

心理的要因が避難行動に与える影響とRFIDを活用した避難誘導の効果の検討

著者	大東 正虎, 谷田 則幸
雑誌名	関西大学経済論集
巻	60
号	2-3
ページ	67-85
発行年	2010-12-05
その他のタイトル	Agent-based modeling for understanding mental factors on fire evacuation and the effect of evacuation guidance
URL	http://hdl.handle.net/10112/5241

論 文

心理的要因が避難行動に与える影響と RFIDを活用した避難誘導の効果の検討

大 東 正 虎
谷 田 則 幸

要 旨

本研究では、地下街からの避難行動について、煙による環境の変化と歩行者の心理的な要因をマルチエージェントシミュレーションのモデルに組み込んで、環境や歩行者の心理的な要因が避難行動に与える影響について検討する。これまでに避難行動をとる際に、初動には個人差があること、他者の行動に同調すること、煙の中では視界が損なわれ歩行速度が遅くなることなどが報告されている。これらの知見から人々の避難行動の特徴を抽出し、避難行動を起こすタイミング、歩行速度、煙の中での視野に着目したモデルを作成する。次に、人々の相互作用に着目し、煙に気づいた歩行者が避難行動を起こす際に、周囲の歩行者に避難するよう喚起した場合にはどのような結果が得られるのかについてもモデルを作成してその効果を検討する。さらに、他者の行動に同調するモデルを作成して、同調した結果が避難完了の時間に与える影響について検討する。最後に、これらのモデルにRFID (Radio Frequency Identification) と携帯電話を用いて避難誘導を行った場合にどの程度避難効率が向上するのかについてマルチエージェントシミュレーションを用いてその効果について検討する。

キーワード：地下街；避難モデル；人と煙の相互作用；他者に同調；携帯電話；RFID；マルチエージェントシミュレーション

経済学文献季報分類番号：01-10；02-13；02-21；05-42

1. はじめに

Daito and Tanida (2009) において行われた地下街の避難行動の分析では、火災発生時に全員が一斉に避難行動を取ることを前提としていた。これらのシミュレーションより、人々の避難行動のパターンを極力簡素化することによって、避難時の問題点と RFID を用いた携帯電話による避難誘導の効果を比較的容易に検証することができた。しかしながら、実際に避難行動をとる際には、人々が避難行動を起こすタイミングには個人差があり、避難の初

動が避難完了の時間に大きく影響を与えるものと考えられる。避難の初動について、安倍(1981)は、ある百貨店において300名を対象に面接調査を行った。その結果、火災ベルが発生後、「すぐに避難を始める」と答えた人は、全体の26.3パーセントで、「この場でしばらく様子を見る」が57.0パーセント、「周囲の人々の行動にならう」が13.7パーセントであった。また、神・渡辺・関沢(1981)は、川治プリンスホテル火災の避難者のうち15名に面談と2名に電話で状況調査を行った。その結果、火災ベルが2回鳴ったうち、1回目で避難行動を起こした人が非常に少なかったことを報告している。このように、人の避難行動は合理的ではなく、状況の判断には時間がかかることが伺える。このため、本研究では、歩行者が火災の煙に反応して避難するモデルを作成する。さらに、避難の際に人々は単独で避難行動をとるわけではなく、他者からも影響を受けるため、人々が相互作用しあうモデルを作成する。

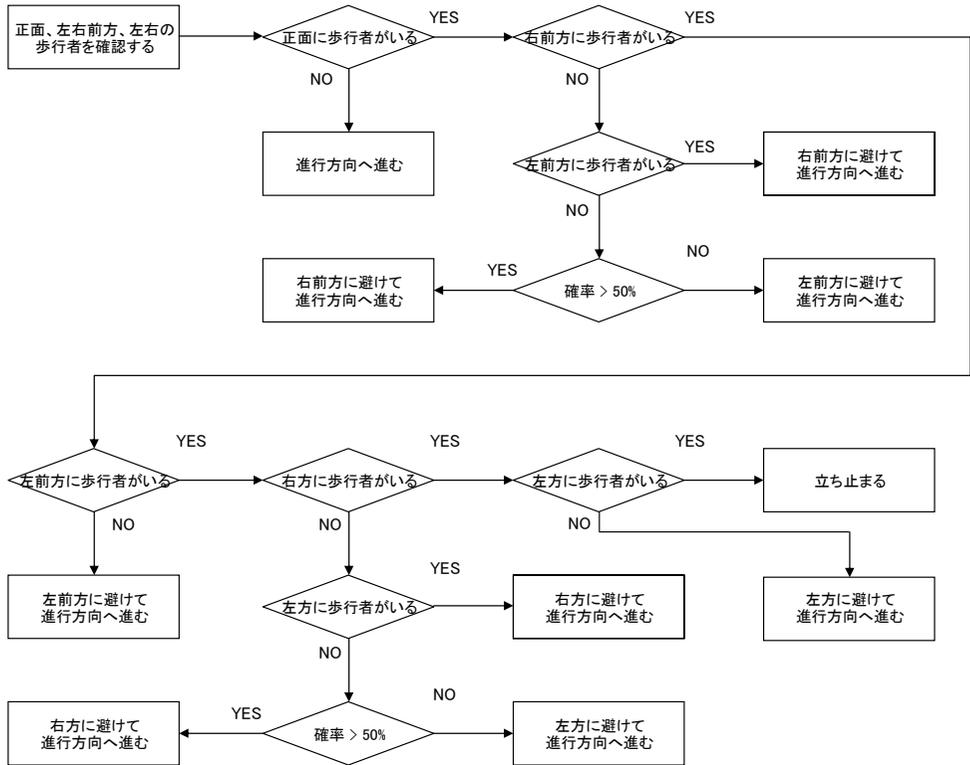
まず、人と煙の相互作用のモデル(Human-Smoke Model)によって、人が煙の中でどのような行動を起こすのかについて、避難の初動と歩行速度に影響を与える心理的要因を加えてシミュレーションを行う。次に、人と人とがコミュニケーションを取るモデル(Human Communication Model)によって、煙に気づいた人が避難行動を起こす際に、周囲の人に避難するよう喚起した場合(社会的要因を導入した場合)にはどのような結果が得られるかを調べるためにシミュレーションを行う。これら2つのモデルは単独避難行動を取るものである。人々は群集にいる時には他者の行動に同調することが報告されている(安倍, 1981, 1982; Helbing, 2002)ため、さらに他者の行動に同調するモデル(Imitation Behavior Model)を作成してシミュレーションを行う。本研究の目的は、これら3つのモデルから、煙の影響と人々の振るまいが避難時間にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることにある。

2. マルチエージェントシミュレーションのモデル

本研究におけるエージェントの種類は、歩行者エージェント、出口エージェント、避難方向表示エージェントの3種類である。

- (1) 出口エージェントは、地下街の中の出口階段の前に設置され、出口であることを示す役割をする。
- (2) 避難方向表示エージェントは、地下街の通路上で広い出口がある方向を指し示す役割をする。
- (3) 歩行者エージェントは、地下街の歩行者を示す。歩行者の属性には、年齢群、性別、煙に対する反応がある。歩行者の行動はある一定の行動に従う。これらの行動ルール

