらに歩行者エージェント A^i の現在位置 (x^i, y^i) を用い、

$$u_{Ai} = (x - x^i) \cos \theta + (y - y^i) \sin \theta \quad (3)$$

$$v_{Ai} = (x - x^i) \sin \theta - (y - y^i) \cos \theta \quad (4)$$

によって求められる。

次に自分の前方にいる歩行者エージェントのうち自分に最も近い位置にいる他の歩行者エージェントを探す。簡単な例として、図-9 のような状況を想定する。黒色の円が動こうとしている歩行者エージェント A^i を表し、灰色の円が他の歩行者エージェントを表している。まず、他の歩行者エージェント A^j の座標 (x^j, y^j) を直交座標系 (u_{Ai}, v_{Ai}) に変換した座標 (u_{Ai}^j, v_{Ai}^j) を見て、

$$-2r < v_{Ai}^j < 2r \quad (5)$$

$$0 < u_{Ai}^j < 2r + V_{max}^i \cdot dt \quad (6)$$

の二つの条件を満たすかどうかを調べる。図-10 の灰色の四角形がこの条件を満たす範囲を表している。この条件を満たす歩行者エージェントのうち、 u_{Ai}^j が最小となる歩行者エージェント A^j を「 A^i の前方妨害エージェント」に設定する。一方、前方妨害エージェントを

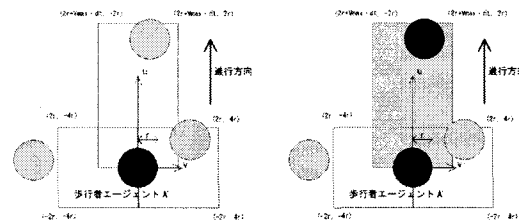


図-9 歩行者エージェント
の追い越し 1

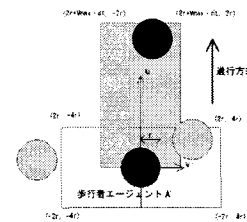


図-10 歩行者エージェント
の追い越し 2

追い抜くため左右に移動する際に、壁や他のエージェントなどによって左右が塞がっていないかどうかを自分の左右の状況を見て調べる。これも前方を調べる時と同様に、右側は、

$$0 < v_{Ai}^j < 4r \quad (7)$$

$$-2r < u_{Ai}^j < 2r \quad (8)$$

の二つの条件を満たすかどうかを調べ、左側の場合は、

$$-4r < v_{Ai}^j < 0 \quad (9)$$

$$-2r < u_{Ai}^j < 2r \quad (10)$$

の二つの条件を満たすかどうかを調べる。図-11、および図-12で灰色で示された部分がそれぞれ右側、左側の二つの条件を満たす範囲を表している。追い抜き行

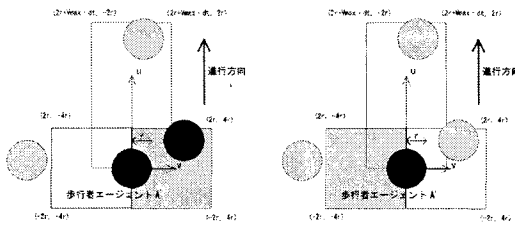


図-11 歩行者エージェントの追い越し 3 図-12 歩行者エージェントの追い越し 4

動のアルゴリズムは、

- 左右両方が塞がっている場合は前方妨害エージェントを追い抜く事を諦め、前方妨害エージェントを追従する行動をとる。
- 左右のどちらかが塞がっている場合には、塞がっていない方向に避けて進む。
- 左右両方とも塞がっていない場合には、前方の歩行者エージェントとの位置関係をみて、自分より左にいれば右へ、自分より右にいれば左へ避けて進む。

となっている。この例の場合、右側が塞がっていて、左側に空きがあるので、図-13のように前方の歩行者エージェントの左側に避けて追い抜こうと動く。また、信

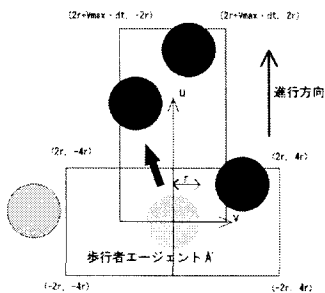


図-13 歩行者エージェントの追い越し 5

号の情報が関わる移動ルールとして、

- 自分の進行方向の信号が赤で、自分が渡る横断歩道の手前にいる場合、横断歩道の前で止まる。
- ただし、自分の進行方向の信号が赤であってもすでに横断歩道の上にいる場合はそのまま直進する。

