

研究報告

津波警報時の大阪湾における自動車による避難のシミュレーション

概要

日本は地震大国であり、毎年数多くの地震が発生している。海溝型地震では津波の発生が見られ、被害防止のために津波避難が実施される。津波避難は徒歩が原則であるが、2003年に発生した十勝沖地震では全体の74%、東日本大震災では、57%の人が、自動車による津波避難を行っている。その際、障害となったこととして、「人の混雑」「地震による道路の被害や道路上の瓦礫などが障害となった」などの様々な問題が指摘されている。近い将来には、東南海・南海地震の発生が予想されており、津波による大規模な被害が危惧されている。大阪湾には、地震発生時から約2時間で津波が到達すると予想されている。大阪湾岸には平坦な海拔ゼロメートル地帯が広がり、津波被害を避けるためには、津波避難ビルへの避難か内陸部への避難しかない。津波避難ビルの数には限界があるため、大勢の人の避難には自動車が用いられると予想される。しかし大都市湾岸部における自動車による津波避難についての研究は管見の限りなく、どのような状況が発生するか理解や、どのような対策をとれば有効かなどの検討が困難となっている。

そこで本研究では、大阪湾における自動車による避難行動の様子を模擬し、それによって起こりうる影響の評価を行うためのデータを提供するための分析ツールの構築、また住民に災害に対するイメージや避難方法を周知して防災意識向上に繋げ、地域の防災上の脆弱性の把握を目標とする。

本システムの実装には、構造計画研究所が開発したマルチエージェント・シミュレータである「artisoc3.0」を使用した。シミュレートした結果、津波から避難する際に大正区から他区への避難にかかる時間が、津波が到達するまでには間に合わないといった結果が得られた。また対象地区として、周りを川に囲まれた大きな島となっている大阪市大正区を選んだ。

評価においては、本システムの目的や機能に関して、ひょうご震災記念21世紀研究機関の林真弘氏、吉岡潤也氏にヒアリングを行った。その結果、本手法が有効であることとともに、避難行動全体に着目するのではなく、特定の避難者に着目した避難シミュレーションが有意義であることが確認できた。

目次

1 章. まえがき	4
2 章. 自動車での避難について	7
2.1 自動車避難の実態.....	7
2.2 自動車での安全にかつ確実に避難できる方策.....	8
3 章. 研究動向	10
3.1 避難行動シミュレーションの現状	10
3.1.1 セルオートマトン手法	10
3.1.2 物理モデル手法	11
3.1.3 マルチエージェントシミュレーション	12
3.2 津波警報時の行動モデル	12
3.3.1 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.....	12
3.3.2 研究事例から得られた点と課題	13
3.3 交通シミュレーションモデル	14
3.4 今回取り上げる課題	15
3.5 津波総合シナリオ・シミュレータ	16
4 章. 提案概要.....	20
4.1 システムに考慮する機能	20
5 章. システム構成.....	22
5.1 開発環境.....	22
5.2 システムの概要	23
5.2.1 対象地域.....	23
5.2.2 artisoc 用 GIS 道路データ変換ツール.....	24
5.2.3 避難車両台数について	26
5.2.4 エージェントについて	26
5.2.5 組み込み関数.....	29
5.2.6 出力設定.....	31
5.3 システムの使い方.....	31
5.3.1 GIS データ読み込み.....	34
5.3.2 最短経路計算.....	37
5.3.3 避難先指定、避難先への避難台数の設定、各エージェントの経路設定...	39
5.3.4 避難開始時間、車両速度設定、シミュレーション開始	40
5.3.5 実行結果の表示	43
6 章. 評価と今後の展望.....	45
6.1 シミュレーションの結果について	45

6.2 結果の整理	49
6.3 専門家による評価について	50
6.3.1 ヒアリング項目	50
6.3.2 評価結果.....	50
6.4 考察と今後の課題.....	51
7 章. あとがき.....	53
参考文献.....	54

第1章 まえがき

日本は地震大国であり、毎年数多くの地震が発生している。日本の地震には、活断層による直下型地震と、プレート境界部における海溝型地震がある。直下型の例としては 1995 年 1 月 17 日の阪神・淡路大震災がある。マグニチュードの大きさが小さくても、震度が大きくなる傾向にある¹。阪神・淡路大震災も、マグニチュードは 7.3 であったが、初の震度 7 を記録し、死者 6,434 人、負傷者 43,792 人もの被害を出した[1]。一方、海溝型地震の例として、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震がある。日本における観測史上最大、マグニチュード 9.0 の地震が発生し、東日本大震災となった。海溝型地震の特徴は津波である。東北でも我が国最大規模の津波により、死者 15,882 人、行方不明者 2,668 人（警察庁調べ、2013 年 3 月 11 日現在）もの被害が出ている[2]。岩手県陸前高田市で最大 15.8m もの津波の高さを観測したほか、岩手県から福島県北部にかけての沿岸地域では、海岸線に沿って内陸 5km 地点にまで津波が到達し、家屋、鉄道、道路、橋梁だけでなく、鉄筋構造のビルまでも押し流した。自動車、大型船、航空機も流され、建物に被害を与える原因となった。

