

地震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

DEVELOPMENT OF MULTI-AGENT SIMULATION FOR POST-EARTHQUAKE MASS EVACUATION

宮嶋宙*・堀宗朗**・小国健二***

Hiroshi MIYAJIMA, Muneo HORI and Kenji OGUNI

*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)

**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)

***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)

This paper presents recent progress of a multi-agent simulation for post-earthquake mass evacuation process, assuming a state where various people run in an un-ordered manner. An agent which can see, think and move is constructed with special function of passing, and a simulation model in which agents move around is automatically constructed by using available GIS. The multi-agent simulation is applied to a town which has network with small and winding roads, and the results of the evacuation process of various agents running in an un-ordered manner are discussed.

Key Words : multi-agent simulation, mass evacuation process, automatic construction of analysis model, parallel computing

1. はじめに

東南海・南海地震や首都直下地震によって、名古屋・大阪や東京といった大都市に想定外の被害が発生することが懸念¹⁾されている。想定外被害の要因は社会環境の変化である。高齢化とともにバリアフリー化が進む現在、密集空間から避難する際に従来とは異なる人的被害が生じる可能性がある。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が参考となるが、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。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。

群集の避難行動に関する研究は限られており、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。駅等の公共空間では火災発生時の円滑な避難を目的として法令²⁾が定められているが、これは一箇所から火災が発生する場合であり、健常者が整然と避難する場合を想定している。高齢化・バリアフリー化が進む社会では、避難時の危険性や避難の円滑化の対策を検討するために、多様な群集が雑然と避難する状況を想定する必要がある。

多様な群集が雑然と避難する状況を想定して、著者のグループは、高度なシミュレーション手法の開発^{3),4)}を進めている。この手法はマルチエージェント^{6),7)}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。なお、エー

ジェントシミュレーションは防災を目的に活発に研究^{8),9),10)}が進められている。

本論文は、地震発生後に多様な群集が雑然と避難する状況を想定する目的で開発されているマルチエージェントシミュレーションを報告する。具体的な開発項目は、自立的に避難経路モデルを動くエージェントの設計である。実空間から避難経路モデルを構築する手法も開発項目となる。これはシミュレーションの適用範囲を広げるためには不可欠である。

2. エージェントの設計

エージェントの具体的な設計項目は機能と属性である。KISS (Keep It Simple and Stupid) 原理に則り、機能と属性はできるだけ簡単にしなければならないが、多様な群集の雑然と避難する状況を模擬するための機能と属性は持たさなければならない。このため、「見る (see)」・「考える (think)」・「動く (move)」という3つの最低限の機能を与えた。それぞれ、外部状況を把握し、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。外部状況とは避難経路や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ベクトルである。エージェントの属性は、移動速度・視野等の行動属性である「能力 (ability)」と、同じ通路を二度通らないための過去の移動経路等の記憶属性である「知力 (thought)」とした。図-1にクラス図を示す。

エージェントの機能の詳細を以下に説明する。属性

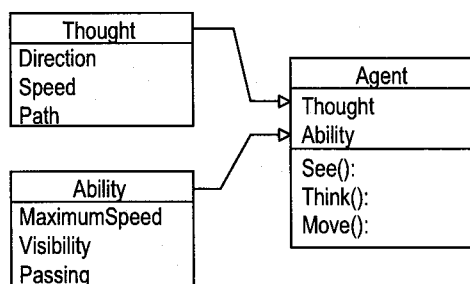


図-1 エージェントのクラス図

のパラメータも合わせて記述する。

見る 視野内にある通路と他のエージェントを見る。通路は出口や他の通路への連絡の様子も見る。

考える 大きさを最大移動速度、向きを通路の方向として速度ベクトルを決める。前方の領域の他のエージェントがいる場合、向きや大きさを修正して追越をしたり、停止したりする。

動く 考えられた速度と方向に従って移動する。通路の壁にぶつかった場合には壁に沿って運動する。

基本的な行動属性として、最大移動速度は正規分布に従う乱数として各エージェントに与える。この分布は群集の実測データを用いて設定する(文献³⁾に詳細を示すが、これは実測された歩行速度の分布は正規分布とみなすことができる)。なお、高齢者等に対応した遅いエージェントを導入し、このエージェントは別途実測された²⁾歩行速度分布に従うように設定する。他の基本的な行動属性として、視野は視野半径 R の半円、前方の領域は進行方向に D [m] と左右に D [m] の $D \times 2D$ [m] の長方形とし、全エージェントに共通とする。なお、値は $R = 2.5$ [m] と $D = 0.5$ [m] である。