を示したものが図1である。シミュレーションの初期のステップにおいて歩行者エージェントは通路上にランダムに配置され、それぞれランダムな方向を向いて歩行を始める。進行方向に壁や店舗などがある場合は、方向転換して通路を歩く。また、進行方向15メートル内で煙を認知した場合は、避難方向表示エージェントを自己の周辺の7.5メートルの範囲から探し、発見した場合には指示された方向に従って行動する¹⁾。



注1) 簡略化のため、歩行者エージェントを歩行者と表記する。

図1 歩行者エージェントの基本ルール

(4) 煙エージェントは、煙の濃度を表すエージェントである。環境の変化は煙の濃度によって示され、本研究において煙の濃度は、煙の測定方法に関する研究（日本火災学会編，2002）に基づいて変化する。煙の濃度を表す記号には C_s が用いられ、人の煙の許容量について、神（1980）は、一般の人で C_s が $0.1/m$ 、煙に慣れている研究者

1) 本研究では75センチメートル四方を1セルとしている。地下街の通路部分は19,921個のセルで構成されている。なお、横幅3セル以下の出口を「狭い出口」として定義する。横幅3セル以上の出口を「広い出口」として定義する。

で0.5/mが限度だとしている。本研究においては、 C_s が0.1/mに達するまでの間、毎秒0.7mの速度で C_s (0.1/m)が火災発生場所から周囲に広がる。この時の C_s の変化は、守屋・渡辺 (1967) が東京海上ビルで行った実験に基づいている。 C_s が0.1/mに達した場所では、 C_s は毎秒0.00333/mずつ濃度を増していく。歩行者エージェントの視程 G は、 $\frac{2.7}{C_s}$ によって算出される (石原, 1981)。歩行者エージェントの歩行速度は下記のように算出される (秋月・山尾・田中, 2007)。

$$v_s = 0.128 \cdot C_s \cdot v_0 \cdot \{ \log_e(VA) - 0.567 \} + v_0, \quad (1)$$

この時 v_s は煙の中における歩行者エージェントの歩行速度を示す。 v_0 は通常の歩行速度を示す。 VA は視力を示している。この時の VA は20代の平均を代入している。一般的に人は明かりがない状態においても毎秒0.2から0.3メートルの速度で歩行できる (北後, 1985) ことから、 C_s の上限を2.25/mとした。これにより、歩行者エージェントは停止したまま地下街に残されることはない。すなわち、どんなに時間がかかっても全員が避難完了できるモデルを作成する。

歩行者エージェントが出口エージェントを認識した場合は、出口の方向を向いて、先述した行動のルールに従って動く。出口で階段がある部分では、歩行速度は45パーセントに減速する (日本火災学会編, 2002)。Human Communication Modelにおいて、歩行者エージェントが煙を知覚した場合、自らの視程 G の範囲内にいる歩行者エージェントに対して避難するよう勧告する。また、狭い出口を見つけた場合は、自らの視程 G の範囲内かつ狭い出口が見える範囲内にいる歩行者エージェントに対して狭い出口の方向を知らせる。なお、歩行者エージェントは視程 G の範囲内で広い出口を80パーセントの確率で、狭い出口を20パーセントの確率で認識する。こうした傾向は、実際の地下街で行われた実験結果を参考にしたものである (小川・森山・佐野ほか, 2007; 森山・長谷見・小川ほか, 2009)。Imitation Behavior Modelにおいては、煙を認知して避難行動を取る際に、視程 G の範囲内にいる人の行動にならう。煙の中において、歩行者エージェントは避難方向表示エージェントを視程 G の範囲内で探す。

3. マルチエージェントシミュレーションのレイアウト

天神地下街の全体図は、図2に示される。天神地下街の延長²⁾は南北方向に約590メートルである。白色の部分が地下街の通路部を示し、それを取り囲む黒色の部分が壁と店舗を示す。全体図の黒丸の部分には出火場所を示す。図2内の*Aは全体図の一部を拡大したもので、斜線部は出口の階段があることを、灰色の箇所は煙エージェントが拡散している様子を、三角形は出口エージェントを、円形は歩行者エージェントを、四角形は避難方向表示エージェントを示す。

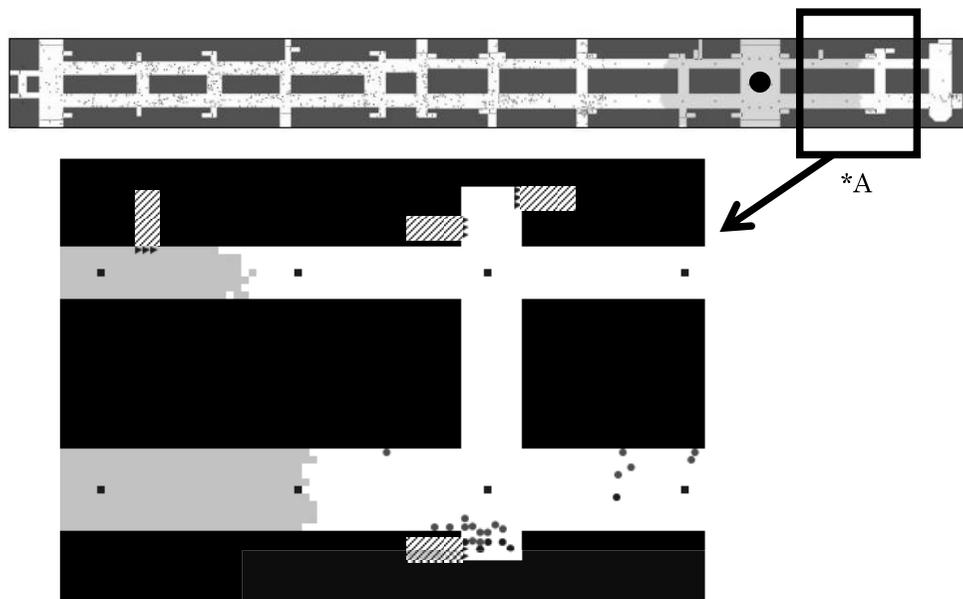


図2 地下街の全体図と煙の拡散および避難の状況

3-1 歩行者エージェントの個性

歩行者エージェントは Daito and Tanida (2009) で示したものと同様に、年齢を属性として持っている。歩行者エージェントには15歳から19歳、20歳から29歳、30歳から39歳、40歳から49歳、50歳から59歳、60歳以上、という6種の年齢群が割り振られる。また、男女の性

2) 福岡地下街開発株式会社「天神地下街全体（既設部+延伸部）地下1階平面図」2004年9月29日、縮尺：1/500、図面番号：全-既+延-02 に基づいて、また階段部分については、多田・葺本・松尾ら(2002)を参考に著者がモデル化した。