- 自分の進行方向の信号が青ならば横断歩道をそのまま直進する。
- となっている。

3.3 シミュレーション結果

歩く人数が一回の青信号でおよそ 500 人であったので、これに近い値になるよう全体の人数を $n=600$ と設定した。

解析した画像との整合性を検証するため、シミュレーションにおける「混雑の影響を受けている歩行者」を、「シミュレーション内での移動速度 V が本来の自分の動く事ができる移動速度 V_{max} の 95%以下に落ちている歩行者」と定義し、混雑の影響を受けた歩行者と混雑の影響のない歩行者とでそれぞれの移動速度の分布を調べた。ある時刻 t における歩行者エージェントの移動速度 V は、

$$V = \frac{\sqrt{(x^t - x^{t-1})^2 + (y^t - y^{t-1})^2}}{dt} \quad (11)$$

と定義する。 x^{t-1} と y^{t-1} はそれぞれ時刻 t の 1 ステップ前の時刻における歩行者エージェントの x 座標、 y 座標である。青信号になると同時に信号待ちをしていた歩行者が一斉に動き出す。信号が変わった直後に歩道に出てくる、群集の先頭集団にいるようなエージェントには「混雑の影響を受けていない」ものが多く、逆に群集の中にいるエージェントには「混雑の影響を受けている」ものが多い。図-14に示すのがシミュレー

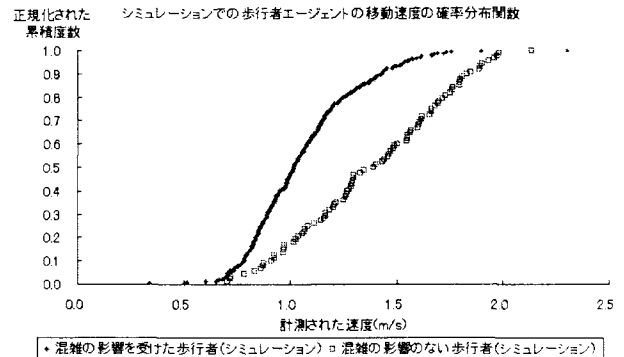


図-14 周囲の混雑状況によりパターン分けした移動速度の確率分布関数(シミュレーション)

ションにおいて、混雑の影響を受けた歩行者と影響のない歩行者とでパターン分けした、歩行者の移動速度の確率分布関数である。また、図-15は画像解析で得られた移動速度の確率分布関数とシミュレーションの結果得られた移動速度の確率分布関数を比較したものである。

図-14を見ると、計測された速度が遅い部分では混雑の影響を受けた歩行者と影響のない歩行者の速度がほぼ同じになる現象がおきていることが分かる。これ

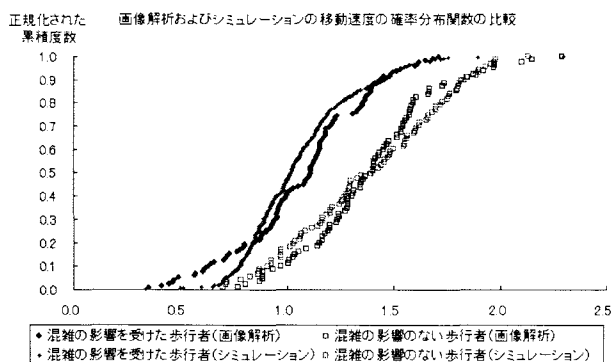


図-15 シミュレーションと画像解析での移動速度の確率分布関数の比較

は混雑によって発生した群集の移動速度よりももとの移動速度が遅いために、速度の低下が起きていない歩行者は、混雑の影響のない歩行者の方にパターン分けされている事が原因であると考えられる。

図-15は画像解析とシミュレーションの結果の概ね良好な一致を示している。顕著な違いは、混雑の影響を受けた歩行者の歩行速度の低い部分で、シミュレーション結果のほうが高い速度を示している点である。これは、シミュレーションにおいて速度を求める際、前方に進む事が出来ない時の細かい左右方向への動き（無駄な動き）も動いた距離とみなされることに起因する。