雑然とした避難行動を模擬するため、「考える」という機能には追越を加えている。追越とは、前方にいるエージェントの左右を通して追い抜くことである。速度の速いエージェントが前のエージェントを追いつくことは自然であり、無理な追い越しは閉塞を引き起こす等、群集の避難の雑然とした状態を再現することに適している。左右のどちらかに他のエージェントがいる場合、速度ベクトルの大きさと向きを変える。大きさの低減率 m と向きの修正角 θ は行動属性のパラメータである。なお、計算結果によれば、 $m = 0.2$ 程度の場合に全エージェントの避難は m の値にさほど依存しなくなり、 θ が 60 [deg] 程度の場合にエージェントは自然に曲がるようである。左右両方に他のエージェントがいる場合、無理な追い越しをするか、停止をするかを確率的に選択する。無理な追越をする確率を P とする。

設定された機能の妥当性を検証するため、真直ぐな通路と、曲がった通路の二つの例でシミュレーションを

行った。真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図-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。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ができる。混雑度と平均速度の関係をあらかじめ与える既往の方法とは異なる点である。なお、 θ を 90 [deg] に近づけると、進行方向の平均速度は遅くなるが、追越の頻度が増えるため逆に標準偏差が大きくなる。図-2 の結果はこれを裏付けている。また、混雑度と平均速度の関係の再現は重要であるが、必要条件の一つにすぎず、この再現をもって開発されたシミュレーションが妥当であると結論することはできない。

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。例として、図-3 に時間毎に避難したエージェントの累積数を示す。設定された θ では m の影響が少ないことがわかる。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するため、曲がった通路において時間間隔 dt を $0.2, 0.1, 0.05$ [s] 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図-4 に示す。軌跡は完全に一致せず、大きく外れていないところでも、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と判断した。なお、大きく軌跡が異なる理由は、時間間隔を変えると他のエージェントの移動も異なってくるため、追越の有無が生じたためである。

3. 解析モデルの自動構築

地震時とはもとより火災時の群集避難を模擬するため高度な数値解析手法が開発されているが、実用例は限られている。この原因の一つに、解析モデルが多大な手間をかけて作成されていることが挙げられる。他のシミュレーションと同様、対象のモデルが簡便に構築できると、シミュレーションの実用化は加速的に進む。

避難行動シミュレーションの対象は、狭隘な街路が入り組んだ街区や地下鉄駅・地下街のような大型地下構造物である。この対象の解析モデルを避難経路モデルと称する。街区には GIS が利用できるため、このようなデジタルデータから人が歩く経路を抽出し、エージェントが動き回る避難経路モデルを構築することは原理的には可能である。

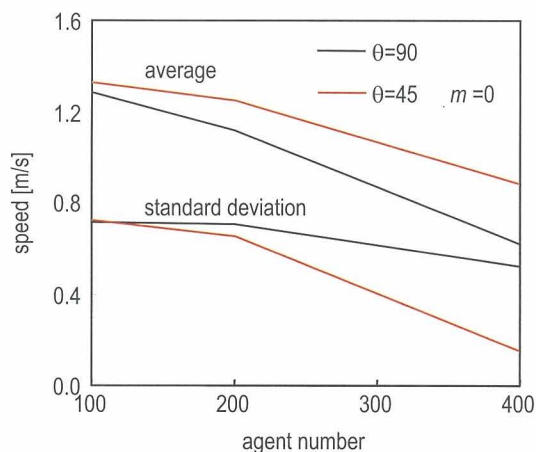


図-2 エージェントの数と速度の平均値の関係

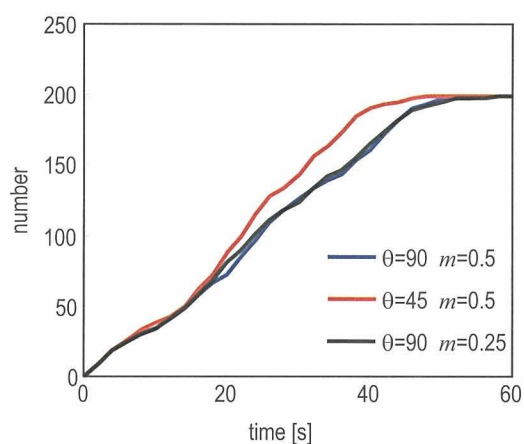


図-3 時間と避難したエージェントの累積数の関係

3.1 自動構築の方法論

合理的なデータ変換を行うため、変換前と後のデータをそれぞれオブジェクトからなるデータとして扱う。すなわち、返還前のデータはGISであり、変換後のデータが避難経路モデルのデータとなる。本研究で利用したGISとCAD、そして避難経路モデルに対し、オブジェクトからなるデータの概要を図-5に示す。

