

災害時の避難シミュレーション

- 夢告館を効率良く脱出するために -

同志社大学 文化情報学部 文化情報学科 藤井 達也

1 はじめに

1.1 研究の背景

平成 22 年の消防庁の統計データによると、日本では 1 年間に 46,620 件の火災が発生しており、1,738 名もの尊い命が失われている。また、総火災件数のうち 58.2 % を建物火災が占めており、その死亡原因の約半数が逃げ遅れによるものである。このことから、火災時においては一刻も早い避難が生き残りの鍵となることが窺える。このような建物からの避難に緊急を要するのは何も火災に限った話だけではなく、地震や津波などの様々な災害時にも同様のことがいえるだろう。

そこで本研究では、災害全般に焦点を当て、避難シミュレーションを用いて建物避難の効率化を図る。

1.2 避難シミュレーションの有効性

避難シミュレーションは、突発性ゆえ実測が難しく、危険性ゆえ実験が困難な災害現場の観測をコンピュータ上で行うことができるという利点を持っている。また、現実世界では手間やコストのかかる選択条件の変更がシミュレーション上では比較的容易に行え、さらには現実世界では難しいとされる再現性を得ることが可能であり、様々な条件下で複数回に渡る観測が必要となる比較分析に適している、ということも利点の一つである。

このような利点を活かし、事前に混雑する箇所や建物の構造上の欠陥、人間心理といった様々な観点から、犠牲者を最小限にとどめる安全な避難方法を見つけ対策を検討できるということが避難シミュレーションの大きな有効性であるといえる。

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、避難シミュレーションを用いて『効率的な建物避難方法の提案』と『避難遅延原因の解明』を達成することである。

2 避難行動シミュレーションの構築

2.1 対象施設の設定

図 1 には、本研究の対象施設である同志社大学の夢告館 1 階から 7 階までのフロア図と本研究で用いる各出口・各階段・各教室の名称、そして各教室の定員数を記載している。本研究では、各教室に配置する人エージェントの数を自由に変動させることができるモデルを作成している。なお、文化情報学部文献室、事務室、学部長・会議室、MK304 に関しては、常に一定数の人エージェントを配置させた。

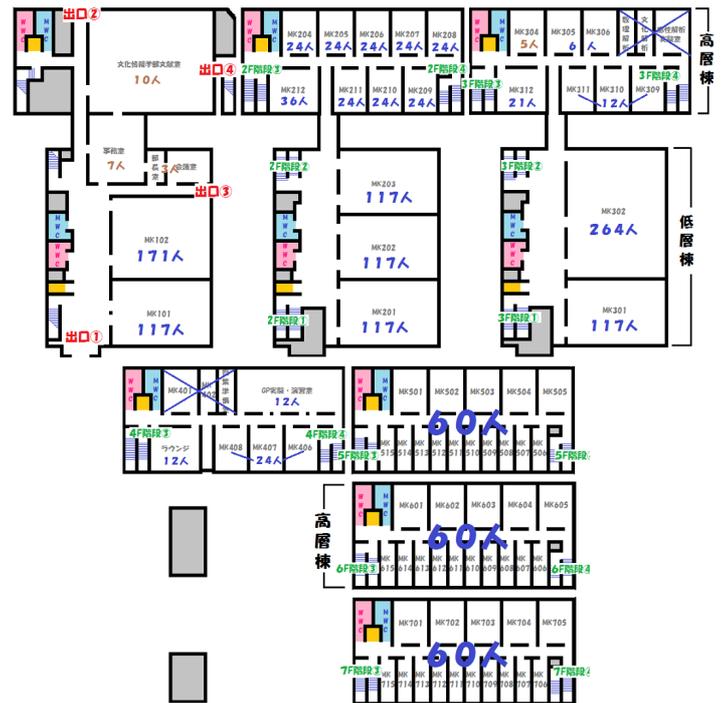


図 1: 夢告館 1,2,3,4,5,6,7 階

2.2 システムの詳細設定

【時間の設定】

artisoc では一定の step を繰り返すことで時間の流れを表現しており、本研究では artisoc の世界での 3step を現実世界の 1 秒であると定義した。

【人エージェントのサイズ設定】

設計上有効な手段として人体寸法は 60cm × 45cm と置き換えられる．この人体寸法とマルチエージェントシステムの仕様を考慮し，本研究では人のサイズを 60cm × 60cm の正方形と定義し，これに合わせてマップの縮尺を調整した．

