

2013年度 卒業論文

大規模地下空間の避難シミュレーション
ー危機迫る梅田地下街からの脱出ー

2010年度入学

18100043 堀口 真実

主担当教員 大田 靖 助教

副担当教員 西倉 実季 助教

2013年12月20日

同志社大学文化情報学部文化情報学科

2013年度 卒業論文

大規模地下空間の避難シミュレーション
ー危機迫る梅田地下街からの脱出ー

同志社大学文化情報学部文化情報学科

18100043

主担当教員 大田 靖 助教

副担当教員 西倉 実季 助教

2013年12月20日

要 旨

近年南海トラフ巨大地震という言葉をよく耳にするようになった。2011 年 3 月 11 日に 15,000 名以上もの死者を出した東日本大震災が発生してからはその危険性を訴える声は更に強くなった。もし南海トラフ巨大地震が発生した場合、大阪府内で最大 13 万人が死亡するとの見解もあり、大都市の混乱は日本にとって未知の領域である。1 日に 250 万人が利用し、7 駅 12 路線が乗り入れる西日本最大のターミナルであるといわれる梅田は 85,000m² を超える大規模地下空間を抱えている。梅田の地下街は駅間の連絡、ショッピング、ビジネスビルの入り口といった多種多様な役割を担う空間であるため非常に複雑であり、緊急時に混乱を招くことが予想され危険視されている。本研究では梅田の地下街のうち特に混乱が予想される通行の多い区域を対象とし、artisoc というシミュレーションソフトを用いて仮想空間上にシミュレーションモデルを作成した。それらのモデルは被災時の人間の心理特性や性差による歩行速度の差、電車からの避難者や階段の特徴を考慮することで、より現実に近付けた。できあがったモデルを電車の乗客・階段の特徴・浸水状況に着目し【電車の乗客:有・ドア付階段:有・時間経過での浸水:有】という基準パターンとそれぞれの条件を変えた全 6 パターンを 10 試行ずつ行い全 60 回のシミュレーションデータを取得した。そして得られた避難時間の分散分析と避難率の差の検定の結果から避難に影響を及ぼす要因は人の力や速度といった避難者の属性ではなく、避難を開始した区域の混雑度や階段数といった場所の特性であることが分かった。そこで、エリアごとの避難率のデータを踏まえて梅田地下街のハザードマップを作成することにより、エリアごとの危険性を視覚的に捉えやすくした。

目 次

第 1 章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.1.1	研究の背景	1
1.1.2	研究の目的	2
1.1.3	研究の手順	2
1.2	避難シミュレーションの必要性	2
第 2 章	事前調査	3
2.1	現状	3
2.1.1	東日本大震災での津波被害	3
2.1.2	地下空間の問題点	3
2.2	先行研究	5
2.2.1	地下の避難に関する研究	5
2.2.2	artisoc を用いた避難シミュレーションモデルに関する研究	6
2.3	避難行動に関する調査	6
2.3.1	人間の歩行速度	6
2.3.2	災害時の行動と心理特性	7
第 3 章	避難行動シミュレーションの構築	8
3.1	シミュレーションソフト artisoc	8
3.1.1	artisoc の使用について	8
3.1.2	artisoc の世界と基本的な要素	8
3.1.3	artisoc の流れ	8
3.2	対象施設の設定	9
3.3	システムの詳細設定	10
3.3.1	距離の設定	10
3.3.2	時間の設定	10
3.3.3	歩行速度の設定	10
3.4	エージェントのルール設定	10
3.4.1	壁エージェント (wall)	10
3.4.2	人エージェントの詳細設定	11
3.4.3	階段エージェント (outside,useless)	14

第4章 様々なパターンにおける検証	15
4.1 条件の設定	15
4.2 パターン	15
4.3 分析結果	16
4.3.1 単純集計	16
4.3.2 パターン間の比較	17
4.4 考察	19
4.5 ハザードマップの作成	20
4.5.1 ハザードマップについて	20
4.5.2 エリアごとの未避難率から見るハザードマップ	21
第5章 おわりに	22
謝辞	23
参考文献	24

第1章 序論

1.1 はじめに

1.1.1 研究の背景

近年南海トラフ巨大地震という言葉をよく耳にするようになった。2011年3月11日に15,000名以上もの死者を出した東日本大震災が発生してからはその危険性を訴える声は更に強くなった。もし南海トラフ巨大地震が発生した場合、津波は満潮時には最大で6.9mに達する恐れがあり、大阪も甚大な被害に見舞われると考えられている。内閣府が2013年3月18日に発表した「南海トラフ巨大地震の被害想定(第二次報告)」によると、この地震では、最大で死者323,000人、倒壊家屋2,386,000棟という数字が算出されている。この数値は東日本大震災の教訓を踏まえ、千年に一度の最悪の事態を想定した場合ではあるが、史上最大の被害を引き起こした2004年のスマトラ島沖地震の約280,000人を大きく上回っており、東日本大震災の20倍近い数字である。その中での大阪の死者は7,700人と推定されており割合は高くないが、その想定とは別に大阪府が独自で試算し2013年10月30日に公表した被害想定では、大阪府内で最大130,000人が死亡するとの見解もあり、被害想定や大都市の混乱は日本にとって未知の領域である。

私が卒業後働く予定の企業は大阪市の大正区に位置しており、この地域は大阪府が公表した津波浸水想定によると南海トラフ大地震が発生した場合の最大津波高が4.6メートルになると想定されている。これは大阪府では4番目に高い数値であり、就職活動を機に地震による津波と避難について深く関心を持つようになった。また、通勤に使う予定である大阪の中心地梅田のある大阪市北区は先述の津波浸水想定では浸水面積3,220,000m²、浸水深は最大2mとされている。しかし今回の想定では地下街への流水の浸入やその影響は考慮していないため、浸水面積の更なる拡大が予想できる。大阪の代表的な地下街である梅田の地下街は、ホワイティうめだ、ディアモール大阪、ドージマ地下センターといった複数の地下街が繋がっており、上記3点の地下街だけでも78,000m²を超える。さらに、ハービス OSAKA や阪急三番街といったビルの地下階も一体化しているため、それらの商店数をすべて合わせると1,200店舗を超え、1日に約40万人が往来する非常に大規模な建造物である。更に梅田の地下街は駅間の連絡、ショッピング、ビジネスビルの入り口といった多種多様な役割を担う空間であるため非常に複雑であり、目的地へ辿り着くのは容易ではなく、異なった通路や出口へ辿り着いてしまうことも少なくない。そのような場所にいる時にもし巨大な地震が発生した場合、周囲がパニックになっている中で安全な出口を判断し避難することは可能だろうか。自分自身が被災者になるという可能性もあり、自身や梅田の地下街を使う人々の安全