表-1 計測とシミュレーションの結果との比較

	交差点での計測	
	影響あり	影響なし
速度の平均 (m/s)	1.08	1.40
速度の分散 (m/s)	0.300	0.315
	シミュレーション	
	影響あり	影響なし
速度の平均 (m/s)	1.06	1.39
速度の分散 (m/s)	0.258	0.353

表-1は図-15に基づいて作られたもので、実際に交差点で行った計測で得られた結果とシミュレーションの結果で、混雑の影響を受けた歩行者、受けなかった歩行者とに分けて、それぞれの移動速度の平均と分散を示したものである。これを比較すると、移動速度の平均では非常に近い値が得られたことがわかる。一回の青信号で渡った人数も約500人であることから、この歩行者エージェントによるシミュレーションが十分信頼できるものであるということが言える。

4. 大規模地下空間でのシミュレーション

本節では大規模地下空間での避難行動シミュレーションを行う。大規模地下空間として東急横浜駅での避難行動を想定し、まず兵庫県南部地震クラスの大きさの地震波を入力した時の応答をシミュレートし、構造物への損傷を仮定する。そしてその損傷に基づき一部の通路の幅を短くした構造物と、もとの構造物における避難行動シミュレーションを行う。避難行動シミュレーションは前節に引き続き画像解析の結果を踏まえてパラメータを定めた歩行者エージェントを用いるが、地下構造物に特有の階段での動きや危険な状況にある人の行動を再現するべく新たな行動ルールを定め適用する。

4.1 大規模地下空間の構造物被害シミュレーション

地震波入力時の挙動を見るために構造物と地盤の弾性応答解析プログラムISOP⁷⁾を用いた。まずISOPでの解析手法について述べる。

この手法では、図-16のように通常の有限要素法とボクセル有限要素法とを組み合わせた解析手法を用いる。対象とする構造物の領域を四面体要素により離散化することで、実在する構造物形状を簡素化することなくモデル化する。材料は線形弾性体を仮定し、要素には二次要素を用いている。また、側面には半無限吸収境界を適用することで半無限性を考慮している。時間積分にはNewmark- β 法を用いている。東急横浜駅

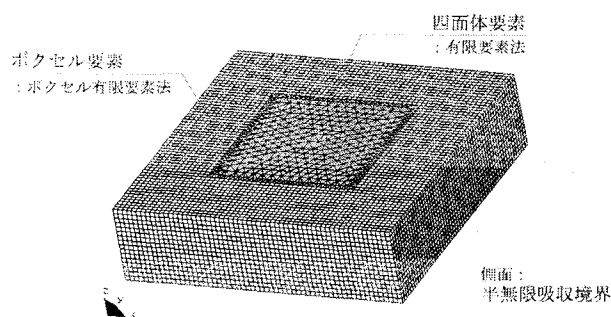


図-16 ISOPにおける解析手法の概要

のモデリングはweb上で手に入った駅の地図を参考にして、汎用グラフィカルソフトGiD(デジタルソリューション株式会社)を用いてCADデータを作成した。解析対象は200(m)×80(m)×80(m)で、そのうち有限要素領域は180(m)×60(m)×70(m)となっている(要素数45183、節点数78306)。また、ボクセル有限領域は一辺2.5(m)刻みでメッシュ作成した。計算の精度は、10(Hz)まで保証している。計算の時間間隔は0.01(sec)、計算時間は5.12(sec)である。入力波として、中心周波数1.0(Hz)、中心時間1.5(sec)のRicker Waveletを用いた。解析領域の底面のx方向に一様な

平面波として入力している。

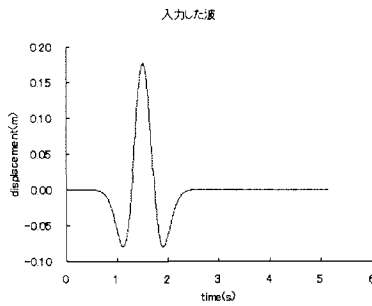


図-17 入力した地震波

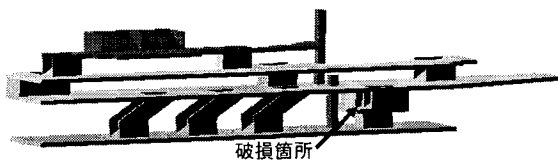


図-18 作成した横浜駅の CAD データ

4.2 構造物損傷シミュレーションの結果

シミュレーションの結果、大きな応力が見られた箇所は地下 5 階から地下 3 階にあがる階段のうち、地下 4 階に踊り場が存在している階段の部分 (図-18 中矢印部分) であった。この結果より、次節の避難行動シミュレーションにおいてこの地下 4 階の階段踊り場付近で損傷が起きたと仮定して避難行動シミュレーションを行う。また、損傷が起きなかったと仮定して避難行動シミュレーションを行った場合と結果を比較する。