【歩行速度の設定】

人の歩行速度は参考文献 [8] より障害物のない空間では 1.2m/s，階段では 0.6m/s となっており，これに合わせて人エージェントの歩行速度を設定した．

2.3 エージェントのルール設定

本研究で作成したエージェント，変数を図 2 に掲載している．

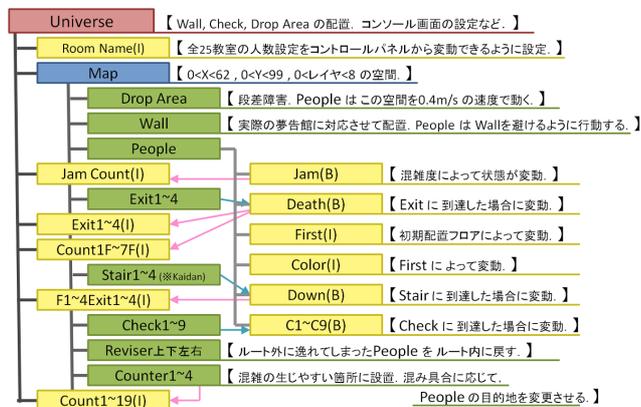


図 2: ツリー画面

【人エージェント (people)】

人エージェントは，コントロールパネルからその初期配置と人数が決められる．配置された人エージェントはシミュレーション開始と同時に，出口を目指すように行動設定されており，基本的には最短距離で出口を目指すすが，他のエージェントや周囲の環境などでその行動は変化していく．

【出口エージェント (exit)】

人エージェントが最終的に目指す目的地が出口エージェントである．出口脱出の表現は到達した人エージェントを消去することによって行っている．また人エージェントを消去した際に，各出口エージェントに消去した人の数を数えさせるルール設定を行った．

【階段エージェント (kaidan)】

2 階以上に存在する人エージェントは 1 階に存在する出口を目指すために，下階へ降り続ける必要がある．その表現として，階段エージェントが周囲に人エージェントを認識した場合，人エージェントのレイヤ（階層）を 1 つ下げるといったモデルを作成した．また階段エージェン

トが人エージェントのレイヤを下げた際に，各階段エージェントに階層を下げた人の数を数えさせるルール設定を行った．

【チェックポイントエージェント (check)】

人エージェントは最短距離で出口エージェントを目指すすが，人エージェントと出口エージェント間に壁という障害物が存在した場合，一直線で出口エージェントへと進むことは不可能である．そこで，人エージェントが進むルートの途中にチェックポイントエージェント配置しておく．これにより，チェックポイントエージェントが人エージェントの一時的な目的地となり，ここに到達した人エージェントはまた次の目的地を目指す．また，カウンターエージェントが一定の数値以上をカウントしている場合にも，人エージェントの目的地を現在とは別の目的地へと変化させるように設定した．

【カウンターエージェント (counter)】

人エージェントを混雑箇所から閑散箇所へと誘導する目的で混雑の発生しやすい箇所に設置したエージェントである．設置されたカウンターエージェントは自分の周囲にいる人エージェントの数をカウントし，人エージェントの数が一定数を超えていた場合，チェックポイントエージェントに働きかけ，チェックポイントエージェントが人エージェントの目的地を混雑していない箇所へと向かわせる．

【エージェント以外に重要なルール】

人エージェントを目的の方向へと動かす際に，チェックポイントエージェント以外に座標を利用した手法を用いた．例えば『if my.X>26.9 and my.X<55.3 and my.Y>2.8 and my.Y<21.8 then ~』のように記述する．これは「もし，自分の今いる座標が X (26.9 から 55.3) Y(2.8 から 21.8) のとき ~ 以下のルールに従う」というものである．これにより，チェックポイントエージェントの設置数を抑えることが可能となり，ルールの簡略化を図った．

3 様々なパターンにおける検証

3.1 最短距離で屋外を目指すシミュレーションの試行（以降最短距離モデル）

災害時の心理特性である至近距離選択性・向開放性を考慮したモデルを作成し，シミュレーションを行った．本モデルでは，人は最寄りの階段，最寄りの出口を目指す．また，T 字路などにおける経路の選択は，階段・出口までの距離がほぼ同等な場合，均等な確率で経路を選択し避難するように設定を行った．各教室に配置した人エージェントの数によって避難完了時間にどのような違いが見られるのかを測定するためには，全 25 教室において定員の 1/3, 2/3, 3/3 のいずれかを配置したパターンでシ