別の属性を持つ。通常の歩行速度は、年齢群と性別によって割り当てられる(表1)³⁾。なお、歩行者エージェントの視野は前後左右に10セルで、広い出口前の出口エージェントを発見できる確率は1ステップごとに80パーセント、狭い出口前の出口エージェントを発見できる確率は1ステップごとに20パーセントとする。これは、小川・森山・佐野ほか(2007)の実験において地下街において利用者が避難行動を取る際に、必ずしも最寄りの出口を利用しないことを示しているからである。彼らの実験において各出口の前を通り過ぎる確率は、0パーセントから78パーセントまでであるが、本研究では先述した2つの確率でシミュレーションを行う。また、歩行者エージェントの歩行速度は出口階段では半減する。

煙に対する反応には、個体差があり、「煙に対して極めて敏感に反応」、「煙に対して敏感に反応」、「煙に対して普通の反応」、「煙にあまり気づかない」、といった4種の心理的な属性を持つ。

「煙に対して極めて敏感に反応」の歩行者エージェントは、煙に気づく確率が100パーセントであるものと定義する。「煙に対して敏感に反応」の歩行者エージェントは、煙に気づく確率が75パーセント、「煙に対して普通の反応」の歩行者エージェントは、煙に気づく確率が50パーセント、「煙にあまり気づかない」の歩行者エージェントは、煙に気づく確率が25パーセントであるものと定義する。歩行者エージェントは1,500、地下街の通路上にランダムに配置される。歩行者エージェントの年齢群、性別は天神地区におけるアンケート調査の結果(黒瀬・伊, 2007)に基づいて作成する(表2)。

表1 歩行者エージェントの歩行速度

年齢群	歩行速度 (1 セル / 1 ステップ)	
	男	女
15-19	1.000	0.903
20-29	0.947	0.854
30-39	0.935	0.844
40-49	0.898	0.810
50-59	0.854	0.771
60以上	0.836	0.754

表2 天神地下街の人口構成

年齢群	年齢構成比 (%)	男女比 (%)	
		男性	女性
15-19	17	6.12	10.88
20-29	33	11.88	21.12
30-39	11	3.96	7.04
40-49	9	3.24	5.76
50-59	17	6.12	10.88
60以上	13	4.68	8.32

- 3) 川初(1974)が行った男性15歳から72歳までの男性277名を5歳間隔ごとにとった最大脚筋速度歩行速度のデータをもとに年齢ごとに比率で換算する。また、歩行者エージェントの女性の歩行速度は、村田・忽那・北山(2004)による最速歩行時における平均歩行速度の男女比を使って、川初(1974)のデータをもとに比率によって換算する。歩行速度は加齢に伴って衰えることが中村・小林(1984)に示されている。ただし、歩行速度について、谷川・太田・長尾ほか(2002)は運動の経験によって、また中村・小林(1984)は目的や場所によって、Rotton, Shats and Standers(1990)は気温によって、変化すると指摘している。本研究では年齢、性別による歩行速度の変化を単純化して考察するため、これらの複雑な要素をモデルに反映していない。

3-2 シミュレーションのセッティングと得られるデータ

マルチエージェントシミュレーションの実行にあたって、3つのモデルを使用する。まず、Human-Smoke Model をケース1とし、Human Communication Model をケース2とし、そして Imitation Behavior Model をケース3とする。これらの各ケースはさらに3つのケースに分類され、煙に対する反応の度合いが異なる（表3）。

表3 煙に対する反応の度合いが異なるケース

		煙に対して極めて敏感に反応	煙に対して敏感に反応	煙に対して普通に反応	煙にあまり気づかない
ケース1	ケース1-1	40%	30%	20%	10%
	ケース1-2	25%	25%	25%	25%
	ケース1-3	10%	20%	30%	40%
ケース2	ケース2-1	40%	30%	20%	10%
	ケース2-2	25%	25%	25%	25%
	ケース2-3	10%	20%	30%	40%
ケース3	ケース3-1	40%	30%	20%	10%
	ケース3-2	25%	25%	25%	25%
	ケース3-3	10%	20%	30%	40%

Human-Smoke Model であるケース1の場合、ケース1-1では、「煙に対して極めて敏感に反応」が全体の40パーセント、「煙に対して敏感に反応」が全体の30パーセント、「煙に対して普通の反応」が全体の20パーセント、「煙にあまり気づかない」が全体の10パーセントの割合で歩行者エージェントに当てられる。また、ケース1-2では、「煙に対して極めて敏感に反応」が全体の25パーセント、「煙に対して敏感に反応」が全体の25パーセント、「煙に対して普通の反応」が全体の25パーセント、「煙にあまり気づかない」が全体の25パーセントの割合で歩行者エージェントに当てられる。ケース1-3では、「煙に対して極めて敏感に反応」が全体の10パーセント、「煙に対して敏感に反応」が全体の20パーセント、「煙に対して普通の反応」が全体の30パーセント、「煙にあまり気づかない」が全体の40パーセントの割合で歩行者エージェントに当てられる。

Human Communication Model であるケース2の場合、ケース2-1では、「煙に対して極めて敏感に反応」が全体の40パーセント、「煙に対して敏感に反応」が全体の30パーセント、「煙に対して普通の反応」が全体の20パーセント、「煙にあまり気づかない」が全体の10パーセントの割合で歩行者エージェントに当てられる。また、ケース2-2では、「煙に対して極めて敏感に反応」が全体の25パーセント、「煙に対して敏感に反応」が全体の25パーセント、「煙に対して普通の反応」が全体の25パーセント、「煙にあまり気づかない」が全体の25パーセントの割合で歩行者エージェントに当てられる。ケース2-3では、「煙に対して極めて敏

感に反応」が全体の10パーセント、「煙に対して敏感に反応」が全体の20パーセント、「煙に対して普通の反応」が全体の30パーセント、「煙にあまり気づかない」が全体の40パーセントの割合で歩行者エージェントに当てられる。

Imitation Behavior Modelであるケース3の場合、ケース3-1では、「煙に対して極めて敏感に反応」が全体の40パーセント、「煙に対して敏感に反応」が全体の30パーセント、「煙に対して普通の反応」が全体の20パーセント、「煙にあまり気づかない」が全体の10パーセントの割合で歩行者エージェントに当てられる。また、ケース3-2では、「煙に対して極めて敏感に反応」が全体の25パーセント、「煙に対して敏感に反応」が全体の25パーセント、「煙に対して普通の反応」が全体の25パーセント、「煙にあまり気づかない」が全体の25パーセントの割合で歩行者エージェントに当てられる。ケース3-3では、「煙に対して極めて敏感に反応」が全体の10パーセント、「煙に対して敏感に反応」が全体の20パーセント、「煙に対して普通の反応」が全体の30パーセント、「煙にあまり気づかない」が全体の40パーセントの割合で歩行者エージェントに当てられる。