を確保するために何かできることはないかと考えた結果、避難シミュレーションにより安全を確保できる出口をすぐに見つけだせるような仕組みづくりに貢献していきたいと考え、本研究を進めて行くこととした。

1.1.2 研究の目的

本研究は仮想空間上に梅田の地下街を作り、シミュレーションを行って得られたデータを用いて統計的に分析し、適切な避難誘導を明らかにすることを目的とする。

1.1.3 研究の手順

本研究では梅田の地下街のうち特に混乱が予想される通行の多い区域を対象とし、避難行動を観測していく。また、被災時の人間の心理特性を追加するとともに性別による速度の差を考慮し、より現実に近い人間らしい行動に近付ける。さらに既往の研究では考慮されていない電車からの乗客や階段の特徴を考慮することで空間もより現実に近付けモデルを作成していく。最終的には作成したシミュレーションモデルに対して複数の条件下でシミュレーションを行い、その結果に対し比較分析を行うことで、諸条件と避難行動との関連性を明らかにし、より安全で素早い避難策を検討する。本研究の構成は、以下の通りである。

第1章の残りでは避難シミュレーションの必要性についてを述べる。

第2章ではシミュレーション上の各エージェントに与える行動ルールを定義していくために必要な浸水時の人間の歩行速度や行動特性、心理特性、避難行動に関する事前調査について述べる。

第3章では実地調査と事前調査をもとにシミュレーションモデルにどのような設定、ルールを与え構築したかを述べていく。

第4章では出来上がったモデルを用いた様々なパターンにおける試行結果について述べる。

1.2 避難シミュレーションの必要性

本来災害時の避難行動を分析するには災害時の状況を再現し、実験を行う必要があるが、津波浸水を想定した状況を作り出し実験を行うことは、梅田の地下街のような大規模な場所では通行を一時的に止めることもできず現実的ではない。それに対して、避難シミュレーションによる分析では、津波浸水時における空間や人間の行動特性を考慮した避難モデルを作成しておくことにより、時間を選ばず安全に実験を行えるという利点を持っている。また、シミュレーションは様々な条件下で繰り返し実験を行うことができるため、比較分析を行いやすい。このような利点をいかし、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点が本研究で避難シミュレーションを用いた理由である。

第2章 事前調査

2.1 現状

2.1.1 東日本大震災での津波被害

東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)はマグニチュード9.0という国内観測史上最大の地震となり、宮城県栗原市では震度7を記録した。地震に伴い発生した津波は北海道から関東にまで押し寄せ、漁船や港湾施設、住宅地・農地をのみこみ甚大な被害をもたらした。浸水面積は宮城県、福島県などで561km²におよび、死者と行方不明者の合計は18,550人である¹。内閣府の調査によると震災による死因の9割以上が溺死であり、他の大きな地震とは大きく異なる(図2.1, 2.2)。また内閣府が陸地に浸水した津波の高さに応じた死亡率を分析したところ、浸水70cmで71.1%, 1mで100%に達した。

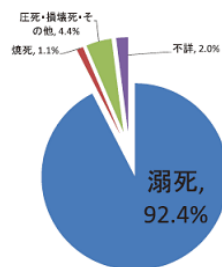


図 2.1: 東日本大震災死因

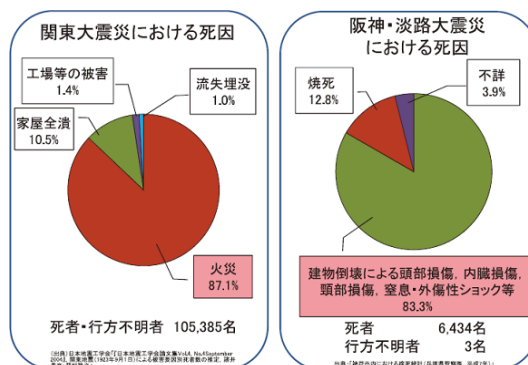


図 2.2: 他の震災の死因

2.1.2 地下空間の問題点

雨風などの気候による影響や交通事故といった危険が少なく快適である地下街であるが、世界では1987年ロンドン・キングスクロス駅のエスカレーター火災(死者31人)、2003年韓国大邱広域市の地下鉄火災(死者192人)、日本では1980年の静岡駅前地下街爆発事故(死者15人)、1995年の地下鉄サリン事件(死者13人)といった地下で発生した災害によって多くの命が失われており、地下空間において災害が発生した場合、被害が拡大しやすいことが

¹2013年3月時点・警察庁調べ

指摘されている。また水の災害としては、1999年6月に九州北部で発生した集中豪雨により、福岡市で地上に氾濫した水が地下へ流入した(図2.3)。また、2000年9月には東海地方で集中豪雨が発生したことにより、各地で土砂災害や床上・床下浸水の被害に見舞われ、名古屋市では地下空間に水が流入し、都市機能が麻痺した。更に2013年8月には大阪市で1時間に49ミリの雨が降り、梅田駅周辺が広範囲に冠水し、その影響により地下にあるJR北新地駅は、雨水が流れ込んだことにより一部改札口を一時閉鎖した(図2.4)。このように集中豪雨などによる地下浸水は数多く発生し、その度に都市機能に影響を与えてきた。東京都都市整備局では、地下空間の危険性について以下の点を挙げている。

1. 地上の状況が分かりにくく避難等の判断が遅れがちになる
2. 避難路が浸水流入経路と重なり、避難が困難となる
3. 水圧でドアが開かなくなり、脱出できなくなる可能性がある
4. 浸水により地下の電気設備が停止すると、停電(暗闇)、エレベータ閉じ込め、防火扉の閉鎖等が発生し、避難困難となる

今回梅田の地下の実地調査を行った際に避難路である階段を調べた結果、ドア付の階段が頻繁に見受けられた(図2.5, 図2.6)。その数は、今回シミュレーションを行う範囲80ヶ所の階段の実に23ヶ所に及んでいる。さらにそれらは火災発生時を考慮して、室内から押し開ける向きにドアが取り付けられている。つまり津波が押し寄せた場合約3割の階段では、上記の3の様にドアが開かなくなり使用できなくなる可能性があるといえる。



図 2.3: 福岡の冠水 (1999 年)

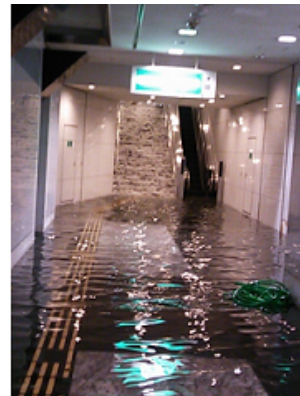


図 2.4: 梅田の冠水 (2013 年)