2000 年以降、震度 5 以上の地震が 100 回以上発生しており、地震による被害が多発しており、我が国は地震の活動期に入ったとされている。文部科学省研究開発局地震・防災研究課、地震調査研究推進本部が公表している「全国を概観した地震動予測地図 2010 年版」によると、今後 30 年以内にマグニチュード 7 以上の大規模海溝型地震が発生する確率が高い地域として東海(87%)、東南海(70%)、南海(60%)、根室沖(40%)などが挙げられている[4]。図 1-1 は、今後 30 年以内に起こると予想されている海溝型地震の主な地震発生地域とその発生確率を示している。大規模な地震がいつ、どこで起きてもおかしくない状況にある。

南海・東南海地震では、大阪や名古屋などの大都市圏が被災する。地震による被害は、建物、交通網、ライフライン、2 次災害の引き金など広範囲に打撃を与える。阪神・淡路大震災では、被災地の鉄道網は完全にマヒし、海上輸送も港湾施設の崩壊によりほとんどの機能が停止し、道路交通に利用者が集中する結果となった。海溝型地震の場合には、そのような揺れの後に津波が来る。揺れの周期が長い海溝型地震によるインフラの被害は、直下型地震ほどではないと予想されるが、大きな混乱の中で津波避難を行う必要がある。

¹ 地震の崩壊面でのエネルギーはマグニチュードで表されるが、地表面での震動の大きさは、日本では震度で表されている。震度は以下のように分類される[3]。震度 7 は阪神・淡路大震災で初めて導入された。

震度 1～2 程度 … 人が揺れを感知する

震度 3～4 程度 … 地震により建物が揺れる

震度 5～6 程度（強弱の 4 段階） … 建物が倒壊し始め、地滑りなどが起こる

震度 7 以上 … 全壊の建物が多くなり、大きな被害が出る

した。地震発生時には、人々は目先の個人的事情を重視した行動をとりやすく、渋滞を回避する抜本的な対策は現時点ではない。

一方で東日本大震災後、南海・東南海地震による最大20メートルの津波に見舞われる可能性のある愛知県田原市では、高齢者に配慮し例外的に自動車避難することが検討されている。また、全国最大34.4メートルの津波が予想される高知県黒潮町では、自動車による避難を一部容認する方針を打ち出している。介護が必要な高齢者らを自動車で運ぶ避難路を確保するため、海岸から山側につながる複数車線を備えた道路を検討している。自動車での避難を認める対象者や対象地域についてのルール作りも進めている[6]。このように地震発生後、自動車による避難が社会的に注目されている。しかし大阪市や名古屋市などの大都市で津波警報時に自動車による避難が行われた場合に、どのような状況が発生するのかが研究例が少なく、自動車の利用や制限の方法についても検討できていないのが現状である。

南海・東南海地震では、津波による被害は、静岡県から大阪府の沿岸を含めた紀伊半島全域、四国の南側など、ほぼすべての沿岸線に出ると予想されている。本研究では、特に大都市圏において、津波避難時に自動車を用いた避難がどのような状況を生み出すかをシミュレートすることで対策の検討を支援するツールの開発を目指す。道路破損や家屋倒壊によって避難経路が遮断されてしまうおそれをも考えられるので、道路容量も含めたシミュレーションを行う。また避難者の心理や行動特性も考慮する。本アプローチの有効性の検証のために、具体的な対象地域として、南海・東南海地震による津波で大きな被害が出ると予想されている大阪市を選び、専門家による評価を実施する。

以下では、第2章にこれまでの地震発生後において、自動車での避難の実態を述べ、第3章では防災に関連するこれまでの研究動向を述べ、第4章ではシステム提案の概要と詳細、第5章では具体的なシステム構成、使い方などを述べる。第6章ではシステムの評価と考察、今後の課題を示す。

第2章 自動車での避難について

本章では、これまでの地震発生後における自動車避難での実態を整理し、それに対して自動車により安全かつ確実に避難できる方策について述べる。

2.1 自動車避難の実態

2003年に発生した十勝沖地震では、全体で自動車を利用し避難した人が74%、2011年に発生した東日本大震災では57%であった[7]。避難の際、自動車を利用した理由を図2-1に示す。