通常、気づかないうちに煙に巻かれた場合、濃度が増していくにつれて煙の中にいることに気づきやすくなる。このため、 C_s が0.1/mの時に煙の中にいる歩行者エージェントの煙に対する反応は25パーセント上昇するものとした。たとえば、「煙に対して敏感に反応」の場合は75パーセントの確率で気づいていたのが、100パーセントの確率で気づくようになる。また、「煙に対して普通の反応」の場合は、50パーセントの確率で気づいていたのが、75パーセントの確率で、「煙にあまり気づかない」の場合は25パーセントの確率で気づいていたのが、50パーセントの確率で気づくようになる。さらに、 C_s が0.5/mの時に煙の中にいる歩行者エージェントの煙に対する反応はさらに25パーセント上昇する。たとえば、「煙に対して普通の反応」の場合は、100パーセントの確率で、「煙にあまり気づかない」の場合は75パーセントの確率で気づくようになる。

シミュレーションは、全ての歩行者エージェントが地下街から避難完了した時点で終了する。本研究において分析に用いるデータは、以下の5つである。

- (1) それぞれの歩行者エージェントの避難完了時間が年齢群と性別で示されたもの。
- (2) 初期の段階（シミュレーション開始後400ステップ（5分））で避難した歩行者エージェントの数の中間集計
- (3) 全ての歩行者エージェントが地下街から避難完了した時間
- (4) C_s が0.1/mあるいは0.5/mの煙の中を歩いて避難した歩行者エージェント数の中間集計
- (5) C_s が0.1/mあるいは0.5/mの煙の中を歩いて避難した歩行者エージェント数の合計

9 ケースをそれぞれ15回ずつ実行する。そして、煙に対する反応、他者への伝達行動、他者の行動に同調した結果が避難完了の時間に与える影響について検討する。

4. 結果と考察

まず、Human-Smoke Model（ケース1）、Human Communication Model（ケース2）、Imitation Behavior Model（ケース3）のシミュレーション結果⁴⁾を比較する。これらの3 ケースのうち最も早く全員が避難できたものは、ケース2で、次いでケース1で、最も時間がかかったのがケース3であった（図3）。煙の中を通過した歩行者エージェントのステップごとの累計を図4に示す。ケース1では、 C_s が0.1/mの時の煙を通過した歩行者エージェントの数が平均655.31と最も多かったが、 C_s が0.5/mの時の煙を通過した歩行者エージェントの数は平均63.09と最も少なかった。一方で、最も時間がかかったケース3では、 C_s が0.5/mの時の煙を通過した歩行者エージェントの数が平均167.48と最も多かった。

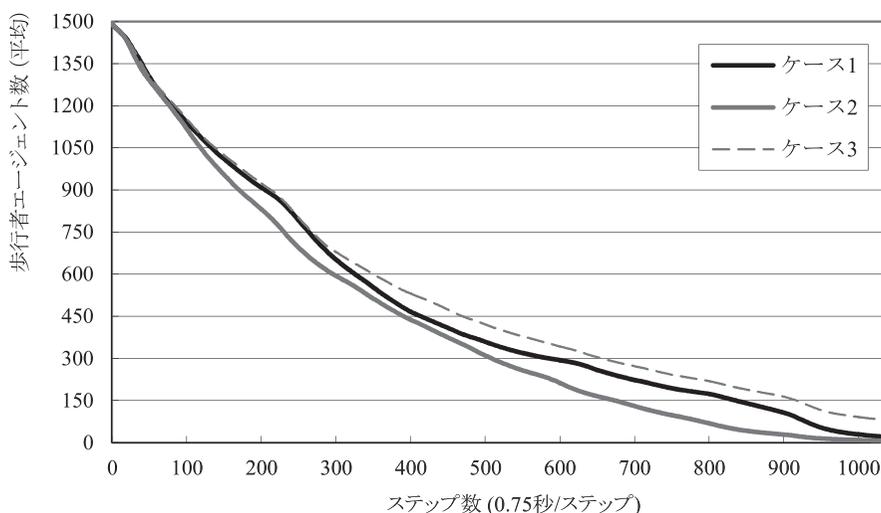


図3 ケース1、ケース2、ケース3の避難完了の時間と地下街に残っている歩行者エージェントの数

4) ケース1は、ケース1-1、ケース1-2、ケース1-3の実行結果を、ケース2は、ケース2-1、ケース2-2、ケース2-3の実行結果を、ケース3は、ケース3-1、ケース3-2、ケース3-3の実行結果を平均したものである。

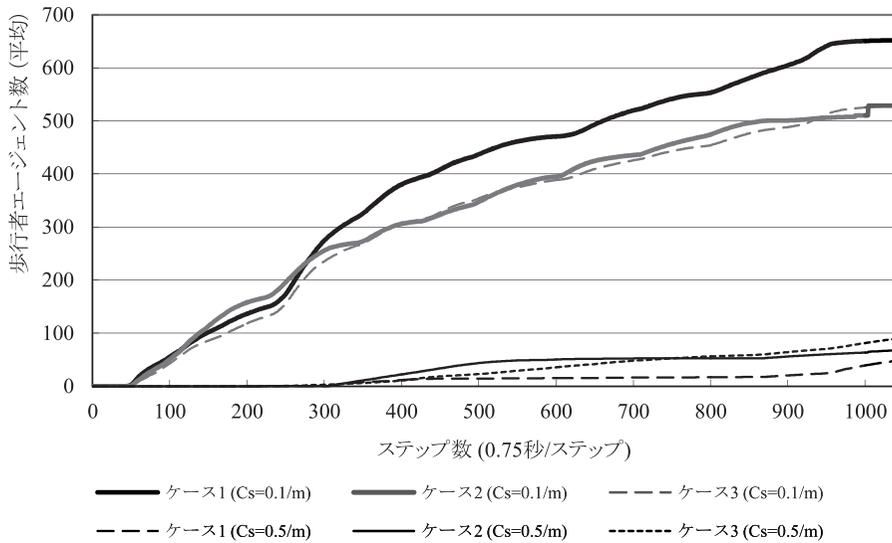


図4 ケース1、ケース2、ケース3の避難完了の時間と煙の中を歩行した歩行者エージェントの数

次に、ケース1の詳細についてケース1-1、ケース1-2、ケース1-3で比較する。単純に歩行速度の差だけを考慮すると、年齢群や性別に関係なくそれぞれの歩行者エージェントは、「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が増加するに従って、初期の段階から避難完了者の割合が高くなると予測されたが、「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が増加するに従って、年齢群40-49歳、50-59歳と60歳以上、性別で見ると、初期の段階で避難を完了した歩行者エージェントの割合は低い傾向にあることを示した(表4)。これは、「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が高まるに従って、年齢群が40代以下の比較的歩行速度の速い歩行者エージェントが初期のステップから出口に集中したため、年齢群が40代以上の歩行者エージェントは順番待ちとなり、避難時間が初期の段階で遅くなったと考えられる。しかし、最終的には、年齢群が40代以上の歩行者エージェントの避難完了時間は、「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が高まるに従って、早くなることが示された(表5)。ただし、年齢群60歳以上の歩行者エージェントの最終的な避難完了時間の最大値は高く、最後まで危険にさらされていることが分かる。 C_s が0.5/m以上の時は、視程は5.4メートルを下回る。それゆえ、歩行者エージェントは、出口エージェントを探しながら歩行したため、歩行距離がそれだけ伸びたものと考えられる(年齢群15-19歳、20-29歳、50-59歳で見た場合、性別で見た場合)(表6を参照)。その結果より、 C_s が0.5/m以上時の煙の影響によって避難時間が増したと考えられる。