利用したGISはshp形式のASCIIファイルであり、街路はその境界の角点を結んだ点列の集合となっている。この点列を「境界」オブジェクトとし「GISデータ」を作る。一つの街路は二つの境界の間になるが、shp形式のGISには、一つの街路を指定するよう、二つないし複数の境界に関連は付いていない。

避難経路モデルのデータは、エージェントが歩き回る「回廊」と回廊を結ぶ「通路」という二つのオブジェクトから構成される「領域データ」とする。エージェントは回廊の内部を自由に動くことができるが、外には出られず、隣接する回廊が共有する通路を使って隣の回廊へ動く。回廊は多角形、通路は線分の幾何形状を

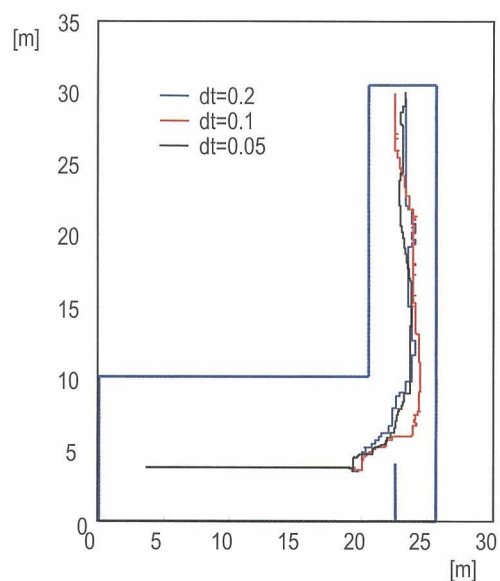


図-4 時間間隔によって変わるエージェントの軌跡

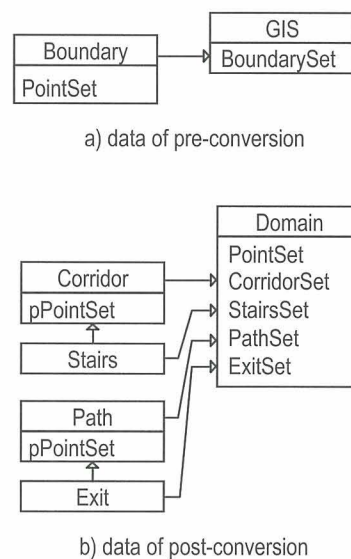


図-5 変換前後のデータの概要

持つ。回廊を拡張して、横断歩道に対応する「信号」、階段やエスカレータに対応する「階段」、そして通路の拡張として、避難経路モデルの脱出口となる「出口」のオブジェクトを継承を使って作る。オブジェクトの幾何形状は共通の点によって記述されるため、これに対応して「点」オブジェクトを作る。すなわち、各オブジェクトの幾何形状は点オブジェクトの集合となる。

3.2 データ変換のアルゴリズム

GISデータを領域データに変換する際、回廊を作る境界の選択が課題となる。これは、一つの街路を示すような関連が境界に付けられていないためである。街路の二つの境界を選ぶ目的で、GISデータから「ImageData」

を作ることとした。ImageData は街区を覆う格子データであり、最初に、境界が通った格子は 1, そうでない格子は -1 の値が入る。次に -1 を取った格子を繋げてクラスタを作る。隣接する格子に 1 から順に共通の自然数を与えることでクラスタを作る (図-6 参照)。

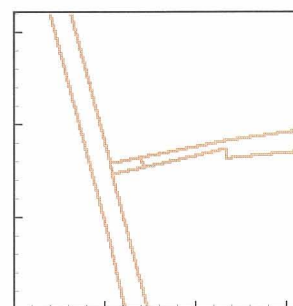
1. GIS データの読み込み shp 形式のファイルから境界から構成される GIS データを読み込む。
2. ImageData の作成 (格子化) GIS データから ImageData を下記の方法で作成する。
 1. 境界が通る格子に 0, 通らない格子に -1 を与える。
 2. 値 -1 を持った隣接する格子を繋げてクラスタを作る。
 3. クラスタの面積を計算したり街区の境界との共有を調べて、街路網に対応するクラスタを決める。
3. 回廊の作成 ImageData を使って一つの街路を作る二つの境界を選択する, 原則として四角形の回廊を作成する。
4. 通路の設定 隣接する回廊の辺を通路として作成する。