難誘導によって避難完了時間が大幅に短縮されていることがわかるが、一方でクラスター 4 では避難誘導後であっても避難時間には改善が見られないことがわかる。そこで、クラスター 1 とクラスター 4 を比較することで、避難に遅延をもたらす原因を明らかにしていく。その際には、クラスター 1 とクラスター 4 の避難誘導前後における各階避難時間、各階使用階段、全体使用出口といった項目に差が見られるかどうかを対応のある t 検定を用いて判断した。図 6 はそれぞれの結果を表にしたものである。

表中の 1F-1, 1F-2, 1F-3 では、各出口を使用した初期配置されたフロアが 1 階の人エージェントの数をカウントしている。一方で出口 (1), 出口 (2), 出口 (3), 出口 (4) では、各出口を使用した全ての人エージェントの数をカウントしている。

要素	クラスター1		クラスター4		要素	クラスター1		クラスター4	
	避難差大	避難差小	避難差大	避難差小		避難差大	避難差小	避難差大	避難差小
1F-1	○	○	○	○	出口①	○	○	○	○
1F-2	○	○	○	○	出口②	○	○	○	○
1F-3	○	○	○	○	出口③	○	○	○	○
2F-1	○	○	○	○	出口④	○	○	○	○
2F-2	○	○	○	○	1F避難時間誘	○	×	○	×
2F-3	○	○	○	○	2F避難時間誘	○	○	○	○
2F-4	○	○	○	○	3F避難時間誘	○	○	○	○
3F-1	○	×	○	×	4F避難時間誘	○	○	○	○
3F-2	○	×	○	×	5F避難時間誘	×	×	×	×
3F-3	○	○	○	○	6F避難時間誘	×	○	×	○
3F-4	○	○	○	○	7F避難時間誘	×	×	×	×
4F-3	○	○	○	○					
4F-4	○	○	○	○					
5F-3	×	×	×	×					
5F-4	×	×	×	×					
6F-3	×	×	×	×					
6F-4	×	×	×	×					
7F-3	×	×	×	×					
7F-4	×	×	×	×					

避難差の大きいパターンと避難差の小さいパターンの各要素に対して避難誘導前と避難誘導後で対応のあるt検定を行った結果、差が見られたものを○、差が見られなかったものを×と表記している。

図 6: 対応のある t 検定：一覧表

図 6 より、クラスター 1, 4 間で差異が見られる項目は 3 箇所であった。各項目から、避難時間について考えられることを以下で述べる。

- 避難誘導が最も有益に働く箇所が 3F 低層棟であり、クラスター 4 の 3F 低層棟における避難の比率が避難誘導以前から均等であった。
- 6F において避難誘導が行われたことで、避難時間に悪影響を与えた。
- 1F において避難誘導が行われなかったことが、避難時間に影響を与えた。

しかしながら、これらの結果からはこれ以上の原因が考えにくいので、先ほど分類した 4 つのクラスターに関して、新たな観点から比較分析を進めて行くこととした。なお、クラスターに関する分析を行う際の各教室の人数配置は、各クラスターに存在するパターンの平均値をそのクラスターの代表値として考え設定した (図 7)。

クラスター	避難時間	101	102	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211
1	609	76	117	67	72	89	15	15	16	19	17	15	16	17
2	514	60	134	92	85	87	16	18	16	14	16	15	17	17
3	563	89	73	67	67	82	13	16	14	16	15	16	16	16
4	575	84	155	100	100	39	18	18	14	16	11	15	14	15

クラスター	212	301	302	304	305	mk308	111	312	GP	77	77	406	8	8F	8F	7F
1	24	72	254	5	4	4	8	15	7	7	28	41	51	39		
2	23	80	88	5	3	8	14	8	9	21	38	31	38			
3	23	80	142	5	4	8	13	7	7	27	46	44	42			
4	24	95	176	5	4	8	15	7	7	26	40	29	46			