表4 初期の段階（400ステップ時に地下街から避難完了した歩行者エージェントの割合）
（ケース1-1とケース1-2、ケース1-3）

	年齢群						性別		
	15-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60以上	男性	女性	合計
ケース1-1	71.22	69.55	68.66	67.98	66.98	67.24	69.14	68.07	68.61
ケース1-2	69.34	70.08	70.21	68.62	68.50	68.29	69.85	68.49	69.17
ケース1-3	69.77	69.24	70.01	69.82	68.60	69.02	70.16	68.67	69.41

表5 避難完了時のシミュレーションのステップ数（ケース1-1とケース1-2、ケース1-3）

		年齢群						性別		
		15-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60以上	男性	女性	合計
ケース1-1	平均ステップ数	1108.57	1211.27	1272.10	1164.43	1071.90	1074.90	1100.49	1233.67	1167.08
	標準偏差	215.41	429.08	97.35	76.32	279.78	341.87	160.56	319.37	239.97
	最大値	1806.00	2595.50	1333.00	1193.00	1782.50	2345.00	1588.67	2096.33	1842.50
	最小値	945.00	1015.50	953.00	938.00	1017.50	963.00	951.17	992.83	972.00
ケース1-2	平均ステップ数	1082.43	1118.70	1226.17	1189.57	1092.63	1077.43	1104.99	1255.66	1180.32
	標準偏差	82.14	274.25	73.49	64.57	413.83	403.60	164.02	273.27	218.65
	最大値	1257.50	1866.00	1221.50	1190.00	2442.00	2292.00	1586.17	1836.83	1711.50
	最小値	961.50	1035.50	994.50	963.00	1071.50	1002.50	965.33	1044.17	1004.75
ケース1-3	平均ステップ数	1167.83	1233.33	1271.67	1225.70	1150.73	1128.20	1119.84	1323.69	1221.77
	標準偏差	264.28	322.60	225.93	262.93	500.80	403.79	225.64	434.47	330.06
	最大値	1927.50	2184.50	1868.00	1750.50	2822.50	2472.50	1781.83	2560.00	2170.92
	最小値	943.00	1010.50	930.50	908.50	978.50	998.00	933.33	989.67	961.50

表6 C_0 が0.5/mの通路を通過した歩行者エージェントの数
（ケース1-1とケース1-2、ケース1-3）

		年齢群						性別		
		15-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60以上	男性	女性	合計
ケース1-1	煙の中を通過した歩行者エージェントの数	6.53	16.80	6.53	6.73	12.27	10.47	17.27	42.07	59.33
	標準偏差	2.01	2.85	2.42	1.92	2.34	2.72	1.64	3.12	2.38
	最大値	8.00	13.50	8.50	7.00	10.00	11.00	6.00	13.33	9.67
	最小値	0.50	3.50	0.00	0.50	3.00	0.50	0.17	2.50	1.33
ケース1-2	煙の中を通過した歩行者エージェントの数	8.60	17.53	6.47	5.53	12.73	11.53	17.33	45.07	62.40
	標準偏差	1.33	3.63	1.71	1.62	2.26	2.95	1.83	2.67	2.25
	最大値	7.00	16.00	6.00	6.50	11.00	11.50	7.33	12.00	9.67
	最小値	2.00	4.00	0.00	0.50	3.50	1.00	0.50	3.17	1.83
ケース1-3	煙の中を通過した歩行者エージェントの数	8.87	19.33	7.07	6.13	14.87	11.27	20.73	46.80	67.53
	標準偏差	2.53	3.13	2.60	1.96	2.64	2.64	2.07	3.09	2.58
	最大値	9.00	14.50	9.00	6.00	11.50	11.00	7.50	12.83	10.17
	最小値	0.50	3.50	0.50	0.00	2.50	1.50	0.33	2.50	1.42

表7 初期の段階において C_s が0.1/mの通路を通過した歩行者エージェントの数
(ケース2-1とケース2-2、ケース2-3)

	年齢群						性別		
	15-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60以上	男性	女性	合計
ケース2-1	61.69	61.21	62.99	63.16	63.01	57.98	62.59	60.76	61.67
ケース2-2	63.47	60.84	58.82	63.75	59.36	56.03	60.59	60.17	60.38
ケース2-3	58.18	60.72	60.22	62.01	58.89	56.97	59.83	59.16	59.50

表8 C_s が0.1/mの通路を通過した歩行者エージェントの数
(ケース2-1とケース2-2、ケース2-3)

		年齢群						性別		
		15-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60以上	男性	女性	合計
ケース2-1	煙の中を通過した歩行者エージェントの数	71.40	156.87	53.67	43.20	95.07	71.67	166.93	324.93	491.87
	標準偏差	5.49	9.97	5.02	4.13	6.99	5.45	5.28	7.06	6.17
	最大値	47.00	97.00	35.00	31.50	60.50	47.50	38.50	67.67	53.08
	最小値	27.00	60.50	19.50	15.50	36.00	27.50	20.00	42.00	31.00
ケース2-2	煙の中を通過した歩行者エージェントの数	76.13	160.47	57.93	46.93	87.53	74.73	165.60	338.13	503.73
	標準偏差	7.16	7.54	6.34	5.10	6.37	5.06	4.53	7.99	6.26
	最大値	51.00	94.00	38.50	31.50	52.50	45.00	35.83	68.33	52.08
	最小値	26.50	67.00	19.00	13.50	28.50	28.00	21.00	39.83	30.42
ケース2-3	煙の中を通過した歩行者エージェントの数	79.87	169.47	59.73	47.20	93.20	79.27	177.27	351.47	528.73
	標準偏差	6.33	7.83	5.00	4.70	4.37	6.79	5.17	6.50	5.83
	最大値	50.50	104.00	38.00	32.50	54.00	51.00	39.00	71.00	55.00
	最小値	27.50	74.50	20.00	15.00	40.00	29.00	20.50	48.17	34.33

次に、ケース2の詳細についてケース2-1、ケース2-2、ケース2-3で比較する。シミュレーションの初期の段階で、 C_s が0.1/mの時に煙の中を通過した歩行者エージェント、年齢群が20-29歳、50-59歳、性別では男女をともに見ると、「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が高いほど煙の中を通過しながら避難する割合も高まる傾向にある(表7を参照)。また、最終的に C_s が0.1/mの煙の中を通過した年齢群の50-59歳を除く全ての歩行者エージェントは、「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が高いほど、煙の被害に遭わずに避難を完了していることが示された(表8を参照)。これらの3つのケースに見られる特長は、「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が高まるにつれて C_s が0.1/mの時に煙の中を歩行する歩行者エージェントの割合が低くなる傾向にあることが示された。