このようにして作成されたクラスタには街路網に対応するクラスタがある。面積が小さく、また、街区の境界を含むクラスタである。それ以外のクラスタは街路に囲まれた建物に対応する。街区内の街路と建物を分けた ImageData は仮想的なデジタル航空写真とみなすことができる。

ImageData の街路クラスタを使うと、一つの街路の端を与える二つの境界が選択される。二つの境界の四つの端点を四角形の頂点とすることで回廊が作られる。通常、回廊は四角形となるが、三叉路や大きな交差点や、街路幅が急に変わったり曲がった箇所では複雑な形状を持ち、境界の端点を頂点とする多角形が回廊となる。回廊群が作成されれば通路や境界を作成することは容易である。隣接する回廊の辺が通路、街区の境界に接する辺が出口となる。

3.3 自動構築の例

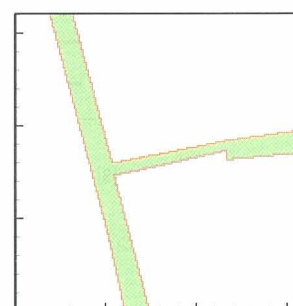
GIS データとして読み取られた街区を図-7 に示す。幹線道路の他、狭隘な街路が複雑に繋がった部分があるところにある。なお、カーナビゲーションに使われる道路データ (国土地理院作成、2500 数値地図) には全国の道路を網羅しているが、路地は含まれておらず、道路形状の記述は概略である。多様な群集が雑然と避難する状況のシミュレーションには、この道路データから構築される避難経路モデルは適していない。図-8 には変換されたモデルデータから作られた避難経路モデルを示す。赤線で囲まれた図形が回廊、緑線が通路



a) grid for boundary



b) clusters for road and buildings



c) grid for road

図-6 避難経路モデル自動構築のアルゴリズム

である。自動構築が成功した例である。

ImageData を作成する際には、2 次元格子の連結が解析される。この解析に必要な計算量は少なくとも格子サイズの二乗に応じて増加する。また、ImageData から回廊を作成する際にも、多角形の回廊を作成・連結する図形解析が必要であり、計算量は ImageData のサイズに応じて増加する。したがって、GIS の街区が大きい場合、街区を一括して扱うよりは、街区を適当なサイズの小街区に分割し、各小街区に対して避難経路モデルを構築し、この小モデルを繋ぎ合わせて街区全体の避難経路モデルを作るほうが数値計算上は効率的である。図-8 の避難経路モデルはこの方法で作成されている。

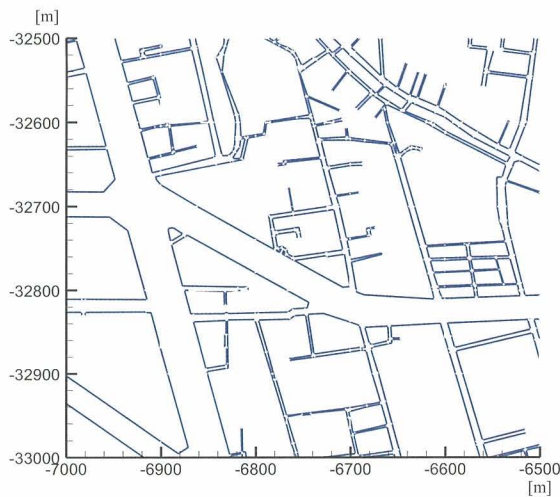


図-7 GIS データの建物・構造物の輪郭

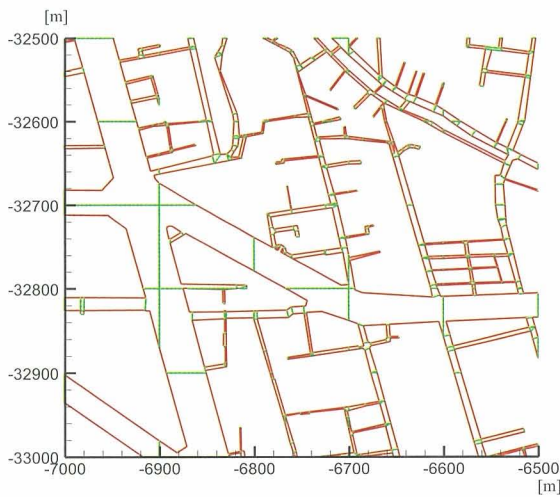
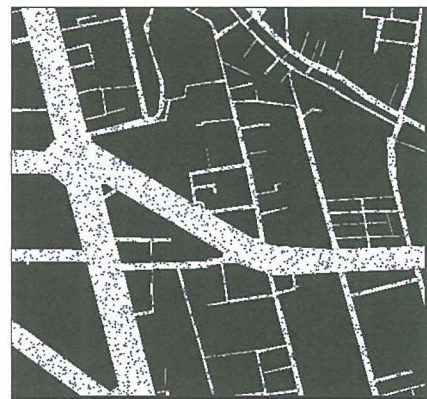


