２０１３年度

修 士 論 文

論題

津波警報時の JR 大阪駅周辺における

避難計画策定支援

指導教員	仲谷　善雄

立命館大学大学院　情報理工学研究科	
博士課程前期課程 情報理工学専攻 計算機科学　　コース	
学生証番号	6611120007-7
氏　　名	石田　涼

概要

地震大国と言われるほど日本では地震が多く発生している。昨今、日本において今後大規模な地震が発生すると予測されているのが、東海・東南海・南海連動型地震と呼ばれる南海トラフ巨大地震や首都直下型地震などである。その中でも特に懸念されているのが、南海トラフ巨大地震である。南海トラフにおいて東北地方太平洋沖地震（M9.0）と同規模の地震が発生した場合、大阪や和歌山、高知などの広い地域で津波の影響を受けて大規模な被害と多数の津波被災者が発生すると予測されている。

中でも高さ 6m の津波が予想されている大阪市では、JR 大阪駅や市内のメインストリートである御堂筋、市役所などが浸水域に入るほか、淀川や堂島川に堤防の決壊があれば市営地下鉄の駅や地下街にも被害が出ることが予想され、ビルや地下街から地上へ膨大な数の避難者が避難し大きな混乱が発生すると危惧されている。したがって、大阪市内における大きな被害を軽減させるためには、このような多様な空間が密集する地域での迅速かつ的確な避難誘導を検討する必要がある。

本論文は避難誘導の分野において、地上・地下・ビルを含む大都市空間における津波警戒時の人々が、安全かつ効率的に避難するための方法を検討するツールを構築し、津波避難ビルの指定、避難誘導方法や防災体制、避難誘導先の選定などに基礎的なデータを提供することを目的とする。提案システムでは、大都市空間における避難者の行動モデルを適用し、避難者数や目的地などを設定することで様々な避難状況を計算機上で模擬できる。本研究では、大阪市北区の JR 大阪駅周辺を対象に提案システムを用いて津波警戒時の人々の避難行動を検証する。その結果、いつ、どの場所で避難者が混雑しやすいのか、避難ルートをどのように変更すれば人の滞留を避けられるか等、これまで明らかでなかった避難行動の具体的な問題点と改善点を示す。また、本システムに対する防災の専門家からの評価結果を示す。

目次

第 1 章　まえがき 1

1.1　研究背景 1
1.2　研究目的と内容 3
1.3　構成 5

第 2 章　関連研究の動向 6

2.1　大規模災害時の大阪市における防災の取り組み 6
2.1.1 大規模災害時における帰宅困難者対策 6
2.1.2 地震に伴う津波発生時の避難 10
2.2　避難誘導システム 11
2.2.1　大規模公共空間のため位置依存型誘導システム 11
2.2.2　屋外における動的な避難誘導システム 12
2.3　エージェントモデルによる災害時避難行動モデル 13
2.3.1　避難行動モデル 13
2.3.2　エージェント型行動モデル 13
2.3.3　エージェント型避難行動モデル 14
2.4　避難行動シミュレーション 14
2.4.1　マルチエージェントシミュレーション 14
2.4.2　津波避難施設設置の評価 15
2.4.3　一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータ 16
2.4.4　津波避難評価システムの構築と社会実装 17
2.4.5　段階的避難誘導法を考慮した避難誘導検討システム 18
2.5 本研究の位置づけ 20

第 3 章　提案の概要 21

3.1　震災時における大阪府の避難計画について 21
3.2　避難行動シミュレーションについて 21
3.3　本システムの提案方法 22
3.4　大阪市北区でのアンケート調査 23
3.4.1　アンケート調査の概要 23
3.4.2　アンケート調査の内容およびその集計結果 23
3.5　本研究で扱う避難シナリオ 26

第 4 章　システム詳細 27

4.1　開発環境 27

4.2 システムの内部仕様 29
4.2.1 対象地域における地理情報 29
4.2.2 対象地下街と津波避難ビルの設定 32
4.2.3 避難者エージェントの定義 36
4.2.4 プログラムの組み込み関数 44
4.3 システムの外部仕様 47
4.3.1 システムのパラメータ設定 47
4.3.2 シミュレーションの全体の流れ 48
4.3.3 避難者の前方密度表現 51
第 **5** 章　評価実験 53
5.1 シミュレーションのシナリオと実験結果 53
5.1.1 シナリオ **1 :** 一切、津波避難ビルを使用せずに避難する「非使用型」のケース 53
5.1.2 シナリオ **2 :** アンケート調査で得たデータをもとに当てはめた「行動予測型」のケース 55
5.1.3 シナリオ **3 :** 想定した津波避難施設などの **3** 階以上の階層へ避難させる「誘導型」のケース 57
5.2 モデルの妥当性の検証 59
5.2.1 群集歩行の特性量 59
5.2.2 歩行速度と群集密度の関係式 60
5.2.3 測定方法 61
5.3 考察と課題 63
5.4 専門家の意見 64
第 **6** 章　あとがき 66
謝辞 67
参考文献 68
付録１　避難行動調査アンケート 70

第 1 章　まえがき

1.1　研究背景

我が国は、おおむね温帯に位置し、豊かな自然に恵まれた風光明媚な国である。一方、その位置、地形、地質、気象などの条件から、自然現象として現れる台風、大雨、大雪等は時として甚大な被害をもたらすことがある。また、我が国は、プレート境界、環太平洋火山帯に位置しており、世界で発生するマグニチュード 6.0 以上の地震発生回数の約 2 割, 世界の活火山の約 7%を占めている[1]。そのため、日本は世界から地震大国と呼ばれるほど地震が多く発生している。さらに地震によって火災や津波などが引き起こされるが、これらも甚大な二次被害をもたらす。それを顕著に表したのが、平成 7 年の阪神・淡路大震災と平成 23 年の東北太平洋沖地震である。

阪神・淡路大震災は、人口 350 万人余が密集し、我が国の経済活動の中枢を担う淡路北部から神戸市及び阪神地域の直下で発生した内陸・都市直下型地震である。この震災は大都市を直撃した大規模地震のため、鉄道、新幹線、高速道路、新交通システム、都市間交通・地下鉄が損壊し、生活必需基盤に壊滅的な打撃を与えた。さらに、地震動による建築物等の大規模な倒壊や、古い木造住宅の密集した地域において大火災が発生しその影響により 6400 人以上の犠牲者が出て被害が甚大であった[2]。そのため、政府はこの教訓を踏まえて、各種法令の制定・改正、防災基本計画の大幅な修正、建築物等の耐震の強化、初動対応の強化等様々な分野における災害対策の充実・強化が図られた。しかし一方で、津波被害が発生しなかったため、津波による災害に対する教訓は得られなかった。

東北地方太平洋沖地震は、マグニチュード 9.0 という我が国の観測史上最大の地震であり、世界でも 1900 年以降 4 番目の巨大地震であった。震源域は岩手県沖から茨城県沖まで及び、プレート型地震であったために波高 20m を超える巨大津波が南北 200km の沿岸地域に押し寄せ、地震による犠牲者を大きく上回る規模で津波の犠牲者が発生した。この地震では、死者・行方不明者は 12 都道府県でみられ、死者 1 万 5859 人、行方不明者 3021 人という明治以降では 1923 年の関東大震災（死者・行方不明者：約 10 万 5000 人）、1896 年の明治三陸地震（同：約 2 万 2000 人）に次いで極めて深刻な被害をもたらした。特に、図 1 に示す通り震災における死因の 92.4%が溺死となっており、津波の被害が甚大なものであったことが分かる[3]。

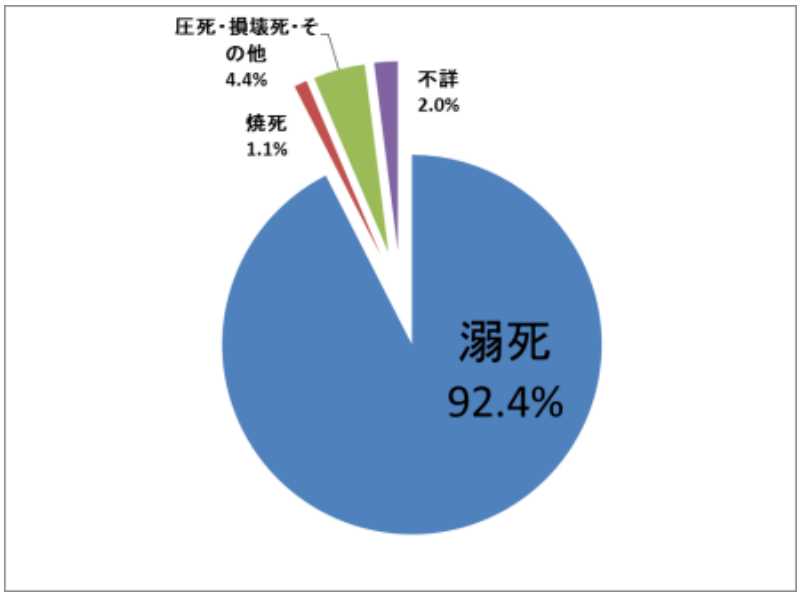


図 1　東北地方太平洋沖地震における死因（岩手県・宮城県・福島県）

これらのような震災が日本の首都圏や観光客や買い物客等の人が多く集まる都市部で発生すれば、大規模な混乱が発生すると危惧される。昨今、日本で大規模な地震が発生すると予測されているのが東海・東南海・南海連動型地震と呼ばれる南海トラフ巨大地震や首都直下型地震である。特に、南海トラフ沿いでマグニチュード 8.0~9.0 の地震が起きる確率として、今後 50 年以内の発生確率が 90%程度以上としたほか、30 年以内は 60~70%、40 年以内は 80%程度と発表された。これらの地震が実際に起きた場合、大規模な被害と公共交通機関等の運転が停止するために帰宅できない帰宅困難者が多数発生すると予測されている。例えば首都圏では、東京湾北部にマグニチュード 7.3 の首都直下型地震が最悪の状況（冬の夕方 18 時、風速 8m/秒）で起きた場合、約 9700 人の死者が発生すると想定されている。また、首都圏の交通機関が一斉に停止することが予測されるため、東京都において都内滞留者（約 1,387 万人）のうち約 471 万人が帰宅困難者となると想定されている。これに、東京都市圏外からの流入者を合わせると、帰宅困難者数は約 517 万人になる。さらに、地震発生後 1 日後には約 339 万人の避難者が出ると予想されている[4]。東北地方太平洋沖地震では、首都直下型地震の予想被害ほどではないが、実際に関東地方にも大きな影響を及ぼした。この地震によって JR を始めとする公共交通機関などが停止したため、地震発生当日における首都圏での帰宅困難者は、当日帰宅を断念した人が約 260 万人、遠距離を徒歩で帰宅した人が約 600 万人であった。首都圏中心部では地震による直接的な被害が少なかったものの、政府や自治体からの避難指示や具体的な行動指針が提示されなかったために、都心にいた会社員や買い物客などが一斉に帰宅しようとし、一時は皇居前広場を始めとする公園や駅周辺で大きな混雑が発生し、大きな社会問題となった。

南海トラフ巨大地震の影響を大きく受ける大阪市も、首都圏と同様の状況が予想される。

大阪市にはJRや市営地下鉄の他に、近鉄、南海、京阪、阪急、阪堺などの多くの私鉄が乗り入れており、JR大阪駅では平成17年度における1日の平均利用者数が約42万人にも達している[5]。また、大阪市には事業所や学校、デパートや地下街などの集客施設が集中しており、昼間流入人口が約124万人、昼間人口が約350万人となっている。そのため、平成17年度と18年度に組織された大阪府自然災害総合防災対策検討委員会によると、大規模な災害が起きた場合、大阪市内で約90万人の帰宅困難者が発生し、JR大阪駅を中心とした北区では徒歩帰宅が可能な人が約22万人、徒歩帰宅が不可能な人が約20万人となっており、合わせて約42万人の帰宅困難者が発生すると推定されている[6]。また、東北地方太平洋沖地震において東京では津波の心配はなかったが、この地震によって津波の災害に対する防災の見直しがされた。南海トラフ巨大地震では東京都内における6つの区（中央区、港区、江東区、品川区、大田区、江戸川区）で最大2mから3mの津波が押し寄せると想定されている。さらに大阪市では、地震発災後2時間弱で最大5mの津波が襲来する可能性が予想されている。同様の危険性は名古屋市や神戸市などの各大都市で懸念されており、津波への対策は喫緊の課題である。

1.2　研究目的と内容

前節で述べたように、南海トラフ巨大地震では、東北地方太平洋沖地震のように地震だけでなく大規模な津波も発生すると予想されている。東北地方太平洋沖地震が想定されていた以上の規模の津波を伴ったことを受けて、大阪府は従来の想定を見直し新たな被害想定を発表した。大阪府は、これまで想定していた地震の規模をマグニチュード9.1に引き上げた[7]。それによって、図2に示すように大阪市を襲う津波の波高をこれまでの30cmから最大2mに見直した。また、大阪湾岸から約15km離れたJR大阪駅などのほか、大阪府北東部の北摂、河内地域など約40km離れた地点まで浸水被害を受ける可能性があるとされている。これにより、大阪湾岸の10市3町計約200平方kmが浸水すると想定している。浸水エリアには約165万人が居住しており、地震発生から津波到達までは1～2時間程度とみられている。また大阪市内では、JR大阪駅や市内のメインストリートである御堂筋、市役所などが浸水域に入るほか、市営地下鉄や梅田地下街が水没する可能性が浮上してきたため大きな被害が出ることが予想される。例えば人的被害として、地震発生後2時間弱で津波が到達し、津波の浸水深が1メートル以上の地域では100%死亡すると仮定すると、津波による死者数は大阪府全体で約13万2967人、大阪市北区においては約1万6198人と想定されている。また、JR大阪駅周辺（大阪市北区）では、通勤客以外にも観光客や買い物客など多くの人が集まっているため、震災時には津波から避難しようとする多数の人々で大規模な混乱が起きる可能性がある。さらに、この津波被害を伴う大きな混乱により2次災害や3次災害の発生も考えられる。

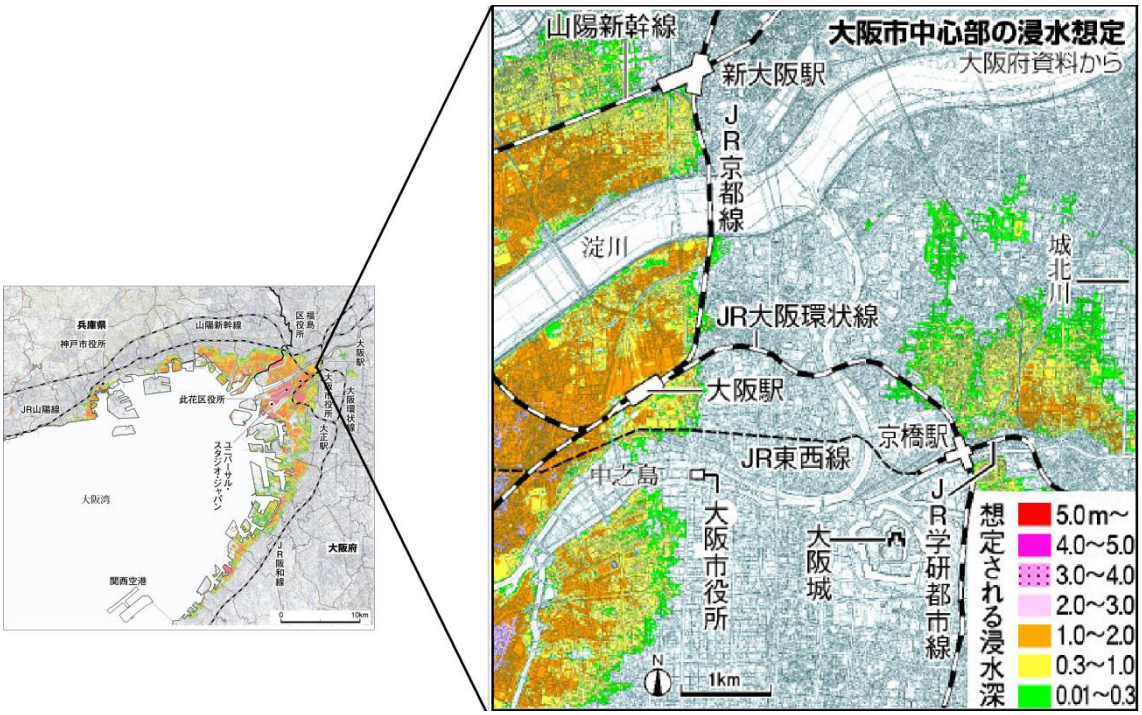


図 2　南海トラフ巨大地震における津波の浸水域 [7]

したがって、大阪市内における大きな被害を軽減させるような、避難誘導を含めた防災対策を検討することが重要である。これには、各誘導方法を実施した場合の、大阪市の中心部における群集の避難状況、および避難先や避難途中の混雑状況などの基礎的データが必要となる。しかし、これらの基礎的データは不足しているのが実状である。例えば、梅田地下街では津波の影響によって水没する可能性があるのにも関わらず、避難者に対する避難対策が整っていないのが現状である。JR 大阪駅周辺には、百貨店やホテル、高層ビル、市営地下鉄、地下街などの多くの施設が存在する。そのため、ビルから外へ出ようとする人とビルに避難しようとする人との衝突、ビルから道路に出ようとする人と地下街から道路に出ようとする人との衝突、渋滞する道路交通と歩行者との衝突など、様々な状況における避難行動を想定して避難誘導を検討する必要がある。このような群集行動を把握するためには、平日でも混雑している JR 大阪駅周辺において避難誘導実験を実際の規模で実施することは困難であるため、計算機上でのシミュレーションが必要かつ有効である。しかしこのような多様な空間が存在する空間上で避難誘導方法の検討のための計算機シミュレーションシステムはほとんどないのが実状である。

本研究は、地上、地下、ビルを含む大都市空間における津波警戒時の人々の避難行動をシミュレートする計算機システムを開発し、津波避難ビルの指定、避難誘導方法や防災体制、避難誘導先の選定などの防災対策立案に必要な基礎的なデータを提供することを目的とする。なお、本論文では主に大阪市を例として現状の課題や従来の対策などについて述べるが、基本的には東京 23 区や名古屋市などの海沿いの大都市に共通した課題であり、大

阪市以外の大都市にも適用可能であることを申し添えておく。

1.3　構成

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章では、避難行動シミュレーションに関する研究動向を説明し、それらの問題点について整理し述べる。第 3 章では、第 2 章で述べた問題点についての解決案を説明し、本システムのアプローチについて述べる。第 4 章では、本研究のシステム内容とその動作について詳しく述べる。第 5 章では、本システムの検証・評価の内容とその結果と、それに対する専門家の意見・考察を述べる。第 6 章では、本研究の残された課題と、今後の研究開発計画を述べ、本論文をまとめる。

第 2 章　関連研究の動向

2.1　大規模災害時の大阪市における防災の取り組み

大阪市では、東北地方太平洋沖地震の影響を受けて既存の防災対策について見直しを行い、様々な対策を講じている。例えば、大規模災害時における帰宅困難者の対策や地震に伴う津波に対する避難対策などがある。以下では、大阪市のこれらに関する対策の現状を整理する。

2.1.1 大規模災害時における帰宅困難者対策

大規模災害時には、道路や鉄道等の施設被害、点検、交通規制等により、公共交通機関の途絶や一般自動車等の通行不能が生じ、通勤先、通学先や所用先等から自宅への帰宅が困難となる可能性がある。大阪市が、大阪府自然災害総合防災対策検討委員会（平成 17 年度～18 年度）で大阪府と共同で行った地震被害想定では、図 3 のように徒歩で帰宅が不可能な帰宅困難者が、大阪市内で約 90 万人、大阪府全体では約 142 万人発生すると予測され、特にターミナルに人が集中することによる大混乱が予想されている[8]。

<table>
<tr><td rowspan="7">発生人数（人）</td><td colspan="5">周辺7駅［JR 大阪・北新地、阪神 梅田、阪急 梅田、地下鉄 梅田・東梅田・西梅田］
一日あたり鉄道利用客数　約236万人</td></tr>
<tr><td colspan="5">帰宅困難者総数　　約42万人　（ピーク14時台）　※徒歩帰宅者含む、鉄道以外含む</td></tr>
<tr><td colspan="4">徒歩帰宅不可能者
約19.8万人</td><td rowspan="5">徒歩帰宅者
約21.8万人</td></tr>
<tr><td>買い物等
自由目的</td><td>業務関連(屋外)</td><td>業務関連(屋内)</td><td>企業ビル等内
(就業者・学生)</td></tr>
<tr><td>約5.3万人</td><td>約2.5万人</td><td>約2.5万人</td><td>約9.5万人</td></tr>
<tr><td colspan="2">屋外滞留者
（買い物等・業務）</td><td colspan="2">屋内滞在者
（就業・業務・学生）</td></tr>
<tr><td colspan="2">約7.8万人</td><td colspan="2">約12.0万人</td></tr>
<tr><td>必要面積（m2）</td><td colspan="4">約12.4万m2</td></tr>
</table>

図 3　大阪駅周辺地区における帰宅困難者の概略試算[8]

しかし、そのような状況下においては、行政機関は被災市民の救援を優先するため、帰宅困難者への十分な対応は困難である。また被災時に十分な対応をとるためには、帰宅困難者のおよそ半分が民間企業等の事業所の関係者であると予想されることから、民間企業と連携した帰宅困難者への対応体制の構築が必要となる。そこで混乱を回避・軽減するために、大阪市は平成 21 年度に「大阪駅周辺における大規模災害時帰宅困難者対策検討会」を設置し、「とどまる」「ともに働く」「無事に帰す」「地域で保護」の 4 つのキーワードをコンセプトとして、国、大阪府、大阪府警をはじめ、鉄道事業者、地下街、百貨店、大規

模な複合ビルの管理者など、大阪駅周辺の関係者の協力を得ることで、駅周辺の混乱抑制や鉄道の代替交通手段の確保など対応策について検討している[6]。また、この検討会において作成した計画の有効性や課題等を抽出するための検証、計画の実効性の向上、帰宅困難対策の啓発等を目的に、大阪市では平成 23 年 11 月に「大阪市・大阪府帰宅困難者対策訓練」を実施した。この訓練における参加者のアンケート結果等から、今後取り組むべき対応の方向性を 8 項目にまとめ、帰宅困難者対策の 4 つのコンセプトに対する優先課題を以下の通りまとめた [6]。

コンセプト 1 :「とどまる」
①災害時の正確な情報の入手方法の周知
コンセプト 2 :「ともに働く」
②帰宅困難者対策の啓発・帰宅困難者対策協議会の充実
③災害等への対応システムづくり
コンセプト 3 :「無事に帰す」
④支援ステーションの周知
⑤駅ターミナル等での広報の充実
⑥交通事業者と関係機関との連絡・対応体制の充実
コンセプト 4 :「地域での保護」
⑦滞留スペースの確保
⑧食糧・水などの備蓄等の推進啓発

また大阪市では、関西広域連合や周辺自治体等と連携しながら、基礎自治体が果たすべき取り組みとして、一斉帰宅の抑制を図るとともに、市内の主要なターミナルである大阪駅、難波駅、天王寺駅周辺において、市公共施設だけでなく駅周辺の民間企業などに協力を求め、帰宅困難者のための一時滞留スペースの確保を進めている。さらに、多くの民間企業等と連携して帰宅困難者対策を進めていく上で、「自助」「公助」の意識を高め、取組みを促進するために、平成 25 年 2 月に大阪市内の主要ターミナルである大阪駅、難波駅、天王寺駅周辺の 3 地区を対象に図上訓練を実施した。この図上訓練を通して、防災への取り組み状況の共有化が達成でき、表 1 のような課題や図 4 に示すような発災後の行動パターンが明確になり、対策の方向性を見出すことができた[9]。そのため、これらの行動パターンと対策の方向性をもとに、今後の検討会において対策案や対策実施上の課題等についての議論が必要であることが分かった。

表１　図上訓練から分かった課題

ステップ・訓練項目	訓練から分かった課題
STEP1 発災後 15 分～3 時間 **①　状況確認** **②　従業員や来客等の緊急的一時避難**	①　状況確認 ・全般的に状況確認の体制は整っている（特に二次災害への警戒を重視） ②　従業員や来客等の緊急的一時避難 ・鉄道駅では、設備点検のために一旦ホームの外（地下駅の場合は地上）に、商業施設等では、基本は館内（危険であれば屋外）に待機。状況に応じ、お客様等を避難誘導 ・パニック対策として、落ち着いてもらうように安心でわかりやすい案内放送が必要
STEP2 発災後 3 時間～6 時間 **①　従業員や用務での来客の屋内滞留** **②　不特定の利用者・来訪者の屋内滞留**	①　従業員や用務での来客の屋内滞留 ・従業員や来客用の最小限の備蓄は、概ね確保されている ②　不特定の利用者・来訪者の屋内滞留 ・大半は人道的見地から受入れるが、滞留スペースや備蓄の関係で大量の受入れができない ・商業施設では、受入れ時の防犯対策も重要な課題
STEP3 発災後 6 時間～ **①　帰宅困難者の滞留場所が確保されていない場合の状況想定** **②　一時滞留スペース設置時の留意点**	①　帰宅困難者の滞留場所が確保されていない場合の状況想定 ・相当な人が大阪駅や梅田駅に殺到し、さらに帰宅できない人や駅に入れない人が駅から周辺施設に流れてくるために、駅と周辺施設が大混乱する状況を共有化 ・鉄道が不通の場合、各施設や店舗棟で駅に行ってもダメだという情報発信が必要 ・道路交通への対応（通行止め等）の検討要 ②　一時滞留スペース設置時の留意点 ・街のキーである商業施設と地下街の両者が連携した対策の検討が必要 ・滞留場所が満杯になった時の案内方法等について、ルール化が必要

	・道路、鉄道の被害状況や避難場所等について、行政やメディアが協力して情報発信するべき

課題の洗い出し

	〈STEP0・1　発災直後～３時間〉	〈STEP2　発災後３時間～６時間〉	〈STEP3　発災後６時間～〉
行動パターン（問題の様相）	•梅田貨物駅、中之島公園等の避難場所の他、百貨店や地下街等への一時避難が集中 •ターミナルゾーンの南側から梅田貨物駅に避難する際、ＪＲ横断部がボトルネックになる •帰宅しようとする来訪者がＪＲ大阪駅に殺到する	•鉄道は動いていないと思いつつも、さらに周辺から駅に人が殺到する •鉄道利用できない帰宅困難者が、情報や休息場所を求めて駅から周辺の施設に大量に流れてくる	•地区外との鉄道乗換客等の利用が多い拠点ターミナルとしての特性に伴い、地区外からの避難者も地区に滞留し、周辺道路や地下通路が大混乱 •一時滞留者が増大する一方で、被災者支援・復旧人員が不足し、思うように支援・活動が行えない
対策の方向性	•まずはパニックを回避するため、各施設において緊急放送等により、まずは滞留者を落ち着かせることが必要 •むやみに移動しないことの周知、災害・交通情報の提供が必要 一斉帰宅の抑制、正確な情報	•ＪＲ大阪駅や阪急梅田駅等への一斉集中を回避するため、各施設等において駅に行ってもダメだという情報発信が必要 •ターミナルゾーンへの避難集中を回避するため、災害・交通情報に加え、一時滞留スペースやトイレ等の情報提供を行う 一時滞留スペースの確保・開設	•地区外からの避難・滞留者も多くなる可能性を踏まえた対応（たとえば他地区の状況に関する情報提供等） •一時滞留スペースにおける被災者支援・復旧人員の確保 一時滞留スペースの運営（安全な滞留と相互支援）