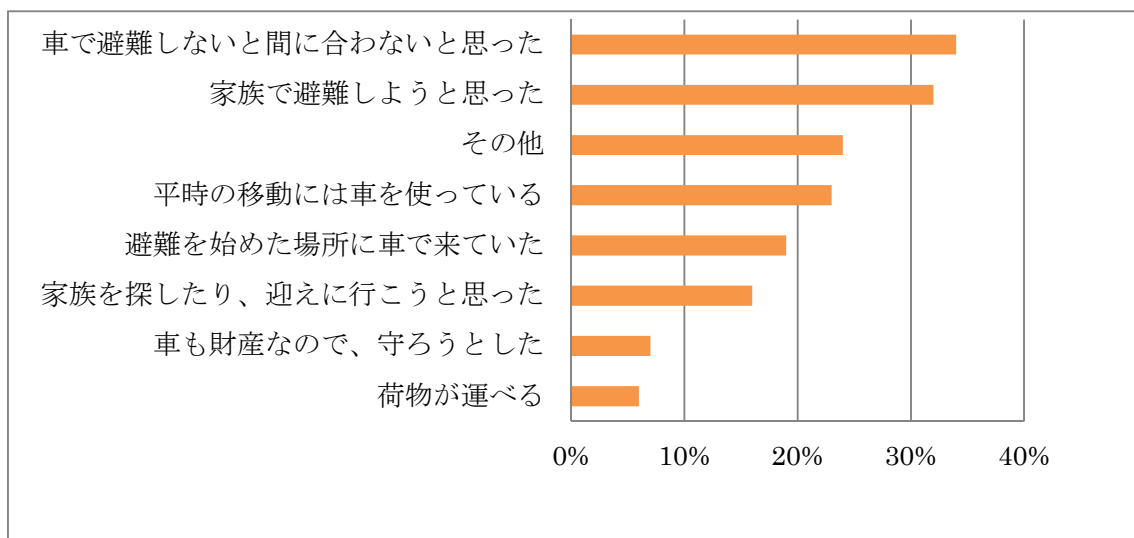


図2-1：自動車で避難した理由(複数回答)

自動車を利用した理由について、「車で避難しないと間に合わないと思ったから」「家族で避難しようと思ったから」「安全な場所まで遠くて、車でないと行けないと思ったから」という理由があげられている。一方、「避難をはじめた場所に車で来ていたから」「平時の移動には車を使っているから」といった理由もある。

自動車を利用した避難の「その他」の主な理由として、「乗車を促されたから」「支援のために使用せざるを得なかったから」「防寒対策を考えていたから」「自身が災害時要援護者またはその家族だから」という回答が多くあげられた。

また、避難する際に「守らなければならない」と思った物について、一番多くあげられた「預金や預金通帳・印鑑」に次いで「車」と回答した人が2番目に多い。表2-1に示すように、どのような自動車保険制度においても、地震・噴火・津波が原因の事故では保険金が支払われないのが現状である。このように避難の際に自動車を利用した理由は様々である。

表 2-1：自動車保険制度について

主な種類	内容	支払要求	
		台風・洪水・高潮	地震・噴火・津波
賠償保険 (対人、対物)	自動車運転中に、相手方に死傷させた場合に、他人の財物に与えた場合に保険金が支払われる。	×	×
障害保険 (人身障害、搭乗者傷害)	自動車運転中に、運転者及び搭乗者が死傷した場合に保険金が支払われる。	○	×
車両保険 (一般車両保険)	事故により契約金が損害を受けた場合に保険金が支払われる。	○	×

東日本大震災において、地震が発生してから津波が来る前に避難行動を開始した人のうち、発生から15分後に避難を開始した人が最も多く、全体の80%が35分後までに避難を開始している。すなわち、極めて短時間に多くの人が一斉に自動車で避難しているのである。自動車で避難した人が避難する際に障害となったことについて、「車の渋滞」「地震による道路の被害や道路上の瓦礫などが障害となった」が多いが、渋滞はこのような短時間の交通集中が原因である。また、その他には、「停電による信号機の減灯」「液状化による道路の浮き上がり」「踏切の遮断機が降りた状態」などが存在する。このように、道路の損壊が大きな障害になっており、これも渋滞の原因と言える。

地震発生後、宮城県・石巻警察署管内では、信号の減灯や内陸へ向かう自動車の渋滞が確認されている。また、「路面崩壊」「液状化によるマンホールの浮き上がり」「停電による信号機の減灯」など、通行の障害となる問題点も明らかになった。さらに、岩手県大船渡市と山田町、宮城県気仙沼市と山元町などでは、地震発生後、踏切がおりた状態となり、渋滞が発生し避難の障害となった。

自動車避難と年齢層の関係については、若い人ほど自動車を運転して避難する割合が高く、高齢になると自動車に同乗して移動している。徒歩による避難の避難距離が平均434mに対して、自動車による避難の避難距離は平均2,209mである。このことは、自動車利用による避難が遠距離避難を可能にしていることを示しているのではない。避難先が遠いことにより、自動車を利用せざるをえず、自動車による避難が増えることを示している。このことは、南海・東南海地震で、湾岸部に津波の可能性が高くなった場合に、内陸部への避難に自動車が利用される可能性が高いことを示唆する。