次に、ケース3の詳細についてケース3-1、ケース3-2、ケース3-3で比較する。シミュレーションの初期の段階で、 C_s が0.1/mの時に煙の中を通過した歩行者エージェント、年齢群が15-19歳、20-29歳、50-59歳で見ると、「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が高いほど煙の中を通過しながら避難する割合が低くなる傾向にある(表9を参照)。また、最

最終的に C_s が0.1/m の煙の中を通過した年齢群が40-49歳、60歳以上の歩行者エージェントは、「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が高いほど、煙の被害に遭いながら、避難を完了していることが示された（表10を参照）。これらの3つのケースに見られる特長は、初期の段階では、ケース2の場合の結果とは逆の傾向を示したが、最終的には、ケース2の場合の結果と同様に、「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が高まるにつれて C_s が0.1/m の時に煙の中を歩行する歩行者エージェントの割合が低くなる傾向にあることが示された。さらに、全体の避難完了時間では、年齢群の20-29歳を除く全ての歩行者エージェントを見ると、「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が高いほど避難にかかる時間は増加傾向にある（表11を参照）。これは、たとえばケース3-1の場合では、「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が高いので、シミュレーション開始後の比較的早い時間から他の歩行者エージェントの行動に同調する歩行者エージェントが増えたため、結果的に歩行距離が伸びて避難完了までに時間がかかったものと推測される。このためケース3-1はケース3-2、ケース3-3よりも避難完了までの時間を必要としたと考えられる。

表9 初期の段階において C_s が0.1/mの通路を通過した歩行者エージェントの数
(ケース3-1とケース3-2、ケース3-3)

	年齢群						性別		
	15-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60以上	男性	女性	合計
ケース3-1	54.00	57.91	57.42	60.13	55.09	58.82	57.94	56.52	57.23
ケース3-2	57.62	58.01	56.13	56.19	56.74	60.40	57.34	57.69	57.52
ケース3-3	58.82	58.77	59.70	57.87	57.26	56.45	58.28	58.01	58.15

表10 C_s が0.1/mの通路を通過した歩行者エージェントの数
(ケース3-1とケース3-2、ケース3-3)

		年齢群						性別		
		15-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60以上	男性	女性	合計
ケース3-1	煙の中を通過した歩行者エージェントの数	82.20	175.70	60.90	45.70	93.80	67.00	177.20	348.10	525.30
	標準偏差	5.17	8.53	5.99	5.49	6.41	4.77	4.51	7.60	6.06
	最大値	49.00	104.00	40.00	32.50	58.50	39.50	37.83	70.00	53.92
	最小値	33.00	77.00	22.50	15.00	35.50	23.00	23.33	45.33	34.33
ケース3-2	煙の中を通過した歩行者エージェントの数	80.36	175.55	56.55	49.55	97.45	71.73	184.91	346.27	531.18
	標準偏差	7.64	7.95	4.52	5.08	5.66	6.10	5.01	7.31	6.16
	最大値	56.50	100.50	34.00	32.50	57.00	44.00	38.67	69.50	54.08
	最小値	29.00	75.50	21.50	15.50	38.50	26.00	22.83	45.83	34.33
ケース3-3	煙の中を通過した歩行者エージェントの数	85.80	175.47	58.87	50.60	90.13	74.60	193.93	341.53	535.47
	標準偏差	6.10	8.67	5.73	5.37	6.04	3.68	5.35	6.52	5.93
	最大値	53.50	103.00	41.50	36.50	53.00	43.00	42.17	68.00	55.08
	最小値	32.00	73.00	20.50	17.00	35.00	31.00	22.50	47.00	34.75

表11 避難完了時のシミュレーションのステップ数
(ケース3-1とケース3-2、ケース3-3)

		年齢群						性別		
		15-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60以上	男性	女性	合計
ケース 3-1	平均ステップ数	2129.55	2382.85	2801.35	2619.80	2286.45	2353.90	2153.00	2781.98	2467.49
	標準偏差	554.57	715.19	564.75	671.55	590.78	756.22	638.26	646.10	642.18
	最大値	3235.00	4037.00	3413.50	3379.50	3780.50	3785.50	3336.33	3874.00	3605.17
	最小値	1348.50	1667.00	1514.50	1250.50	1911.00	1586.50	1233.17	1859.50	1546.33
ケース 3-2	平均ステップ数	2026.82	2421.91	2674.50	2370.50	1949.23	1930.50	2030.09	2629.38	2329.73
	標準偏差	764.72	786.77	702.01	755.98	604.03	666.77	682.14	744.62	713.38
	最大値	3576.00	3634.00	3472.00	3444.50	3586.50	3842.00	3421.67	3763.33	3592.50
ケース 3-1	最小値	1177.00	1223.50	1020.50	1144.50	1729.00	1541.50	1153.67	1458.33	1306.00
	平均ステップ数	2011.57	2183.07	2438.00	2167.53	1830.60	1838.97	1913.37	2434.22	2173.79
	標準偏差	644.37	701.29	566.58	773.13	665.47	597.93	584.64	731.61	658.13
	最大値	3313.00	3579.50	3116.50	3843.00	3539.00	3555.50	3149.50	3832.67	3491.08
	最小値	1225.00	1269.50	1129.00	1145.00	1342.00	1353.00	1142.33	1345.50	1243.92

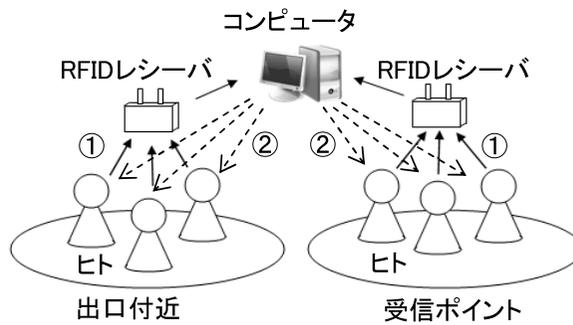
ケース3では、ケース1やケース2よりも倍以上の避難時間がかかっていることから、他者の行動に同調することは、必ずしも最適な方向へ誘導されないことが示された。このように他者の行動に同調する歩行者が多い場合には、リーダーの存在や避難方向を支援するツールが特に必要になるものと思われる。

5. RFIDと携帯電話を導入した場合の避難行動のシミュレーション

リーダーの役割として、熊谷・高田(1983)は、誘導者が避難者の先頭に立って誘導する「引きつれ法」と、出口を示して避難者自身に出口の場所を判断させて出口へ向かわせる「指差し法」による実験を行い、「引きつれ法」の方が「指差し法」よりも早く誘導できることを示している。しかし、実際に「引きつれ法」によって歩行者を誘導できるのは避難路に熟知した人に限られるので、大人数を適正な出口に連れ出すことは困難である。このため、Daito and Tanida(2009)において行われたRFIDと連携した携帯電話のマルチエージェントのモデルを適用して効率的な避難方法について検討を行う(図5)。