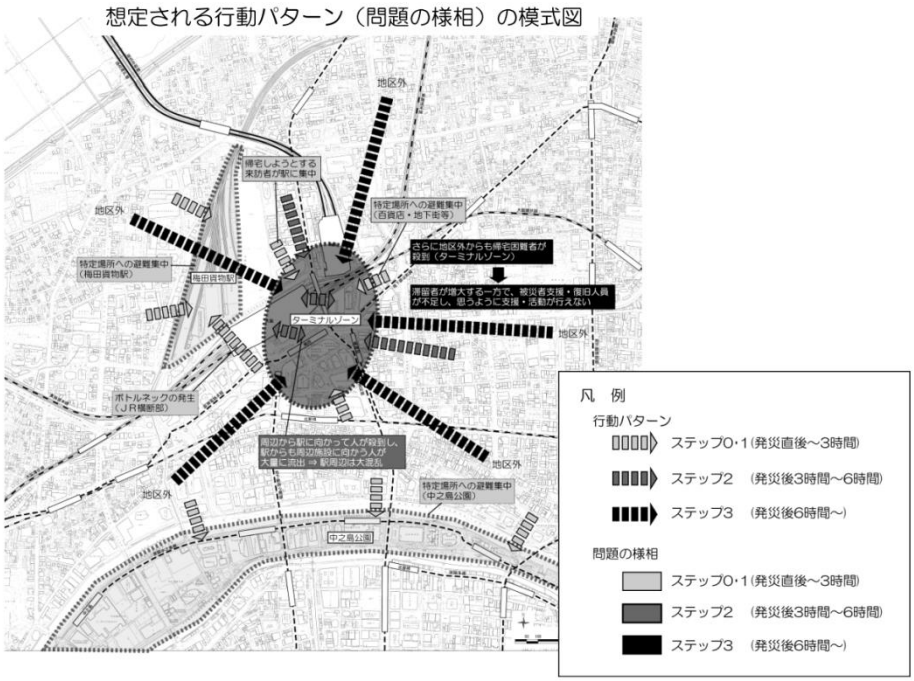


図４　発災後の行動パターン（問題の様相）と対策の方向性[9]

2.1.2 地震に伴う津波発生時の避難

大阪市は、マグニチュード 9.0 級の南海トラフ巨大地震が発生した場合、北区（JR 大阪駅周辺）において約 2 時間以内に最大 2m の津波が襲来すると予測されており、その津波によって約 1 万 6000 人の死者が発生すると考えられている。また、大阪市の地形は比較的平坦であるため、津波から身を守るためには少しでも早く高い場所（建物の 3 階相当以上）に避難する必要がある。その被害を最小限に抑えるために、大阪市は津波対策として図 5 に示すように津波浸水のおそれのある 17 区を対象に、市内に立地する堅固な施設を津波来襲時に避難できる津波避難施設としての確保に取り組んでいる[10]。特に、大阪市内における多くの市立学校や市営住宅等の公共施設を津波避難施設として指定している。

図 5　津波避難ビル対策エリアと施設証明シール[10]

さらに現在、民間企業等の協力のもと、観光客へもわかりやすい避難施設として、各区に拠点施設を確保している。例えば、西区においては京セラドーム大阪の周辺デッキが津波避難拠点施設であり約 9000 人が避難可能である。また、大正区ではイケア鶴浜において約 2 万 8000 人が避難可能である。本研究では大阪市北区が対象地域であり、表 2 に示すように北区では様々な民間企業や事業主等の協力を得て、津波避難施設を確保している[11]。

表 2　北区における津波避難ビル一覧

No.	施設名称	所在地	避難可能人数（人）	避難可能場所
1	ポートピア梅田（北大阪堂山ビル）	北区堂山町 18-8	2805	3 階以上の観覧席(3 階~9 階)
2	大阪富国生命ビル	北区小松原町 2-4	736	2 階~5 階の共用部分
3	OAP タワー	北区天満橋 1-8-30	170	2 階ロビー
4	兎我野町 聚楽マンション	北区兎我野町 9-2	114	3 階以上の共用部分

5	グランフロント大阪 南館,北館	北区大深町 3-1,4-20	南館：約 1000 北館：約 2000	南館・北館：9 階オフィス カイロビー,テラスガーデン
6	コープ・ジャペン	北区豊崎 2-8-11	160	3 階以上の共用部分
7	第 10 新興ビル	北区浪花町 1-23	43	3 階以上の共用廊下

しかし、これらの津波避難施設だけ津波対策としては十分であるかは明らかになっていない。北区には日本最多の利用者数を誇る地下街である「ホワイティうめだ」が存在し、低い地盤に立つ超高層ビルが地下街と直結しており、毎日数十万の人を誘引している。その地下街が、地震の 2 時間後に発生する第 1 波の津波の影響ですべて水没すると予想されている。そのため津波被害から逃れるために、地下街から地上、または直結している建物への迅速かつ安全な避難者の避難誘導方法を検討し、それらの避難者を受け入れるだけの十分な津波避難施設の数を予測する必要である。

2.2　避難誘導システム

現在の日本では、災害情報を最大限に活用して被害を最小限に抑制する「減災」の考え方に則って、避難者に対する様々な避難誘導システムが提案されている。以下ではいくつかの代表的なシステムを紹介する。

2.2.1　大規模公共空間のため位置依存型誘導システム

居住環境や労働環境におけるコミュニケーション支援の研究が盛んに行われてきている一方で、我々の日常生活にとって重要であるはずの大規模公共空間を対象としたコミュニケーション支援の研究は不十分である。そこで伊藤ら[12]は、ユビキタス環境の普及によって可能になりつつある「超越型」のコミュニケーション支援システムを提案し、それによって大規模公共空間の管理スタッフが空間内の避難者に対する誘導等の手助けを効果的に行えることを示した。具体的なシステムの概要を図 6 に示す。視覚センサ（CCD カメラ）または避難者が所有する GPS 付携帯電話で取得した避難者の位置情報に基づき、FreeWalk と呼ばれる仮想都市空間を表示するシステム上に人の CG を表示し、避難誘導を担当する管理スタッフがそれを観察して現地にいる避難者の携帯電話に避難指示を送信する。

このシステムの利点は、個別に誘導情報を提供できるため個人毎に状況を合わせた的確で詳細な誘導を行いやすい点と、スピーカや看板での情報提供ではないため、聞き逃しや見逃しのリスクがない点である。しかし課題として、避難者全員に GPS 付携帯電話を持たせる必要がある点や、通常の監視カメラや放送設備では不可能である点などがある。

図 6　超越的避難誘導システム[12]

2.2.2　屋外における動的な避難誘導システム

現在、携帯端末を用いた歩行者誘導システムを災害時における住民の誘導に応用しようという研究が多く存在する。しかし、平常時とは異なり、災害発生時には複数の通路が通行できなくなる可能性がある。そのため適切な避難経路を再設定するためには、周辺の通行不可能な地点を把握することが必要である。そこで野崎ら[13]は、より迅速な情報収集を目指し、住民が携行する携帯端末を通じて、災害発生地点を目にした住民から直接情報提供を受けるシステムを提案した。具体的には、街角の至る所に誘導のための情報を保持した無線情報機器（以下ポストと称する）を設置し、災害発生時、携帯電話からそれらの無線情報機器に災害情報を送信することにより安全な避難経路を提供するシステムである。図 7 のように、Bluetooth などの近距離用無線によって携帯電話とポスト間が通信を行い、避難者の現在地の取得し、ポスト間の情報交換により避難経路の計算を行う。

このシステムの利点として、GPS を用いないため屋内での誘導にも対応できる点や、中央サーバを持たない分散型システムのためシステムの一部が破損しても他の部分では影響なく動作を継続する点がある。課題としては、Bluetooth を用いたポストと携帯端末間の通信が遅い点、道の経路容量に応じて大量のポストを設置する必要がある点などがある。

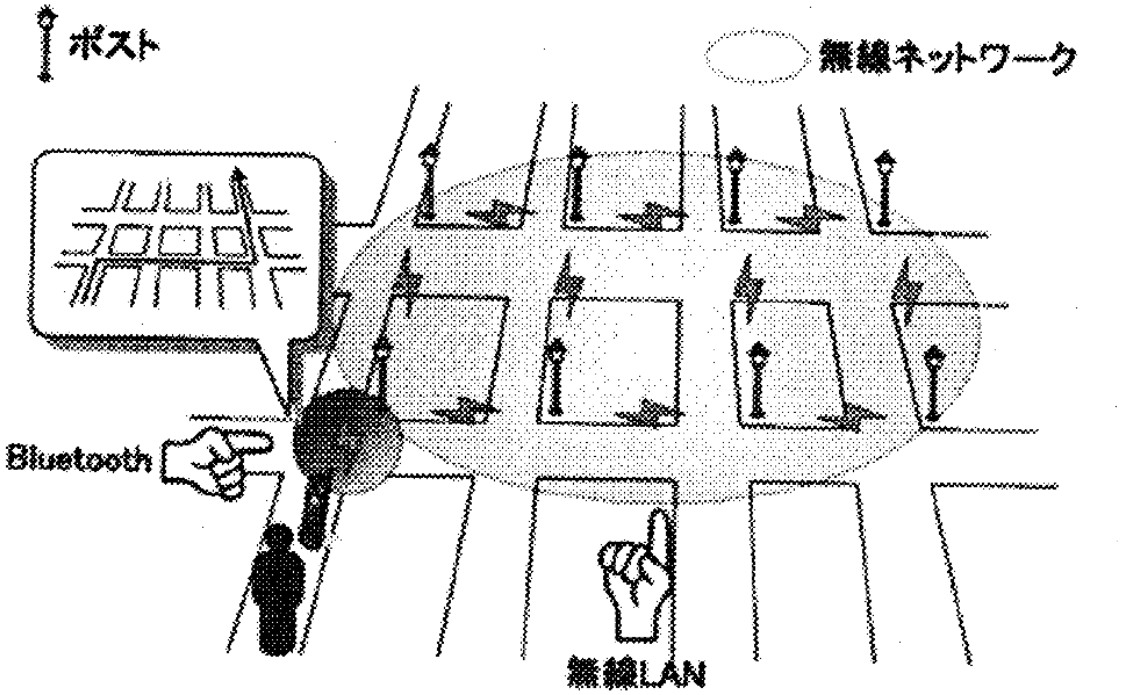


図 7　動的避難誘導システム[13]

2.3　エージェントモデルによる災害時避難行動モデル

2.3.1　避難行動モデル

避難行動モデルの研究は、熊谷[14]や李[15]らによって行われている。李の研究によれば、避難行動は、群集歩行、追従モデルの 2 つに区分でき、それぞれの特徴は以下の通りである。群集歩行では、群集密度によって群集歩行速度が決定され、群集密度が 1.5 人/㎡以上になると、群集内で追い越しが不可能となる。この場合の歩行速度は集団的条件によって決まるとされている。また追従モデルは、避難者が前を行く先行避難者に追随する形で歩行し、先行者との相対関係によって速度が決定されるモデルとなっている。追従モデルでは、先行者との間隔、歩行速度差、自分の歩行速度などに基づき、自分が先行者を追い抜かないよう行動をモデル化したものである。これらのモデルには、行動途中で外部から情報を得ることを想定したものもある。ただし、全ての人が受け取った情報を正しく理解できると仮定をしている。しかし現実には、全ての人が受信した情報を理解できるわけではない。そこでより現実に近いモデルを構築するためには、受け取った情報を理解できる程度をパラメータとして設定可能とする必要がある。

2.3.2　エージェント型行動モデル

近年、エージェント技術を用いたモデル構築が様々な分野において、多数行われている。エージェントの基本的な特性として、1）自立性（エージェントは人間などの直接的介入な

しに動作し、自分の行動や内部状態を制御可能なこと)、2）社会性（何らかの言語を介して他のエージェントや人間と情報交換が可能なこと)、3）反応性（エージェント自身が自分自身の置かれた環境を認識し、その変化に対して適切に応答すること)、4）自発性（外部環境に対して単純な反応だけではなく、目標を持った自発的な行動を起こすことが可能なこと)、以上の 4 つがあげられる[16]。

すなわち、エージェントモデルでは、エージェント自身が環境を認知し、自律的に自分自身を環境に対応させるように変化し、加えて、他のエージェントとも情報交換を行い、目標を達成するためによりよい行動を自分自身で計画し、実現できるという特性を持っている。このようなエージェントの行動を構成する機能的要素は、観測、環境デザイン、計画立案、行為、の 4 つである[16]。つまり、環境を観測することによって得られる何らかの情報を入力とし、これをエージェントが理解した結果、出力として各エージェントの行為が表れる。よってエージェントモデルを用いることの最大の利点は、個人の問題解決行動を等質的な行動として扱うのではなく、異質的な行動として扱うことが可能となっており、より人間社会に近いモデルを構築することが可能になっている。

2.3.3　エージェント型避難行動モデル

既に、人工生命とファジィ推論を組み合わせることによって、避難者と誘導者という異なる役割を行動モデルに導入することが可能になるとともに、避難者の危険意識を避難行動に組み込んだ避難行動モデルの開発が行われている。また、各種災害時、特に津波災害において、人的被害を最小限に抑えるためには、住民の迅速で的確な避難行動が重要な役割を担うことは認識されつつある。特に、各人の固有の人間行動を考慮する必要がある。そのため、街路や地区の認知構造をベースにして避難経路を選択するモデルの開発も行われており[17]、これまで避難モデルで課題としてあげられてきた避難者の心理的要因や避難地城の認知といった問題の解決が始まっている。

2.4　避難行動シミュレーション

計算機を用いて人間の避難行動をシミュレートする試みはこれまでも数多く行われてきた。しかし、大都市空間における避難者を対象としたものはほとんどない。またビル内などの限られた空間を対象とした避難誘導シミュレーションは行われてきたが、大規模避難誘導という発想そのものがこれまでに少なく、ビルや地下街などの多様な空間を組み合わせた空間を対象とした避難誘導を検討するためのシミュレーションに関する研究は筆者知る限り存在しない。

本節では、既存の避難行動シミュレーションや、避難誘導シミュレーションを紹介する。

2.4.1　マルチエージェントシミュレーション

従来のシミュレータは人間行動を物理的挙動として扱うことが多かった。群集の流れを

流体の動きとしてモデル化した流体モデルや、個々の人を剛体としてモデル化し、多くの剛体が衝突を回避しながら移動する剛体粒子モデルなどが採用されてきた。特に流体モデルはマスとしての群集移動を扱うのに優れているために採用されることが多かった。そこでは各行動要素は意思を持たず、全体的に同じ行動パターンを行うよう記述されており、避難者の発話や誘導者の指示といった、実際の避難時に起こり各人に影響を与えうるインタラクションは考慮されない。そのためマクロ的な群集の動きの把握には利用できるが、緊急時の人間心理に基づいて発生する突発的な現象、例えば誰かのあせりから生まれた小走りが全体に波及して群集が走り出す雪崩現象などを説明できない点や、狭隘な通路や出口の周辺で動けなくなるせりもち現象などを再現できないなどの問題がある。

実際の避難状況においては、誰かの叫び声が聞こえれば、声の聞こえる方には避難しなくなり、声やジェスチャーによる指示があれば、避難経路を変更することも考えられる。そのため物理的要因だけでなく社会的インタラクションを考慮に入れることは重要である。

マルチエージェントシミュレーションは、エージェントとしてモデル化された個々の行動要素（避難者）が意思決定を行いながら全体としてシミュレーションを行うシステムである。そのため位置情報だけでなく、避難者間の影響など社会的インタラクションも考慮に入れてシミュレーションを行うことができ、実際の避難者行動を、意思決定過程も含めて精緻に計算できる。しかし個々の避難者単位で計算が行われるため、全体の計算量は大きくなる。そのため従来はあまり採用されてこなかった。近年では計算機の高速化と共に採用されるようになってきており、火災や津波などの様々な状況に応じて、群集の避難行動シミュレーションに関する様々な研究開発が行われている。以下では、マルチエージェントシステムを用いた避難シミュレーションの研究について紹介する。

2.4.2　津波避難施設設置の評価

北海道の過去の地震による津波の履歴が阿部によって報告されているように[18]、北海道太平洋沿岸東部は津波の危険度が高く、とりわけ中核都市である釧路市において津波対策は緊急の課題である。そこで大畑ら[19]の研究では、釧路市中市街地を例に、津波避難施設への避難行動についてマルチエージェントシミュレータを用いて推定し、実行結果から現在釧路市が指定している津波避難施設設置の評価を行い、海岸平野部市街地における津波避難の問題点を見出している。

このシミュレーションモデルでは、地震による津波襲来時、釧路市中心街の住民が指定された最寄りの津波避難施設へ向かう避難行動の様子を視覚的に捉え、住民が避難開始から最寄りの津波避難施設に到着して避難完了するまでに要した時間や時間毎の避難率等を算出している。また、住民を 1 エージェントして定義し、初期位置・避難開始時刻・移動速度の情報等を変数として与え、最寄りの津波避難施設に対して最短距離で移動するルールを設定している。地震発生直後からの避難経路についてはネットワーク型（道路をリンク、道路網の交差点をノードで表現）を用いており、釧路市中心市街地は標高差があまり

ないため、標高については考慮せず、最寄りの津波避難施設に向けて住民エージェントはネットワーク上を移動する。また、指定避難施設の配置状況から対象地域をエリア 1~3 に分けた（図 8）。これらのルールのもと、3 つのケースを設定してシミュレーションを行った結果、海岸平野部の高台避難の確保が難しい市街地で、ビル等の津波避難施設が果たす重要性を確認できた。現在の津波避難施設を利用したケースと地震時の避難施設も併用したケースを比較すると、エリア毎にその影響は異なったが、併用した場合のほうが全体の避難完了時間を短縮させることができ、地震発生 15 分後の避難未完了者数を半減させる効果が認められた。

しかし、このシミュレーションでは釧路市中心市街地の夜間人口しか扱っておらず、オフィス街となる地区における昼間人口を考慮していないため、実際の釧路市中心市街地における大規模な人数の避難行動を検討していない。また、施設到達までのシミュレーションを実施したが、到達後の建物内での避難までは考慮されていない。

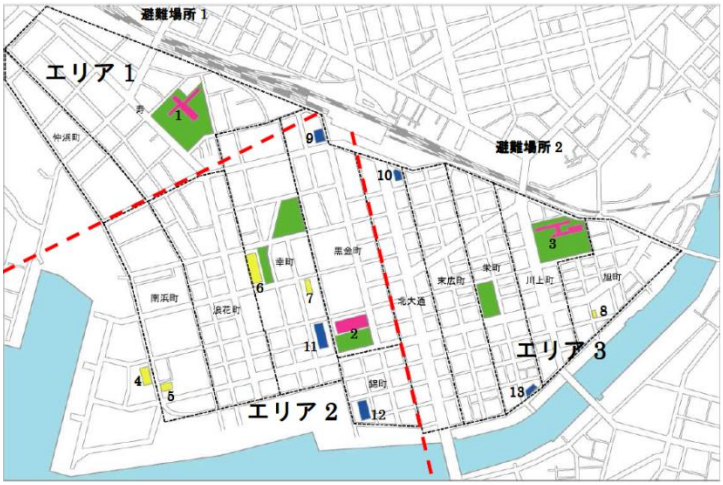


図 8　エリア区分図[19]

2.4.3　一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータ

近年、オフィスビルや商業施設の大型化、高層化が進んでいるが、このような施設で大規模な避難を行う際には、避難対象者は数千人となることもあり、的確な避難誘導が必要とされる。しかし大規模な避難行動は多くの要素が複雑に関連し、容易に扱うことができないため、避難誘導計画の立案・検証には高速計算が可能な避難シミュレータによる支援が必要とされている。そこで山下ら[20]は、歩行者同士の干渉や障害物回避の計算を簡略化し、移動状況の再現精度を落とすことなく、避難過程を高速にするために一次元歩行者モデルを提案した。

一次元歩行者モデルでは、一定の方向に移動するという避難の特性を考慮し、歩行者が移動する空間を一次元的にリンクとして表現する。部屋や廊下をリンクとして扱い、ドアや入口をノードとして扱う。移動モデルは直前の歩行者との距離から移動速度を決定する

速度関数を採用している。そのため、従来は障害物回避やパーソナルスペースの確保などとして二次元平面上で考慮していた要因を考慮しておらず、リンクとして表現することで、必要な計算が省略され、様々な避難誘導計画を短時間で検証できる。

山下らは一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータ NetMAS の開発を行い、実際の避難訓練で実測した結果と比較することで一次元歩行者モデルの有効性を検証している。NetMAS の応用として、大規模な複合商業施設における避難を扱い、避難効率に影響を与える要因を検証し、多数の避難条件を想定したシミュレーションを行った結果、NetMAS の有効性が示されている（図 9）。

しかし一次元歩行者モデルは歩行者間の相互作用の簡潔さを優先したため、大規模な避難行動の経路選択の結果を検証することには適しているが、詳細な歩行動作の局所的な影響評価には向いていない。例えば、渋谷駅前のスクランブル交差点で見られる対向流における櫛状の列が形成される過程やその際の速度減衰、多数の避難者が扉に殺到した際の一時的に流量が低下するアーチ現象を直接的に再現できないなどの制約がある。

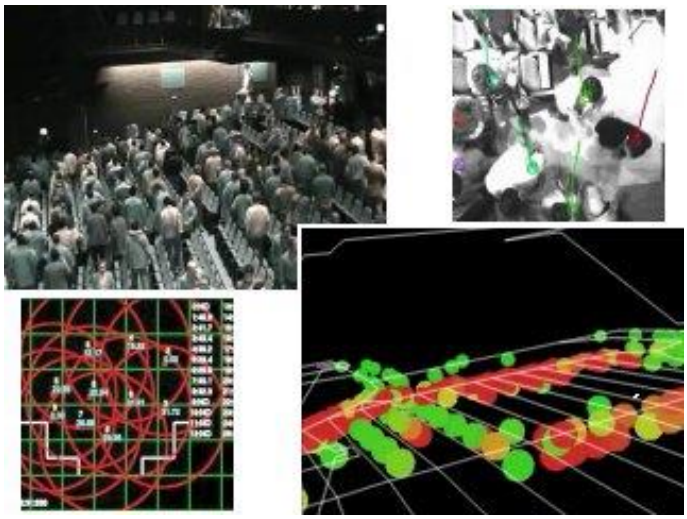


図 9　避難実施訓練とシステムの比較図[20]

2.4.4　津波避難評価システムの構築と社会実装

東北地方太平洋沖地震発生以降、減災の観点から巨大地震に伴う津波を想定した避難計画の策定が注目されている。また、高齢化による避難困難者の増加や、車避難による混雑の問題などのソフト面の課題、既存の建造物の未耐震であるハード面なども深刻であり、今後確実に起こるであろうと言われている地震・津波の被害をソフト・ハード共にとりうる手段を尽くした総合的な津波対策が急務である。

そこで中居ら[21]の研究では、地域におけるリスクコミュニケーションに着目した津波避難シミュレーションを実施した。リスクは災害原因事象である「ハザード」、災害との接続面を示す曝露度の「エクスポージャ」、社会の脆弱性を表す「バイナラビリティ」という 3

つの要素によって定義されるが、ハザードに対して適切な予防を行い、エクポージャやバイナラビリティなどの社会的要素を変えることで上記の 3 つによって定義されるリスクは低減されることが可能である。地域防災であるリスクコミュニケーションは町と住民を災害から守るために、住民の災害リスクへの理解や事前の避難計画策定などにより社会的要素を強化する方法である。そのため、中居らは高知県黒潮町万行地区の住民に対する面接調査を通して、地域社会が抱える社会的リスクの実態把握と、避難行動をモデル化するためのパラメータの収集を行い、エージェント技法を用いたシミュレータを津波避難に応用し、避難計画作成時に考慮しておくべき項目について考察した（図 10）。その結果、年齢別に分けた津波避難タワーへの到着数と到達時刻をもとに、避難計画策定の際に考慮しておく必要がある様々な点が確認できた。

しかしこのシミュレーションでは、過去に津波の被害を受けた地域が対象地域である。さらに東京都や大阪府などの、多様な環境条件の下に様々な人が多く集まる大都市は想定していない。大都市では、高層ビルやホテル、駅などの大きな施設が多数存在するため、多数存在する建物への人の流入を考慮しなければならない。そのため、そのような状況を考慮することが難しい本シミュレーションでは、実際に大都市部での群集避難行動を詳細に把握することができないと考えられる。

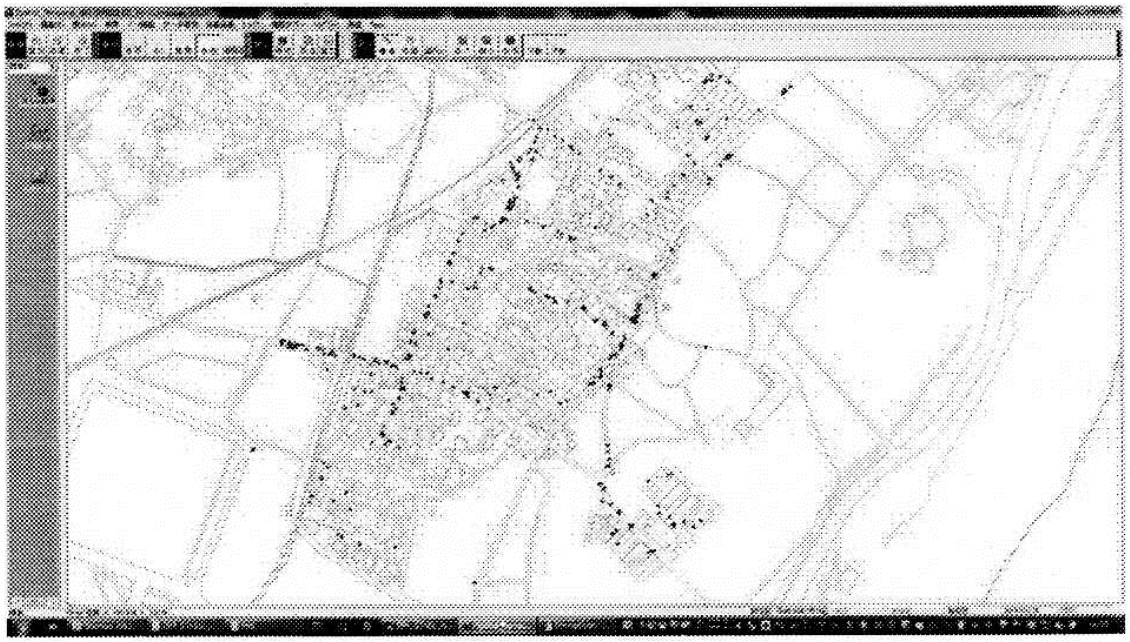


図 10　シミュレーションのイメージ図[21]