図 2.5: ドア付階段の例 1

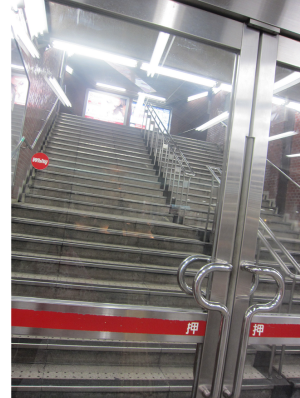


図 2.6: ドア付階段の例 2

2.2 先行研究

2.2.1 地下の避難に関する研究

「群集シミュレーションを用いたターミナル駅地下空間における避難安全確保対策の検討」
山田武志・大森高樹・廣井悠・福井潔，2013

山田 (2013) らは新宿駅を参考にした地下大規模ターミナル駅を作り，より円滑な避難を実現するための避難誘導施策を設定し，群集流動シミュレーションを用いて施策の効果を検証した．その結果各地上出口が均等に利用されるように避難誘導を実施することが有効であることを明らかにし，改札口で退出規制をすることが必ずしも有効ではないことを示している．しかしながらこのシミュレーションでは，水流による歩行速度の低下やドアの開けにくさ，階段の昇りにくさといったものは考慮されていない．

「地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用」大西良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一，2007

大西 (2007) らは水槽とドアを用いて男女それぞれの避難可能なドア前面水深について調べている．その結果ドア前面の水深が男性で 0.35m，女性で 0.3m 以内に避難しなければ，地下室などからの自力避難は非常に困難になるという実験結果を報告している．避難に成功した場合の所要時間は男女問わず 10 秒以内であり，一方避難をあきらめる時間は数秒～1 分程度までと個人差があるが，30 秒を超えると 8 割以上の人が避難をあきらめていた．また同研究では階段模型 (全 20 段，踏み板長さ 0.3m，蹴上げ高さ 0.15m) を用いて階段を昇れる水深についても実験を行い，成人の男女の場合，地上水深 0.3m が階段を利用した避難の限界であるとみなすことが妥当であるという結果を報告している．

「可搬式ドア模型を用いた地下空間浸水時の安全避難に関する実験的検討」中畑佳城・中西健太・石垣泰輔・島田広昭, 2008

中畑 (2008) らはドアの開扉や歩行速度の低下を考慮したモデルを作り 3 層構造の仮想地下空間浸水時に浸水に気付かず, 地下室に取り残された状況からの避難をシミュレーションした. その結果, 同じ時間から避難を開始しドアを開けることに成功しても, 性別によって避難時間に大きな影響を及ぼすことがわかった. 男性は 16 歳以上が 0.5m 未満で避難が可能であるのに対して, 発育途中である 11~15 歳でドア前水深が 0.4m 未満のとき避難が可能であることがわかった. 女性は, 11~15 歳と 16~65 歳が共に 0.4m 未満で避難が可能という結果が得られた. この研究は先述の山田の研究とは異なり, 地下の空間は非常に簡素なつくりとなっている.

2.2.2 artisoc を用いた避難シミュレーションモデルに関する研究

「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」鎌田智之, 2008

鎌田 (2008) は, 介護保険施設を対象に火災時における避難シミュレーションモデルを作成し, 入所者と職員間での歩行速度や行動規定の異なるモデルを作成することで, シミュレーションをより現実の災害時の避難行動に近づけている.

「災害時の避難シミュレーションー夢告館を効率よく脱出するためにー」藤井達也, 2012

藤井 (2012) は, 同志社大学夢告館を対象に従来のモデルに日常導線志向性・至近距離選択性・向開放性といった人間のパニック行動や災害時の心理特性を追加したモデルを作成した. また, それらのモデルで実際の教室の収容人数に合わせランダムに初期人数を配置したものを 60 パターン作成し検証を行った. その結果を重回帰分析し, 避難完了時間に影響を与える教室を危険な教室と定義し, ハザードマップを作成した.

2.3 避難行動に関する調査

2.3.1 人間の歩行速度

[9] によると, 人の歩行速度は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, 男女差はほとんどないとされている. 浸水時においては, [15] より浸水時の単位幅比力²は男性で $0.125\text{m}^3/\text{m}$, 女性で $0.100\text{m}^3/\text{m}$ が避難限界値であるとされており, その際の歩行速度は [14] によると男性で通路時に 0.6~0.8m/s, 階段時に 0.5m/s であり, 女性で通路時に 0.5~0.6m/s, 階段時には 0.38m/s であるとされている.

²単位幅に作用する水圧と流体力. 単位幅比力 = $u^2h/g+h^2/2$ (u:流速 h:水深 g:重力加速度)

2.3.2 災害時の行動と心理特性

[12] 中での意識調査では、地下水深が「2cm 未満」で避難すると答えた人が 34 %、「2～10cm」が 52 %であった。つまり「2cm 未満」と回答した人を除く過半数の人は、わずかに水が流入したくらいでは、浸水に気付いてもすぐに避難を始めないということがわかる。また同研究で「地下から避難する際には階段を昇る必要があるが、地上の水深がどの程度まで階段を利用して避難可能であると思うか」との質問に対し、半数以上が「分からない」と回答しており地上水深に対する階段部の様子をイメージできない人が多いことがわかる。これらのことから、火災などの災害に比べ浸水は階段部や地上の状況をイメージすることが難しく避難に出遅れる可能性があることがわかる。

また本研究では避難モデルの作成において、[18] を参考に至近距離選択性³、向開放性⁴、易視経路選択性⁵の 3 点の心理特性を避難モデルに取り込んでいくこととする。

³最寄りの階段等を選択したり、近道をしようとする傾向

⁴開かれた感じのする方向へ逃げようとする傾向

⁵最初に目に入った経路、あるいは目につきやすい経路を選ぶ傾向

第3章 避難行動シミュレーションの構築

3.1 シミュレーションソフト artisoc

3.1.1 artisoc の使用について

本研究にてシミュレーションを行うために構造計画研究所が開発した artisoc というソフトを用いる。artisoc で使われているプログラミング言語は Visual Basic を基に構成されており直感的なプログラムで仮想空間を作ることができる。artisoc のモデルは空間とエージェントで構成されており、今回は 800×574 の長方形の空間で地下街を再現し、人・階段・壁といったエージェントを作りそれぞれに別々のルールを適用した。

3.1.2 artisoc の世界と基本的な要素

artisoc では X,Y 座標の格子状のセルで仮想空間を作り、一定数の step を繰り返すことで時間の流れを表現している。artisoc におけるマルチエージェントモデルは以下の要素から構成される。