図-8 自動構築された街区の避難経路モデル

4. 避難行動シミュレーションの例

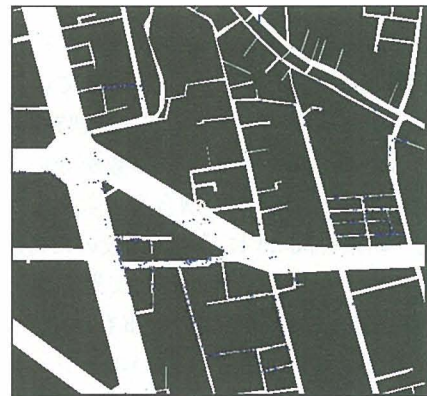
多様な群集が雑然と避難する状況を想定した避難行動シミュレーションの例を示す。シミュレーションは、乱数によって発生したエージェント群が避難経路モデルを動くというモンテカルロシミュレーション (MCS) を行う。MCS はエージェントの総数を設定し、各エージェントの最大移動速度等の運動属性をランダムに設定する。これが多様な群集に対応する。また、各エージェントの位置もランダムに設定する。避難行動はエージェントが出口を抜けて避難経路モデルの外に出るまでの時間、避難時間によって評価する。MCS によって避難時間の確率分布が計算されるが、全エージェントが避難する避難完了時間の分布は特に重要な出力となる。なお、一回の MCS ではエージェント群を 200 ケース発生させている。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。



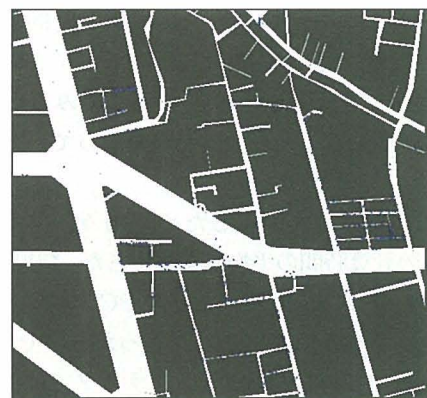
a) initial state



b) 60 [s] later



c) 120[s] later



d) 180 [s] later

図-9 シミュレーションの例:60 秒毎の領域のスナップショット

避難経路モデルは GIS から自動構築されている (図-8 参照)。多様な群集として、通常の歩行者の速度分布に従った最大移動速度を持つエージェントの他、高齢者の速度分布に従った最大移動速度を持つ遅いエージェントを 20% 加える。速度分布は、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^{3),4)}することで求めている。その他の MCS のパラメータを表-1 に示す。

最初にシミュレーションの概略を示すため、図-9 に 60 秒毎の領域のスナップショットを示す。エージェントの数は 2,000 であり、半径 50[cm] の円でエージェントを表している。避難開始から 60 秒後では半数以上のエージェントが避難を完了している。出口のある回廊に達していないエージェントだけが残っている。開発されたエージェントには出口の情報が属性として含まれていないため、このようなエージェントが出口のある回廊に達するまで迷走する場合がある。180 秒後では幹線道路に残っていたエージェントが避難し、9 割がた避難が完了している。しかし、複雑に入り組んだ路地に残されたエージェントが迷走を続けている。

次にエージェントの避難時間の分布を図-10 に示す。横軸が避難時間、縦軸が避難時間までに避難したエージェントの割合である。約半数のエージェントが避難する時間はエージェントの数によらずほぼ一定であるが、それ以降はエージェントの数が増えるにしたがって避難したエージェントの割合が低下する。すなわち、避難に手間取ったエージェントが増えている。