2.4.5　段階的避難誘導法を考慮した避難誘導検討システム

日本では、南海トラフ大地震、首都直下地震など近い将来に大規模な地震災害が発生することが懸念されている。そのため行政を中心にさまざまな対策がとられており、地震対

策に対する関心も高まってきている。しかし防災の対象は住民が中心で、観光客などの地理不案内者については対策が検討されることはほとんどない。しかし日本は観光立国を標榜しており、年間 5000 万人もの観光客が訪れる京都を始め、東京、大阪などの観光地が地震に襲われた場合には大きな混乱が危惧される。

そこで衣笠ら[22]は、避難誘導の分野において観光客を安全かつ効率的に目的地まで避難する方法を検討するために、災害発生時に広域な被災地で観光客を避難誘導する適切な方法を検討するためのツールを構築した。この研究では、観光客の行動モデルを実装しており、避難者数、避難先、避難経路、一時滞留場所、目的地などを指定することで様々な避難誘導方法を指定でき、それに従って観光客が避難する状況を計算機上で模擬できる（図 22)。観光客が我が国でもっとも多い京都市を対象として、段階的避難誘導方法という新しい避難誘導方法の効果を検証した。その結果、段階的避難誘導方法の効果として以下の点が挙げられた。

① 避難者の群集の長大化を防ぐとともに、休憩時間を確保できる。
② 防災中継拠点又は最終目的地に安定的に避難者を誘導できる。
③ 防災中継拠点を適切に選択することで、避難者の群集同士の合流に伴う群集災害の危険性を軽減できる。

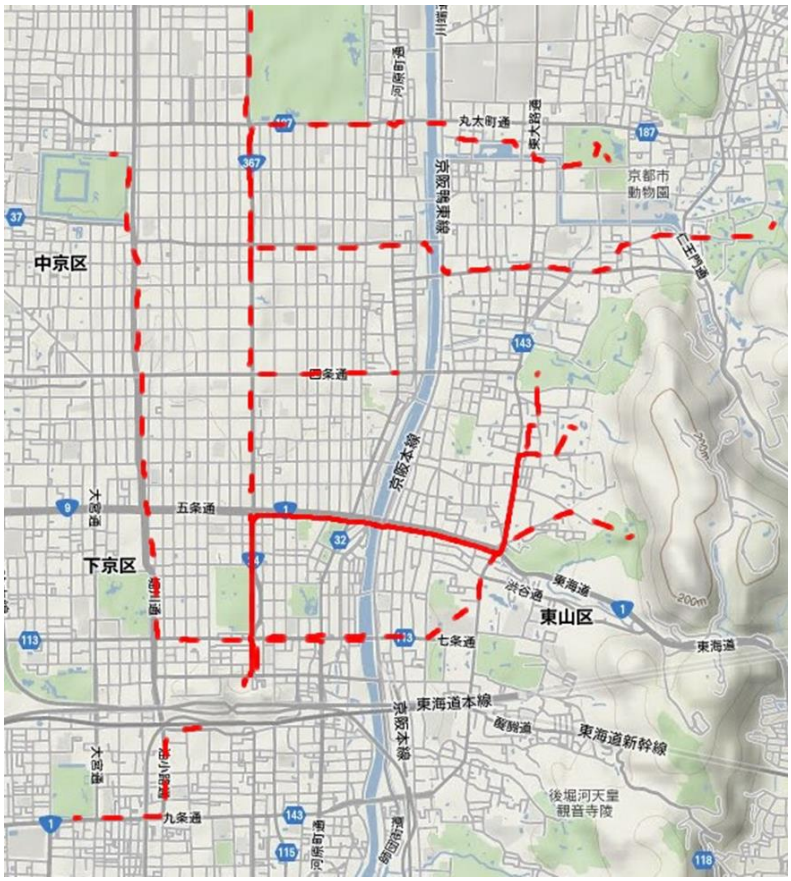


図 11　段階的避難誘導方法のシステム実行図[22]

2.5 本研究の位置づけ

以上のように本章では、大規模災害時における大阪市の取り組み、避難誘導方法の検討例、既存の避難行動シミュレーション技術についての動向を整理した。これらから、まず以下の課題が明らかになった。

① 南海トラフ巨大地震時において、大阪市に位置する企業や行政機関は津波に対して具体的な対策案を共有しておらず、またそれぞれの対策案が不十分である。
② 様々な企業や行政機関は大災害時における津波被害を含む防災対策を作成しているが、実際にその対策に沿って避難誘導を行った場合の有効性については明らかにされていない。

そのため、大阪市を対象に避難誘導方法を検証するためのシミュレータを提示することは非常に重要な取り組みであると言える。いくつかの地域を対象としたシミュレータはすでに提案されているが、それらを適用できない理由として以下が挙げられる。

① 対象の地域がビル内や比較的人口の少ない地域など規模が小さい。
② 地上のみを考慮した二次元平面上のシミュレートや、または特定のビル内などの空間のみを対象としている。そのため、ビルや地下街の組み合わせを考慮し、各々間の人の流入や流出を考慮したシミュレータは実行できない。

本研究では、人口の多い JR 大阪駅周辺に対し、ビルや地下街をも考慮した、避難誘導方法検討のためのシミュレータを提案する。

第 3 章　提案の概要

本章では本システムの提案内容について説明する。はじめに、これまでの大阪市における避難計画や様々な避難行動シミュレーションに関する問題点を再提示し、それらに対する解決案を考察する。その上で、本システムの提案方法について述べる。

3.1　震災時における大阪府の避難計画について

大阪府は、東北太平洋沖地震の影響を受けて南海トラフ巨大地震時における津波の被害は震災前と比べると大幅に見直され、その対策会議などが多く設けられるようになった。しかし、震災前には津波の被害を限定的なものと想定していたため、大きな津波を伴う地震に対しての防災・減災対策が未だ不十分なものとなっている。また、JR 大阪駅周辺に存在する様々な企業と防災対策に対する十分な協議をしておらず、行政機関である大阪市や各企業は具体的な対策を共有していない。そのため、各ビルやデパート、地下街などの各々が独自の避難誘導マニュアルを作成している状況であり、震災時にマニュアル通りに避難誘導した場合に、実際に街全体としてどのように人が動くのか、避難誘導は有効に機能するのかについて、予想できていない。最悪の場合、津波避難ビルから過度の避難者の流入で更なる 2 次被害が発生する可能性も存在する。

津波防災において、被害を減らすためには避難者に対して迅速な避難誘導を実施することが重要である。効果的な避難誘導を事前に検討するには、避難者の行動を空間的に考慮した上で避難行動シミュレーションによる検討が考えられる。例えば JR 大阪駅周辺では、JR 大阪駅、阪急梅田駅、阪神梅田駅、地下鉄梅田・東梅田・西梅田駅などの鉄道駅と、それらを結ぶ地上の道路や地下道・地下街、その沿道に建てられた百貨店や高層ビル群などを一体としてとらえ、これらの地域における人の動きを全体として把握した上で避難誘導計画を策定する必要がある。

3.2　避難行動シミュレーションについて

避難誘導計画は、避難行動シミュレーションで得られた様々なデータをもとにして策定されることが多い。従来の避難行動シミュレーションでは、単に避難者の行動を流体としてモデル化し、その動きを模擬することが主な目的であったが、最近では避難者間の物理的な相互作用だけでなく、社会的相互作用も考慮されたシミュレータの研究が行われている。また、過去において実際に津波の被害を受けた地域や大規模複合施設を想定した建物内、地下鉄や地下街における地下空間などの、限定された空間のみを対象としたシミュレータが多く存在する。

しかし、現在のシミュレータでは不十分な点が多々残っている。第 2 章でも述べたように、津波から避難するためにビル、地下街、大規模商業施設等から流出する避難者と、もともと地上にいる避難者の避難行動の相互作用を考慮した避難行動シミュレーションはな

されていない。特に JR 大阪駅周辺には、ヨドバシカメラやグランフロント大阪等の大規模商業施設や、様々な企業が入っている高層ビルなどが多く位置し、1 日の利用者数が日本最多である梅田地下街も存在する。そのため、本当に地下街にいる全員が限られた時間で地上に出られるのか、津波避難ビルに収容できるのか、津波避難ビルに避難せずに歩いて帰宅しようとする人の流れはそのような避難行動の妨害要因とならないのか、などの検討が必要である。このような検討を行えるシミュレータが求められる。

3.3　本システムの提案方法

本研究では、上記のような問題を解決するために、南海トラフ巨大地震を想定した様々な避難状況やデータに基づいて、JR 大阪駅周辺地域を対象に、JR 大阪駅や阪急・阪神・地下鉄の駅周辺における群集が地震発生時にどのような行動をするのかをシミュレートする。このシミュレートした結果に基づき、津波避難ビルの指定、避難誘導方法や防災体制、避難誘導先の選定などに基礎的なデータを提供できるシステムを構築することを本研究の目標とする。そこで、避難誘導方法の検討に必要な機能として、本研究で提案するシミュレータが提供するものを以下に挙げる。

① 地上や地下、建物内の各空間における避難者の行動が時間を追ってマップ上で明確に視覚的に把握できる。
② 地上の避難経路において、道路の位置や幅などの地理空間情報を組込み、正確な避難者の移動速度や避難に要する時間を計測できる
③ 各空間の避難者数を時間推移で確認するために、それぞれの箇所における避難人数を時系列グラフとして表示する。
④ 各津波避難ビルの評価ができる。例えば、避難者が津波被害から逃れるために目的地以外にも避難ができるように、阪急梅田駅、梅田貨物駅など大勢の避難者が避難できる建物を緊急避難用建物として設定し、シミュレーションを行うことができる。
⑤ 様々な避難状況を生み出すために、各避難行動をとる人の割合や津波避難ビル内の各階層における避難者数を自由に設定できる。

また、JR 大阪駅周辺で起こり得る避難行動モデルを定義するために、対象地域である JR 大阪駅周辺（北区）においてインタビュー調査を行い、地域が抱える社会的リスクの実態把握と歩行者がどのような避難行動をとるのかの調査結果を基にモデル化を行う。このモデルを用いて、地上や地下、ビルを含む大都市空間における津波警戒時の人々の避難行動をシミュレートする計算機システムを開発する。本研究で提案するシミュレータの特徴として以下のものが挙げられる。

① 地上や地下、建物内の 3 つの空間を連動させた状況で、避難者の避難行動をシミュレ

ートする。

② 避難者を地上に避難する（地下や建物内から地上へ出て各方面へ避難する）人や津波避難ビルに避難する人に分類して行動モデルを定式化する。

③ 地下街や建物空間内では空間の形状を反映させ正確なデータを計測するために、小さいメッシュを用いた微細ネットワークで空間内を表現する。

なお、地上における道路上には車などの障害物が存在せず、人の混雑により速度が低減しても、避難者は指定された経路の迂回することをしないとする。このような道路交通の影響は今後の課題としたい。

3.4 大阪市北区でのアンケート調査

本調査では、大阪府大阪市北区における高層ビルや商業施設などをよく利用する方に対するアンケート調査を通して、都市部社会が抱える社会的リスクの実態把握と、避難行動をモデル化するためのパラメータ収集を行った。その結果を本節で述べる。

3.4.1 アンケート調査の概要

調査は 2013 年 6 月 1 日から 6 月 30 日までの期間に実施した。大阪府大阪市北区における高層ビルや商業施設などをよく利用する方に対してインタビューと、調査票への記入をしてもらうという方法で行った。設問は性別や年齢を含め 15 問あり、1 人あたり 15 分から 30 分程度の時間を要した。内容は、避難行動シミュレーションを行うために必要な避難者の属性や、北区における行動パターン、津波が来る場合にどこに逃げるか、その理由等の情報を収集した。また、避難の際に心配や不安に感じる点などの都市部の社会的な脆弱性に関する項目も収集した。アンケートの協力者数は 46 人である。

3.4.2 アンケート調査の内容およびその集計結果

本研究の避難行動シミュレーションはエージェントベースで行われるため、調査から得られたデータをもとにエージェントの属性を与え、ボトムアップ型で全体の挙動を評価する。本節ではアンケートの集計結果を通して得られた北区を利用する人の特徴について述べる。

(1)対象者の属性

個人の属性に関しては、年齢、性別、職業に関する情報を得ている。男女比は男性 74%、女性 26%となっている。また、男女比以外のデータの集計結果を以下の図 12 に示す。

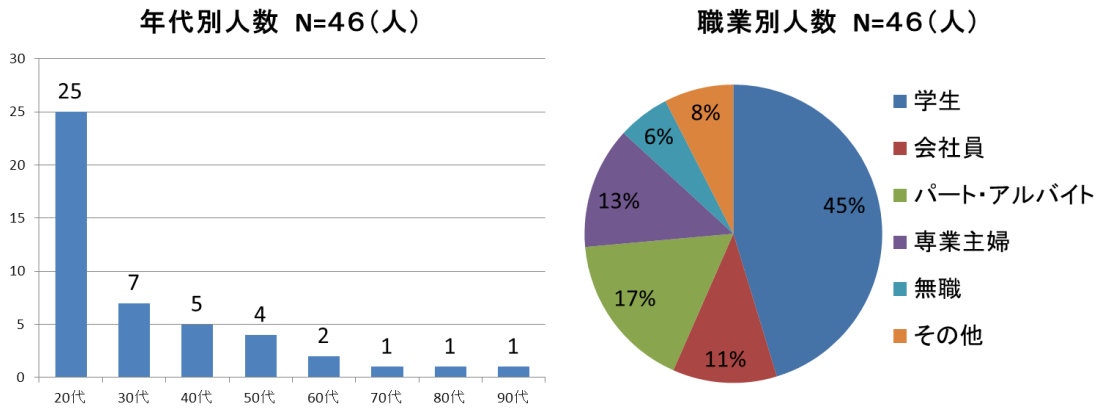


図 12　年代別人数と職業別人数

(2)南海トラフ巨大地震に関する認識

上記の対象者に南海トラフ巨大地震についてどれくらい認識があるのか調査するために、以下の点について質問した。

① 南海トラフ巨大地震について知っているか

② 上記の地震が起きた場合、JR 大阪駅周辺において最大 2m の津波がくる可能性があることを知っているか

③ 大阪市が津波避難の際に、「高い」場所(建物の 3 階相当以上)に避難すること被災者に対して推奨していることを知っているか

その結果、①においてアンケート調査の総人数 46 人のうち 30 人（全体の約 66%）の人が南海トラフ巨大地震について知っていることが判明した。残りの 16 人（全体の約 44%）の人は地震の名称すら知らないという意見もあった。しかし南海トラフ巨大地震の被害想定や避難方法に関する知識を持っている人はさらに少なく、質問②に対して知っていると回答した人は 10 人（全体の約 22%）、③では 2 人（全体の 5%）であった。これらから関西圏域にいながら今後起こり得る巨大地震について認識している人が非常に少ないことがわかった。

(3)避難行動に関する意向

避難行動に関する項目では、以下の点について質問した。また、回答は自由記述である。

① 津波の際に、それぞれの階層（北区内の地上、地下街、建物内 1,2 階）における避難行動

② ①の行動を選んだ理由

③ 避難の際に不安・心配なこと

④ 避難する際の交通手段（徒歩、自転車、バイク、車、公共交通機関のどれを使うか）

上記の質問①の結果、アンケート協力者が地上における津波避難の際に、避難意向を示した場所を図 13 に示す。

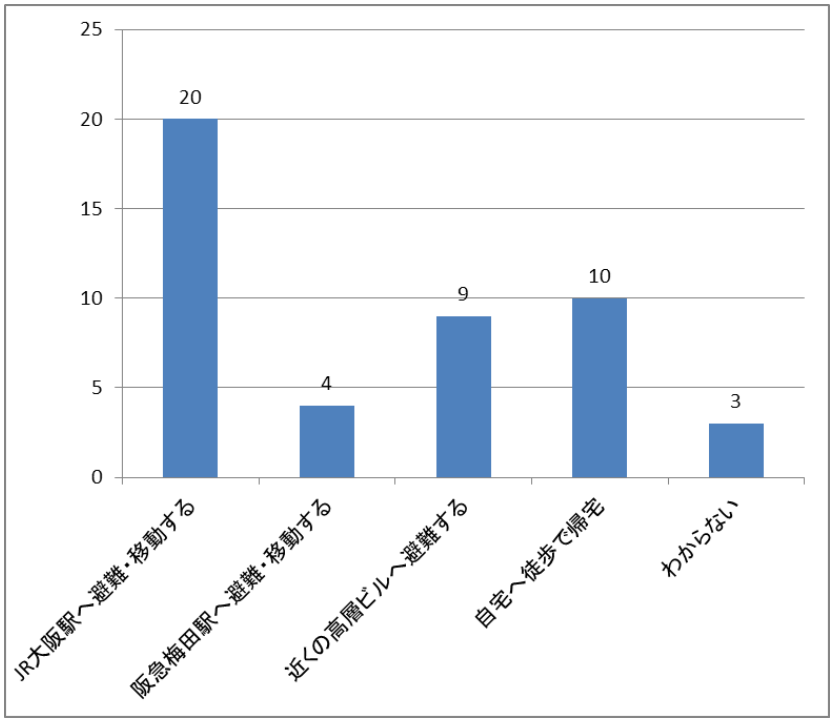


図 13　地上における避難意向を示した様々な場所とその人数（N=46 人）

津波の際における地上の避難行動として、半数近くに及ぶ 20 人が「JR 大阪駅を避難・移動するための場所として選択」した。その理由のほとんどが、JR 大阪駅は大規模施設であるため津波の被害が最小限であると考えており、さらに公共交通機関が復旧するまでに一時的に避難することが目的であるという意見があった。「阪急梅田駅を選択」した場合も、JR 大阪駅の意見と同様であった。「近くの高層ビル（大阪駅第 1 ビルや第 2 ビル、百貨店等）へ避難する」という 9 人の意見があり、見知った建物や人が集中しなさそうの建物の方が避難しやすいという理由からだった。一方で、建物に避難せずに徒歩で自宅に帰宅すると回答した人が 10 人もいた。その理由として、津波避難施設に避難する場合、一度避難施設に逃げると長時間出ることができないのではないかという不安と、帰宅することで家族の安否を確かめたいということが挙げられた。

次に、地下街における避難行動として、46 人中 43 人が「すぐ近くの出口（地上や建物内につながる階段）から地上に避難する」だった。その多くが、すぐに地下街のような密閉空間から外に出たいや外の状況を知りたいという理由の意見があった。やはり、津波を伴う震災時には人間の心理面において、避難行動が左右されることがこの結果から考えられる。一方で、残りの 3 人が「すぐには地下街から出ずに地下街を通って JR 大阪駅や阪急梅田駅まで避難する」という意見であった。

建物内においては、約 2 時間以内に津波が建物 2 階相当の高さで襲ってくると説明した上で「建物内 1,2 階にいる際どのような行動をとるのか」という質問をした。その結果、29 人が「建物の 3 階以上へ避難する」という意見であり、残りの 17 人は「階段を下りて地上へ脱出し、北区内からできるだけ遠くへ避難する」という意見であった。前者では、津波被害から逃れるためにより高いところへ避難したいという理由からが多く、一方、後者では 2 時間という避難の猶予が与えられているため、その時間内に被害予想地から逃れられると考えている人が多かった。

避難する際に心配・不安な事として最も多く挙げられたのは、「地震動による建物や道路の損壊、避難経路の寸断」である。また、「駅や高層ビルなどの津波避難施設や道路の混雑」なども挙げられた。それに関連して、避難の際の交通手段として車や公共交通機関を使用することをためらう結果が多かった。調査の集計によると、多くの人が徒歩を選択しているが、積極的に徒歩で避難したいというよりも、車や電車を使用したいが交通機関がマヒしており無理だと思うから、徒歩で逃げるしかないという意見の人が多かった。したがって、潜在的に車避難などの交通状況についても考慮したシミュレータを今後検討する必要があると考えられる。

3.5　本研究で扱う避難シナリオ

アンケート調査の結果をもとに、本研究では地上・地下街・建物内の 3 つの階層におけるエージェントを定義し、地上や地下、ビルを含む大都市空間における津波警戒時の人々の避難行動をシミュレートする。行動モデルについては次章で詳しく述べる。また、特に津波避難ビルを考慮した避難方法について着目し、一切、津波避難ビルを使用せずに避難する「非使用型」、アンケート調査で得たデータをもとに一定の割合の避難者が津波避難ビルを使用する「行動予測型」、想定した津波避難施設などの 3 階以上の階層へ避難誘導を行う「誘導型」を想定した。

これら 3 つの避難方法をそれぞれの避難シナリオとして想定し、各避難シナリオに対する避難状況の確認とそれぞれのケースの課題について検証を行う。

第 4 章　システム詳細

本システムは、JR 大阪駅・梅田駅周辺（北区）を対象として、南海トラフ巨大地震時に避難者が津波被害を逃れるためにどのような動きをするのか検証するためのツールである。第 3 章で整理したように、地上や地下、ビルを含む大都市空間における津波警戒時の人々の避難行動をシミュレートする計算機システムを開発し、津波避難ビルの指定、避難誘導方法や体制、避難誘導先の選定などに基礎的なデータを提供できるシステムの構築を目的としている。そのために、避難者の行動モデルを実装し、対象地域における各空間の避難状況を設定すると各状況下に対応する行動モデルに基づいて避難者が避難する行動を模するシステムとした。

本章では本システムの開発環境、システムの構成、動作について説明する。

4.1　開発環境

本システムは、株式会社構造計画研究所が開発したマルチエージェント・シミュレーションプラットフォームである「artisoc」を用いて実装した[23]。下記で、artisoc について説明する。

artisoc は、構造計画研究所が開発したマルチエージェントシミュレータ「KK-MAS」の使いやすさと汎用性をそのままに、実務システムとの連携を目指した次世代の複雑系シミュレータである。また、データベースや各種センサ機器からのデータを取り込み、コンピュータの中のエージェントを人間が Web 画面から操作する Web サービスや、ネットワーク上の複数のマシンを並列実行させる等、実務システムの一部としてマルチエージェントのアプローチを適用できる数々の連携機能を持っている。下記に artisoc の特徴を説明する。

① GUI によるモデル定義ができる。
② GUI によるマップ(2D,3D)やグラフなどの出力設定ができる。
③ ルール記述を支援するデバッグ機能を提供している。
④ 変数や関数名に日本語を利用できる。
⑤ VisualBasic ライクな文法により行動ルールを簡単に記述できる。
⑥ 便利な組込み関数を提供している。
⑦ ネットワーク図や関係図を簡単に出力ができる。
⑧ 複数回実行、レポート出力などの実行制御ができる。
⑨ Windows, MacOS X の両方で動作可能である。
⑩ 外部の DB, XML,テキストファイルの読み書きができる。
⑪ 作成したモデルファイルを自由に配布できる。

artisoc のプログラムの構成は段階構造で、最上位に「WORLD」エージェントが存在し、その下に「二次元空間」や「エージェント」、「変数」などのコンポーネントが存在する。各エージェントにルールを記述し、二次元空間でシミュレーション空間を作成する。ルールの記述言語は、主に Microsoft 社の Visual Basic に沿っている。二次元表示マップ（シミュレーション実行画面）や数値出力でエージェントの動作を視覚的に捉えることができる。また、artisoc のプログラムの構成図や本システムにおける構成図を図 14 と図 15 示す。

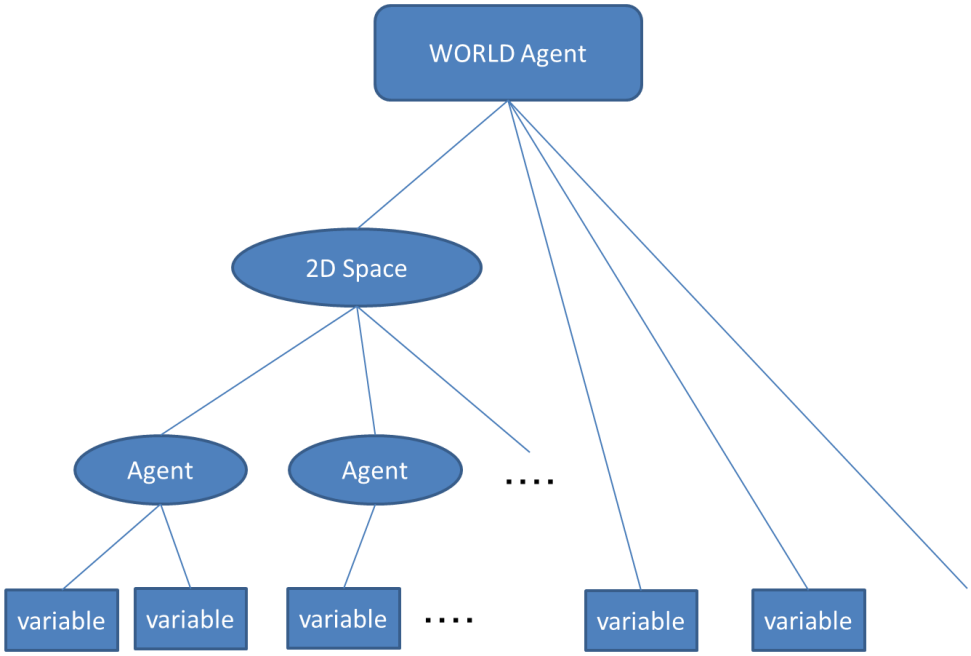


図 14　artisoc のプログラム構成図例

図 15　システム構成図

4.2　システムの内部仕様

以下に提案する本システムの内部仕様について説明する。

4.2.1　対象地域における地理情報

今回のシミュレーションの対象地域として、図 16 に示すように JR 大阪駅を中心とした周辺 2km 圏域（大阪市北区）を設定している。また、地上におけるベースマップとして、図 17 のように国土地理院[24]が提供する 1:25000 の基盤地図情報と、GIS（地理情報システム）の基盤データとして作成された「数値地図 25000（空間データ基盤）」の地図データを利用した。具体的には避難経路となる領域には道路縁情報や道路幅、道路の長さなど、高層ビルや駅施設などの都市領域として建物情報を用いた。避難経路（青色）となる領域を限定して、道路交差点にノード番号を、ノード間をつなぐ経路にはリンク番号を与え、Excel csv ファイルに記述した（図 18）。これらのノードとリンク間の接続関係を記述することで、本シミュレーションにおける地上空間上に道路ネットワークを作成した。