- エージェント

行動主体となるものであり、例として人や階段が挙げられる。

- 変数

エージェントの属性を表し、例として性別などが挙げられる。

- ルール

エージェントの行動内容を命令することができる。階段を見つけたら近づくといったルールが作れる。

- 空間

エージェント同士の関わりあう場所である。本研究では梅田の地下街を表現している。

3.1.3 artisoc の流れ

artisoc でシミュレーションを行う際には、以下の3つのプロセスが必要である。

1. モデルの枠組みである空間・エージェントの配置

2. エージェントへのルールへの付与

3. シミュレーション結果の出力表示設定

本研究では、これらの構築順序を踏まえた上で、シミュレーション構築を進めていくこととする。

3.2 対象施設の設定

本研究では梅田の地下街の中でも JR 大阪駅以南、泉の広場以西、東梅田駅以北、西梅田駅以東の横に約 600 m、縦に約 430 m の区間をシミュレーションの対象としている。その区間での階段は 80ヶ所あり、そのうちドア付の階段は 23ヶ所に及ぶ (図 3.1, 赤丸)。また、対象区間内には地下鉄御堂筋線梅田駅、谷町線東梅田駅、四つ橋線西梅田駅、阪神電車梅田駅の 4ヶ所の駅が存在し、それぞれに改札口が複数あった (図 3.1, 緑丸)。また混雑度合もエリアごとに異なっていた。具体的に述べると、最東端に位置する泉の広場付近では飲食店が立ち並ぶが、通勤ラッシュの時間帯にはあまり混雑はみられない。また大丸の北にはクロストというショッピングモールが通路とつながっているが、駅間の移動といった通路としての利用が多くないため混雑が少なく。それに対し、複数の百貨店に囲まれ阪神梅田駅、地下鉄御堂筋線梅田駅といった駅の改札も存在している地域では通勤ラッシュ時に駅間の移動で多くの人々が行き交い混雑度が非常に高く、流れに反して歩行する場合や交差時において衝突の可能性が高い。

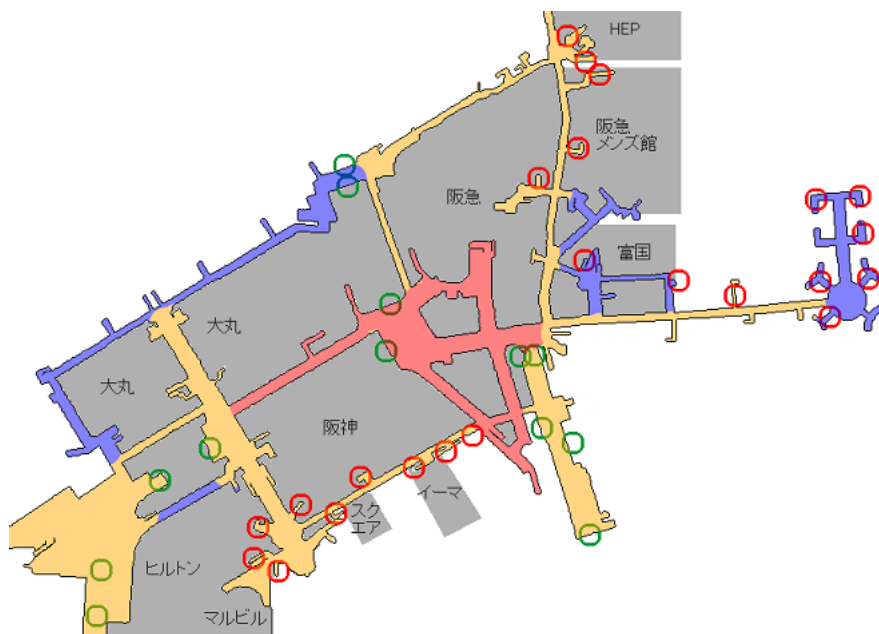


図 3.1: 対象区域とドア付階段・駅改札口・混雑度

3.3 システムの詳細設定

マルチエージェントモデル構築のポイントとなってくるのが現実世界を詳細に再現することである。本研究において現実世界を再現するために設定した詳細条件を以下に記す。

3.3.1 距離の設定

モデル内では1セルを約 $1.3\text{m} \times 1.3\text{m}$ と定義し、 800×574 セルで空間を表現する。

3.3.2 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 1step を現実世界の 1 秒であると定義する。また、一番の混雑が予想される通勤ラッシュの 8 時台の 10 分間での避難を前提としているため、通常 600step でシミュレーションを終了させる。

3.3.3 歩行速度の設定

人の歩行速度は前述より男性が通常時で $1.2\text{m/s}(0.9/\text{step})$ 、浸水時で $0.8 \sim 0.6\text{m/s}(0.6 \sim 0.525/\text{step})$ 、女性が通常時で $1.2\text{m/s}(0.9/\text{step})$ 、浸水時で $0.6 \sim 0.5\text{m/s}(0.45 \sim 0.375/\text{step})$ であることから、これに合わせて人エージェントの歩行速度を設定する。また、浸水時の速度は時間の経過とともに遅くなる。

3.4 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は全部で 4 種類である。

- 壁エージェント (wall)
- 人エージェント (people)
- 階段エージェント (outside)
- 階段エージェント (useless)

以上の 4 つが存在する。各エージェントのルールについては以下で述べる。

3.4.1 壁エージェント (wall)

artisoc 上にある初期値設定にて梅田地下街の地図を背景に壁エージェントをドットで打ち込んだ。人エージェントは与えられたプログラムによって設置された壁エージェントを避けるよう行動していく。

3.4.2 人エージェントの詳細設定

人エージェントの配置と人数は図 3.2 のコントロールパネルにより決めることができ、配置された人エージェントは、出口を目指すように設定されている。基本的には最短距離で階段を目指すとするが、他の人エージェントや壁などの環境により行動が変化していく。

また、人の属性を補助する役割を担う変数として、

- 性別変数 (sex)
- スキル変数 (skill)
- 場所変数 (area)
- 避難変数 (escape)
- 電車変数 (train)
- 避難時間変数 (et)

以上の 6 つが存在する。

マーケットストリート 240	ヒルトン下 40	イーストモール 360
センターモール 480	阪神東 360	阪神西 120
阪急東 120	阪急西 240	クロスト 120
泉の広場通路 50	ホワイティ 120	ノースモール1 120
ノースモール2 40	ノースモール3 90	東梅田駅 300
サウスモール 450	阪急左通路 180	阪神右通路 300
円形広場 600	大丸左通路 40	ヒルトン 180
ヒルトン2 180	阪急阪神間道路上 240	阪急阪神間通路下 240
泉の広場 50	フロートコート右 60	富国生命ビル 20

図 3.2: コントロールパネル

混雑度の設定

[9] より、混雑指標は以下のように設定されている。

- 混雑レベル 1 (0.1 人/m^2) : 追い越しができる程度 (図 3.1, 3.2, 青)
- 混雑レベル 2 (0.3 人/m^2) : 交差時に衝突がわずかにある (図 3.1, 3.2, 黄)

- 混雑レベル 3 (0.5 人/m²) : 交差時に衝突がかなりある (図 3.1, 3.2, 赤)

実地調査で混雑の少なかったエリアはレベル 1, 混雑していたエリアはレベル 3, それ以外のエリアはレベル 2 とし人を配置した.