4.3 避難行動シミュレーション

避難行動シミュレーションは先の構造物被害推定シミュレーションの際に製作した東急横浜駅の地下の CAD データを参考にして空間データを作成した。地下 5 階のプラットフォームから地下 4 階部分にあたる階段を上り、地下 3 階の改札階よりまた階段で上る。地下 3 階から上にのぼった時点で脱出が完了するという状況を想定している。前節の交差点での人流シミュレーションと同様、駅空間全体を数十の四角形に区切り、それぞれの空間に階段、通路、出口などの属性を持つように設定している。

階段や通路など一様に配置されたエージェント達が一斉に避難を開始する。先に行った地下構造物被害推定シミュレーションにおいて強い応力分布が見られた 4 階部分の階段や踊り場部分では構造物に損傷が起きたと仮定して、損傷がない場合よりも通路の幅が短くなるように、また歩行者エージェントの動きが遅くなるように設定した。階段にあたる部分においても、平

坦な通路の部分歩くよりも歩行者エージェントの動きが遅くなるように設定した。

混雑や階段などの影響を受けない状況における歩行者エージェントの基本的な移動速度の分布は前節のシミュレーションと同様、平均を 1.40(m/s)、分散を 0.315(m/s) とした。今回は実世界での 1 秒を 1 ステップとした。

仮定した構造物の破損や避難する人数の変化が、避難にかかる時間や混雑の様子にどのように影響するかを検証するべく、構造物に破損が無い場合と発生した場合の両方において、人数を 1000 人から 3000 人まで 200 人おきに变化させて避難行動シミュレーションを行った。

4.4 エージェントのルール

このシミュレーションで用いたエージェントの行動ルールは、前節で行った交差点での人流シミュレーションとほぼ同様である。変更点として地下構造物に特有の現象を再現するため、老人エージェントと普通エージェントと 2 種類のエージェントを設定した。老人エージェント特有のルールとして、

- 階段で移動速度が低下する幅が普通エージェントより大きい
- 破損を仮定した箇所において移動速度が低下する
- 判断が遅いため、時々立ち止まる

というルールを適用する。これにより破損箇所や階段において起こりうる閉塞した状況の再現を目指す。

表-2 通常の通路での移動速度を 1 とした時の特殊な通路における速度の比

	老人	若者
通常の通路	1	1
階段	0.625	0.8
破損した通路	0.8	0.8
破損した階段	0.5	0.64

4.5 結果

図-19 に、一例として人数を 3000 人、構造物の損傷ありと仮定して行った場合の様子を示す。一番下の段が地下 5 階部分、中央が地下 3 階と地下 5 階を繋ぐ階段と地下 4 階の階段の踊り場部分、一番上が地下 3 階部分を表している。黒色のプロットが普通エージェントを表し、灰色のプロットが老人エージェントを表している。また、階段の踊り場の部分で灰色の長方形になっている部分は構造物の破損を仮定した箇所であり、損傷により歩行者が通れなくなり、通路が狭くなっている。図-20 は構造物の損傷を仮定した部分を拡大したものである。損傷のない場合 (左側) は 720 秒後に

は避難する人がすでになくなっているが、損傷を仮定した場合（右側）ではまだ残っており、通路の幅が狭くなったことによる影響があることがわかる。

人数:3000 人 損傷あり t=180(s)