遅いエージェントの有無による避難時間の分布の違いを調べるため、エージェントの数が 500 と 5,000 の場合に遅いエージェントの割合を 0% として MCS を実行した。結果を図-11 に示す。比較のため、平均速度で避難する場合を理想状態、そして遅いエージェントが 20% いる場合の避難時間の分布も示す (エージェント数の後のカッコ内の数字が遅いエージェントの割合を示す)。約 4 割のエージェントは遅延がなく避難しているものの、それ以外は避難が手間取っている。また、遅いエージェントがいる場合には避難時間も遅くなっている。縦軸にそって見ると遅いエージェントの有無の差は僅かに見えるが、横軸に沿ってみると、すなわち、時間に関しては 10 秒以上遅くなっていることがわかる。

最後に計算効率を調べるため、10 ケースの MCS を行った時の計算時間の平均値を測定した。結果を図-12 に示す。この計算は 32GB メモリの PC クラスタ (8CPU, AMD Opteron875, 2.2Ghz) で行ったものである。エージェント数が 500 の場合、PC クラスタでは 1 ケースの計算に 20[s] かかるが、2GB メモリの PC (Pentium 4, 2.8GHz) では 1 ケースにでは 340[s] かかる。エージェント数と計算時間の関係はほぼ直線であるが、エージェ

number of agent	500/1000/2000/ 3000/4000/5000	
direction modification [deg]	75	
speed reduction [%]	25	
ratio of slow agent [%]	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

表-1 MCS のパラメータ

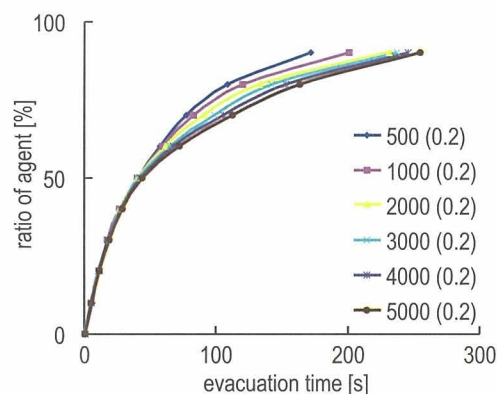


図-10 避難時間の分布：エージェントの数の影響

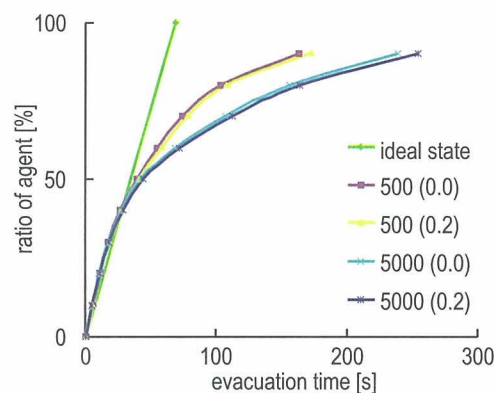


図-11 避難時間の分布：遅いエージェントの有無の影響

ント数が増えると直線から外れる傾向にあることが見てとれる。これは追越の頻度が増えたためであり、必然的に計算のスケラビリティが失われる。逆に言えば、エージェントの密度が一定数以下であり、追越の頻度が抑えられれば、計算のスケラビリティが期待できることを意味している。

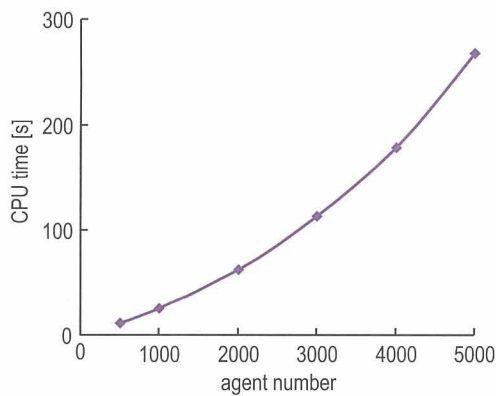


図-12 エージェント数と CPU 時間の関係

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を開発した。KISS 原理に則りつつも、追越機能を持つエージェントは雑然と避難することができる。狭隘な路地がある比較的大規模な街区を対象に、避難行動シミュレーションが実施可能であることを示した。GIS を使った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、実用化に取り組む予定である。1.0cm

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, 2002.

- 2) 日本火災学会編火災と建築, 共立出版株式会社, 2002.
- 3) 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.
- 4) 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, 地震工学会論文集, 28, 2005.
- 5) 宮嶋宙・堀宗朗・小国健二, 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, 地震工学論文集, 29, (2007, 掲載予定).
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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, 93-104, 2005.
- 10) 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.

(2007 年 4 月 12 日 受付)