2.2 自動車での安全かつ確実に避難できる方策

上記で述べた自動車避難の実態に対して、自動車で安全かつ確実に避難するための対策、

留意点を下記に示す。

- (1) 自動車避難を検討せざるを得ない地域、自動車避難が適さない地域の条件整理
 - ① 想定津波の津波到達時間、浸水範囲等の条件を明確にした上での検討
 - ② 徒歩避難が困難な地域における自動車による避難の検討
 - ③ 各地域における特有の条件を踏まえた検討
- (2) 自動車避難をせざるを得ない場合における道路利用ルールの整理
 - ① 自動車避難と徒歩避難が混在した場合にも安全に避難できるルールの整備と周知・徹底
 - ② 津波避難時のみ通行可能とする道路利用ルールの検討
 - ③ 災害時の通行ルールの検討
- (3) 地震発生後の避難に向けた道路の安全性の向上
 - ① 地震発生後にも自動車が走行可能となるような安全対策の推進
 - ② 標識や標高表示による避難誘導対策の推進
 - ③ 新規道路建設時や道路改良時における津波避難への留意
- (4) 通過交通や例外的に自動車避難を行う場合について各地域で明確化
 - ① 発災時における通行中の自動車の取扱いの検討
 - ② 災害時要援護者施設における集団避難や徒歩による避難が困難な方の避難
 - ③ 避難時に自動車利用を許可する者の設定と地域における合意形成の場の整備
- (5) 津波避難時の自動車利用に関して、ドライバーを中心に教育を充実
 - ① ドライバーへの防災教育の実施
 - ② 平常時における道路情報板等へ災害時の行動ルールの表示の推進

このように、避難者自身に対して、「災害後にどうすべきか」、「どのように避難すべきか」を周知、教育するとともに、社会的に合意を形成することが、避難者が安全に津波から避難するためには重要である。そのためには、皆が自動車で避難をするとどのような状況になるかを共有することが大前提となる。

本研究では、自動車による避難をシミュレートし、大都市における自動車避難の影響を評価するとともに、本システムを個人の避難検討ツールとして生活者に利用してもらうことで、個人の防災意識の向上も目標とする。

第3章 研究動向

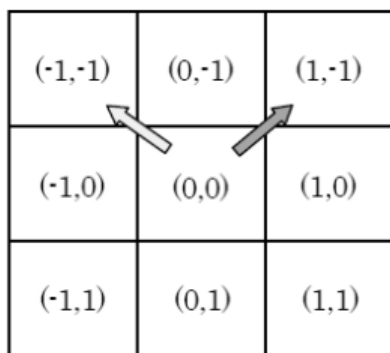
本章では、避難行動シミュレーションモデル、津波警報時の人間の行動モデル、および交通シミュレーションモデルの現状を整理し、本研究の位置づけを明確にする。

3.1 避難行動シミュレーションの現状

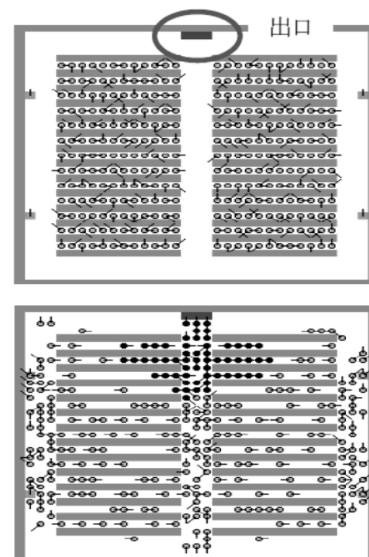
火災や津波等の状況に応じて、群集の避難行動のシミュレーションは様々な研究開発が行われている。パニック状態も視野に入れた緊急避難行動の予測手法を開発するために、本章では数値解析手法の点からその現状を整理する。

3.1.1 セルオートマトン手法

セルオートマトン法はボトムアップ的な手法であり、離散的な時間・空間を取り扱う[8]。歩行空間である二次元平面はセルと呼ばれる格子に区切られ、歩行者一人一人は近傍情報を処理しながら自律的に行動し、その結果として大域パターンが創発させられる。歩行者一人一人の意思決定ルールに様々な要素を組み込んだり外したりしながら大域パターンの創発を理解していくことが出来る。また歩行空間の形状設定や施設配置等における自由度も高く、複雑な形状の境界条件を容易に組み込むことができる。特に多数のエージェントが相互関係のもとで自律的に動作する際の創発現象の理解に優れた手法である。また、歩行者や車の流動における渋滞・混雑現象のシミュレータ作成においては基本的な手法の一つとなっている[8]。図3-1にセルオートマトン法の例を示す。



(a) 空間のセル分割の例



(b) 群集流動のシミュレーション例

図3-1：セルオートマトン法の例

避難行動の場合、円滑に流れるパターンや閉塞するパターンを計算することができる。

一方で、定性的なパターンの分類には適した手法であるものの、定量的な予測には限界がある。ルールを複雑にすることでより定量的な予測も可能ではあるが、セルオートマトン法の強みではない。