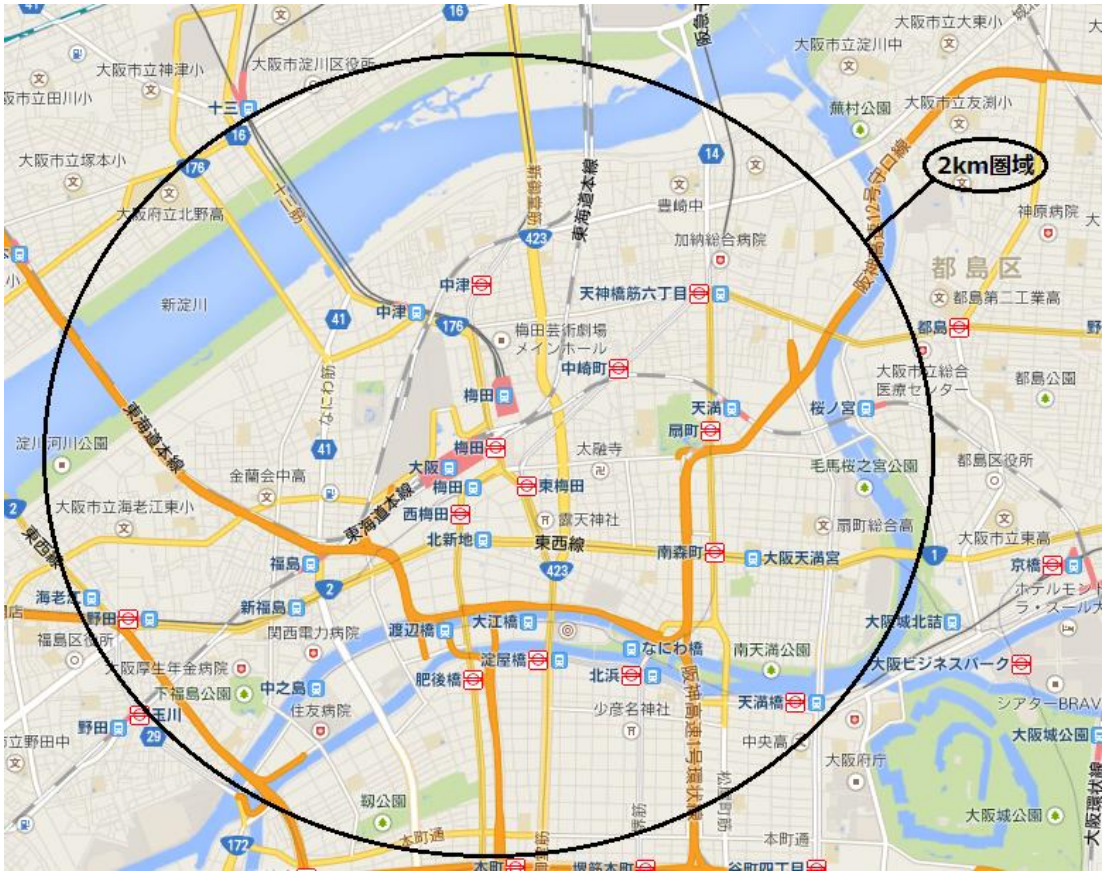


図 16　シミュレーションの対象地域

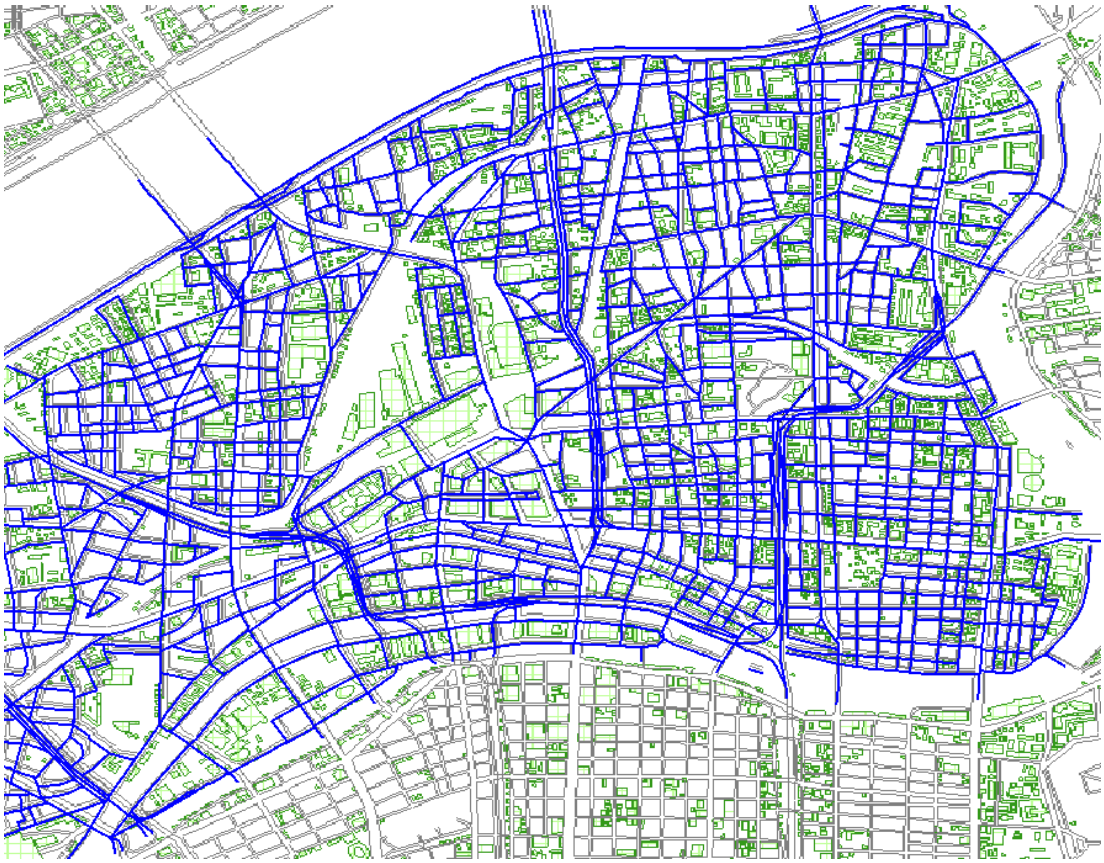
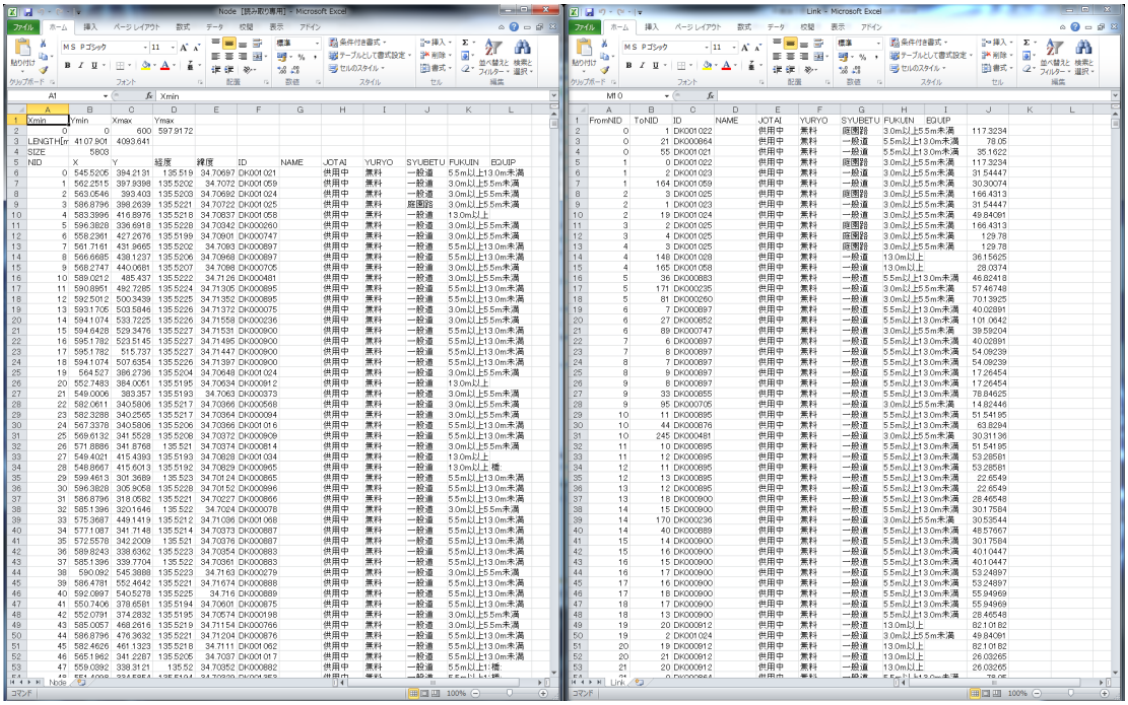


図 17　地上における道路ネットワーク図



Xmin	Ymin	Xmax	Ymax
0	0	600	597.9172
LENGTH[m	4107.901	4093.641	
SIZE	5803		

NID	X	Y	経度	緯度	ID	NAME	JOTAI	YURYO	SYUBETU	FUKUIN	EQUIP
0	545.5205	394.2131	135.519	34.70697	DK001021		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
1	562.2515	397.9398	135.5202	34.7072	DK001059		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満	
2	563.0546	393.403	135.5203	34.70692	DK001024		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満	
3	586.8796	398.2639	135.5221	34.70722	DK001025		供用中	無料	庭園路	3.0m以上5.5m未満	
4	583.3996	416.8976	135.5218	34.70837	DK001058		供用中	無料	一般道	13.0m以上	
5	596.3828	336.6918	135.5228	34.70342	DK000260		供用中	無料	庭園路	3.0m以上5.5m未満	
6	558.2361	427.2676	135.5199	34.70901	DK000747		供用中	無料	庭園路	3.0m以上5.5m未満	
7	561.7161	431.9665	135.5202	34.7093	DK000897		供用中	無料	庭園路	3.0m以上5.5m未満	
8	566.6685	438.1237	135.5206	34.70968	DK000897		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
9	568.2747	440.0681	135.5207	34.7098	DK000705		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満	
10	589.0212	485.437	135.5222	34.7126	DK000481		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満	
11	590.8951	492.7285	135.5224	34.71305	DK000895		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
12	592.5012	500.3439	135.5225	34.71352	DK000895		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
13	593.1705	503.5846	135.5226	34.71372	DK000075		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満	
20	594.1074	533.7225	135.5226	34.71559	DK000236		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満	
21	594.6428	529.3476	135.5227	34.71531	DK000900		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
22	595.1782	523.5145	135.5227	34.71495	DK000900		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
23	595.1782	515.737	135.5227	34.71447	DK000900		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
24	594.1074	507.6354	135.5226	34.71397	DK000900		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
25	564.527	386.2736	135.5204	34.70648	DK001024		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満	
26	552.7483	384.0051	135.5195	34.70634	DK000912		供用中	無料	一般道	13.0m以上	
27	549.0006	383.357	135.5193	34.7063	DK000373		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満	
28	582.0611	340.5806	135.5217	34.70366	DK000568		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満	
29	582.3288	340.2565	135.5217	34.70364	DK000384		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満	
30	24 567.3378	340.5806	135.5206	34.70366	DK001016		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
31	25 569.6132	341.5528	135.5208	34.70372	DK000909		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
32	26 571.8886	341.8768	135.521	34.70374	DK000814		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満	
33	27 549.4021	415.4393	135.5193	34.70828	DK001034		供用中	無料	一般道	13.0m以上	
34	28 548.8667	415.6013	135.5192	34.70829	DK000865		供用中	無料	一般道	13.0m以上 機	
35	29 599.4613	301.3689	135.523	34.70124	DK000865		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
36	30 596.3828	305.9058	135.5228	34.70152	DK000896		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
37	31 586.8796	318.0582	135.5221	34.70227	DK000896		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
38	32 585.1396	320.1646	135.522	34.7024	DK000078		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満	
39	33 575.3687	449.1419	135.5212	34.71086	DK001068		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
40	34 577.1087	341.7148	135.5214	34.70373	DK000887		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
41	35 572.5578	342.2009	135.521	34.70376	DK000887		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
42	36 589.8243	338.6362	135.5223	34.70354	DK000883		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
43	37 585.1396	339.7704	135.522	34.70361	DK000883		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
44	38 590.082	545.3898	135.5223	34.7163	DK000279		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満	
45	39 586.4781	552.4642	135.5221	34.71674	DK000888		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
46	40 592.0897	540.5278	135.5225	34.716	DK000889		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
47	41 550.7406	378.6581	135.5194	34.70601	DK000875		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
48	42 552.0791	374.2832	135.5195	34.70574	DK000198		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満	
49	43 585.0057	468.2616	135.5219	34.71154	DK000796		供用中	無料	一般道	5.5m以上5.5m未満	
50	44 586.8796	476.3632	135.5221	34.71204	DK000876		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
51	45 582.4626	461.1323	135.5218	34.7111	DK001062		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
52	46 565.1962	341.2287	135.5205	34.7037	DK001017		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満	
53	47 559.0892	338.3121	135.52	34.70352	DK000882		供用中	無料	一般道	5.5m以上1 機	

FromNID	ToNID	ID	NAME	JOTAI	YURYO	SYUBETU	FUKUIN	EQUIP	
0	1	DK001022		供用中	無料	庭園路	3.0m以上5.5m未満		117.3234
0	21	DK000864		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		78.05
0	55	DK001021		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		351.622
1	0	DK001022		供用中	無料	庭園路	3.0m以上5.5m未満		117.3234
1	2	DK001023		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満		31.54447
1	164	DK001059		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満		30.30074
2	3	DK001025		供用中	無料	庭園路	3.0m以上5.5m未満		166.4313
2	1	DK001023		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満		31.54447
2	19	DK001024		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満		49.84091
2	2	DK001025		供用中	無料	庭園路	3.0m以上5.5m未満		166.4313
3	4	DK001025		供用中	無料	庭園路	3.0m以上5.5m未満		129.78
3	3	DK001025		供用中	無料	庭園路	3.0m以上5.5m未満		129.78
4	148	DK001028		供用中	無料	一般道	13.0m以上		361.5625
4	165	DK001058		供用中	無料	一般道	13.0m以上		28.0374
5	36	DK000883		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		46.82418
5	171	DK000235		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満		57.46748
5	81	DK000260		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満		70.13925
6	7	DK000897		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		40.02891
6	27	DK000852		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		101.0642
6	89	DK000747		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満		39.59204
7	6	DK000897		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		40.02891
7	8	DK000897		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		54.08239
8	7	DK000897		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		54.08239
8	9	DK000897		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		17.26454
9	8	DK000897		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		17.26454
9	33	DK000855		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		78.84625
9	95	DK000705		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満		14.92446
10	11	DK000895		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		51.54195
10	44	DK000876		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		63.8294
10	245	DK000481		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満		30.31136
11	10	DK000895		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		51.54195
11	12	DK000895		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		53.28581
12	11	DK000895		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		53.28581
12	13	DK000895		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		22.6549
13	12	DK000895		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		22.6549
13	18	DK000900		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		28.46548
14	15	DK000900		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		30.17584
14	170	DK000236		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満		30.53544
14	40	DK000889		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		48.57667
15	14	DK000900		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		30.17584
15	16	DK000900		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		40.10447
16	15	DK000900		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		40.10447
16	17	DK000900		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		53.24897
17	16	DK000900		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		53.24897
17	18	DK000900		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		55.94969
18	17	DK000900		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		55.94969
18	13	DK000900		供用中	無料	一般道	5.5m以上13.0m未満		28.46548
19	20	DK000912		供用中	無料	一般道	13.0m以上		82.10182
19	2	DK001024		供用中	無料	一般道	3.0m以上5.5m未満		49.84091
20	19	DK000912		供用中	無料	一般道	13.0m以上		82.10182
20	21	DK000912		供用中	無料	一般道	13.0m以上		26.03265
21	20	DK000912		供用中	無料	一般道	13.0m以上		26.03265

図 18　避難経路情報（ノード番号とリンク番号）

また、数値地図 25000（空間データ基盤）に収録されているデータとして、2 万 5 千分 1 地形図に相当する精度を持つ、道路中心線、鉄道中心線、河川中心線、水涯線、海岸線、行政界、基準点、地名、公共施設、標高の 10 項目がある。その中でもこのデータにおける道路情報は、道路の名称、種別（一般道、高速道路、石段、庭園路）、状態（建設中、供用中）、国道番号、高速道または一般道、有料または無料、幅員などの情報が収録されている。さらに、それらのデータを本システムに使用するために、それらのデータにおける相互の関連性や継承関係を大きな図式（スキーマ）、つまり応用スキーマでまとめたものを図 19 に示す。

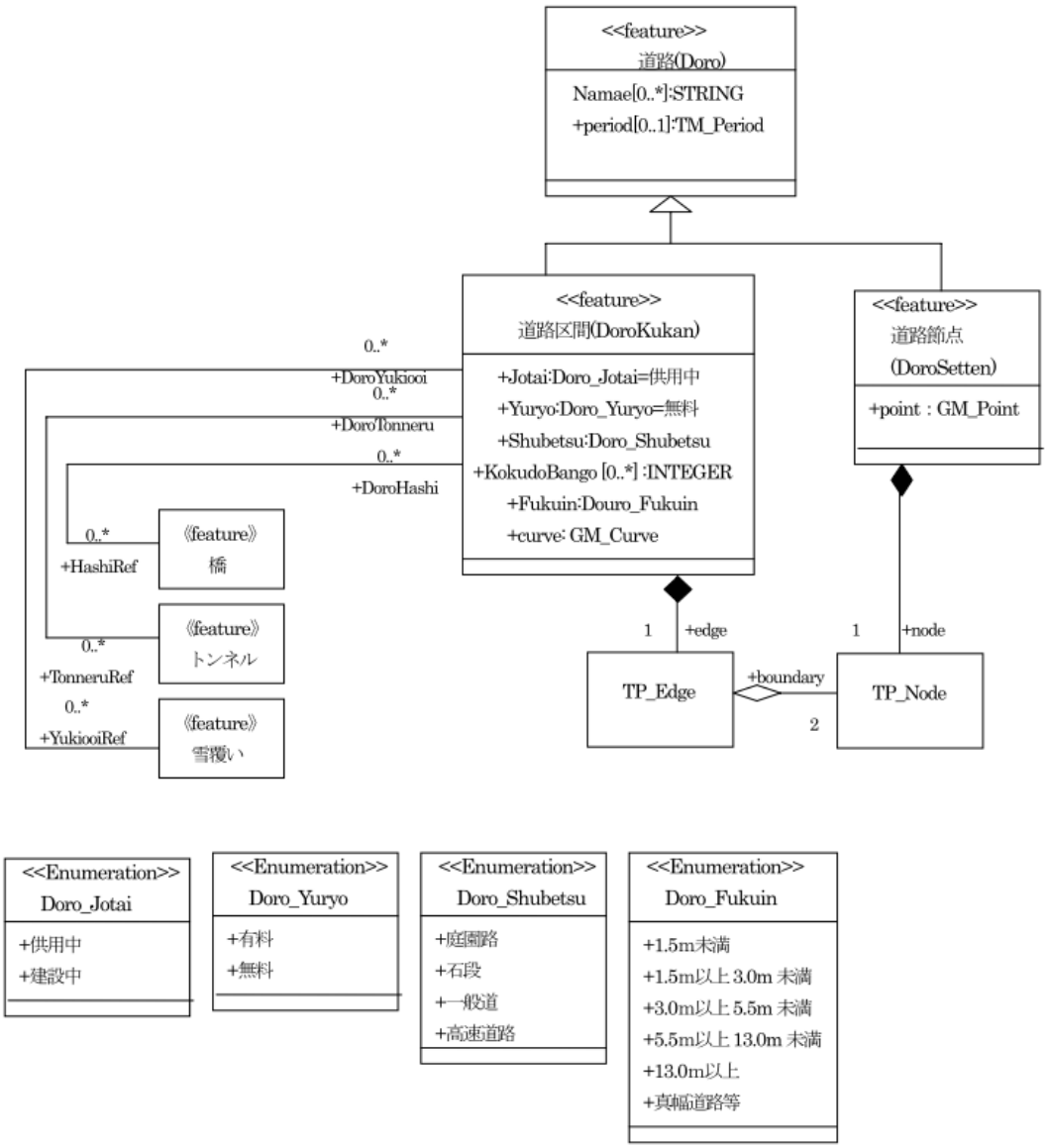


図 19　道路情報のデータ構造

4.2.2　対象地下街と津波避難ビルの設定

対象地域には JR 大阪駅のほか、阪急および阪神の梅田駅、市営地下鉄梅田駅・東梅田駅・西梅田駅、JR 北新地駅が立地しており、交通の要衝となっている。また、百貨店・ホテル・オフィスビルなどの商業施設や高層ビルが林立している。主要道路の下にはホワイティうめだ・ディアモール大阪といった地下街があり、隣接ビル地下にある商業施設群のほか、堂島地区の「堂島地下センター」とも結合しており、図 20 のようにビルの地下階が地下街とほぼ一体化した巨大な繁華街を構成している[25]。

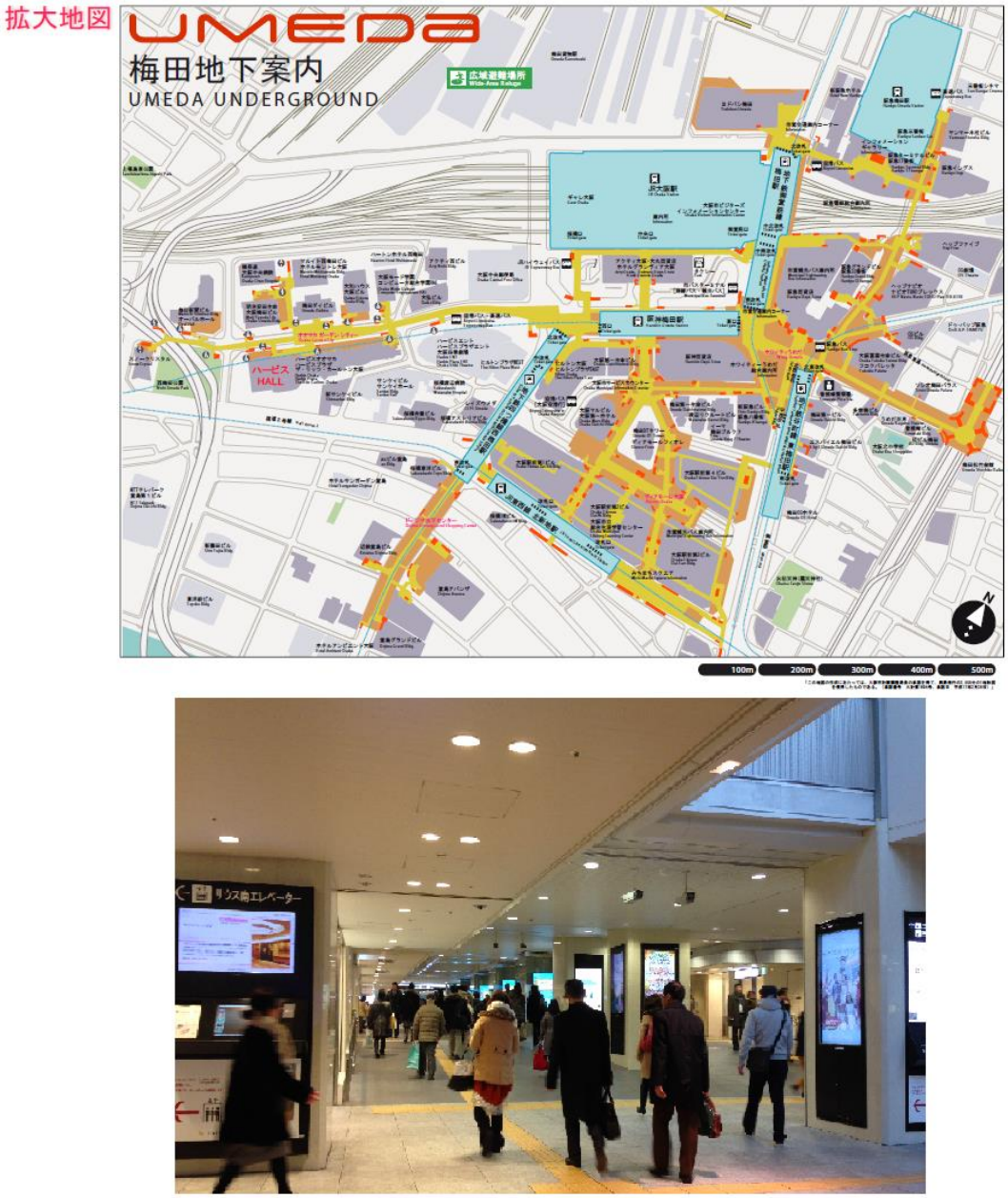


図 20　梅田地下街案内図と風景[25]

本研究では、これらのような地下および地上に建つビル施設を地上空間に配置して考慮するシミュレータを提案する。本システムで使用する対象地下街の平面図を図 21 に示す。

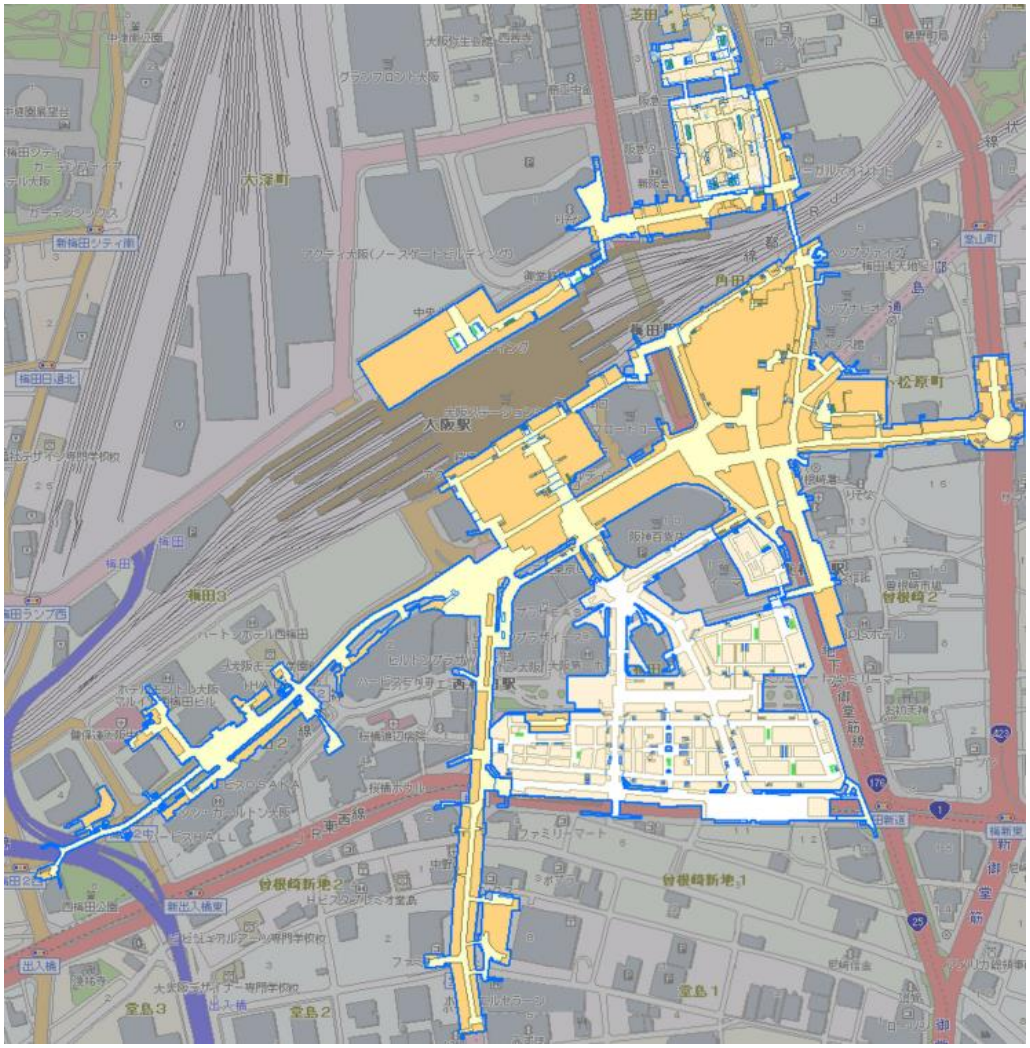


図 21　梅田地下街平面図

第 2 章で述べたように、大阪市の北区では、南海トラフ巨大地震による津波の想定浸水エリアに新たに含まれた（平成 24 年 8 月内閣府発表）ことを受け、地域住民等の安全を守るための対策として津波避難ビルの確保に取り組んでいる。現在では、ビルや商業施設といった 7 つの施設と津波避難ビル協定を締結している[11]。しかし、その数だけでは十分な避難対策をとっているとは言えず、より多くの建物を津波避難ビルとして策定する必要がある。そのため、大阪市が現在提携している施設とは別に、いくつかの施設を避難ビルとして、図 22 と表 3 に示す施設を緊急避難施設として設定することで津波避難ビルの検討が可能とする。