性別変数

[6] の「労働力調査」(2011)によると, 雇用総数に占める女性の割合は 42.7 %であることから本研究での男女比も 57:43 とする. 人エージェントの性別変数は 57 %の確率で 0, 43 %の確率で 1 となり, それぞれの人エージェントを 0 ならば青色, 1 ならば赤色で表示させる.

スキル変数

スキルとは人の力の強さをあらわす属性であり, [12] を参考にスキルは以下の 5 段階で設定した.

- スキル 1 : 地上浸水 30cm までならドアを開けることができ, 早い段階で歩行速度が下がる (女性の 20 %)
- スキル 2 : 地上浸水 35cm までならドアを開けることができ, 早い段階で歩行速度が下がる (女性の 30 %)
- スキル 3 : 地上浸水 40cm までならドアを開けることができ, 中盤で歩行速度が下がる (男性の 10 %, 女性の 40 %)
- スキル 4 : 地上浸水 45cm までならドアを開けることができ, 中盤で歩行速度が下がる (男性の 40 %, 女性の 10 %)
- スキル 5 : 地上浸水 50cm までのドアなら開けることができ, 終盤で歩行速度が下がる (男性の 50 %)

場所変数

人エージェントがシミュレーション開始時にスタートしたエリアを場所変数にて格納する. エリアは 35ヶ所に分類している (図 3.3).

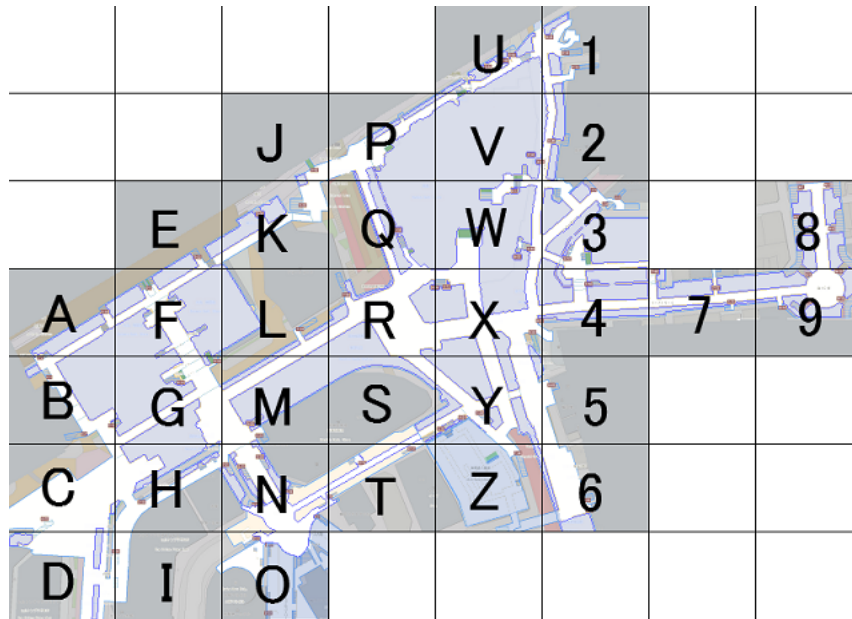


図 3.3: エリア

電車変数

駅からの避難者かどうかと、どの駅の何本目の電車から避難したかを電車変数にて格納する。駅からの避難者数は [7] による車両定員・混雑率・車両編成のデータから 1 本当たりの乗客数を導き設定した。御堂筋線は $140 \text{ 人} \times 1.443 \times 10 \text{ 両}$ となり、1 本の電車に 2,020 人が乗車している。谷町線は $140 \text{ 人} \times 1.01 \times 6 \text{ 両} = 848 \text{ 人}$ ，四つ橋線は $140 \text{ 人} \times 0.836 \times 6 \text{ 両} = 702 \text{ 人}$ ，阪神本線は $133 \text{ 人} \times 1.15 \times 6 \text{ 両} = 917 \text{ 人}$ が乗車しているという計算になる。その中で例えば御堂筋線は 18ヶ所の出口の中から対象区内には 3ヶ所の出口があるため、約 330 人の乗客が流れ込む。したがって、それらの各出口から 11 秒間かけて毎秒 10 人の人エージェントをモデル内に送り込む。

また、本研究では上記の駅から上下線 2 本の乗客者が時間差で避難することを想定したため、合計 8 本の電車の乗客が対象区内に出現する。

避難変数

避難変数は人エージェントが避難できたかどうかを 0 と 1 で表現している。

避難時間変数

人エージェントが避難できた場合に、避難した時間を格納する。

3.4.3 階段エージェント (outside,useless)

階段エージェントは視野 1 の範囲で人エージェントを認識し，人エージェントが 1 つ以上存在したらランダムで 1 つ選び，消す (避難させる). また，階段エージェントには outside と useless の 2 種類が存在する.

outside

一般的な階段であり，浸水時も使うことができるが，時間経過とともに避難速度は遅くなっていく.

useless

ドア付の階段であり，時間経過とともに避難速度が遅くなるだけでなく使用ができなくなる.

第4章 様々なパターンにおける検証

4.1 条件の設定

本研究では電車の乗客・階段の特徴・浸水状況に着目し試行パターンの条件を決定した。

電車の乗客

電車の乗客が出現する場合は開始から2分後と4分後に計5,156人の乗客が各改札口から分かれて空間に出現する。電車の乗客が出現しない場合の避難者は空間にスタート地点から存在する5,790人のみである。

ドア付階段

ドア付階段を考慮する場合は、ドア付階段を使用する避難者の避難完了時間が浸水状況の変化に伴い遅くなり、時間の経過とともに使用不可能者も出現する。また、ドア付階段が使用不可の場合、避難者は通常の階段の中から最短距離にある階段へ避難する。