3.1.2 物理モデル手法

物理モデルとは、群集内の個人が、仮定された法則に従って行動する手法である。例えば、建物内の動線の設計では、群集を流体とみなし、速度や空間あたりの人数を計算する手法が使われる。

群集が円滑に動く場合、この手法は効果的であり、信頼度も高い。計算に使われるパラメータを適切に設定することで、人の流れが閉塞する状況も再現することは可能である。しかし、建物の構造を配慮する必要があり、パラメータの設定が難しい。

高度な物理モデルとして、ポテンシャルモデルとそれを使ったシミュレーション手法が提案されている[9]。経路の空間特性、避難する個人の特性、災害状況等に対し、適切なポテンシャルを設定することで、閉塞等も含め、さまざまな避難行動をシミュレートすることができる。図 3-2 にポテンシャルモデルにおけるポテンシャルのイメージを示す。

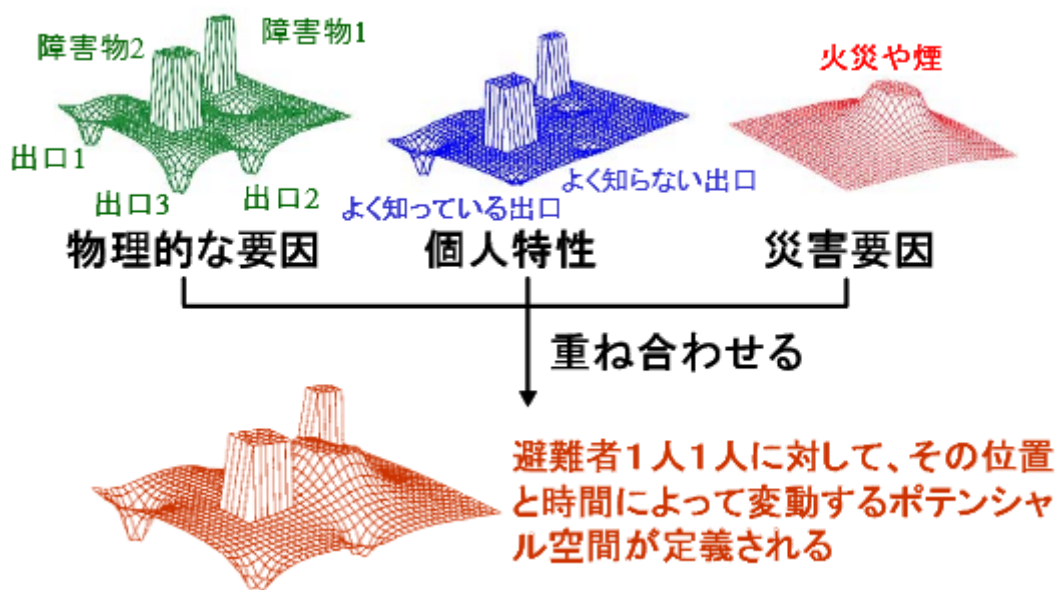


図 3-2：ポテンシャルモデルにおけるポテンシャルのイメージ

しかし、結果の信頼性は、設定されたポテンシャルの質に依存する。状況を再現することは可能であるが、客観的にポテンシャルを決定する原理や方法がないため、信頼度の確保が重要な緊急避難行動を予測するには適していない。

3.1.3 マルチエージェントシミュレーション

マルチエージェントシミュレーションとは、「エージェント」「環境」「属性」「ルール」によって構成される。エージェントとは、周囲の環境の状態を知覚し、自らの判断に基づいて目標達成行動を行う自立主体のことを意味し、内部状態(属性)と行動ルールを持つ。環境とは、エージェントの外部にあり、エージェントの意思では変更できないものである。属性は、自立主体を構成する要素のことであり、シミュレーションを通じて一定のものと、環境や他のエージェントとの相互作用を通じて変化するものの2種類がある。ルールは、エージェントの移動や状態変化、他のエージェントとの相互作用、環境の挙動を規定するため、エージェントや環境に設定する。エージェントに設定した場合、ルールを行動ルールと呼ぶ。これらの構成要素をシミュレーション空間で自律的に動作させることで、複雑な相互作用がコンピュータの中で創発的に展開し、場合によっては予想外の結果をもたらすのがこの手法の利点である。