図 7: クラスターの平均値

3.4 新指標

避難の特徴をつかむために新たな指標として、各避難者の避難中の混雑度 (図 8) と各階避難者の避難完了時間 (図 9) を用いた。

本論文では、誘導による効果の最も大きなクラスター 1 と、誘導によって避難時間に若干の遅延が見られたクラスター 4 に関して、比較・考察を行った。

3.4.1 各避難者の避難中の混雑度

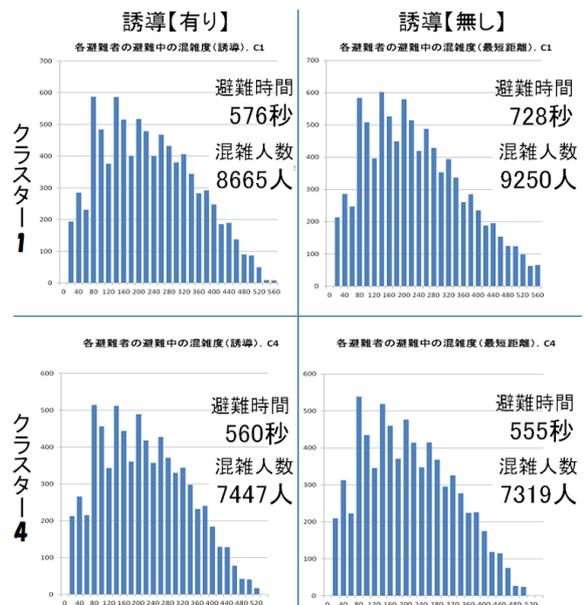


図 8: 避難誘導前後の混雑情報

各避難者の避難中の混雑度とは、横軸を経過時間、縦軸を平米辺りの人数 5 人以上の状態に移動していた各避難者の数として、20 秒ごとに算出したグラフである。図 8 のクラスター 1 では誘導によって混雑人数が減少しており、避難時間が短縮されている。クラスター 4 では誘導によって混雑人数が増加しており、避難時間は若干遅延している。以上から、混雑度の高低が避難完了時間に影響を与えていることがわかる。また、混雑が将棋倒しなどの事故を発生させるため、実際の災害現場においても混雑度は避難完了時間により大きな影響を与えるものと考えられる。

3.4.2 各階避難者の避難完了時間

各階避難者の避難完了時間とは、横軸を避難完了時間、縦軸を人エージェントが初めに設置された階数として算出したグラフである。(例えば、2階に配置された人エージェントが300秒後に避難を完了させた場合、横軸300Sec.・縦軸2階の位置に点が打たれる。)

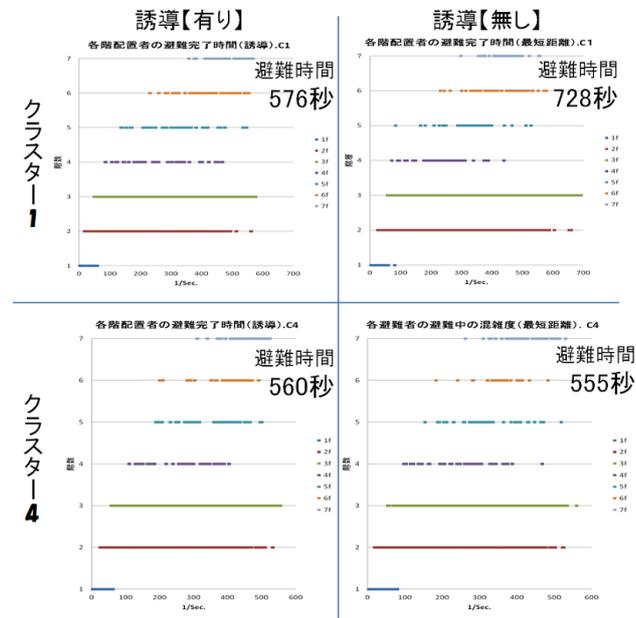


図 9: 避難誘導前後の各階配置者の避難完了時間

図 9 のクラスター 1 に関して、誘導前後で 3F に配置された人エージェントの避難完了時間に大きな差異が観測された。また、誘導有りの場合では、各階の初期脱出者が階段状に並んでいることがわかった (図 10)。

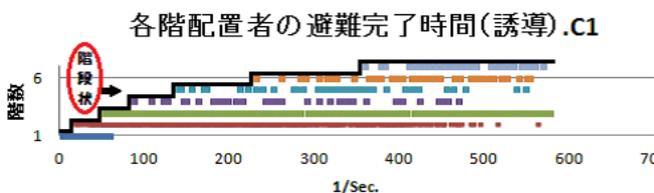


図 10: 図 9 のクラスター 1・誘導ありのグラフの縮尺を変えたものである。

クラスター 4 からは誘導前後での大きな差を観測することはできなかった。しかしながら誘導ありのグラフでは、6F 初期脱出者の位置が最短距離モデルと比べてやや左に寄っており、これにより上述した階段状の並びが崩れているのではないかと考えられる。