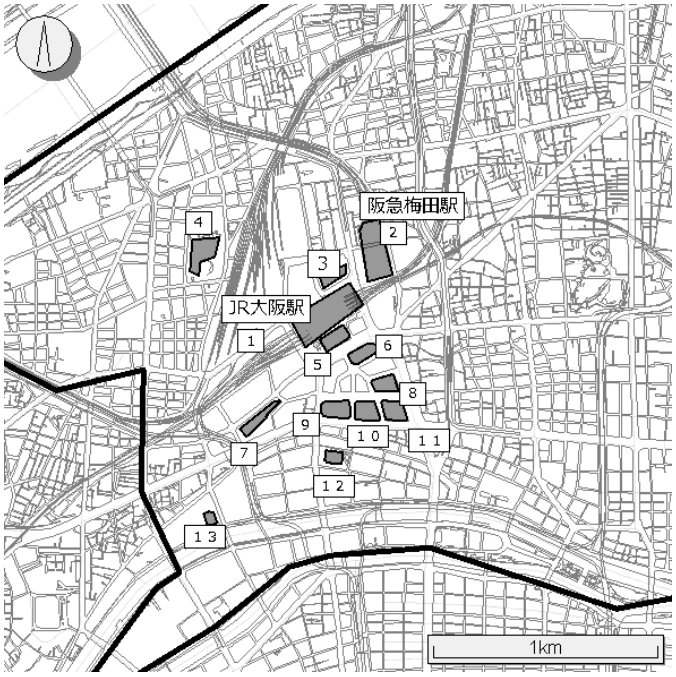


図 22　津波避難ビルの位置図

表 3　津波避難ビルの情報一覧

施設用途	番号	施設名
駅	1	JR 大阪駅
	2	阪急梅田駅
店舗	3	ヨドバシカメラ
店舗・事務所	4	梅田スカイビル
百貨店	5	大丸百貨店
	6	阪神百貨店
ホテル	7	ザ・リッツ・カールトン大阪
店舗・事務所	8	大阪駅前第 4 ビル
	9	大阪駅前第 1 ビル
	１０	大阪駅前第 2 ビル
	１１	大阪駅前第 3 ビル
	１２	堂島アバンザ
公共施設	１３	大阪中之島合同庁舎

また本研究では建物空間における避難者の避難行動をシミュレートし、その様子をリアルタイムで視覚的に観測するために、津波避難ビルの建物内空間を作成する必要がある。そこで、本システムでは大阪駅第 1 ビルを対象に建物空間を作成した。大阪駅第 1 ビル内には、飲食店や金券ショップ、コンビニなどの様々なテナントが多く存在し、上層階はオ

フィスとして利用されている。そのため、買い物客以外にも通退勤者など多くの人に利用されているビルである。そのため、本研究において大阪駅第 1 ビルを建物空間として作成することは様々なデータを収集するには適している。また、津波避難において大阪市などは建物内 3 階以上への避難または避難誘導を推奨しており、その方針に基づいて本システムでは建物 1 階から 3 階までの避難行動を扱い、その様子をシミュレータの出力として表示する。大阪駅前第 1 ビルの外観とそれぞれの階層におけるフロアマップを図 23 に示す。

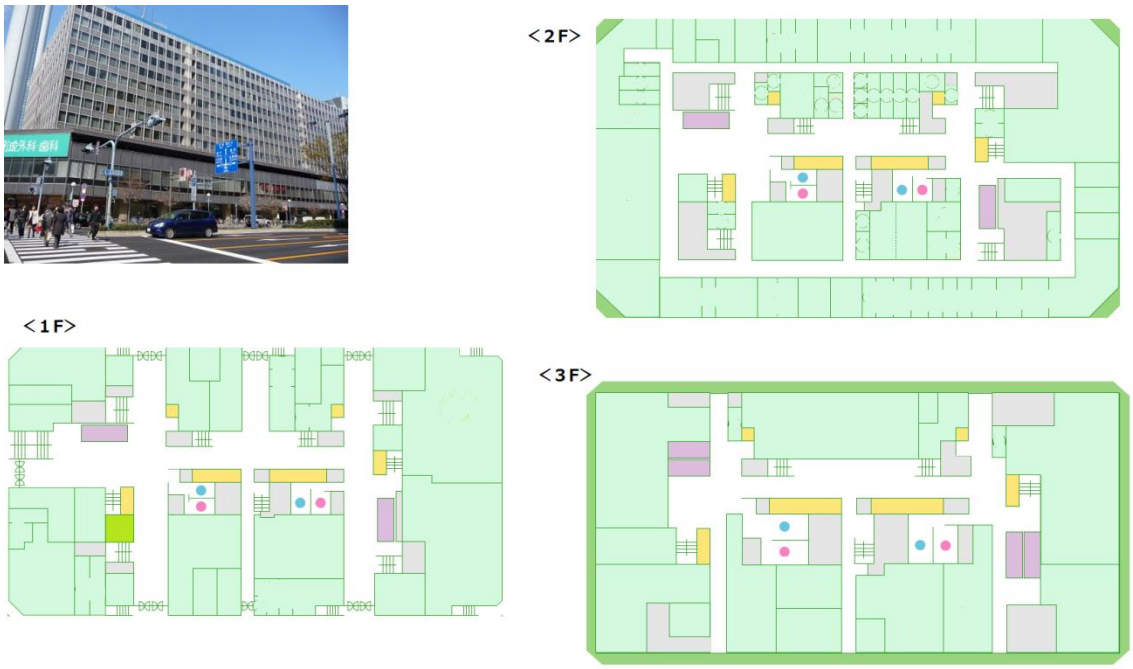


図 23　大阪駅前第 1 ビルの外観とフロアマップ図

避難経路として、4.2.1 節で述べたとおり地上空間上では道路交差点をノード、道路をリンクとする道路ネットワークを作成した。一方で、地下・建物内空間においては地上空間のような道路ネットワークを構築するのではなく、図 24 に示すような小さいメッシュ（セル又は格子と同じ）を用いて微細ネットワーク空間を形成した。本研究では、震災時にビル等からの避難者と地上にいる避難者の衝突などの状況が避難全体に与える影響の分析などを行うため、本シミュレータでは地下や建物空間において正確で詳細なデータを計測する必要がある。そこで様々な形状の空間を扱えるよう、小さいメッシュを用いて空間モデルを表現し空間内に微細ネットワークを形成する。これにより、空間内の避難者の動きを正確に表現でき様々なデータも収集することができる。

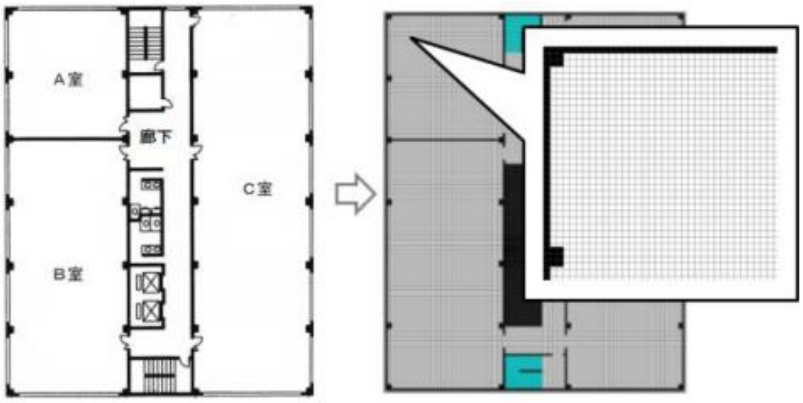


図 24　小さいメッシュで表現された微細ネットワーク空間

4.2.3　避難者エージェントの定義

第 3 章で述べたとおり、津波被害から逃れるために地上・地下・建物内などの様々な空間において違った避難行動を行うと本研究では考えている。そこで、本システムでは図 25 のようにエージェントの位置、つまり地上・地下・建物内の 3 つの空間ごとにそれぞれ異なる避難行動が定義されたエージェントを用いる。本節では、それぞれのエージェントの避難行動などを説明する。

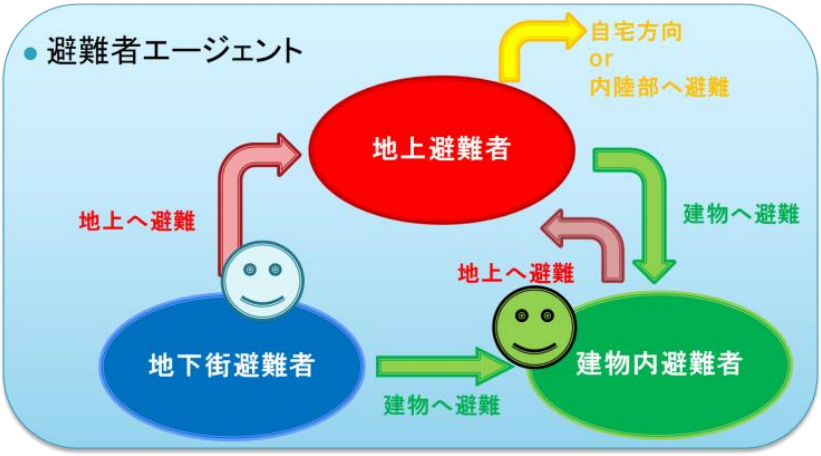


図 25　避難者エージェント

4.2.3.1　地上にいる場合の避難行動の設定

(1)エージェントの避難先

このエージェントは、地上、つまり図 26 に存在する避難者をモデル化している。このエージェントは、自らの位置と全ての津波避難ビル（赤色の建物）や避難目的地（黒丸）の距離を計算し、最も近い津波避難ビルや避難目的地を目的地として避難行動を開始する。

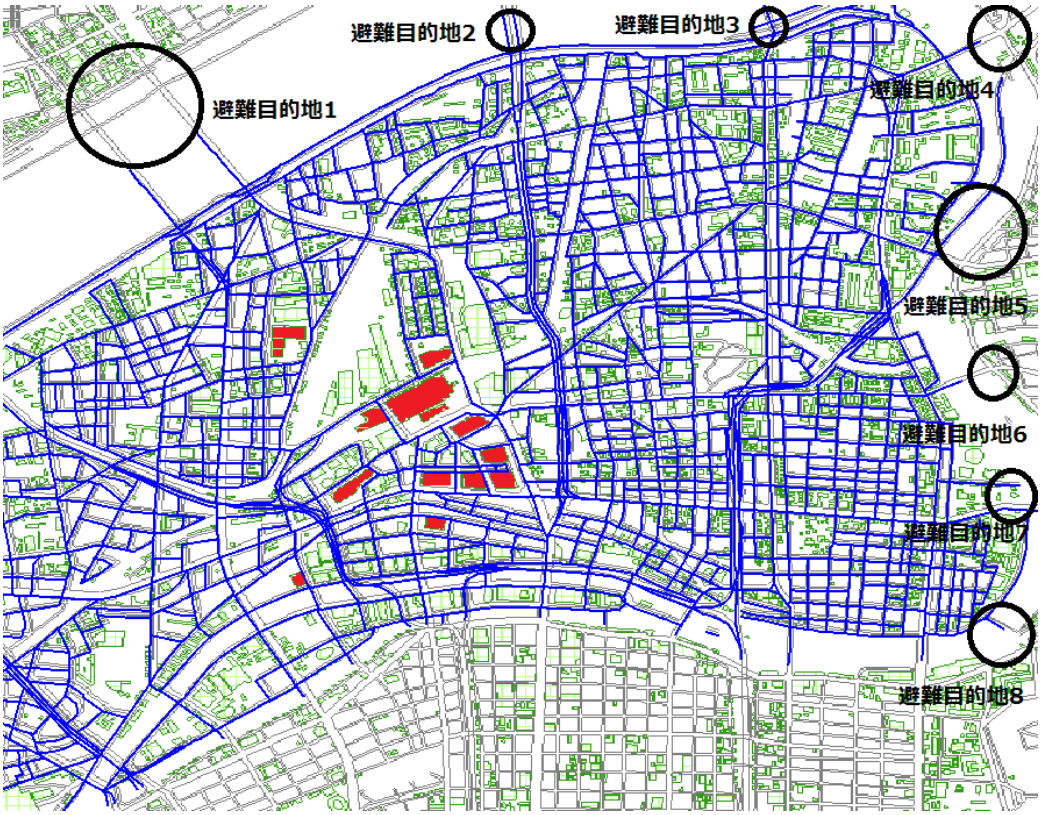


図 26　地上における避難経路図と避難目的地

(2)エージェントの基本行動

シミュレーション開始時には、地上空間において避難経路上にランダム形式で地上にいるエージェントを配置する。避難行動を開始した地上にいるエージェントは、最終目的地とした津波避難ビルや場所への最短経路を通るように、現在のノードの隣接ノード（目標ノードと呼ぶ）を決定し、移動することを繰り返す。最終目的地とした地点に到着した時点で避難完了とする（図 27）。また津波避難ビルに避難後は、後述する建物内避難者のエージェントと同様の避難行動を開始する。

経路選択のルールは図 28 に示すように、それぞれのノードに対して、交差点から交差点までの距離を用いて重み付けを行い、最も近い津波避難ビルや避難目的地を最終目的地とし、各エージェントは最終目的地までの最短経路を通る。ここで、最短経路の検索には、ダイクストラ法を採用した。

実際には経路以外にも人が通過できる可能性がある場所（公園等）は存在するが、本システムでは経路上のみをエージェントが移動することとした。また、本システムでは道路上には車や信号が存在しないものとし、人の混雑により速度が低減しても経路の迂回をすることはない。

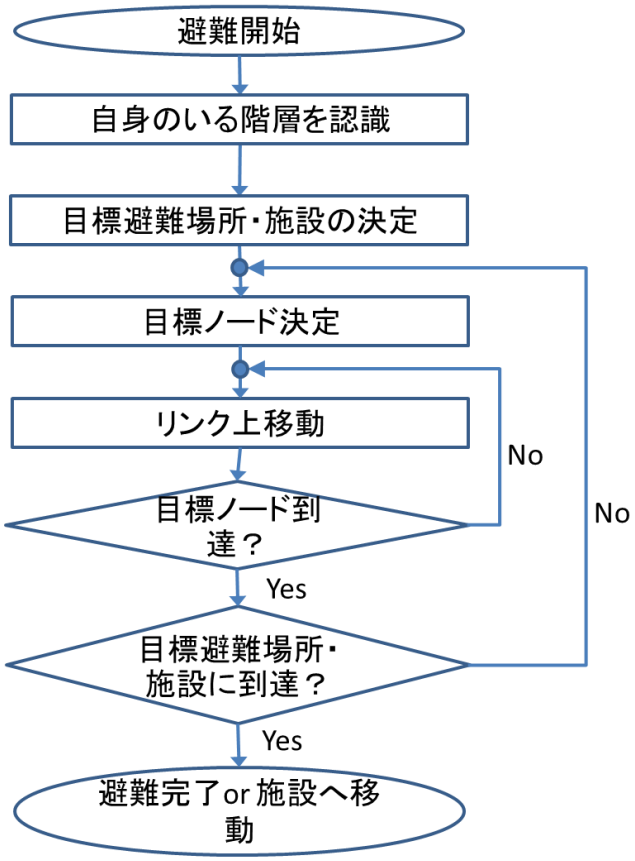


図 27　地上避難者のエージェントの行動フロー

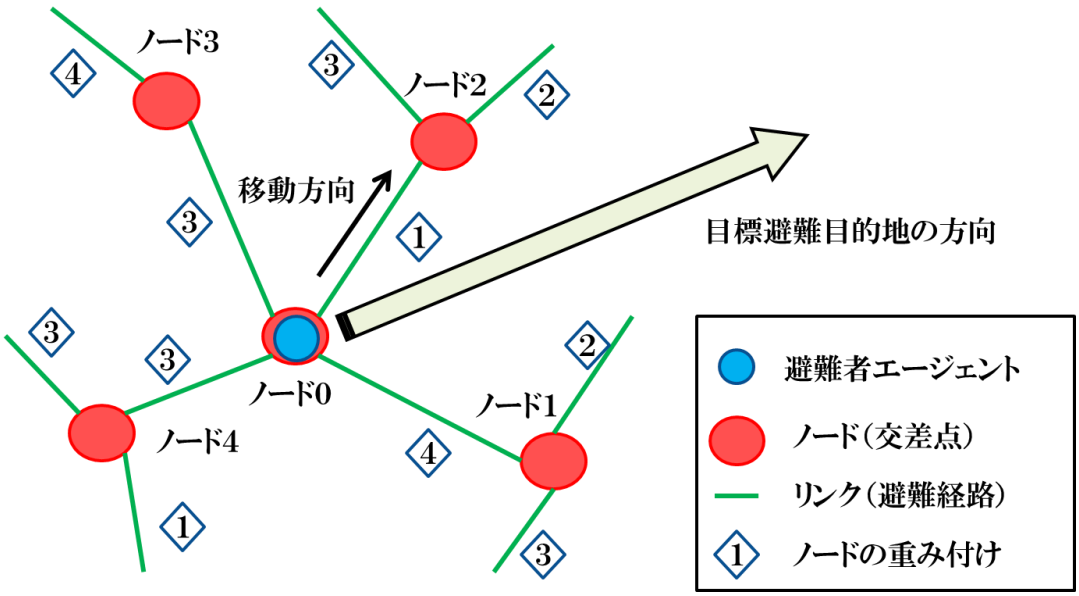


図 28　道路ネットワーク上のエージェントの移動

4.2.3.2　地下にいる場合の避難行動の設定

(1)エージェントの避難先

地下にいる場合のエージェントは、梅田地下街つまり図 29 に存在する避難者をモデル化している。赤丸は地上や建物内の 1 階に通じる出口を表しており、地下街避難者エージェントはこの出口に向かって避難行動を開始する。

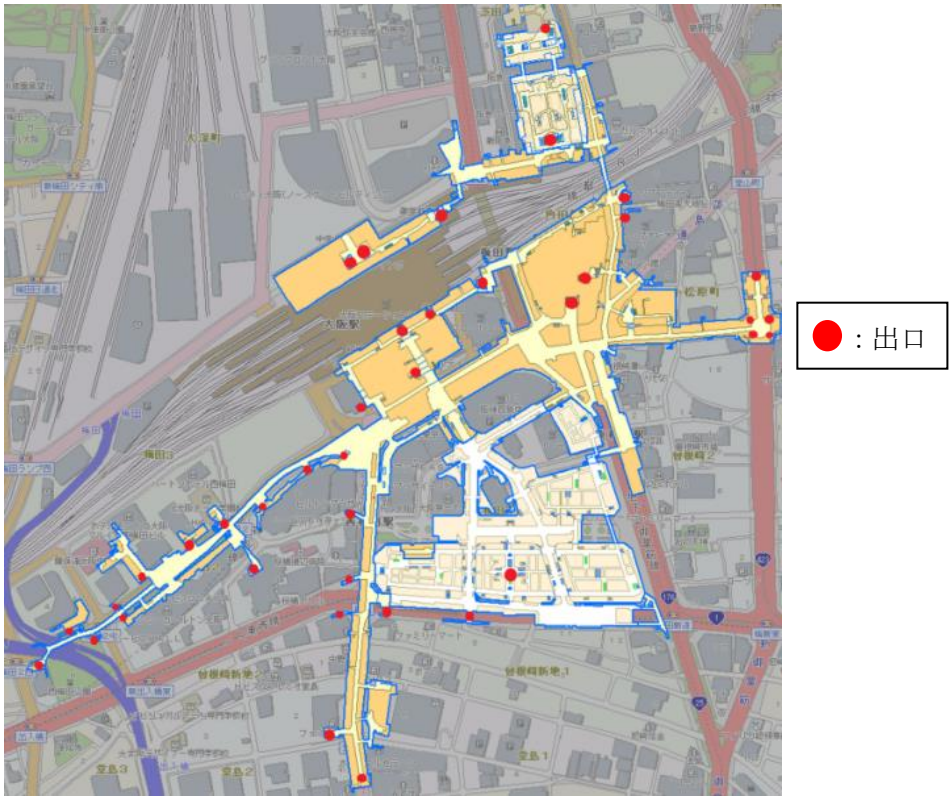


図 29　梅田地下街空間図と出口

(2)エージェントの基本行動

シミュレーション開始時には、地下空間にランダム形式で避難者エージェントを配置する。地下に存在する避難者エージェントは、自らの位置と地上や建物 1 階への全ての出口との直線距離を計算し、最も直線距離が近い出口を目指して避難行動を行う。まず、目的地として決定した出口につながるマス目上に存在するルートを選び、その前方に壁や人が存在するかどうかを確認する。もし存在すれば移動方向を変更する回避行動をとり、再び出口に向かって移動する。この行動ルールを繰り返し、目的地とした出口に到着した時点で地上や建物 1 階へ移動する（図 30）。また出口に到着後、建物が津波避難ビルであれば、後述する建物内避難者のエージェントと同様の避難行動を開始し、そうでなければすでに述べた地上避難者のエージェントと同様の避難行動を開始する。

地下街空間では、マス目状の小さいメッシュを用いた微細ネットワーク空間となっているため、避難者エージェントは格子の交点から交点に移るような動きをセル空間上で行う（図 31）。

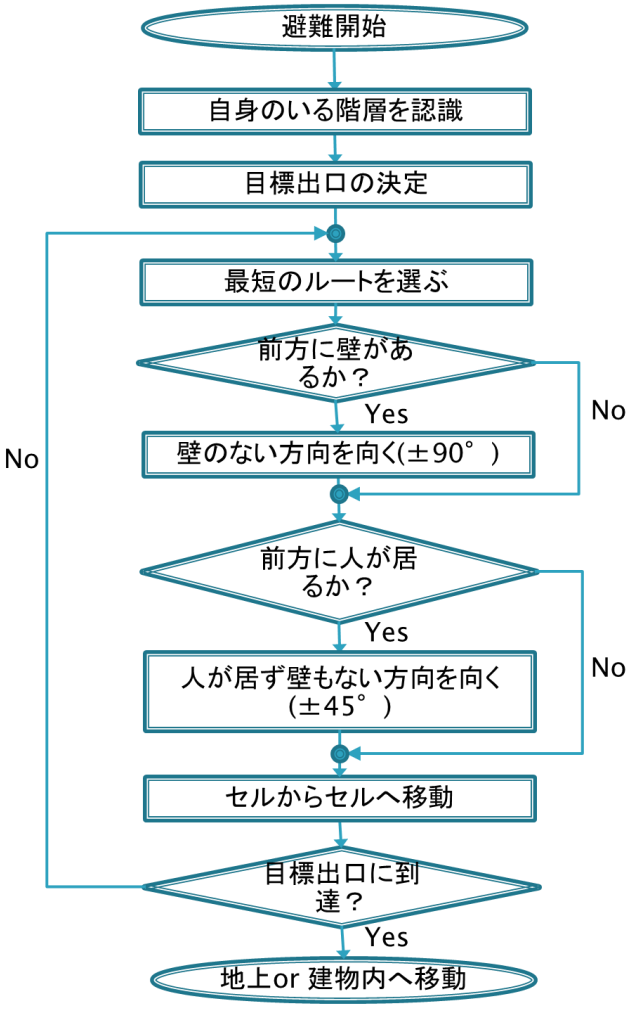


図 30　地下街避難者のエージェントの行動フロー

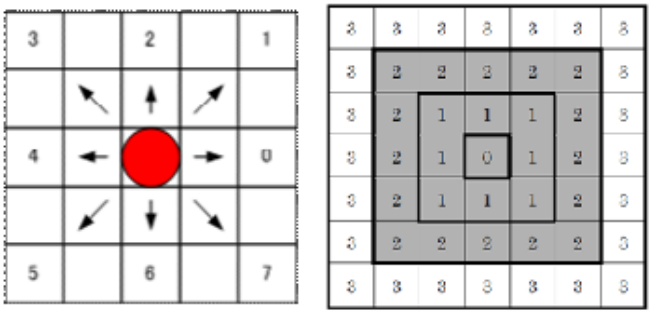


図 31　避難者のセル間移動

4.2.3.3　建物内にいる場合の避難行動の設定

(1)エージェントの避難先

建物内にいる場合のエージェントは、建物内（大阪駅第 1 ビル）つまり図 32 に存在する避難者をモデル化している。このエージェントは、自らの位置と建物内の全ての出口（緑色）や階段（青色や橙色）との直線距離を計算し、最も直線距離が近い出口、又は階段に対して避難行動を開始する。