3.2 津波警報時の行動モデル

津波災害への対策として防潮堤などの施設の整備や、警戒システムなど住民へ早期に情報提供するシステムの整備が進められてきた。しかし、津波災害時におけるこれまでの人々の避難行動には問題が多い。地震直後に発生する津波や被害を軽く見積もり、警報や避難勧告が発せられた場合でも避難を行わない、行政からの情報伝達に過度に依存してしまい、情報が発せられるまで避難しないといった危険な行動を取る傾向がある[10]。例えば、2005年に発生した宮城県沖地震では、津波多発地域にも関わらず実際に避難した住民は2割に満たないことが調査から明らかにされている[11]。このように、日本の津波避難率は極めて低いレベルにあり、このままでは近い将来に発生すると予測されている南海・東南海地震での津波の際に、多くの犠牲者を出す可能性も否定できない。これは、住民の過剰な行政依存、情報依存に基づくものであり、行政主導の津波対策が進めば進むほどに、その傾向が強くなることが危惧されている。

このような問題に対処するためには、避難の必要性を単に訴えるだけの避難活動だけでは効果が低い。地域住民が津波の危険性を自らの命の問題として深く認識し、自発的に避難を決断できる住民となるような津波防災教育が必要である。そのためには、津波避難時にはどのような状況が発生しうるのかを効果的に示すことのできるシステムの開発が必要である。次節では交通シミュレーションに考慮すべき様々な基礎データとして活用できる研究例を整理する。

3.2.1 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

津波のような災害時において被害を最小限に食い止めるためには、迅速な住民の避難行動が重要であり、その行動特性に応じた地域計画・避難システムが必要である。東北大学大学院工学研究科の鈴木らによる津波避難シミュレーションモデルは、沿岸地域の住民に

対して、避難訓練調査およびヒアリング調査を行うことにより津波避難に対する意識を把握し、その結果を導入した避難シミュレーションモデルである[12][13]。

(1) ヒアリング調査

調査は対象地域の各家庭を訪問して、1軒につき1人に回答してもらった。また昼夜の避難行動特性の違いを把握するために、調査を昼（14:00～16:00）と夜（17:30～19:30）に区別して行った。調査内容は、家族構成、地震発生時とその後大津波警報が発令された場合の対応行動、避難のきっかけ、緊急避難時に持ち出す物、避難手段、避難形態、避難経路である。

(2) 避難訓練調査

対象地域の1区画（21世帯、1世帯1～6人）の住民に、同時刻に一斉に避難を開始してもらい、家族単位で自宅から指定避難所まで徒歩で移動してもらった。各世帯に調査員を1人ずつ配置し、避難経路の選択理由を聞き取りながら移動した。

(3) 避難経路の選択

対象地域における経路の選択として挙げられた項目は、下記の4つである。

- ① 他の人の付いていく(自分で決めた道に行く)
- ② 川沿いへ向かう(避ける)
- ③ 主要道路へ向かう(避ける)
- ④ 橋を渡る(渡らない)

3.2.2 研究事例から得られた点と課題

これらの研究事例から下記のことが言える。

- ① ほとんどの人（約90%）が家族全員そろっての避難を考えている。
 - 外出している家族が多い昼よりも、家族が揃う夜の方が各対応行動の割合、もしくは避難率が高い。
- ② 避難手段は、徒歩と自動車がほぼ半々である。ただし、地域によって大きな差が生じる。また、避難手段と避難場所には関係がある。
- ③ 避難する方向は、沿岸から離れた内陸の方への避難者が多い。
- ④ 目指す避難場所（高台）が遠いほど、自動車による避難率が高くなる。
- ⑤ 目指す避難場所として、海岸により近い世帯ほど自動車で内陸・高台への避難を考えており、遠い世帯ほど近くの公的指定避難場所を考えている。
- ⑥ 道路に住民が集中し、交通密度が大幅に増加し、予定していた経路とは異なる周辺の道

路へ迂回する住民が多く見られた。

住民意識を導入した避難シミュレーションモデルから避難状況の問題点を示した。家族で避難する傾向や避難の方向、それによる交通渋滞の危険性を知ることができ、交通密度を減らすなどの何らかの対策が必要であることが分かった。平常時や避難行動時における住民の行動表現について、これらの研究からの成果を考慮することで、より現実的な被害推計や効果的な津波避難計画を実施することができるシミュレーションが可能となる。本研究におけるベースとなる知見として重要である。一方で、避難シミュレーションモデルの課題として、避難開始時刻の詳細な設定、交通流モデルの更なる改良、地震による道路倒壊や家屋倒壊による道路状況の影響の考慮などが挙げられる。

3.3 交通シミュレーションモデル

本研究は自動車の動きのシミュレーションを中核とする。有効な交通シミュレーションの方式を検討するために、従来用いられている交通シミュレーションの特徴や課題を整理する。

道路交通シミュレーションは、道路交通環境を改善するための規制や制御などの交通運用政策、道路建設などの施設整備を実施した場合、交通流の状態がどのように変化するかを事前に評価するために開発された[14]。シミュレーションの最も大きな特徴は、交通渋滞の延伸が表現できる点である。静的な交通状況モデルでは渋滞現象の発生・消滅に関するメカニズムは厳密には表現できないため、動的な渋滞評価のためにはシミュレーションの利便性が高くなっている。