煙に対する反応は、「煙に対して極めて敏感に反応」、「煙に対して敏感に反応」、「煙に対して普通の反応」、「煙にあまり気づかない」の割合をそれぞれ25%とする(表12)。RFIDと連携した携帯電話を導入したHuman-Smoke Modelをケース4とし、RFIDと連携した携帯電話を導入したHuman Communication Modelをケース5とする。そしてImitation Behavior Modelをケース6とし、ケース6には新たなアイデアを加えた。ケース6の携帯電話には、次のようなメッセージ、「周辺の人に「私についてきて下さい」と呼びかけて

避難して下さい」を示すことにする。すなわち、これは Imitation Behavior Model（ケース 3）に RFID と連携した携帯電話を導入し、さらに Human Communication Model（ケース 2）のルールを取り入れたものである。なお、同調行動も RFID と連携した携帯電話を持っていないエージェントだけが行い、RFID と連携した携帯電話を持っている歩行者エージェントは携帯電話だけを見て行動することとした。エージェントの役割と数は、RFID と連携した携帯電話が無い場合と同様にシミュレーションは各15回行った。



①では、RFIDがRFIDレシーバに向けて自己の位置情報を自動的に発信する。②では、携帯電話にメールが着信する。

図5 RFIDの情報と携帯電話への指示の関係図

表12 RFIDと連携した携帯電話を導入したケース

		携帯普及率	煙に対して極めて敏感に反応	煙に対して敏感に反応	煙に対して普通に反応	煙にあまり気づかない
ケース 4	ケース 4-1	50%	25%	25%	25%	25%
	ケース 4-2	100%	25%	25%	25%	25%
ケース 5	ケース 5-1	50%	25%	25%	25%	25%
	ケース 5-2	100%	25%	25%	25%	25%
ケース 6	ケース 6-1	50%	25%	25%	25%	25%
	ケース 6-2	100%	25%	25%	25%	25%

シミュレーションの結果、図 6 に示すようにケース 4-1 はコミュニケーションを取らないモデルであるので、シミュレーションの終了ステップは RFID と携帯電話を導入した他のケースと比べて相対的に遅くなる。それは、歩行者エージェントが視野の範囲内に煙が来ないと避難行動を起こさないことに起因する。ただしケース 4-1 は RFID と携帯電話の導入前のケース 1-2 よりも約1.7倍早く避難ができています。また、ケース 4-2 は、ケース 1-2 よりも約3.4倍速く避難ができています。注目すべきは、ケース 6-1 は、RFID と携帯電話の導入前のケース 3-2 よりも約5.4倍早く避難ができていたことが示された。また、煙の中を通

過した歩行者の数も図7に示されるように、RFIDと携帯電話を導入することで大幅に煙を回避することができることが示された。以上より、ケース6-1はRFIDと携帯電話が完全普及していなくても避難時間が大幅に削減できていることから、他者の行動に同調する環境下においては避難行動のリーダーの役割ができることが示された。

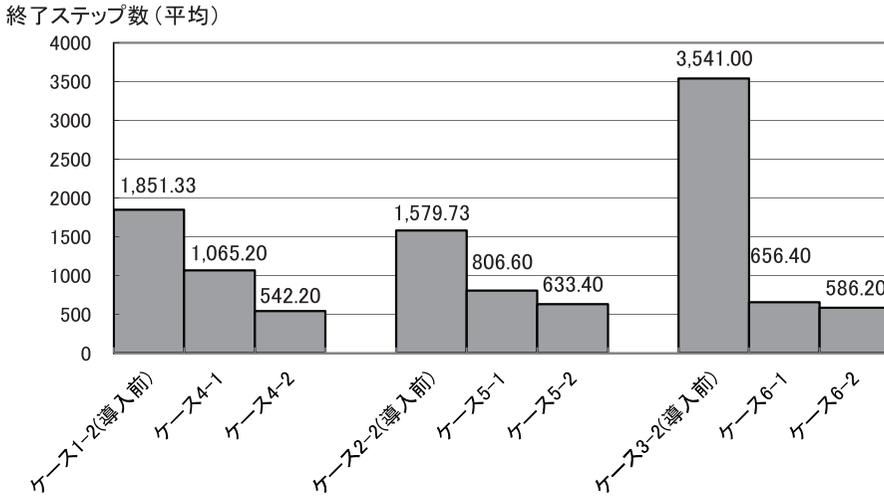


図6 RFIDと携帯電話の導入前と後の避難完了時間の比較

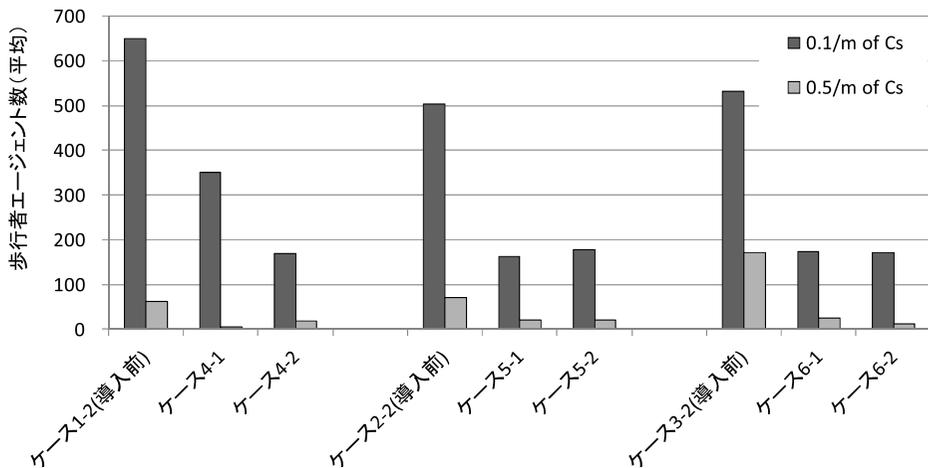


図7 煙の中を歩行した歩行者エージェントの数

6. おわりに

本研究では、心理的・社会的要因（煙に対する反応、視程、歩行速度、他者への伝達行動、他者の行動に同調すること）をモデルに組み込んだ。また環境的要因（煙の速度と濃度）をモデルに組み込んだ。本研究で得られた結果は歩行者の心理的要因と環境的要因が相互作用した結果から得られたもの、また歩行者同士の行動が相互作用した結果から得られたものである。