以上より、3F に配置された人エージェントの避難完了時間が短縮されるほど、避難完了時間が早くなっている傾向が確認された。また、各階配置者の避難完了時間が階段状に並ぶことで、より素早い避難を行うことができ

ると考えられる。これはコンサート会場などで混雑を避けるために行われる、ブロック毎の完全規制退場というシステムに通じるものがある。クラスター 4 の誘導ありでは、誘導によっていち早く下階におりた 6F の初期脱出者が、下階の避難を妨げた結果、避難時間に遅れが見られたのではないかと考えられる。そこで建物避難においても、フロア毎に退出開始時間をずらすなどの配慮を施すことで、避難時間を短縮できることが可能性として考えられる。

3.5 ハザードマップの作成

ハザードマップとは災害による被害を予測し、その被害範囲を地図化したものである。本研究では災害時の一助となることを目的として、避難誘導モデルのシミュレーションから得られた、避難完了時間・各教室設定人数をもとに重回帰分析を行い、夢告館における各教室の危険度を可視化したハザードマップの作成を行った。

避難完了時間を目的変数、各教室設定人数を説明変数として重回帰分析を行った結果、自由度調整済み決定係数の値が 0.8198 となり、1 に近く当てはまりの良いモデルが算出された。この重回帰分析によって算出された各説明変数の係数をもとに、最も値の大きい係数を基準として、教室を危険度ごとに色分けしたハザードマップを作成した。



図 11: ハザードマップ 1,2,3,4,5,6,7F

図 11 のハザードマップから、教室の危険度が MK302、MK301、F7、F6、F5 の順に高くなっていることがわかった。

4 結果

本研究では、災害時の建物避難の際に避難完了時間に影響を及ぼす要因を明らかにするとともに、避難時間を短縮するための対策法を検討することを目的として研究を進めてきた。はじめに、同志社大学の夢告館を対象施設とし、artisocを使用して災害時の状況を組み込んだ避難行動モデルを構築した。次に、構築したモデルを用いてシミュレーションを実行し、そこから算出されたデータに対して比較分析を行うことで対策法を検討してきた。以下が本研究のまとめである。

- (1) 災害時の建物避難において、避難誘導は効果的である。
- (2) 混雑度の高低が避難完了時間に影響を与えている。
- (3) 夢告館においては3F低層棟が避難を遅らせる大きな要因であり、それゆえ誘導の効果が最も現れる箇所でもある。
- (4) 各階避難者の避難完了時間における階段状の並びと避難完了時間に関連がある傾向が見られる。階段状の並びから、過度な誘導はかえって下階の避難の妨げとなり、避難時間に悪影響をもたらす恐れがあると考えられる。そこで、各階ごとに避難開始時間をずらして避難させるなどの配慮を施すことによって、避難時間の短縮を図ることができると思われる。

A 煙を用いた避難シミュレーション

A.1 煙の危険性と転倒について

人が逃げ遅れる原因に、煙による一酸化炭素中毒や酸素欠乏・パニックや集団心理などが考えられる。特に、煙の燃焼に伴う酸素欠乏は、人の思考力や判断力を著しく低下させ、避難をより困難なものへと変える。一般的に脳への酸素供給が停止して、2,3分で人の脳細胞は破壊され二度と回復しなくなるといわれている。

A.1.1 延煙モデル

そこで本研究では、煙の拡散や酸素欠乏、パニックによる転倒を考慮した延煙モデルを構築した。延煙モデルにおける人エージェントは、歩行速度が低下し最終的に死に至る酸素欠乏状態や、走り回ること転倒し周囲を将棋倒しに巻き込むパニック状態などに变化する。

A.2 シミュレーション構築

延煙モデルで新たに設置したエージェントと変数を図12に掲載している。

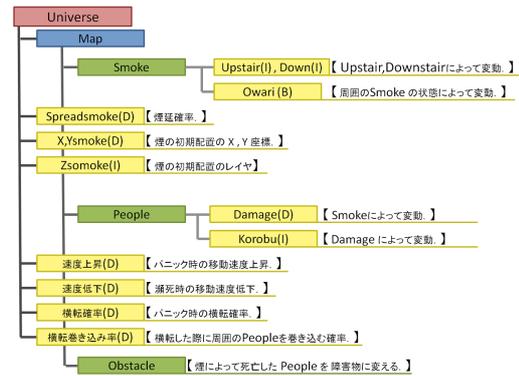


図 12: 煙モデルツリー画面

【延煙確率】

水平方向に煙が進む速さ 0.5m/s に基づき、延煙確率を 0.3 と定義した。

【影響度 (Damage)】

1Step 間の、煙エージェントが人エージェントに与える影響の強さを $Rnd() \times \text{Damage}$ の式で表す。ここで Damage の値は、人が酸素欠乏によって死亡するまでの時間を約 5 分と考え、さらに Damage の合計が 255 に達した時に人エージェントが死亡するように設定したことに基づき、0.6 と定義した。