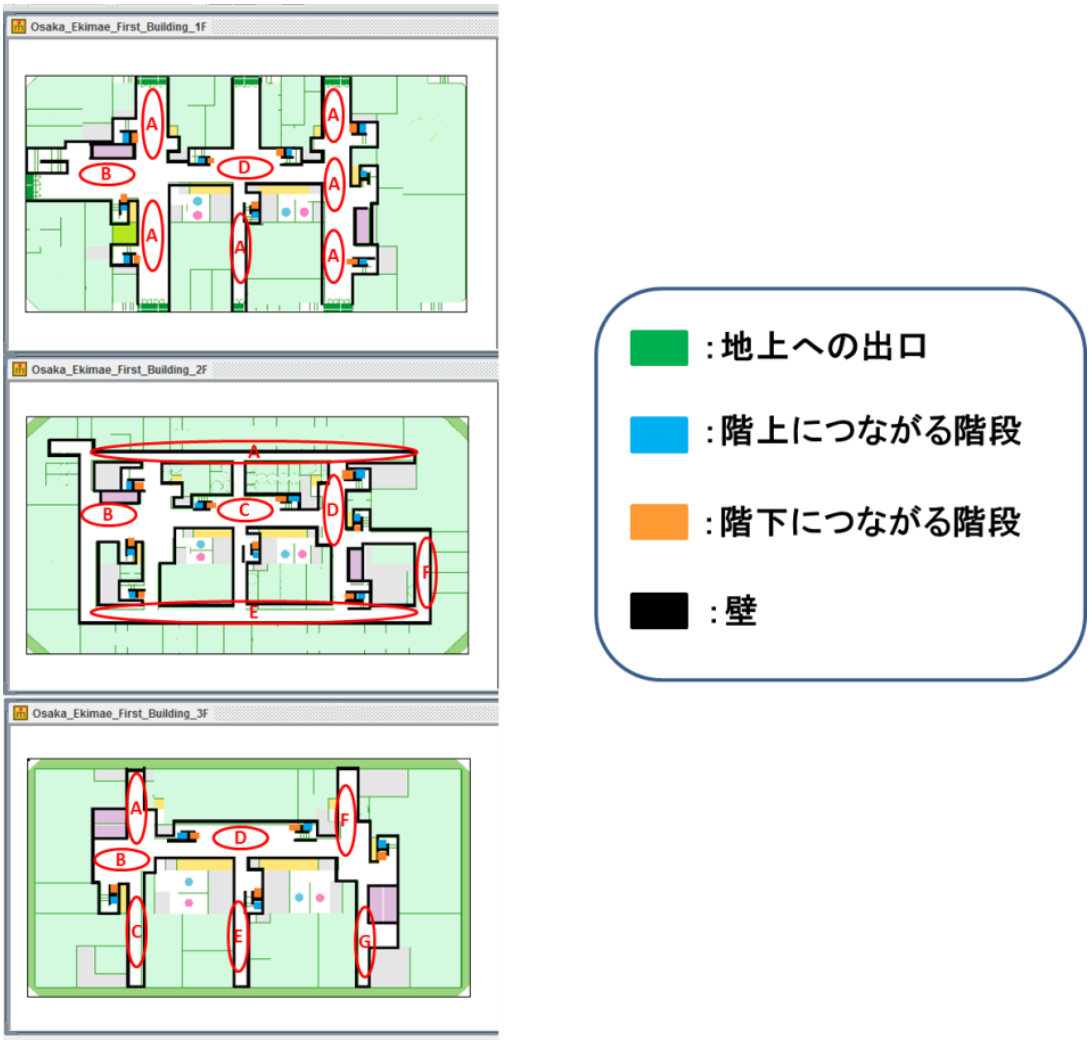


図 32　大阪駅第 1 ビル空間内図と出口や階段

(2)エージェントの基本行動

シミュレーション開始時には、建物空間において図 32 に示すアルファベットで分けられたエリア毎に避難者エージェントをランダムに配置する。まず、建物内避難者エージェントは、建物内から地上へ避難するエージェントと建物の 3 階以上へ避難するエージェントに分類される。どちらの行動をするかは、シミュレーション開始時に設定されたパラメー

タに基づき、確率的に決定される。避難行動は、基本的にエージェントが地下にいる場合と同様である。それぞれの避難者エージェントは、自らの位置と全ての出口や階段との直線距離を計算し、最も直線距離が近い出口や階段に対して避難行動を行う。まず、出口や階段につながるマス目上に存在するルートを選び、その前方に壁や人が存在するかどうかを確認する。もし存在すれば移動方向を変えるなどの回避行動をとり、再び出口や階段に向かって移動する。この行動ルールを繰り返し、目標とした出口、または階段に到着した時点で地上や建物の各階へ移動する（図 33）。また出口に到着後、地上避難者のエージェントと同様の避難行動を開始し、上層階へ上がったエージェントは 4 階にたどり着くと避難完了とする。

また、建物内空間は地下街空間と同様に、マス目状の小さいメッシュを用いた微細ネットワーク空間となっている。そのため、4.2.3.2 節の図 24 に示したように、地下避難者のエージェントと同様の方法で移動する。

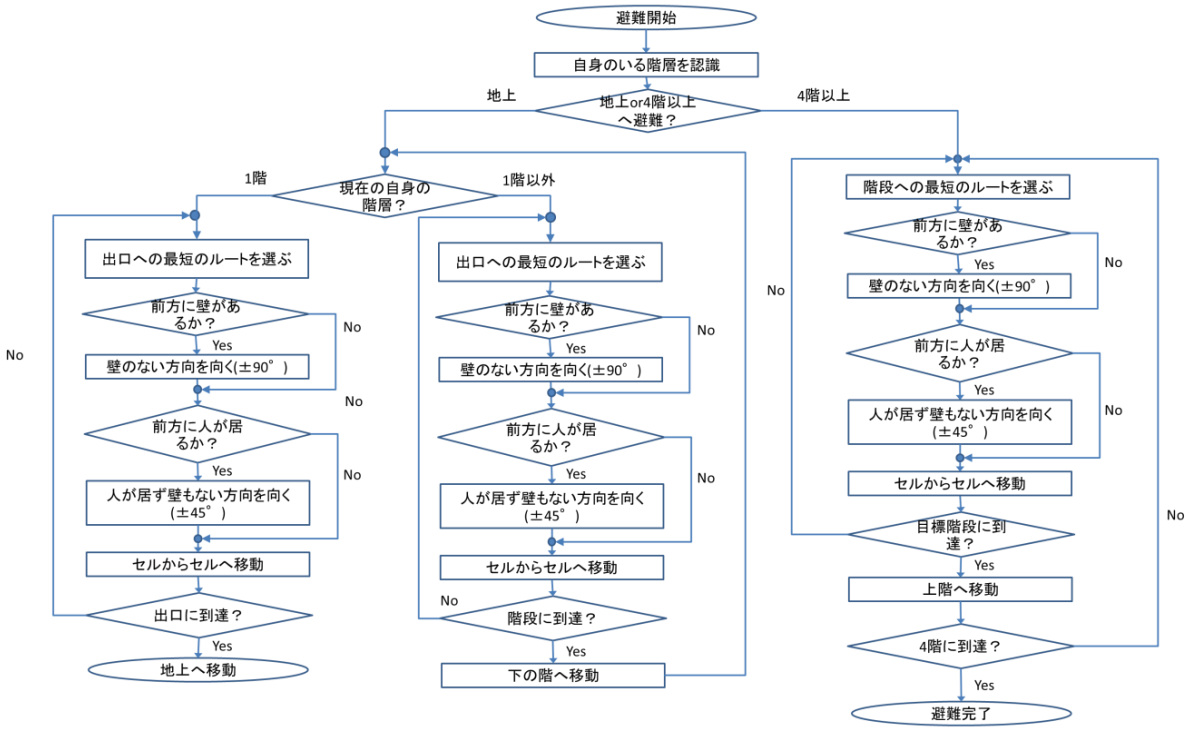


図 33　建物内避難者のエージェントの行動フロー

4.2.3.4　エージェントの避難行動パラメータ

人は、目的地に向かう際、目的地に向かって直進するだけでなく、加速・減速したり、障害物を回避したりといった行動をとる。本節では、上記のような歩行行動を模すために避難者エージェントに与えた様々なパラメータを説明する。

①自由歩行速度

人は、周囲の障害物等の影響から、一定速度ではなく加速・減速を繰り返しながら歩行している。しかし、周囲の障害物等から物理的・心理的影響も受けることがない場合には、無理に加速・減速することなく歩行者自身の最も歩きやすい速度で歩行する。このような歩行を自由歩行といい、この自由歩行時の速度を自由歩行速度V_iと定義する。本研究では、V_i＝1.33+ σ [m/sec]とする。 σは、平均 0、標準偏差 0.1 の正規分布に従う乱数である。

②歩行者の視野

人は、前方にいる他の歩行者や壁などの障害物を認知すると、衝突の危険を察知し回避行動を行う。このとき、前方の障害物すべてから影響を受けるわけでなく、ある空間に入った障害物からのみ影響を受ける。この空間を歩行者の視野と定める。既存研究において、この視野に相当する空間として、円や扇形、長方形など、様々な形状が考えられているが、本研究では扇形を用いる。

Hall は、人間の感覚特性に基づいて人間感覚距離を公衆距離、社会距離、個体距離、密接距離の 4 種類に分類した[26]。本研究では、避難者エージェントが歩行者や壁に対する視野を、公衆距離を用いて半径R_{ob}＝7.5m の扇形とし、歩行時の視野はおよそ左右 60°であることから、扇形の中心角を歩行者の現在の移動方向を中心とする 120°とする。本システムでの地下や建物内では、メッシュによる空間の管理を行っている。そこで、避難者エージェント視野を設定し、メッシュ状にその視野を重ねることで、各エージェントが状態を知ることのできるメッシュを定義する（図 34）。

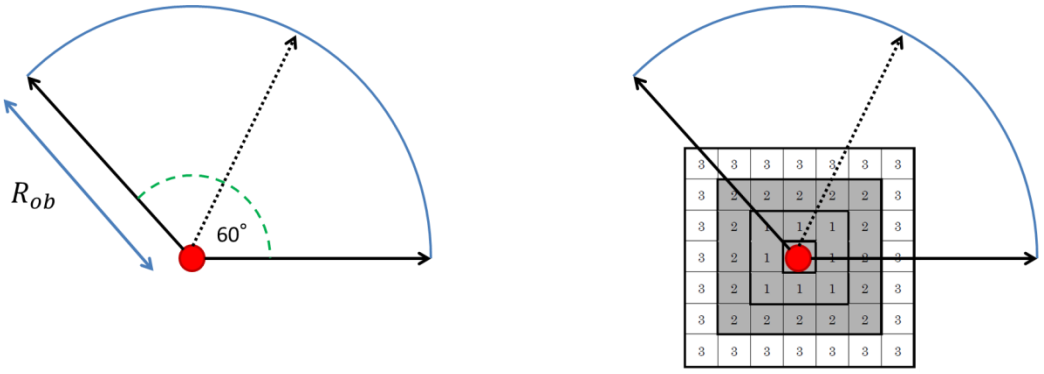


図 34　避難者の視野

③群集歩行速度

群集における歩行速度は、歩行者の前方周囲における密度（群集密度）によって変化する。そのため、上記で述べた①と②を用いて、群集歩行速度と群集密度の関係を以下に示す。群集歩行速度は、自由歩行速度を上限とし、歩行者の群集密度に応じて速度を動的に低減させることにした[27]。ある避難者 i の歩行速度とv_iとすると

$$v_i = \begin{cases} V_i & (0 \leqq \rho < \rho_i) \\ 1.8\rho^{-1} - 0.3 & (\rho_i \leqq \rho < 6.0) \\ 0 & (6.0 \leqq \rho) \end{cases} \quad (4.1)$$

ここでV_iは①の自由歩行速度を表しており、ρ_iは$V_i = 1.8\rho^{-1} - 0.3$を満たす密度である。また、$\rho_i \leqq \rho < 6.0$ の範囲の速度低減を表す式は、群集密度 6.0 人/㎡で群集歩行速度が 0m/sec となる関数を設定した。

④階段における歩行速度

建物内には通路の他に多数の階段が存在する。大震災時にはエレベータなどの建物内の昇降機が停止することが予測されるため、ほとんどの避難者は建物内の階段を利用して避難することが考えられる。そのため、建物内の階段では、通路における群集の歩行速度を設定するのではなく、階段における上り下りを考慮した避難者の歩行速度を設定しなければならない。

そこで、[28]の昇降時における密度と速度の関係式から、垂直移動速度V_y[m/sec]とすると、

$$V_y = 0.5 - 0.075\rho \quad (4.1)$$

となる。ここでρは③で述べたのと同様に、エージェントの視野内の群集密度を表す。

4.2.4 プログラムの組み込み関数

本シミュレータでは、様々な組み込み関数を定義しており、それぞれの関数を以下で説明する。

①避難者エージェント（Person）

全ての空間における避難者エージェントであり、各空間における避難行動や歩行速度、視野範囲などの情報を定義している。また、シミュレーション開始時には各空間に配置される。

②ノードエージェント（RodeNode）

地上空間におけるマップ上の避難経路の交差点を点情報として格納するためのポイントエージェントである。あらかじめ用意した Excel csv ファイルをエージェント初期設定に入力することで、道路交差点の構成を再現する。

③壁エージェント（Wall）

地下街空間や建物内空間上において、空間内の壁のレイアウトを表現するためにエージェントとして定義したものである。壁エージェントの初期値としてあらかじめ用意した Excel csv ファイルをエージェント初期設定に入力することで建物の構成を再現する。

④出口エージェント（Exit）

建物内や地下街から避難者エージェントを脱出させたり、建物外から建物内に出現させたりする動作を行う出口エージェントである。また、この出口エージェントを使用して出口における群集流動係数を計測することによって、本システムにおける避難者エージェントのモデルの妥当性検証も行う。

⑤下り階段エージェント（DownStair）

避難者エージェントを下の階層へ移動させるエージェントである。建物内避難者で地上へ出ようとするエージェントが自身のいる階層に出口がない場合は下の階へと避難することを再現するため、階段の途中に設置された下り階段エージェントは捕捉した避難者エージェントを図 35 のように 1 つ下の階に移動させる。

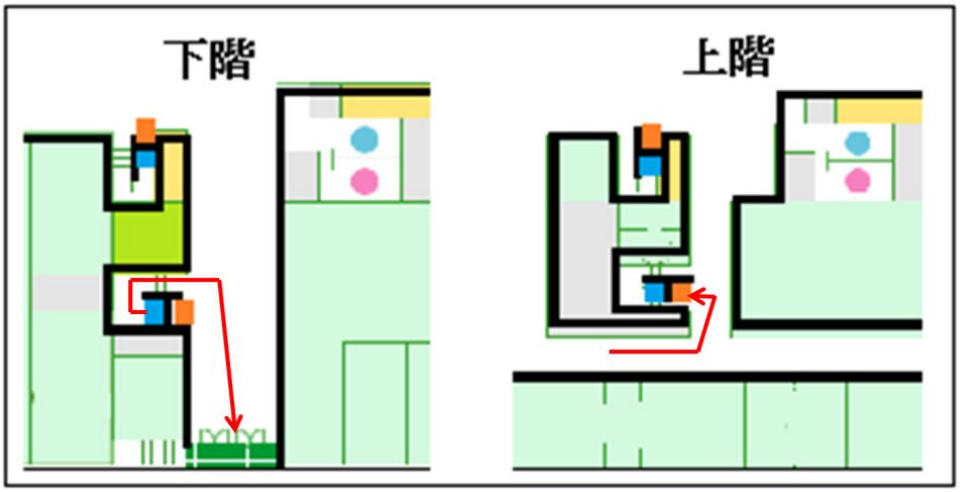


図 35　下り階段による移動の様子

⑥上り階段エージェント（UpStair）

避難者エージェントを上の階層へ移動させるエージェントである。建物内避難者で 4 階以上へ避難しようとするエージェントが上の階へと避難することを再現するため、階段の途中に設置された上り階段エージェントは捕捉した避難者エージェントを図 36 のように 1 つ上の階に移動させる。

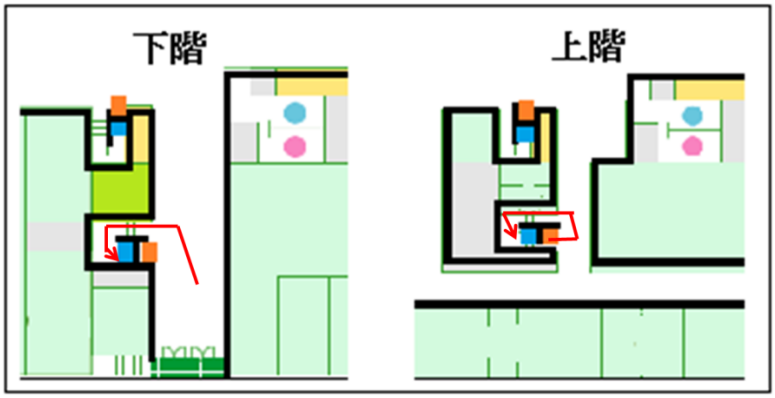


図 36　上り階段による移動の様子

⑦混雑度（Confusion）

シミュレーション実行中にマップ上に存在する避難者が、避難経路上での混雑する状況を変数で定義したものである。

⑧大阪駅第 1 ビルの各階層における避難人数（Pep1A、Pep1B、Pep1C、Pep1D、Pep1E、Pep1F、Pep1G、Pep2A、Pep2B、Pep2C、Pep2D、Pep2E、Pep2F、Pep3A、Pep3B、Pep3C、Pep3D、Pep3E、Pep3F、Pep3G）

シミュレーション開始時、大阪駅第 1 ビル内の各階層において、4.2.3.3 節の図 24 で示したエリア毎に避難者の人数と初期配置をコントロールパネルによって指定できるように変数で定義したものである。

⑨大阪駅第 1 ビルの各階層における地上への避難行動率（Down_rate1、Down_rate2、Down_rate3）

各階層において、地上へ避難する避難者の割合をコントロールパネルによって指定できるように変数で定義したものである。（最大値は 100%）

⑩大阪駅第 1 ビルの各階層における上階への避難行動率（Uphill_rate1、Uphill_rate2、Uphill_rate3）

各階層において、4 階以上へ避難する避難者の割合をコントロールパネルによって指定できるように変数で定義したものである。（最大値は 100%）

4.3　システムの外部仕様

以下に提案する本システムの外部仕様について説明する。

4.3.1　システムのパラメータ設定

本システムを起動させるために、artisoc のモデルファイル（*.model）を開くことによってシステム初期画面が表示される（図 37）。

このシステムを動作させるには、メニューバー下の実行パネルを使う。実行パネルには様々なボタンが付随しており、図 37 のそれぞれの番号ごとに機能を以下で説明する。

①「実行」ボタン：シミュレーションを開始する
②「ステップ実行」ボタン：シミュレーションを 1 ステップ分だけ実行する
③「一時停止」ボタン：シミュレーションを一時停止する
④「停止」ボタン：シミュレーションを終了する

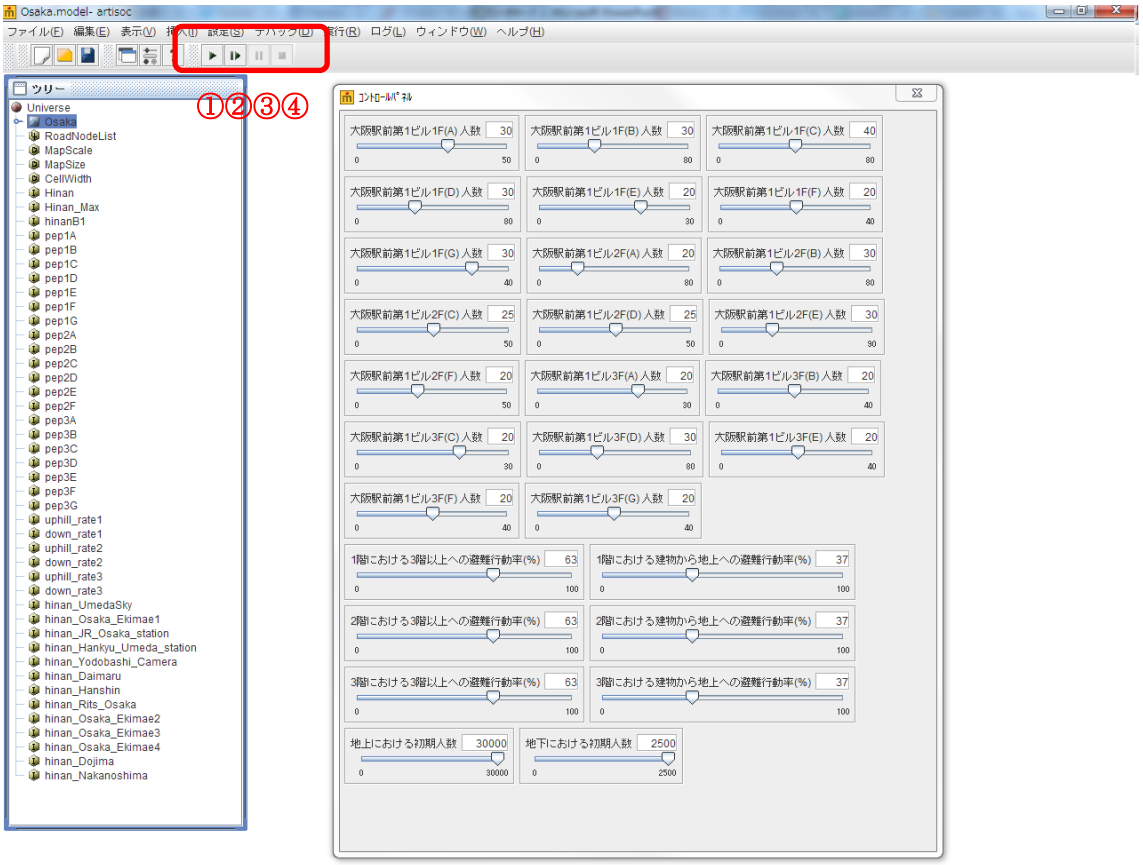


図 37　システム初期画面

コントロールパネルでは、シミュレーション開始時に大阪駅第 1 ビル内の各階層において、4.2.3.3 節の図 24 で示したエリア毎に避難者の人数を調節でき配置できる。さらに、建物内の各階層において、地上へ避難する避難者と 4 階以上の階へ避難する避難者の割合をコントロールパネルによって設定できる。

また、地上や地下における避難者の初期人数も調節でき、地上で最大 30000 人、地下で最大 2500 人の避難者それぞれの階層に配置できる。

4.3.2　シミュレーションの全体の流れ

本システムのシミュレーション全体のおおまかな処理フローを図 38 に示す。また、以下にそれぞれの処理について説明する。

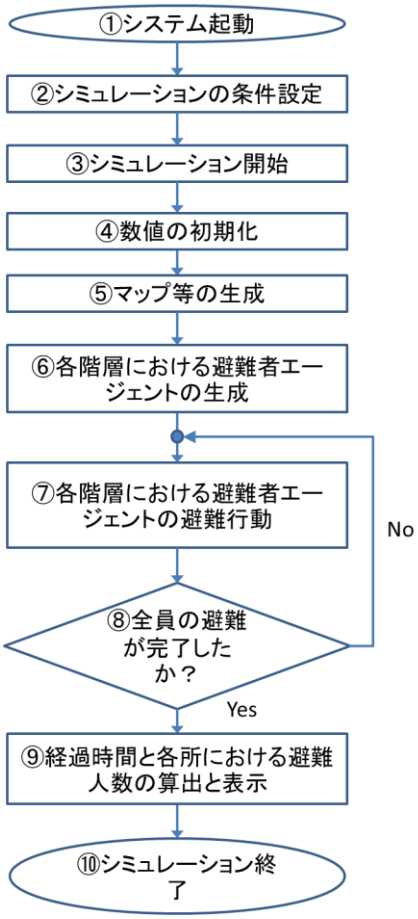


図 38　シミュレーション全体フロー

① はじめに、システムを起動させるために本システムで用いている artisoc のモデルファイル（Osaka.model）を開くことによって初期画面を表示させる。

② 図 37 で示した通り、コントロールパネルの各項目における値を手動で調節することによって、様々な避難状況を設定する。

③ ②におけるシミュレーションの条件を設定後に、4.3.1 節で示した「実行ボタン」を押すことでシミュレーションを開始する。

④ 本システムにおける避難者エージェントの歩行速度や混雑度などの避難者に関するデータの値を初期化する。また、コントロールパネルで設定した大阪駅第 1 ビルの各階層における避難人数や、大阪駅第 1 ビルの各階層における地上や 4 階以上への避難行動率などの値を反映させる。

⑤ 本システムにおける対象地域と地下街と建物を含む空間をシミュレーション上に生成する（図 39）。地上空間にはノードエージェントを配置し、地下街と建物を含む空間には壁や出口、上りや下りの階段エージェント等を配置することによって、本システムの対象空間を構成する。

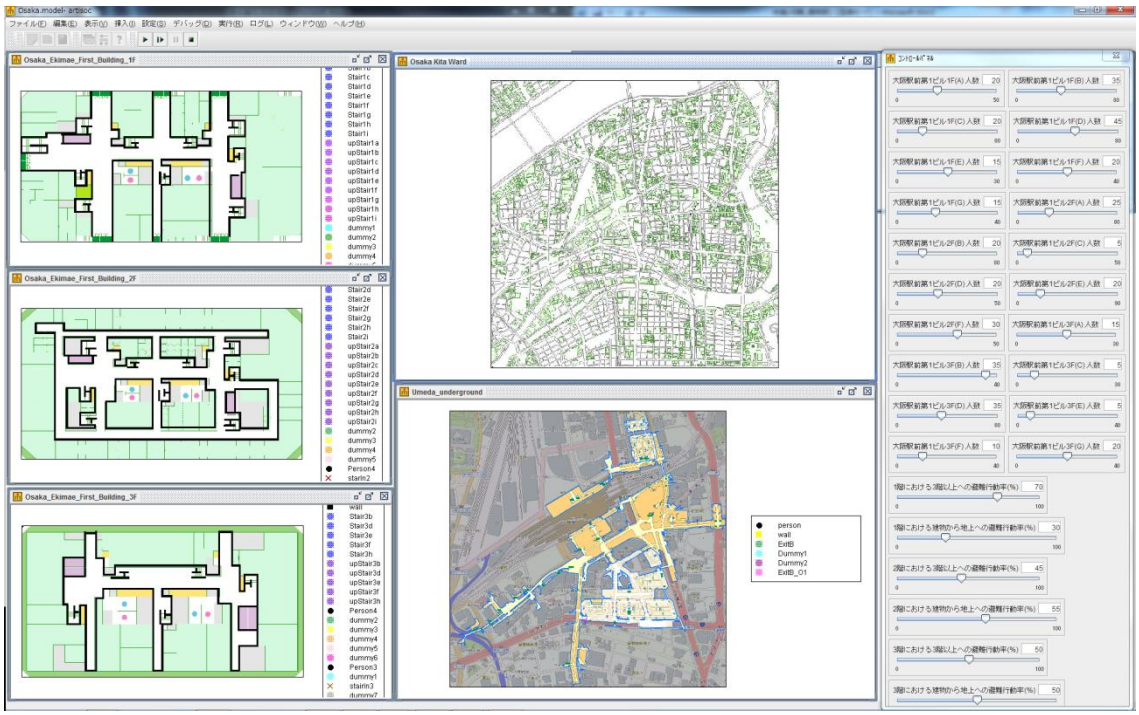


図 39　シミュレーション空間の生成

⑥ 各空間におけるマップが構成された後に、コントロールパネルで設定した各階層における避難人数に従い、各階層にそれぞれ避難者エージェントを生成し配置する（図 40）。図に示したように、マップ上では避難者エージェントを赤丸で表す。