時間経過での浸水

浸水がある場合は100秒に10cmの浸水があると想定し、時間経過によって避難者の歩行速度が低下する。

4.2 パターン

1つのモデルを基準とし、条件を変えた全6パターンのシミュレーションを行い比較する。条件は以下の通りである。

- タイプA：電車の乗客：有・ドア付階段：有・時間経過での浸水：有
- タイプB：電車の乗客：有・ドア付階段：通常階段と同じ・時間経過での浸水：有
- タイプC：電車の乗客：有・ドア付階段：有・時間経過での浸水：無
- タイプD：電車の乗客：有・ドア付階段：使用不可・時間経過での浸水：有
- タイプE：電車の乗客：有(出口別)・ドア付階段：有・時間経過での浸水：有

- タイプ F：電車の乗客：無・ドア付階段：有・時間経過での浸水：有

タイプ A を基準とし，タイプ B とタイプ C では人の性別，スキル，歩行速度といった要因により避難に差があるのかを検証し，タイプ D とタイプ E，タイプ F ではエリアの混雑度，階段の数といった場所の特徴により避難に差があるのかを検証する．6 パターンを 10 試行ずつ行い全 60 回のシミュレーションデータを取得した．

4.3 分析結果

4.3.1 単純集計

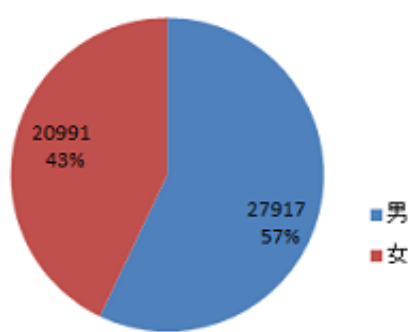


図 4.1: タイプ A の避難完了者の男女割合

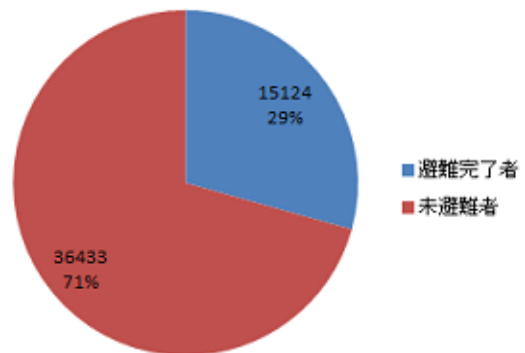


図 4.2: タイプ A の駅からの避難者の避難率

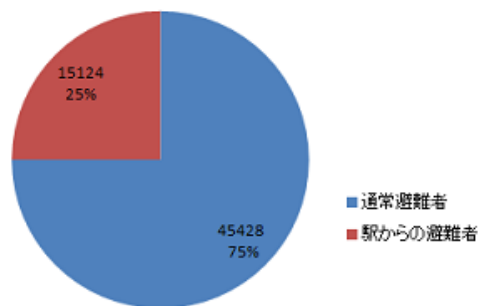


図 4.3: タイプ A の駅の避難者の割合

図 4.1 によると避難完了者の男女比は 57:43 であることがわかる．避難者全体の男女割合は先述の通り 57:43 であるため，避難完了者と未避難者での性差はないといえる．

駅を起点とした避難者の中で避難完了者は 29 % と低く (図 4.2)，全体の避難完了者の中でも見ても 25 % と非常に低い (図 4.3)．これは駅からの避難者が他の避難者に比べ避難を開始する時間が遅いことに起因している．

4.3.2 パターン間の比較

ここからは基準のタイプ A と他の 5 パターンを比較していく。また、途中から空間に出現する駅からの避難者は避難に不利な条件であるため、比較分析からは除く。

平均避難時間と分散分析

600 ステップ内に避難した人のみを抽出し、各パターンの避難時間の平均値をもとに分散分析を行った。その結果 p 値が 0.05 以下で有意差があったため、更に避難時間を目的変数として多重比較を行った。多重比較によって算出されたグラフが図 4.5 である。

パターン	平均避難時間 (秒)
タイプ A	173.49
タイプ B	174.37
タイプ C	174.19
タイプ D	194.58
タイプ E	195.31
タイプ F	179.04

図 4.4: パターンごとの平均避難時間

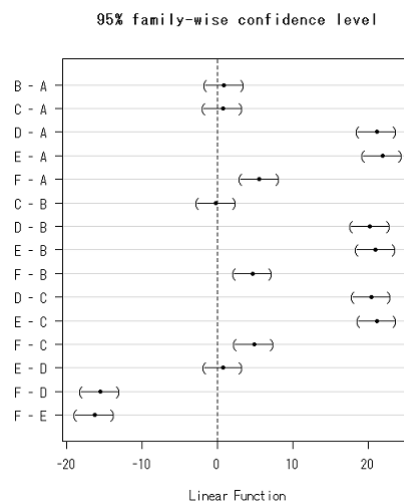


図 4.5: 避難時間の多重比較

タイプ A と有意差があるパターンはタイプ D ($P \ll 0.05$), タイプ E ($P \ll 0.05$), タイプ F ($P \ll 0.05$) である。いずれのパターンもタイプ A より避難時間が遅いことが分かる。

避難率の比較

避難の可否を目的変数とし、比率の差の検定を行うことにより A タイプとそれ以外のタイプで避難率に有意差があるのかを求めた。

タイプ A と有意差があるパターンはタイプ D ($P=0.00000004516$), タイプ E ($P \ll 0.05$), タイプ F ($P \ll 0.05$) である。タイプ D ではタイプ A より避難率が低いのに対し、タイプ E, タイプ F はタイプ A よりも避難率が高い。

パターン	避難率 (%)	未避難率 (%)
A	78.5	21.5
B	78.5	21.5
C	78.3	21.7
D	77.1	22.9
E	84.2	15.8
F	81.4	18.6

表 4.1: 各パターンの避難率

時系列でみた避難人数のヒストグラム

平均避難時間・避難率において有意差があったタイプ D、タイプ E、タイプ F の時間帯ごとの避難完了者のヒストグラムを作成した。さらにそれぞれをタイプ A のヒストグラムに重ねて比較したグラフが以下になる。グレー部は避難完了者数が重なっている部分であり、色がついている部分がどちらかの避難完了者が多い時間帯である。基準となる A が比較パターンよりも避難完了者の多い時間帯はピンク、比較パターンの方が避難完了者の多い時間帯は青、緑、橙であらわした、

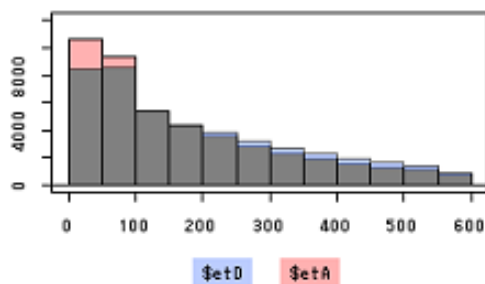


図 4.6: ヒストグラムの比較 (A と D)