【速度上昇変数】

1 から 5 の整数値を取る変数である。値が 1 の時に人エージェントは通常時の歩行速度の 2 倍になり、値を上げるほど速度の上昇率は低下するように設定している。

【速度低下変数】

1 から 5 の整数値を取る変数である。値が 1 の時に人エージェントの歩行速度は 0 になり、値を上げるほど速度の下降率は低下するように設定している。

【Smoke】と【People】エージェント

Smoke と People のフローチャートは図 13 の通りである。

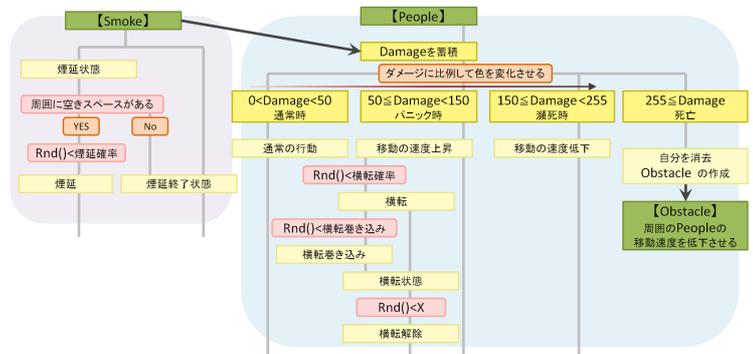


図 13: 煙と人のフローチャート

A.3 分析

煙の発生場所を、給湯室のある 1F の事務室に固定し、夢告館 1F と 2F を対象に再びシミュレーションを行う。なお、各教室には最大定員数の 7 割を配置する。

横転巻き込み率を 0.2、速度上昇率を 1 に固定し、横転率と速度低下率を変化させた 4 つのパターン (図 14) の避難時間と死亡人数を観測した。算出されたデータが図 15 である。

	横転確率[0.1](高い)	横転確率[0.05](低い)
速度低下[2](遅い)	パターン1	パターン2
速度低下[4](速い)	パターン3	パターン4

図 14: 煙と人のフローチャート

	1		2		3		4		5		平均	
	避難時間	死亡数	避難時間	死亡数								
通常避難	317	0	302	0	301	0	313	0	302	0	307	0
パターン1	343	25	338	20	337	20	341	22	372	16	346.2	20.6
パターン2	338	12	341	3	331	6	328	3	346	6	336.8	6
パターン3	336	12	330	7	338	5	345	2	334	5	336.6	6.2
パターン4	301	0	313	1	332	6	323	0	329	2	319.6	1.8

図 15: シミュレーション結果

図 15 より、有煙モデルでは、無煙モデルに比べて避難完了時間が遅くなることがわかる。

A.4 終わりに

延煙モデルの行動定義は必ずしも全てが現実に即しているとは言いがたい。しかしながら、実際の災害現場においても、煙やパニック行動などで避難完了時間が大きく遅れることは間違いない。今後は、延煙モデルを基本のモデルとし、その精度を更に高め実世界の災害現場を再現することで、建物避難の効率化を図る指針として役立てていきたい。

参考文献

- [1] 総務省消防庁 『<http://www.fdma.go.jp/concern/publication/index.html>』 (2012/11 月現在)
- [2] 山影進 『人工社会構築指南』(構造計画研究所, 2011)
- [3] 兼田敏行 『artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション』(構造計画研究所, 2008)
- [4] 安倍北夫 『パニックの心理 群集の恐怖と狂気』(講談社現代新書, 1974)
- [5] 森田武 『世界の高層・超高層・超々高層ビル火災 その実態と防火、避難対策』(近代消防社, 1998)

- [6] 押野麻由子 『マルチエージェントモデルを用いた避難行動のシミュレーション』(2005)
- [7] 澤田翔平 『セルラ・オートマトンを用いた避難行動シミュレーション』(2008)
- [8] 城田拓耶 『マルチエージェントによる避難計画を踏まえた教室配置の検証』(2011)
- [9] 鎌田智之 『マルチエージェントモデルによる介護保険施設における火災時の避難誘導に関する研究』(2008)