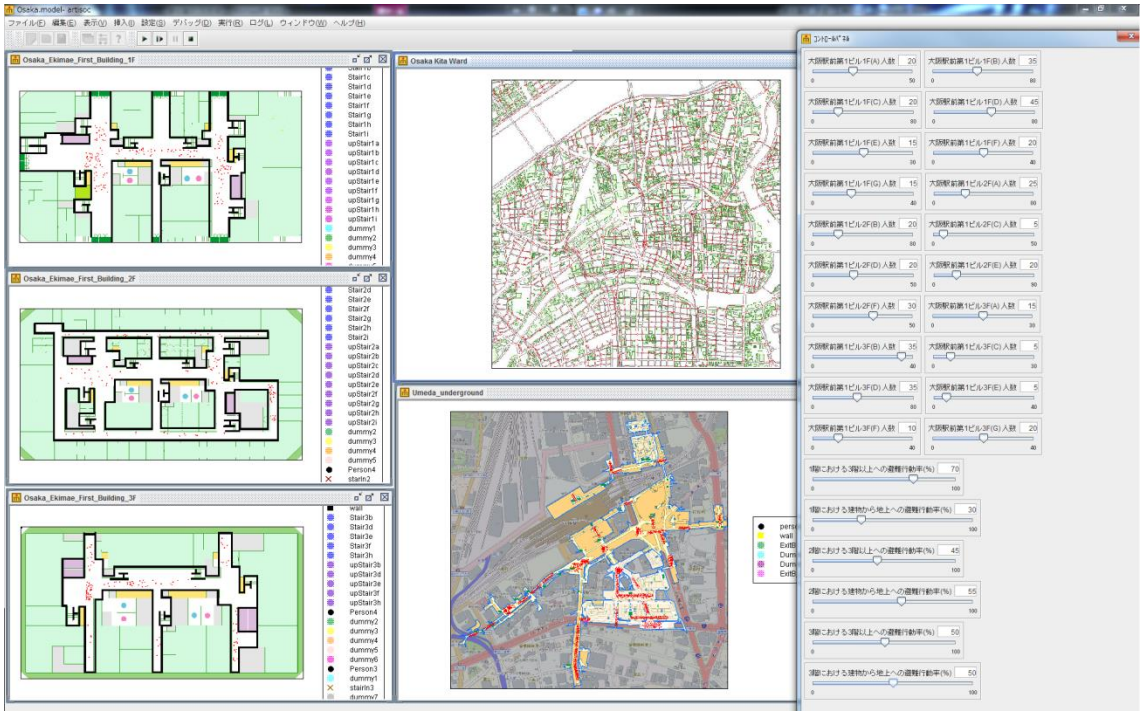


図 40　避難者の配置図

⑦　4.2.3 節で定義したそれぞれの避難者エージェントの避難行動モデルをもとに、各階層における避難者エージェントの避難行動を行う。シミュレーション開始時に各避難者エージェントは自身が存在する位置を認識し、それぞれの位置における避難行動モデルに基づき移動を開始する。また、地下から地上、地上から建物内などの移動が消磁すると、その移動を行った後に自身の存在する位置を認識し、各避難行動を行う。例えば、津波避難ビルには避難せずに京都方面に避難しようとする避難者エージェントがシミュレーション開始に地下街に配置された場合を例に挙げる。はじめに存在する空間が地下街空間なので、地上や建物 1 階に避難するために最も近い出口階段に向かって避難行動を開始する。出口階段に到達後は、地上空間に移動する。この際に、もう一度自身の存在する位置を確認し、地上空間にいることを認識する。その後、エージェントは地上における避難行動を開始し、目的地に到着するまで避難行動を続ける。避難行動を完了した避難者エージェントは、シミュレータ画面のマップ上には表示されなくなり、避難完了者数としてカウントする。

⑧　避難者エージェントが全て避難完了したかどうかの判断を処理する。具体的には、シミュレーション開始時にコントロールパネルで設定した全ての避難者エージェント数と、⑦でカウントした避難完了者数の 2 つを照らし合わせ、2 つの値が同等であるかどうかを確認する。

⑨　避難者エージェントが全て避難完了すると、システム画面上にそれぞれの津波避難ビルにおける避難者数の時系列グラフが表示される（図 41）。

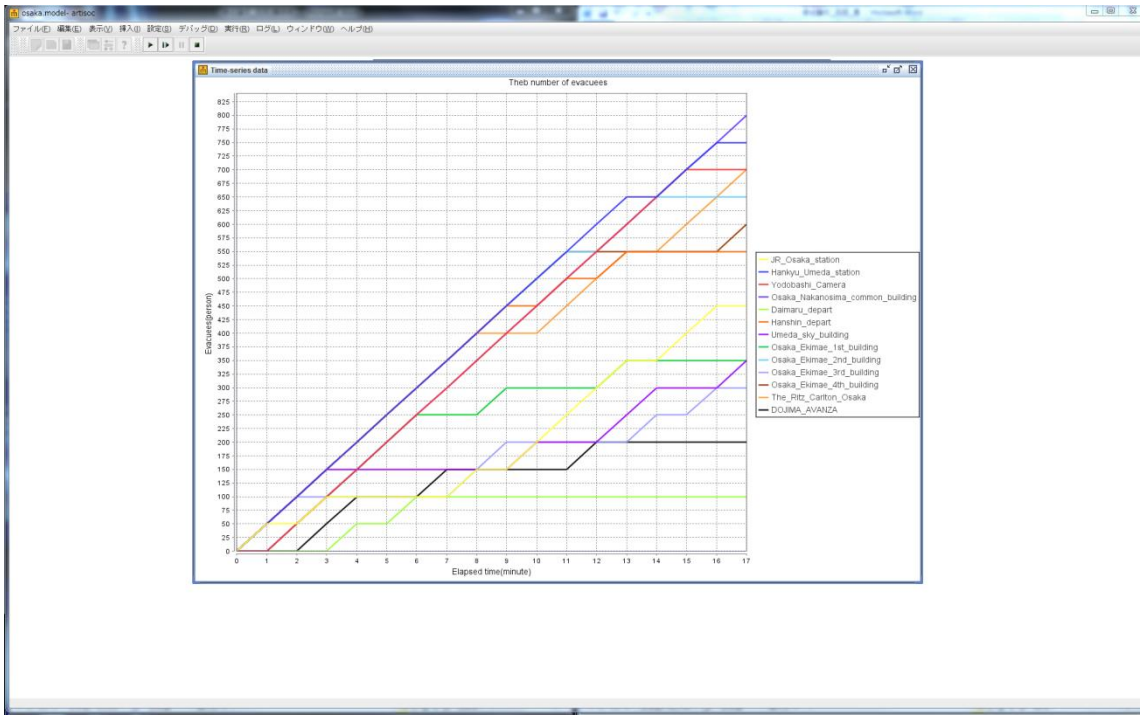


図 41　津波避難ビルにおける避難者数

⑩　①から⑨までの処理を全て実行すると、一連のシミュレーションが完了したと判断しシミュレーションを終了する。

4.3.3　避難者の前方密度表現

群集流動において、密度が 4 人/㎡以上になると群集歩行速度は低速あるいは停止するといった滞留状態になるといわれる[26][29]。そこで本シミュレータでは、避難者の前方密度が高いとき（4 人/㎡以上のとき）は黒色、低いとき（0~1.9 人/㎡のとき）は赤色、中間のとき（2.0～3.9 人/㎡のとき）では青色といったように、密度の高低に応じて避難者の色を変更して表現した。図 42 は、避難者の前方密度を上記の設定で色分けして表現したものである。

図 42　避難者の密度表現凡例

第 5 章　評価実験

本章では、提案したシミュレータを用いて第 3 章で述べた様々なシナリオでシミュレーションを行い、得られたデータなど用いて本システムの有効性について検証する。また、それらの結果について専門家により得た評価について述べる。

5.1　シミュレーションのシナリオと実験結果

第 3 章で提案した内容や第 4 章で定義したシステムをもとに 3 つのシナリオを想定し、シミュレーションを行い本システムの検証を行った。本節では、各シナリオの詳細とその結果を述べる。

(1)　避難人数設定

シミュレーション開始時における避難人数は、地上で 30,000 人、地下街で 2,500 人を配置した。また今回は建物内空間を大阪駅前第 1 ビルで作成しており、建物の床面積を設定しその床面積から在館者数を推計して、建物 1,2,3 階における初期配置人数を全部で 500 人と設定した。

(2)　避難開始時間

東日本大震災時において､被災者が地震発生から平均で約 20 分後に避難開始している[22]。そのため、本シミュレーショも地震発生から 20 分後に避難を開始することとした。

5.1.1　シナリオ 1：一切、津波避難ビルを使用せずに避難する「非使用型」のケース

シナリオ 1 では、全ての避難者は一切、津波避難ビルに対しては避難せずに、北区外（津波による想定浸水域外）へ避難すると想定する。また、建物内の 1,2,3 階に存在する避難者は建物内にはとどまらず、建物内から地上へ出てさらに北区外へ避難する。地下街内の避難者は、地上や建物内 1 階へ出るために出口に向かい、地上や建物内 1 階へ移動した後は地上避難者や建物内避難者と同様の避難行動をする。

(1)　長時間にわたる滞留の発生

津波避難ビルを使用しないケース（シナリオ 1）では、地下街や建物内を含む全ての避難者が地上へ出てくるため地上は人で溢れる様子がシミュレータの出力画面でも観測できた。図 43 の丸の部分で示した複数の箇所で、避難者エージェントが黒く表示されており、群集による滞留が発生した。この影響により渋滞が発生し、北区外へ避難する経路はでは約 30 分間の（地震発生より 50 分後まで）滞留が継続し、従来よりも経路を通過する時間がかかっていた。

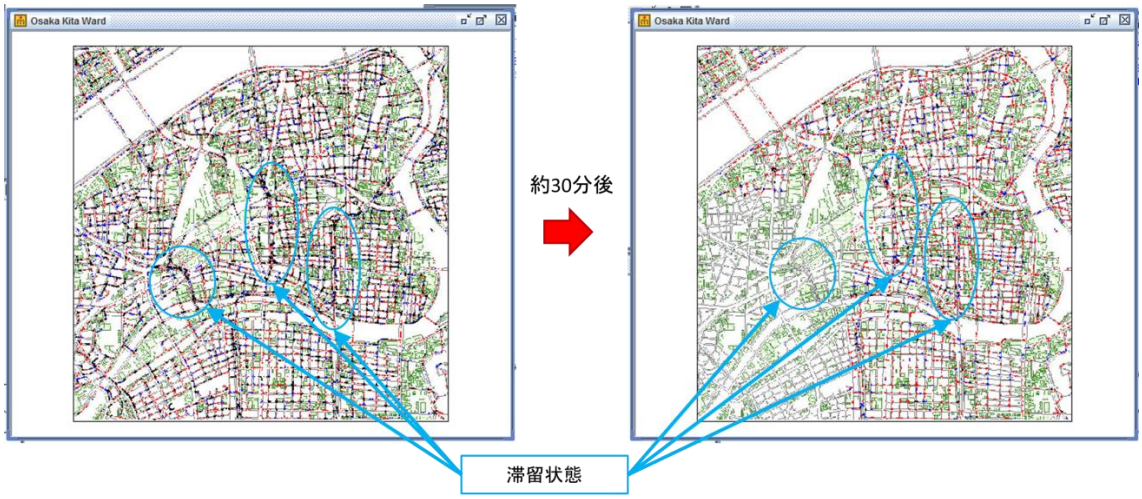


図 43　滞留の様子

(2)　地下街における状況

地上における避難者の滞留時間が長いことによって、地下街にもその影響がおよび地上へ出られない地下街避難者が発生した（図 44）。また、シミュレーションを 10 回繰り返してその状況が顕著に表れた箇所が図 44 の丸で表示した場所であり、これらの箇所における有効的な対策や避難誘導方法を講じなければならないことがうかがえられる。

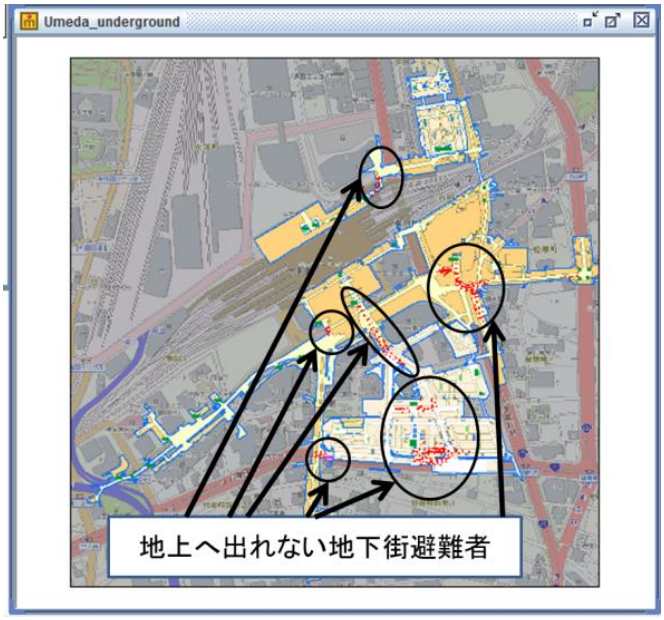


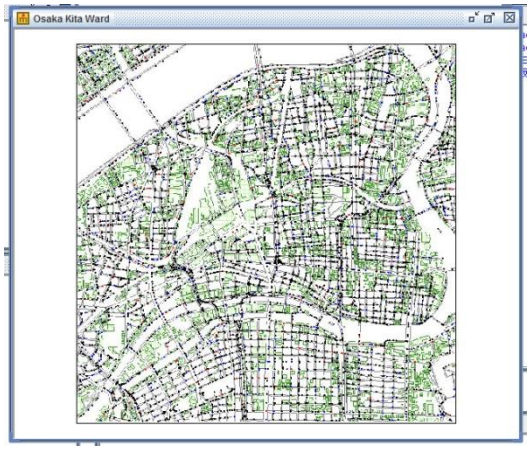
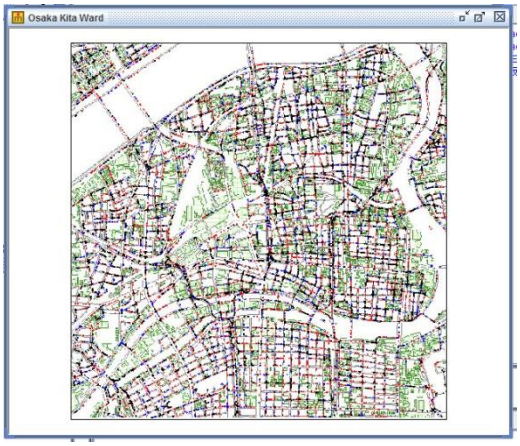
図 44　地下街における避難者の様子

5.1.2　シナリオ 2 : アンケート調査で得たデータをもとに当てはめた「行動予測型」のケース

シナリオ 2 では、第 3 章で述べたアンケート調査から得られた避難者の行動データをもとにして、避難者の位置に応じてパラメータを設定し避難行動を想定した。地上避難者は、現在地から第 4 章の図 22 で示した最近隣避難目的地や津波避難ビルに避難行動をする。建物内避難者は、アンケート調査結果から各階層における避難行動として、建物内において 3 階以上への避難する人の割合を 63%、建物から地上へ避難する人の割合を 37%と異なる避難行動に分けてそれぞれの値で設定し各避難行動を行う。また、地下街避難者はシナリオ 1 で述べた同様の避難行動をする。

シナリオ 1 とシナリオ 2 の地上における避難状況の様子を比較した図を表 4 に示す。避難開始 5 分後である地震発生 25 分後の様子を比較すると、シナリオ 1 では避難開始直後から滞留（黒色）が複数の箇所で多く発生している。一方、シナリオ 2 では複数の箇所に津波避難ビルを配置しているため、多くの避難場所に避難が可能である。地震発生 40 分後の様子を比較するとシナリオ 1 では図中央部分に黒い部分が見て取れ、滞留が解消されず残っていることがわかるが、シナリオ 2 では解消している。これはシナリオ 2 では、その箇所の周辺に津波避難ビルを避難先として使用しているため、円滑に避難が行われたためであると考えられる。また、その影響によって地下街の避難者も円滑に避難でき、シナリオ 1 の(2)で指摘した地下街における問題を多少緩和できたことを観測した（表 5）。

表 4　シナリオ 1 と 2 の地上における避難状況の比較

	シナリオ 1	シナリオ 2
地震発生25分後		

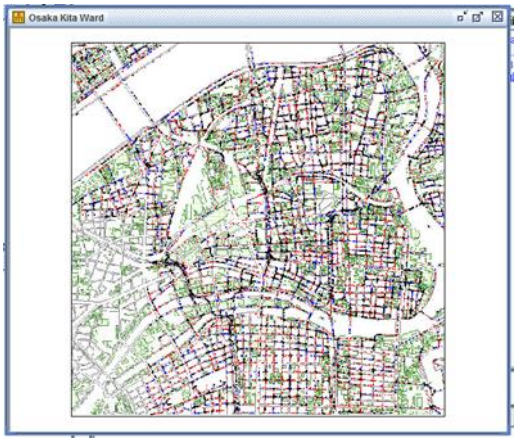
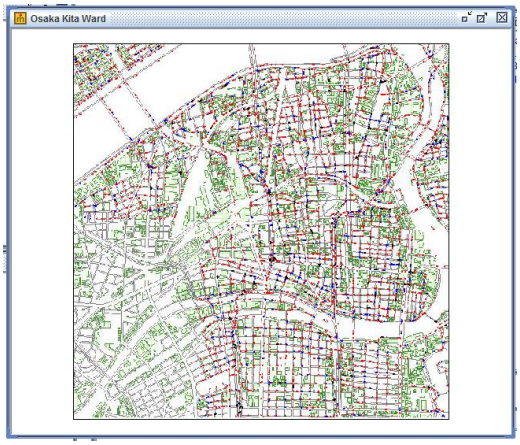
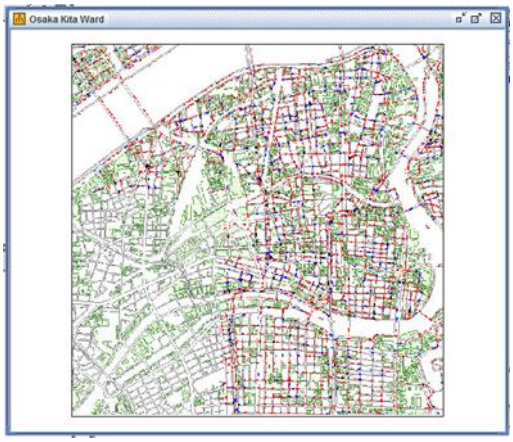
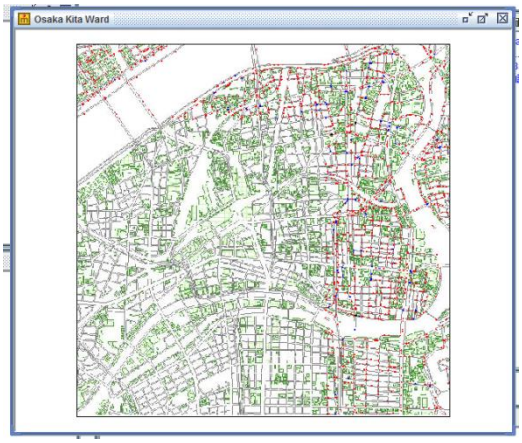
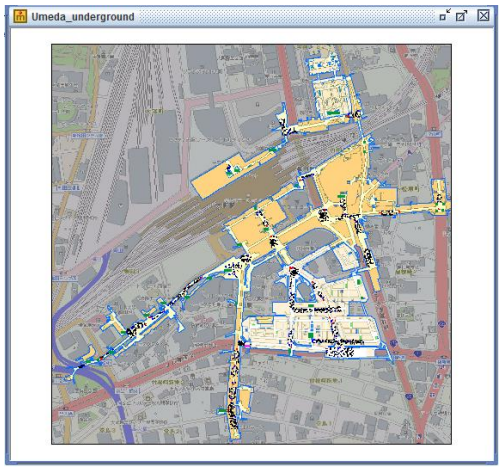
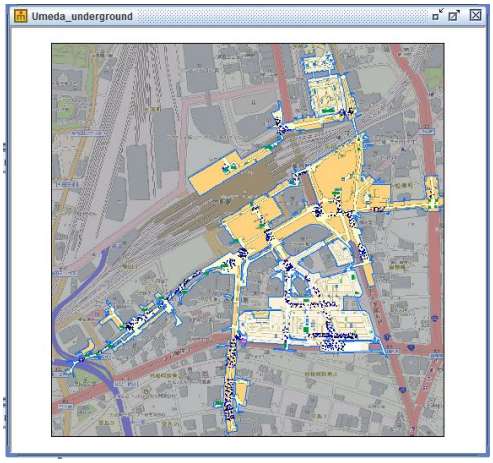
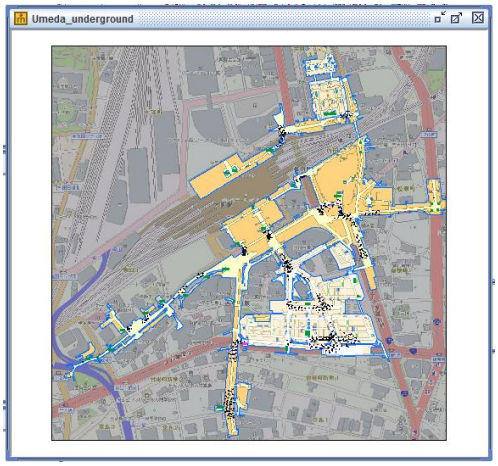
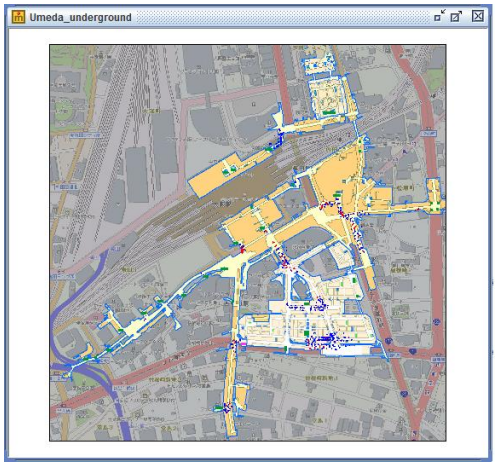
地震発生40分後		
地震発生60分後		

表 5　シナリオ 1 と 2 の地下における避難状況の比較

	シナリオ 1	シナリオ 2
地震発生25分後		

地震発生40分後		

5.1.3　シナリオ 3 : 想定した津波避難施設などの 3 階以上の階層へ避難させる「誘導型」のケース

津波避難ビルを使用しないケース（シナリオ 1）に対して、アンケート調査から得られた避難者の行動データを組み込んだケース（シナリオ 2）では、各箇所の滞留状態の違いが確認できた。しかしながら、シナリオ 2 では建物内における状況の違いによってどのような変化があるのか確認ができなかった。

そこで、シナリオ 3 では、津波避難ビル周辺における全ての避難者を建物内に避難させ、さらに建物 3 階以上に避難誘導させると設定した。これは、大阪市が津波避難対策として建物 3 階以上への避難を推奨しているため、その状況を想定したものである。具体的には、シナリオ 2 における建物内避難者の 3 階以上への避難する人の割合を 100%、建物から地上へ避難する人の割合を 0%にし、他の階層における条件（地上避難者、地下街避難者の避難行動）はシナリオ 2 と同様にした場合である。これにより、建物の間口や建物内における状況の違いが避難完了時間にどのように影響するのか検証した。

そのため、下の図 45 に示したように、大阪駅前第 1 ビルの全ての建物間口において観測エージェントを配置し、各時間における群集密度を計測した。

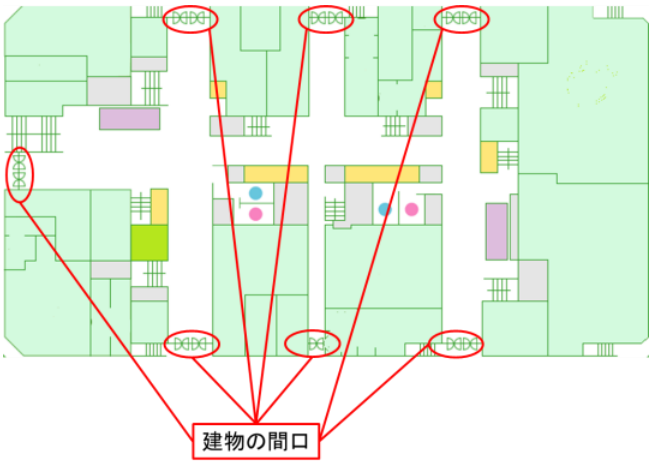


図 45　大阪駅前第 1 ビルの間口

この観測エージェントを用いて、シナリオ 2 とシナリオ 3 における全ての建物間口で得られたデータを平均化し、それぞれの結果を時系列グラフで示したのが図 46 である。

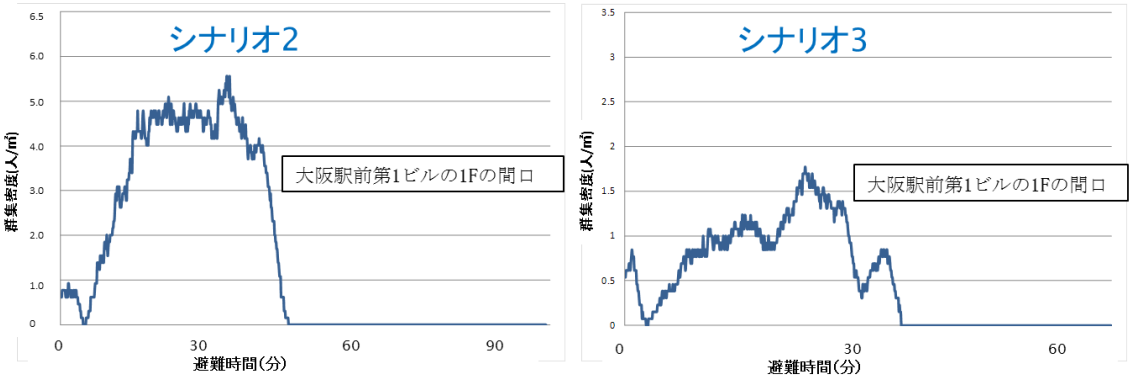


図 46　各シナリオにおける建物間口の群集密度の時系列

上図から、シナリオ 2 では大阪駅前第 1 ビルの建物間口（以降は建物間口と表現する）における群集密度の値が非常に高く、さらにその状態が長時間にわたって継続したことがわかる。これは、シナリオ 2 においては、建物内から地上へ出る避難者と地上から建物内へ避難してくる避難者が建物間口で鉢合わせになり、混雑が発生しているためと推測できる。また、2 階や 3 階における建物内避難者も時間が経過すると建物間口に到達するため、さらに建物間口に人が集中する。つまり、多くの箇所で避難者同士の衝突が発生し歩行速度が遅くなり、さらに建物間口に避難者の滞留状態が長時間続くことで図 46 の結果が得られたと考えられる。

一方、シナリオ 3 ではシナリオ 2 と比較すると、建物間口における群集密度の値が低く、高い時間帯も存在するがその時間は非常に短いものである。これは、建物内避難者を全て 3 階以上の階へ避難誘導させることで建物間口における余計な衝突を少なくし、それによっ