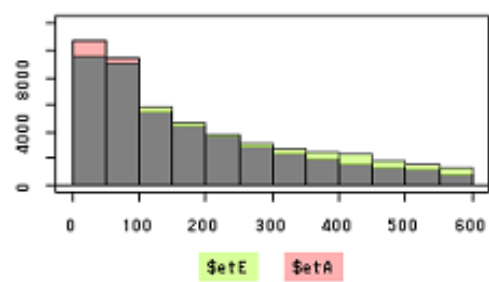


図 4.7: ヒストグラムの比較 (A と E)

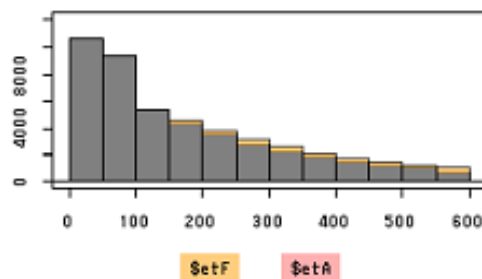


図 4.8: ヒストグラムの比較 (A と F)

これらから、タイプD、タイプEでは避難開始後すぐの時間帯での避難者数が少なく、中盤から終盤にかけてはタイプAに比べ避難者数が多いことがわかる。また、タイプFでは序盤は変わらないが、中盤からは避難完了者数が多いことがわかる。

4.4 考察

平均避難時間と避難率から比較した際タイプA、タイプB、タイプCには有意差がないことから歩行速度は避難の可否にそれほど影響を及ぼさないことがわかる。

また、タイプDは平均避難時間・避難率ともにタイプAよりも劣ることから、使用できる階段を規制することは避難の可否に影響を与えているといえる。ただし、ヒストグラムを見ると中盤以降の避難完了者はタイプAよりも多い。タイプAとタイプDとの違いがドア付階段の規制の有無のみであることから、この中盤で多くなる避難完了者はタイプAに多く発生していた序盤でいち早く避難した避難完了者のうちの一部であるといえる。つまりドア付階段が存在する区域は序盤での避難においては一時的な混雑が発生するが、本来の混雑度自体は低い区域が多いため、慢性的な混雑エリアにはならず10分以内での避難自体が不可能になるほどではないと推測される。

タイプE、タイプFはタイプAに比べ避難率が高いにもかかわらず、平均避難時間は遅い。そこでヒストグラムから比較してみると、タイプEの場合は序盤では使用できる階段が少ないため、タイプAに比べ避難完了者数は少ない。しかし電車の乗客の避難者が現れる中盤以降になると、タイプAでは電車の乗客の避難者と同じ出口を使用するため出口が混雑するのに対し、タイプEは別の出口を使用するため電車の乗客の避難者の影響をあまり受けない。そのことにより、終盤までの間常に混雑をしている特定のエリアにおいては避難が滞っているタイプAに比べると、タイプEは避難に滞りが少なく避難完了者が終盤まで多かったと考えられる。また、タイプFの場合は電車の乗客が出現しないことにより、混雑エリアでも終盤まで継続的に避難完了者数が増加した。そのため、平均避難時間がタイプAより遅くなったと考えられる。

このことから避難率は人の力や速度といった避難者の属性ではなく、避難を開始した区域の混雑度や階段数といった場所の特性に起因しているといえる。つまり災害が発生した場合に避難者は自分のいるエリアがどのような場所であるかをいち早く認識する必要がある。そこで、エリアごとの避難率データを踏まえてハザードマップを作成した。

4.5 ハザードマップの作成

4.5.1 ハザードマップについて

ハザードマップとは災害の被害が予想されるエリアに場所・危険度などを示した地図である。本研究では浸水時の危険度を未避難率の視点から4段階に分類した。危険度の設定については、先述した全35ヶ所のエリアの未避難率が0～5%の区域は危険レベル1、5～30%の区域は危険レベル2、30%～50%の区域は危険レベル3、50%以上のものが危険レベル4とし分類した。その分類が以下の図4.9である。

エリア	Aタイプ	Dタイプ	Eタイプ
A	0	0	0
B	0	0	0.4
C	4.1	4.0	2.0
D	51.3	51.3	33.0
E	0	0	0
F	0.4	0.4	0.6
G	1.0	0.6	0.1
H	1.7	2.0	0
I	0	0	0
J	0	0	0
K	0	0	0
L	9.4	11.1	0
M	1.3	1.2	0
N	7.2	17.9	7.0
O	0.6	1.1	0.3
P	0.2	0.2	0.1
Q	55.0	55.4	42.1
R	63.4	63.5	57.2
S	1.6	0.7	1.5
T	0	28.3	0
U	0.6	0.4	0.7
V	0	0	0
W	9.3	14.6	10.9
X	35.7	35.9	12.8
Y	26.3	29.2	21.8
Z	0	0	0
1	2.5	0.2	2.8
2	0.5	0	0.7
3	0	0	0
4	7.5	7.4	6.9
5	53.2	46.9	64.6
6	6.1	6.7	9.6
7	9.8	0.3	9.2
8	0.7	0	0.5
9	0	0	0