しかし一般に交通シミュレーションでは、時刻、気候、道路状況、車種、ドライバーの運動能力、性格など、考慮すべき要因が多く存在する。さらに、道路ネットワークを実際の道路に一致させることや、シミュレータで使用するデータの計測にも限界があり、現況を完全に再現することは、どの交通シミュレータにも限界がある。交通シミュレータは、実測、推測の変動するデータで道路状況の評価するため、シミュレーションの実施に際しては、使用するシミュレータの機能、走行特性、限界を考慮し、現実の値に近い1つの値、もしくは複数の満足する値を抽出する必要がある。

従来の交通シミュレーション手法としては、広域ネットワークシミュレーションやミクロシミュレーションがある。広域ネットワークシミュレーションは、車両密度や速度などの様々な交通パラメータから構成されるノード（地点）のネットワークとして広域道路網をモデル化し、パラメータが地域間でどのように伝播するかを分析するものである。広域をマクロ的に分析できるために、政策評価するのに優れたツールである。交通環境を改善するために、規制・制御などの交通運用策を検討する際や、道路を作るなどの施設整備の際には、交通流がどのように変化するかをあらかじめ評価する必要がある。特に政策の影響範囲が1交差点や、1路線ではなく、面的に広がる地域に及ぶと考えられる場合に、広

域ネットワークシミュレーションが適用される。特徴としては、静的な交通流配分モデルでは表現できない交通渋滞現象を動的なモデルとして適用することで、広い地域での複雑に影響し合う交通状況を総合的に分析できる点である。特に、特定地点での僅かな渋滞が地域全体に広がるような影響過程の分析などには効果的である。しかし、交通渋滞現象などシミュレーションを動かすためには多くの交通需要データが必要になり、一般に調査によって得られる需要パターンよりも細かなデータが必要になる。

一方で、ミクロシミュレーションは車両や歩行者、さらには荷物といった移動体ひとつひとつを個別に表現したモデルを適応する。交通流を構成する移動体には、走行特性が異なる車両が混在したり、ドライバーの行動規範が異なったりと、多種多様な特性がある。これらの詳細レベルのパラメータの多様性が交通流に大きく影響を及ぼすと判断される場合に、このシミュレーションが有効である。ただし、運転者の判断・行動分析・車両挙動分析など個々の分析を十分に行う必要があるが、判断・行動モデルをあまりに詳細にするとモデル化が難しくなる。

交通シミュレーションモデルを交通流のモデル化の方法について分ければ、個別の車両の挙動について詳細に取り扱うミクロモデルと、交通の流れを連続的な流体として取り扱うマクロモデルとになる。その中間的なものとして車両をグループ化した車群を単位として交通の流れをシミュレートする車群モデルがある。車群モデルは個別の車両を離散的に取り扱うが、その挙動については車群単位で行い、複雑な追従挙動計算をさせている。合流部の合流挙動や交差の詳細な転向挙動、単路部の追い越し、車線変更、追従挙動などの個別車両の挙動を扱うシミュレーションはすべてミクロシミュレーションである。ネットワークシミュレーションは部分的なものを除いてマクロシミュレーションか群集モデルで行われている。

今回の目的との関連では、自動車による避難が行われた場合の比較的広域における交通状況を把握すること、複数の避難者行動を反映させることが目的であるため、道路の渋滞状況が把握でき、各車両の避難行動が把握できる、車群モデルが適していると考ええる。これにより、津波避難開始後、どの時点でどの道路が渋滞するのか、自動車による避難をどの程度に抑制できれば大きな渋滞を回避できるのかを容易に知ることが可能である。

3.4 今回取り上げる課題

研究事例から津波避難時には、海岸近くに住む住民ほど自動車での避難率が高いことがわかった。南海・東南海地震が発生し、津波が押し寄せれば、静岡県から大阪府の沿岸を含めた紀伊半島全域、四国の南側、ほぼすべての沿岸線に多大な被害と犠牲者がでるのは間違いない。しかし大阪市や名古屋市などの大都市で津波警報時に車による避難が行われた場合にどのような状況が発生するのかは、未知の要素が多く、車の利用や制限の方法についても検討できていないのが現状である。そこで本研究では、津波警報時の大阪湾における自動車による避難行動をシミュレートし、大都市における自動車避難の影響を評価す

ることとする。海岸から近い地域のため、多くの住民が自動車による避難を行うことが予測できる。それによって起こりうる影響の評価を行うためのデータを提供するシステムの構築、また住民に災害に対するイメージや避難方法を周知して防災意識向上に繋げ、地域の防災上の脆弱性の把握を目標とする。

3.5 津波総合シナリオ・シミュレータ

シミュレータをベースとした住民の避難促進のための防災教育ツール、あるいは自治体の防災対策検討の支援ツールとして、津波総合シナリオ・シミュレータがある。これは、本システムと目的が同じであり、完成システムのひとつのイメージとして参考になる。