て建物間口における避難者の滞留状態を軽減させることができたためと考えられる。その結果、図 46 のような群集密度の値が低く、なだらかなグラフになったと考えられる。

また、本システムでは各シナリオに対してそれぞれ 10 回ずつシミュレーションを行い、各シナリオにおける地震が発生した後（20 分後）の全ての避難者が避難開始から避難完了するのに要した時間を計測した。その計測した時間の平均値をグラフにまとめたものを図 47 に示す。このグラフで示したとおり、シナリオ 3 が最短時間でありその時間が約 69 分（地震発生後 20 分含む）である。逆に、シナリオ 1 が最長時間でありその時間が約 111 分となる。この結果から、緊急避難施設として津波避難ビルを複数配置することによって避難者を早期に避難させることが確認できた。また、シナリオ 2 とシナリオ 3 を比較すると、避難時間に多少差異が出てきた。これは、上記で述べた建物間口における状況を考慮すると、建物内外の避難者の滞留状況によって全ての避難者の避難時間が異なってくることが考えられる。

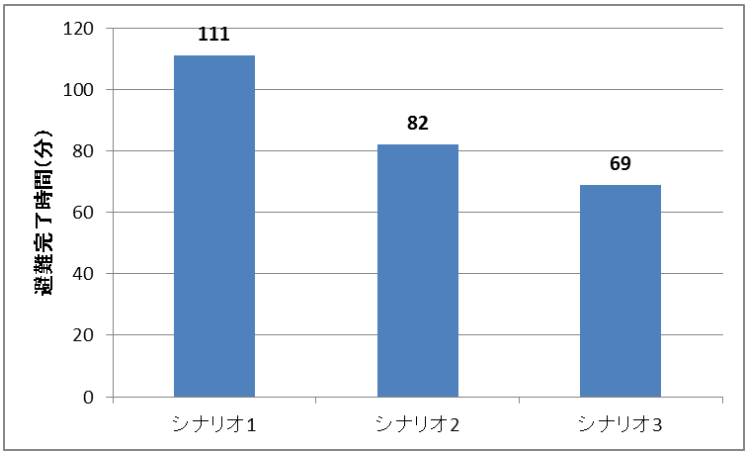


図 47　各シナリオにおける避難完了平均時間

5.2　モデルの妥当性の検証

本シミュレーションにおける歩行者モデルの妥当性を検証するために、本シミュレーションで得られた群集歩行の特性量と既存の研究のデータを比較したものを以下に述べる。

5.2.1　群集歩行の特性量

歩行速度や群集密度、群集流動係数は群集の流動状態を表す基本的な指標である。本研究では、これらの特性量を用いて、シミュレーションから得られる群集歩行を数量的に評価する。以下に、3 つの特性量について述べる。

①歩行速度

対象領域における全歩行者の速度の合計値をステップ毎に足し合わせ、その間ののべ人

数で除したものを歩行速度として用いる。時刻 t における領域内の歩行者数を $N(t)$、歩行者 i の速度を$V_i(t)$とすると、歩行速度 V[m/sec]は

$$V = \frac{\sum_t \sum_i ||V_i(t)||}{\sum_t N(t)} \tag{5.1}$$

となる。

②群集密度

測定領域内の歩行者数 $N(t)$をステップ毎に足し合わせ、測定領域の面積および測定時間で除したものを群集密度として用いる。測定領域の面積を S、測定時間を T、シミュレーションの単位時間を dt とすると、群集密度 ρ[人/㎡]は

$$\rho = \frac{\sum_t N(t)}{\frac{T}{dt} \cdot S} \tag{5.2}$$

となる。

③群集流動係数

対象地域における空間の単位幅あたり、単位時間に何人の歩行者が通過できるかを数値化したものを群集流動係数として用いる。歩行者の歩行速度を V[m/sec]、群集密度を ρ[人/㎡]とすると、群集流動係数 Q[人/m・sec]は

$$Q = \rho V \tag{5.3}$$

となる。

5.2.2　歩行速度と群集密度の関係式

本モデルが現実的であるか数量的に見るために、歩行速度と群集密度の関係式について述べる。

歩行者は、混雑していない場合には他の歩行者に妨げられることなく自由にあることができる。しかし、群集の密度が高くなってくると次第に歩行速度が低下し、自分のペースで歩くことが困難となる。このように、混雑度を表す群集密度と歩行速度には非常に密接な関係がある。また、歩行速度と群集密度の関係のモデル式には、図 48 に示したように様々なモデルが提案されている[30]。

モデル名	関係式
反比例モデル	$v = \frac{1.4}{\rho}$
安全間隔モデル	$v = -0.26 + \sqrt{(\frac{2.36}{\rho}) - 0.13}$
指数モデル	$v = 1.272\rho^{-0.7954}$
対数モデル	$v = 1.32log_{10}(\frac{9.16}{\rho})$
密度の逆数による指数モデル	$v = 1.4 - 1.7e^{\frac{-2}{\rho}}$

図 48　歩行速度と群集密度の関係式

歩行速度、群集密度といった群集歩行の特性量を用いて、シミュレーションから得られる特性量間の関係式と、既存研究の特性量間の関係式を比較する。ここで、本研究の対象空間内の縦 10[m]、横 20[m]の平面領域において避難者エージェントを発生させ、本モデルから得られる結果と既存研究の群集密度と歩行速度の関係式を比較する。

5.2.3　測定方法

各特性量の測定には、図 49 の青色の領域を測定領域として用いる。したがって、5.1 節で述べた面積 S は、S＝10×10＝100[㎡]となる。測定は 10 分間分のシミュレーションを対象とする。各シミュレーション時間で特性量を測定し、10 秒間単位で平均値を算出する。すなわち、式(5.2)の測定時間は T＝10[sec]となる。

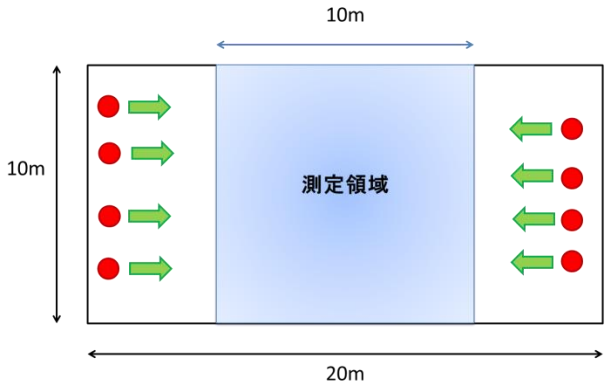


図 49　測定領域

本モデルと図 48 に示した既存の研究と比較するために、歩行者の進行方向を二方向（対向流）に設定し、シミュレーションを行う。

10 分間のシミュレーションを 10 回行った結果から得られる、本モデルにおける歩行速度と群集密度の関係をそれぞれ、図 50 と図 51 に示す。下図より、本モデルから得られる歩行速度と群集密度の関係は、既存の研究と似た傾向があることがわかる。なかでも、理論モデルである中村[31][32]の「密度の逆数による指数モデル」の関係式と類似している。そ

のため、本研究における避難者モデルは既存の歩行者モデルと類似しており、本システムにおけるシミュレーションが妥当なものであるということが証明された。

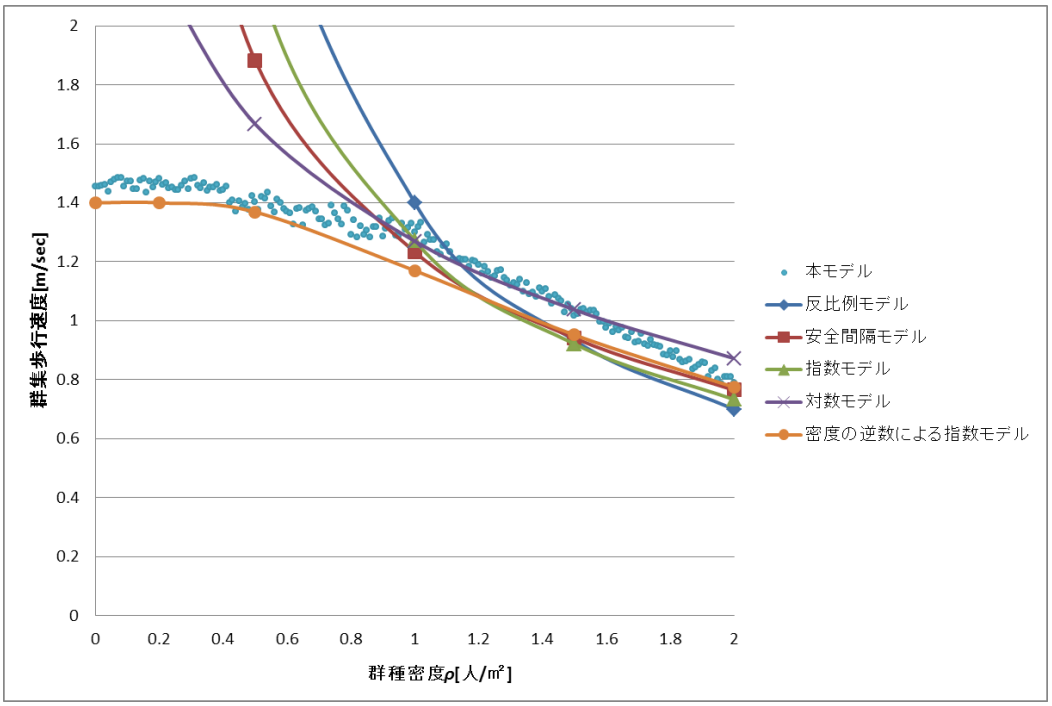


図 50　群集歩行速度と群集密度の関係

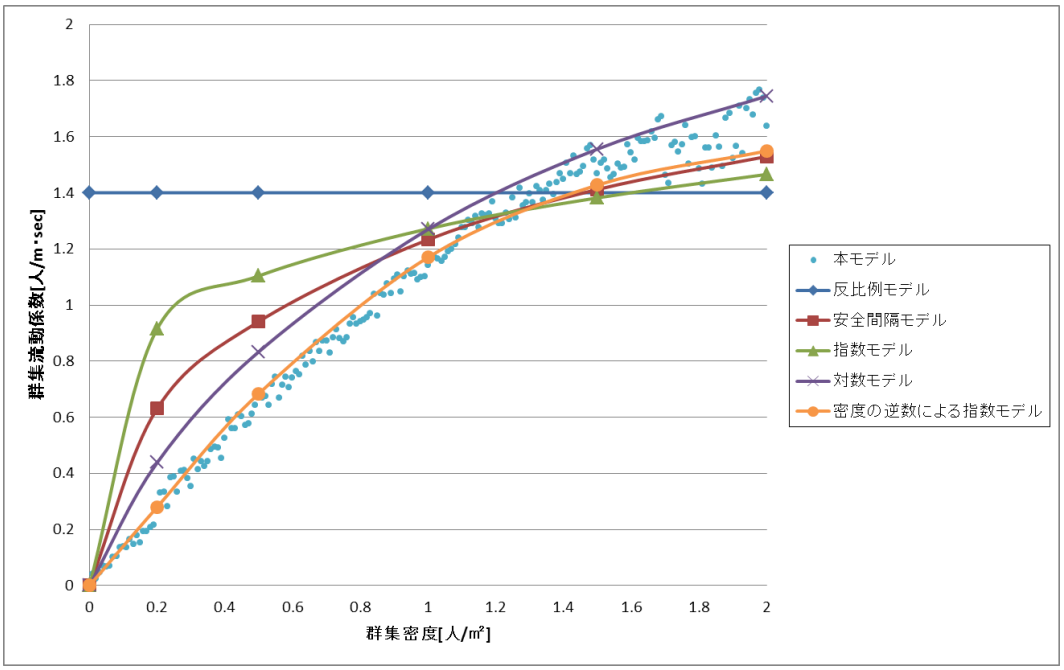


図 51　群集密度と群集流動係数の関係

5.3　考察と課題

本システムにおいて、3 つのシナリオのもとそれぞれのシミュレーションを実行することで、上記のような様々な結果が得られ以下のことが分析できる。

① 津波避難ビルの活用による全体の要避難時間の短縮ができる。津波避難ビルの配置について考慮した場合、対象地域の避難者が全員避難完了するまでの要避難時間がシナリオ 1 とシナリオ 2 の 2 つシナリオを比較すると、平均で約 1740 秒＝29 分の差があった。これは高台の確保が難しい大都市部や市街地において、駅や高層ビル、大規模商業施設等への避難の有効性を示している。特に大阪市北区では、標高の高い地域が内陸部（駅から東方面）に集中しているため、JR 大阪駅周辺に多くの津波避難ビルを配置することは避難者の津波避難対策として有効的であると考えられる。

② 津波避難ビルへ避難することによって、地上における滞留状態の緩和が可能であること。どのシナリオにおいても 5.1.1 節で示したように、北区中心部（JR 大阪駅周辺）の地上において避難者の長時間の滞留状態が観測された。最悪の場合で、シナリオ 1 において最大約 30 分間の避難者の滞留時間が複数の箇所で発生することが予測される。また、地上において多数の滞留状態が発生するため、地下街でもその影響がおよび同様に複数の箇所で地下街から地上へ出られない避難者の滞留状態が長時間観測された。しかし、シナリオ 2 やシナリオ 3 のように地上の避難者を津波避難ビルへ避難させることによってこれらの問題は多少緩和された。このことから、津波避難ビルの活用は有効的であると確認できるが、これだけでは滞留状態を解消させるには十分な対策とは言えず更なる効果的な避難誘導方法の策定が必要であることが考えられる。

③ 避難者に対して津波避難ビルの上階への避難誘導をするかどうかで、避難状況が大きく変化する。津波避難ビルの建物間口における人の混雑が避難全体にどのような作用を生み出すのか、つまり地上から建物内へ避難する人と建物内から地上へ避難する人がおよぼす影響を観測できた。シナリオ 2 とシナリオ 3 を比較すると、避難者同士が建物間口で鉢合わせた場合は群集密度が非常に高く滞留状態も長時間に及んだ。一方で、建物内における避難者全員を 3 階以上へ避難誘導させると、群集密度の低い状態が短い時間だけ継続し、要避難時間も平均で約 13 分の違いが確認できた。このため、大阪市が津波避難の際に推奨している建物 3 階以上への避難が有効的であると考えられる。さらに、建物間口での滞留状態をさらに緩和させることができる避難誘導方法をとれば、より要避難時間を短縮できる可能性があることが本シミュレーションのデータから予測される。

以上より、本システムにおけるシミュレーションから地上・地下街・建物内を含む様々な避難状況を観測できることで、津波被害に遭う避難者に対する避難方法の検討に用いることができ、本システムの有効性及び本研究の有用性が示されたと考えられる。

しかし、本システムではいくつかの課題がある。それらを以下にまとめる。

① 本論文で行った実験では、想定の帰宅困難者数よりも避難者の設定人数が少ない。大阪市北区では、震災時には約 42 万人の被災者が発生すると予測されている。今回の実験ではシミュレーションの処理速度の関係上 33000 人で設定しており、想定の 10 分の 1 程度である。そのため、想定の人数で考慮した場合、要避難時間は本システムで得られたデータよりも実際には多くかかることが予想される。

② 本シミュレータでは車などの路上駐車や建物の倒壊、それによる道路閉塞などの交通状況を考慮していない。震災時には、地震の影響で避難経路には路上に乗り捨てられた車や、建物の倒壊によって瓦礫等の障害物が発生する可能性があり、それによって避難者の歩行速度が減速したり、避難経路の変更などが考えられる。しかし、本システムでは避難目的地までの最短経路で障害物の存在を考慮しておらず、避難者の歩行における外部的要因を今後考える必要がある。

今後、上記で述べた課題をシステムに組み込むことでより詳細な避難者の避難行動を計測し、様々な避難誘導計画を検討する予定である。

5.4 専門家の意見

本システムについて防災の専門家である、ひょうご震災記念 21 世紀研究機構学術交流センターに所属する 2 名に見てもらい、JR 大阪駅・梅田駅周辺（北区）を対象として、南海トラフ巨大地震時に避難者が津波被害を逃れるためにどのような動きをするのか検証するためのツールとして有効か聞いた。また、本システムにおいて気づいた点や修正すべき点などの様々な点について自由な意見を言ってもらった。

その結果、JR 大阪駅周辺にいる人が避難行動をとる際、様々な箇所における状況を観測やデータの収集ができることから、今後の避難誘導方法の立案にも役立つものとだ考えられるという意見を頂いた。また、今後も機能面の向上も含めた開発を進めてほしいという意見も頂き、このシステムが有効であることを確認することができた。

しかし、本システムにおける課題としていくつかの点で指摘され、そのうちの一つを以下に述べる。震災時には経過時間によって避難者は異なる避難行動をとることがあり、それらの状況も考慮した方がいいという指摘である。例えば、南海トラフ巨大地震で発生する津波が北区に到達するには約 2 時間の猶予があり、震災発生直後なら津波から逃れるためにすぐに建物に避難するのではなくそのまま北区から脱出しようとする人もいるはずである。そのため、より詳細な避難行動を計測するためにはそのような状況を含めてシミュレートする必要がある。

表 6 は専門家より追加してほしい機能や意見をまとめたものである。

表 6　ひょうご震災記念 21 世紀研究機構学術交流センターの意見

①　警察や消防等の行政が今後の具体的な避難誘導方法の立案に役立つものである。
②　時間経過における各避難者の避難行動に変化をつける必要がある。
③　あえて失敗例を再現することで、より良い避難誘導方法が見つかる可能性がある。

第 6 章　あとがき

本論文では、大阪市および JR 大阪駅周辺において避難誘導方法の策定支援を目標とし、JR 大阪駅や阪急・阪神・地下鉄の駅周辺における、地上・地下・建物内を含む空間内を避難者で構成される群集がどのような行動をするのかをシミュレートできるシステムを提案した。システムは「artisoc」という実験環境を用いてシステム構築をした。本システムを用いて、いくつか想定されるシナリオに基づいてシミュレーションを行った結果、発災後の対象地域における多くの滞留者の発生やその状況をシミュレータによって確認することができ、さらにはそれらを解決するための津波避難ビルの重要性が確認できた。また、ひょうご震災記念 21 世紀研究機構学術交流センターに所属する 2 名による評価の結果、大阪市周辺に対する避難者の避難誘導方法の立案などにおいて、幾分かの補助になりえると考えられるとの意見をいただいた。

本システムの改良点として各避難者の避難行動に時間経過における変化を考慮することがある。また今後、大阪市のような大都市での迅速かつ丁寧な誘導方法を検討するためのシステムを構築する場合、大阪市だけでなく東京都などへの適用を考えたい。

謝辞

本研究及び本論文を作成するにあたり、手厚いご指導と充実した研究環境の提供をして下さいました立命館大学情報理工学部情報コミュニケーション学科ソーシャルコミュニケーション研究室の仲谷善雄教授及び泉朋子助教に深く感謝するとともに、心から御礼申し上げます。さらに、多忙な中、システムの評価を行ってくださったひょうご震災記念 21 世紀研究機構学術交流センターの皆様や、シミュレーションソフト「artisoc」の貸与してくださいました株式会社構造計画研究所様に感謝申し上げます。

また、本論文を執筆するにあたってソーシャルコミュニケーション研究室の皆様にも多くの援助や助言をいただきましたのでここに記して感謝いたします。

参考文献

[1] 気象庁：気象等の知識 - 地震について -, 気象庁 HP, 入手先 <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/faq/faq7.html#9>（参照 2013-12-10）.

[2] 兵庫県：阪神・淡路大震災の復旧・復興の状況について(平成 25 年 2 月版),兵庫県 HP, 入手先< http://web.pref.hyogo.jp/wd33/documents/2502hukkyu_hukkou.pdf>（参照 2013-12-10）.

[3] 警察庁：東日本大震災について-被害調査と警察措置-, 警察庁 HP（オンライン）,入手先 <http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo.pdf>（参照 2013-12-03）.

[4] JBnetwork：地震情報サイト JIS,JBnetwork, 入手先 < http://j-jis.com/news/shuto/tokyo/hinan.html>（参照 2013-12-03）.

[5] 西日本旅客鉄道株式会社：データでみる JR 西日本,西日本旅客鉄道株式会社 HP,入手先< http://pamph.jr-odekake.net/view_pamph20.php?ci=jrwest&pi=jrdata2013 >（参照 2013-12-03）.

[6] 大阪市：大阪市危機管理室，大阪市 HP, 入手先 < http://www.city.osaka.lg.jp/kikikanrishitsu/cmsfiles/contents/0000073/73235/report1.pdf> （参照 2013-12-03）.

[7] 大阪府：南海トラフ巨大地震災害対策等検討部会，大阪府 HP, 入手先< http://www.pref.osaka.jp/attach/20357/00000000/01siryou4.ppt%20.pdf>（参照 2013-12-03）.

[8] 大阪市：帰宅困難者数の概略試算について，大阪市 HP, 入手先< http://www.city.osaka.lg.jp/hodoshiryo/cmsfiles/contents/0000181/181503/result.pdf> （参照 2013-12-03）.

[9] 大阪市：大阪駅周辺地区帰宅困難者対策図上訓練活動報告書,大阪市 HP,入手先< http://www.city.osaka.lg.jp/kikikanrishitsu/page/0000073235.html>（参照 2013-12-03）.

[10] 大阪市：「津波避難施設」の確保，大阪市 HP, 入手先 < http://www.city.osaka.lg.jp/kikikanrishitsu/page/0000138173.html>（参照 2013-12-03）.

[11] 大阪市北区：北区 津波避難ビル登録一覧，大阪市 HP, 入手先< http://www.city.osaka.lg.jp/kita/cmsfiles/contents/0000234/234115/2.pdf>（参照 2013-12-03）.

[12] 伊藤英明, 中西英之, 小泉智史:超越型コミュニケーション:大規模公共空間のための位置依存型誘導法, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.2, pp.547-554, (2006).

[13] 野崎浩平, 福井淑郎, 柴田正義ほか：災害発生時における動的な避難誘導システムの提案, 情報処理学会研究報告.GN, No.6, pp.185-190, (2007).

[14] 熊谷良雄：避難モデル論, 都市計画, Vol.89, pp.40-50, (1976).

[15] 李載吉:誘導群集の歩行動態ならびに広域群集の避難勧告支援モデルの開発, 学位論文, 筑波大学大学院社会工学研究科, (1992).

[16] 日本建築学会編：知的システムによる建築・都市の創造, 技法堂出版, (1998).

[17] 鈴木介, 今村文彦：住民意識・行動を考慮した津波避難シミュレーションモデル, 自然災害科学, Vol.23, No.4, pp.521-538, (2005).

[18] 阿部勝征:北海道における大津波の履歴, 北海道における地震災害の地域特性に関する調査研究, 北海道総務部防災消防課, pp.43-54, (1987).
[19] 大畑大志郎, 高井伸雄, 鏡味洋史 : 釧路市中心市街地における津波避難施設設置の評価 -マルチエージェントシステムを用いた津波からの避難シミュレーション その２-, 日本建築学会計画系論文集, No.612, pp.87-91, (2007).
[20] 山下倫央, 副田俊介, 大西正輝ほか : 一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発とその応用, 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.7, pp.1732-1744, (2012).
[21] 中居楓子, 畑山満則:エージェント技法を用いた津波避難評価システムの構築と社会実装, 研究報告情報システムと社会環境, Vol.2013-IS-123, No.1, pp.1-6, (2013).
[22] 衣笠成輝, 仲谷善雄, 泉朋子：観光客避難誘導方法の評価支援システム, 修士論文, 立命館大学大学院理工学研究科, (2012).
[23] 兼田敏之：artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション 原理・方法論から安全・賑わい空間のデザイン・マネジメントまで, 構造計画研究所, 書籍工房早山, (2010).
[24] 国土地理院：基盤地図情報サイト, < http://www.gsi.go.jp/kiban/>（参照 2013-12-03）.
[25] 梅田地下街案内図：梅田地下街案内サイト, < http://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~ashino/ms2008/map.pdf#search='%E6%A2%85%E7%94%B0%E5%9C%B0%E4%B8%8B%E8%A1%97'>（参照 2013-12-03）.
[26] John J.Fruin, 長島正充（訳）: 歩行者の空間=理論とデザイン=, 鹿島出版,(1977).
[27] 佐竹健治, 後藤洋三, 山田武志ほか : JST-JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力事業（インドネシアにおける地震火災の総合防災策）, （参照 2013-12-03）.
[28] 森山修治, 長田悠平, 土屋伸一ほか : 津波避難ビルにおける階段歩行特性に関する研究 -その 2　階段上昇時の群集歩行特性-, 日本建築学会大会学術演梗概集, pp.907-908,(2006).
[29] 株式会社サーベーリサーチセンター：宮城県沿岸部における被災地アンケート調査報告書, (2011)
[30] 日本建築学会編：建築設計資料集成[人間]、丸善株式会社(2003).
[31] 中村和男, 吉岡松太郎, 稗田哲也：歩行者流動モデルとそのシミュレーション, 人間工学, Vol.10, No.3, pp.93-102, (1974).
[32] 中村和男, 吉岡松太郎：歩行者流動特性のシミュレーションによる検討, 人間工学, Vol.13, No.3, pp.99-107,(1977).

付録１　避難行動調査アンケート

避難行動調査アンケート

性別　男・女　/　年齢（　　）歳

Q1. あなたの職業について該当箇所をマークして下さい。
＜職業＞：　学生・会社員・パート（アルバイト含む）・専業主婦（主夫）・無職
その他（　　）

Q2. あなたは JR 大阪駅をご利用、又はその周辺における建物をご利用したことがありますか？ある方はその建物をご利用した理由をお書きください。
（　はい　・　いいえ　）

Q3. あなたは南海トラフ巨大地震について知っていますか？
（　はい　・　いいえ　）

Q4. 上記の地震が起きた場合、JR 大阪駅周辺において最大 2m の津波がくる可能性があることを知っていますか？
（　はい　・　いいえ　）

Q5. 大阪市が津波避難の際に、「高い」場所(建物の 3 階相当以上)に避難すること被災者に対して推奨していることを知っていますか？
（　はい　・　いいえ　）

Q6. 上記の震災時に JR 大阪駅周辺又は北区内において最大 2m の津波がくる場合、あなたはどのような行動をとりますか？

Q7. Q6 の行動を選んだ理由をお書きください。

Q8. 上記の震災時においてあなたが梅田地下街にいる際、どのような行動をとりますか？

Q9. Q8 の行動を選んだ理由をお書きください。

Q10. 上記の震災時においてあなたが北区における建物内 1,2 階にいる際、どのような行動をとりますか？

Q11. Q10 の行動を選んだ理由をお書きください。

Q12. 津波避難の際の交通手段（徒歩、自転車、バイク、車、公共交通機関のどれを使うか）はどうしますか？また、公共交通機関を利用すると答えた方は、交通機関がマヒしていた場合どのような行動をとるのかもお書きください。

Q13. 津波避難の際に関して心配・不安なことは何ですか？

アンケート調査のご協力ありがとうございました。