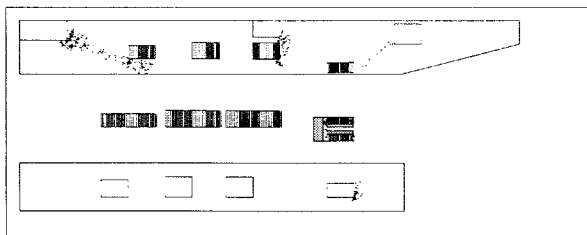
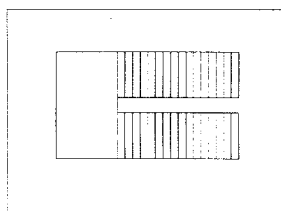


図-19 東急横浜駅における避難行動シミュレーション

破損なし t=720(s)



破損あり t=720(s)

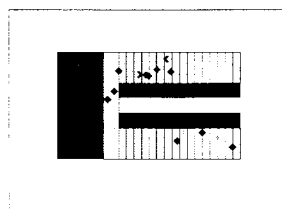


図-20 破損箇所における歩行者エージェントの閉塞状況

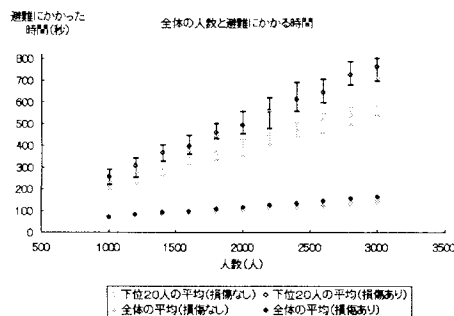


図-21 人数と避難にかかった時間の関係

図-21に人数と避難にかかった時間の関係を示す。灰色のプロットが通常の状態での避難シミュレーションを行った場合、黒のプロットが地震によって地下構造物に破損が生じたと仮定し、一部の通路や階段の幅を狭めて行った場合である。また、白抜きになっているプロットは避難した歩行者エージェント全体の避難にかかった時間の平均で、そうでないのが避難した歩行者エージェントのうち、最も避難に時間がかかった下位 20 名の平均である。下位 20 名の平均については、10 回のシミュレーションの結果の平均値、および 10 回のうちの最大値と最小値を示した。

全体の平均を見ると、人数が同じ場合は破損を仮定した場合の方が時間はかかるものの、構造物の破損を

仮定した場合も破損がないとした場合も人数に合わせてほぼ線形に避難にかかった時間が増加していることがわかる。一方、時間が長かった下位 20 名を取り出した平均を見てみると、人数が増えるにつれて破損を仮定した場合と破損がないとした場合で時間に差がつくようになることがわかる。

5. 本研究のまとめ

本研究では、地震災害発生時の対応行動シミュレーションに関する研究を行った。個人が外部環境を知覚し、個人の行動が環境に影響を与えるという相互作用の再現を行うべく、この再現性に強みを持つマルチエージェントを用いたシミュレーションを行うことにした。

実際の挙動を再現するには歩行者エージェントの行動ルールを適切に設定する必要がある。そのため、実際の群集の挙動を計測した。そしてその結果を踏まえてパラメータと行動ルールを設定し、避難行動マルチエージェントシミュレーションの開発を行った。実際の交差点での人の動きで再現性を検証したところ、速度分布の実測値とシミュレーション結果との間に概ね良好な一致が見られた。

交差点における人流の再現性が確認された歩行者エージェントを用いて避難行動シミュレーションを行った。構造物被害推定シミュレーションと結びつけ、結果を避難行動に反映したところ、避難に要する時間等の結果に有意な違いが見られた。

参考文献

- 1) 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
- 2) A. Kirchner, A. Schadschneider: Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics, Physica A 312, pp.260-276, 2002.
- 3) 清野 純史, 三浦 房紀, 瀧本 浩一: 被災時の群集避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について, 土木学会論文集, 537, I-35, pp.233-244, 1996.
- 4) 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, 591, I-43, pp.365-378, 1998.
- 5) 杉本太一・目黒公郎: 楕円形個別要素法を用いた避難行動解析に関する基礎的研究, 土木学会地震工学論文集, 27, 2003.12
- 6) J. M. Epstein, R. Axtell: 人工社会 - 複雑系とマルチエージェント・シミュレーション -, 共立出版, 1999, 服部正太, 木村香代子, 訳.
- 7) 伊丹洋人, 大保直人, 市村強, 山田岳峰, 堀宗朗, 池田清宏: 大深度地下構造物の大規模三次元動的応答解析, 2004.

(2005 年 4 月 15 日 受付)