図 4.9: 未避難率の表

4.5.2 エリアごとの未避難率から見るハザードマップ

上記を踏まえ作成したハザードマップが図 4.10 である。

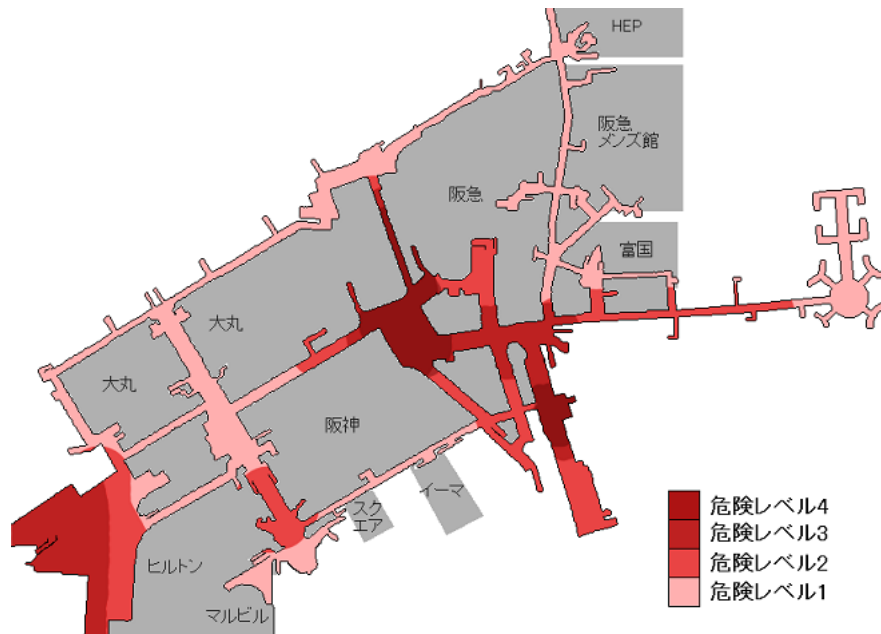


図 4.10: ハザードマップ

一番危険度の高かったエリアは阪急百貨店と阪神百貨店、大丸百貨店といった商業施設に囲まれ阪神梅田駅、地下鉄御堂筋線梅田駅といった駅の改札も存在している。それに加え混雑度の高さに対し、出口となる階段が非常に少ない。そのため、平常時においても混雑度が高く、駅からの避難者が加わることでさらに避難が困難になる。またその少し南に位置する地下鉄谷町線東梅田駅周辺は駅の広さに対し、出口となる階段が3ヶ所しかなく、現在はそのうちの1ヶ所が工事で閉鎖されており2ヶ所のみしか使用できないため、避難時には非常に混雑し避難が遅れる可能性がある。地図上の南西に位置するヒルトン、ハービス OSAKA や地下鉄四つ橋線西梅田駅に囲まれた区域も危険レベルが高い。これも出口となる階段が3ヶ所と少なく、そのうちの2ヶ所が壁により避難者から見えにくい位置にあるため避難が偏ってしまう可能性がある。

第5章 おわりに

本研究では災害が発生した場合の大規模地下空間においてどのような要因が避難に影響を及ぼすかを明らかにするとともに短時間での避難率をあげるための対策法を検討することを目的とし研究を進めた。まず避難行動に関する事前調査を行い、それを踏まえ被災時の人間の心理特性や性差による歩行速度の差、電車からの避難者や階段の特徴を考慮したシミュレーションモデルを構築した。そして電車の乗客・階段の特徴・浸水状況に着目した条件を変更することにより検証パターンを6パターン設定しシミュレーションを試行した。その結果、避難に影響を及ぼす要因は人の力や速度といった避難者の属性ではなく、避難を開始した区域の混雑度や階段数といった場所の特性であることがわかった。また、駅からの避難者が他の避難者の避難完了時間に与える影響が大きいこともわかった。そこで、場所の特性についてはエリアごとの避難率データを踏まえて梅田地下街のハザードマップを作成することにより、エリアごとの危険性を視覚的に捉えやすくした。そして駅からの避難者の影響をできるだけ小さくするために本研究の結果を踏まえ以下に対策法を2点提案する。まず1点目は、電車の乗客を避難させる際には混雑がすでに予想されている梅田駅への避難誘導をしないという対策法である。これは一見不可能なことに思えるが、例えば地下鉄四つ橋線西梅田駅から次の駅である肥後橋駅までは、距離にして1kmである。もし電車がこの2駅の途中を走行している最中に災害が発生した場合電車は停止し乗客は2駅のうちのいずれかへ向かい避難することになるだろう。そのような際には本来なら、より近い駅を選び避難する可能性が高いが混雑が予想される梅田方面の避難をできるだけ避けることにより、乗客の避難を安全に進めることができるのではないだろうか。しかしながら、梅田に100m程度の距離にいるにもかかわらず隣の駅まで歩くのは現実的ではない。そこで2点目の対策法である地下空間に電車からの避難者専用の出口を設定することを提案する。本来駅からの避難者が地下空間に増加することにより局所的な混雑が発生するが、改札口近くの階段を電車からの避難者専用の出口とし、他の避難者の出口と完全に分けることにより混乱を避けることができ、円滑に避難を進めることができるだろう。これらの対策法を災害時の避難誘導に用いてもらい、避難者が先述のハザードマップを指針に危険レベルの高い区域を避けて避難することにより避難率を上げることができると思う。また本研究では通行人と電車の乗客のみを避難者とし研究を進めたが、実際にはショッピングモールや飲食店の従業員、駅のホームで電車を待っている人といった多くの人々が梅田の地下街には存在している。そのような多くの人々が本研究により普段から危険意識を持って行動し、災害時において安全に避難できることを願って止まない。

謝 辞

本論文の作成に当たり，大変忙しい中ご指導いただいた大田靖助教，西倉実季助教に厚く御礼申し上げます．そして，ともに協力し合い切磋琢磨しながら深夜遅くまで卒業研究に取り組んだ広域数理研究室の皆様にはとてもお世話になりました．特に artisoc 班の方々には大変助けられました．本当にありがとうございました．また，最後に卒業まで支えてくれた両親には本当に心から感謝いたします．

参考文献

- [1] 内閣府 『<http://www.cao.go.jp/>』 (2013/12 月現在)
- [2] 大阪府 『<http://www.pref.osaka.jp/>』 (2013/12 月現在)
- [3] 東京都都市整備局 『<http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/>』 (2013/12 月現在)
- [4] 国土交通省九州地方整備局 『<http://www.qsr.mlit.go.jp/>』 (2013/12 月現在)
- [5] 警察庁 『<http://www.npa.go.jp/>』 (2013/12 月現在)
- [6] 総務省統計局 『<http://www.stat.go.jp/>』 (2013/12 月現在)
- [7] 大阪市交通局 『<http://www.kotsu.city.osaka.lg.jp/>』 (2013/12 月現在)
- [8] 山影進 『人工社会構築指南』 (構造計画研究所, 2007)
- [9] 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, 2010)
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 大西良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一 『地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用』 (水工学論文集, 第 52 巻, pp.841-846, 2007)
- [13] 中畑佳城・中西健太・石垣泰輔・島田広昭 『可搬式ドア模型を用いた地下空間浸水時の安全避難に関する実験的検討』 (第 64 回年次学術講演会, pp379-380, 2008)
- [14] 浅井良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一 『高齢者を含めた地下空間浸水時における避難経路の安全性に関する検討』 (水工学論文集, 第 53 巻, pp859-864, 2008)
- [15] 石垣泰輔・戸田圭一・尾崎平・馬場康之・井上和美 『内水氾濫時における大規模地下空間浸水と避難』 (京都大学防災研究所年報第 54 号 B, pp471-476, 2011)
- [16] 山田武志・大森高樹・廣井悠・福井潔 『群集シミュレーションを用いたターミナル駅地下空間における避難安全確保対策の検討』 (土木学会・地下空間研究委員会・地下空間シンポジウム 論文・報告集第 18 巻, pp137-144, 2013)

- [17] 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』(地域安全学会論文集, 第 10 巻, pp.183-193, 2008)
- [18] 藤井達也『災害時の避難シミュレーションー夢告館を効率よく脱出するためにー』(同志社大学文化情報学部 2012 年度卒業論文, 2012)