ケース1は、歩行者エージェントが煙に気づいて避難行動を起こし、それぞれが単独で避難行動を行うモデルである。歩行者エージェントの「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が高くなるにつれて、歩行者エージェントはより煙を避けて、より早く避難することが示された。ケース2は、歩行者エージェントが煙に気づいて避難行動を起こし、さらに他者に避難することを伝達しながら、それぞれが単独で避難行動を行うモデルである。歩行者エージェントの「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が高くなるにつれて、歩行者エージェントは、より効率的に煙を避けながら避難することが示された。このケース2においては、「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が高まった場合において、避難完了までの所要時間との関係性は見られなかった。しかしケース2の避難完了時間は、ケース1、ケース3よりも早いことが示された。ケース3は、歩行者エージェントが煙に気づいて避難行動を起こし、さらに他者の行動に同調しながら行動するモデルである。歩行者エージェントの「煙に対して極めて敏感に反応」の割合が高くなるにつれて、煙の中を通過する歩行者エージェントの数は増加し、避難完了までの所要時間も増すことが示された。これは、「煙に対して極めて敏感に反応」の歩行者エージェント数の割合が高まるにつれて、シミュレーション開始後の比較的早い時間から他の歩行者エージェントの行動に同調する歩行者エージェントが増えたため、結果的に歩行距離が伸びて避難完了までに時間がかかったものと推測される。このことから、他者の行動に同調することは、必ずしも最適な方向へ誘導されない。むしろ、他者の判断を頼りにすることによって、避難完了までの所要時間が他のケースよりも大幅に必要とされることが確認された。

もし、避難路をよく知っている人が多く地下街にいるならば、既に熟知している出口まで走って移動するということも考えられるが、通常の地下街においては避難路を知らない人が多いものと推測される。そのため、煙の濃度が増すことによって、視程の距離が短くなり、先の見えない恐怖心から歩行速度が遅くなる。それゆえ、火災避難を行う場合には、煙を敏感に察知し、他者に避難勧告をしながら避難行動を取ることが効果的であることが本研究の

結果から示された。

安倍(1974)は、アンケート結果において、他者に同調する歩行者が、避難時に焦りによって適正な指示に従わなくなることを危惧していた。本研究では、それを支持する結果が得られた。つまり、正確な状況判断ができないまま他者の行動に同調した場合には避難が非効率になることが示された。このように他者の行動に同調する歩行者が多い場合には、リーダーの存在や避難方向を支援するツールが特に必要になるものと思われる。そこで、Daito and Tanida(2009)が行ったRFIDと携帯電話を利用した避難誘導のモデルを本研究において適用した。ただし、Imitation Behavior Modelには新たなアイデアを加えた。ケース6-2の携帯電話には、次のようなメッセージ、「周辺の人に「私についてきて下さい」と呼びかけて避難して下さい」を示すことにした。その結果、RFIDと携帯電話が50パーセント普及しただけで、避難完了までの所要時間が大幅に削減できた。他者の行動に同調するような環境下において、RFIDと携帯電話を持った歩行者エージェントは、リーダーの役割をすることが可能となることが示された。

本研究においては、パニックや将棋倒し、けが人の発生などの避難時に想定されるこれらの事故を考慮せずにシミュレーションを行ったが、このような事故がどのような条件によって発生するのかについて検討することは今後の課題である。

謝 辞

本研究で用いたマルチエージェントシミュレーター、artisocは株式会社構造計画研究所から貸与して頂きました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 秋月有紀・山尾耕平・田中哮義(2007)「災害時避難経路の視認性と避難歩行速度に関する実験的研究: その1 様々な光環境下での歩行速度の予測」『日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, 防火, 海洋, 情報システム技術』Vol.2007, pp.279-280.
- 安倍北夫(1974)『パニックの心理』講談社.
- 安倍北夫(1981)「災害時の避難行動を決定する人間的要因の分析: デパートでの避難をモデルとして」『東京外国語大学論集』No.31, pp.227-261.
- 安倍北夫(1982)「ある巨大ビルの火災と避難」『予防時報』No.130, pp.21-27.
- 石原茂久(1981)「火災時の煙と有害ガス」『木材研究・資料』No.16, pp.49-62.
- 小川純子・森山修治・佐野友紀・長谷見雄二(2007)「大規模地下街における避難行動特性に関する実験研究: その2 実験結果及び分析」『日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, 防火, 海洋, 情報システム技術』Vol.2007, pp.305-306.
- 川初清典(1974)「脚筋の力・速度・パワー能力の年齢別推移」『体育学研究』Vol.19, No.4・5, pp.201-206.

- 北後明彦（1985）「煙中における人間の避難行動実験：避難経路選択および歩行速度に関する実験的研究」『日本建築学会計画系論文報告集』Vol.353, pp. 32-38.
- 熊谷良雄・高田誠（1983）「地下街における避難誘導方策に関する実験的研究」『日本都市計画学会学術研究発表会論文集』No.18, pp.163-168.
- 黒瀬重幸・伊藤和陽（2007）「地下街を持つ福岡市天神地区の歩行者行動に関する研究：その1 歩行者属性とトリップ長の分析」『福岡大学工学集報』No.78, pp.105-111.
- 神忠久・渡部勇市・関沢愛（1981）「川治プリンスホテル火災における宿泊客の避難行動について」『火災』Vol.31, No.4, pp.4-12.
- 神忠久（1980）「煙中での心理的動揺度について」『日本火災学会論文集』Vol.30, No.1, pp.1-6.
- 多田彰秀・葦本浩平・松尾一良・井上啓由・古本勝弘（2002）「福岡天神地下街に通じる階段入口の構造特性に関する現地調査」『長崎大学工学部研究報告』Vol.32, No.58, pp.177-186.
- 谷川智宏・太田茂・長尾光城・宮川健（2002）「携帯型 軸加速度計を用いた歩行状態の計測—加速度による加齢の影響の評価—」『川崎医療福祉学会誌』Vol.12, No.1, pp.103-107.
- 中村和男・小林實（1984）「交通環境における歩行行動」『国際交通安全学会誌』Vol.10, No.5, pp.300-313.
- 日本火災学会編（2002）『火災と建築』共立出版株式会社.
- 村田伸・忽那龍雄・北山智香子（2004）「最適歩行と最速歩行の相違」『理学療法科学』Vol.19, No.3, pp.217-222.
- 森山修治・長谷見雄二・小川純子・佐野友紀・神忠久・蛇石貴宏（2009）「大規模地下街における避難行動特性に関する実験研究：実験概要と避難経路・避難出口の選択性」『日本建築学会環境系論文集』Vol.74, No.637, pp.233-240.
- 守屋忠雄・渡辺彰夫（1967）「上階への煙の滞留ならびに拡散」『火災』Vol.17, No.3, pp.19-23.
- Daito, M. and Tanida, N. (2009) "Effectiveness of Cellular Phone with Active RFID tag for Evacuation: The Case of Evacuation from the Underground Shopping Mall of Tenjin," *International Journal of Humanities and Social Sciences*, Vol.3, No.1, pp. 72-83.
- Helbing, D., Farkas, I. J. and Vicsek, T. (2000) "Simulating Dynamical Features of Escape Panic," *Nature*, Vol.407, No.6803, pp. 487-490.
- Rotton, J., Shats, M. and Standers, R. (1990) "Temperature and Pedestrian Tempo: Walking without Awareness," *Environment and Behavior*, Vol.22, No5, pp.650-674.