群馬大学の片田らによって開発された本シミュレータは、様々なシナリオの下で住民が自らの避難行動を想定し、シミュレータに入力すれば自らが助かるか否かをアニメーションで確認できるように構成されており、住民の避難促進のための防災教育ツール、および自治体の防災対策検討の支援ツールとして開発された[15]。

津波総合シナリオ・シミュレータは、以下の3つのシミュレーション技術を統合したシステムである。各シミュレーションによる計算結果を利用することによって、行政からの災害情報の伝達状況や住民の避難状況、そして、津波の発生状況を考慮した被害状況を推計できる。また、シミュレーション結果は、アニメーションとして出力することができ、インターネットなどにより公開することが可能である。図3-3に、津波総合シナリオ・シミュレータの要素技術を示す。

(1) 情報伝達シミュレーション

情報伝達シミュレーションは、津波警報や避難勧告などの災害情報が防災行政無線の屋外拡声器や広報車、そしてマスメディアといった情報伝達メディアにより住民に対して発信される様子、また情報を受けた住民が口頭や電話による伝達行動を行うことによって災害情報が地域全体に広まっていく様子を表現するシミュレーションモデルである。このシミュレーションに現状の情報伝達施設の状況や情報伝達体制を設定することによって、以下のような結果を得ることができる。

- ① 住民の情報取得状況（情報が届きにくい地域が存在するかどうか）
- ② 住民の情報取得タイミング（どれぐらいの時間で地域に情報が広まるのか）
- ③ 住民が取得した情報の正確性（行政からの情報が直接届かず不正確な情報が広まりやすい地域があるかどうか）

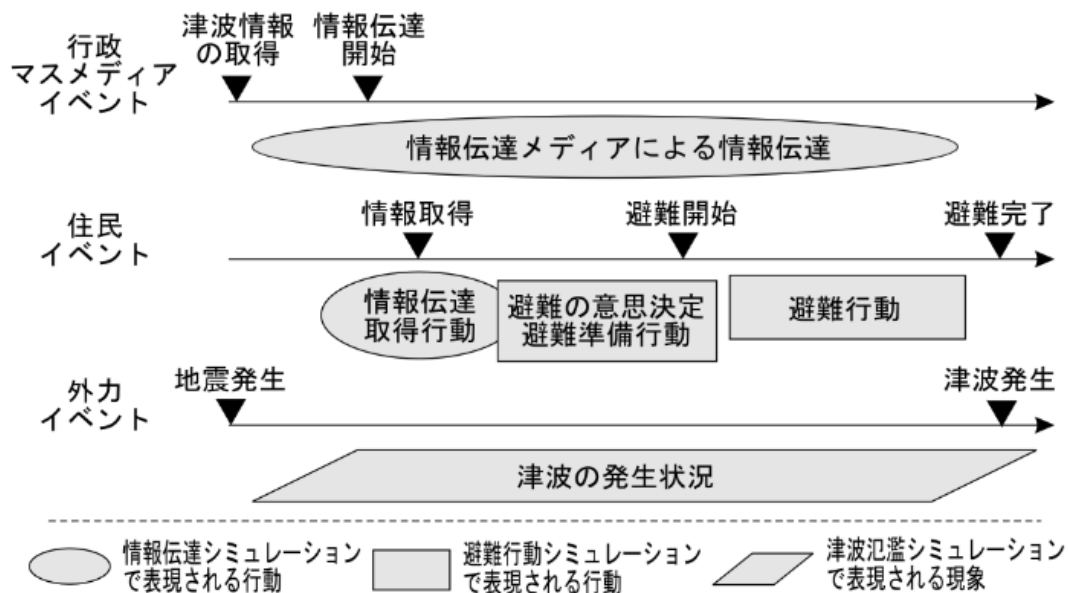


図3-3：津波総合シナリオ・シミュレータの要素技術

(2) 避難行動解析シミュレーション

災害情報を受けた住民が、避難場所まで避難する様子を表現するシミュレーションである。このシミュレーションでは、避難の有無や避難行動を開始するまでの準備時間を設定することも可能である。このシミュレーションによって、以下のような事項を検討することができる。

- ① 住民の避難所要時間（避難が遅れがちな地域はどこか）
- ② 避難路や避難所など避難施設の整備による効果

(3) 津波氾濫シミュレーション

地震の規模や震源に応じた津波の発生状況を表現するシミュレーションである。本システムでは、地震の規模や防潮堤などのハード施設の整備状況が異なる様々な設定に基づいて計算された結果を蓄積しておき、想定するシナリオに応じて選択する形式を採っている。

図3-4に人的被害発生件数のシミュレーション例、図3-5にアニメーション出力例を示す。

		行政の情報伝達タイミング(分)												
住民の避難開始タイミング(分)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	60
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	7
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	10
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	17
	3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	4	6	32
	4	0	0	0	0	0	1	2	2	4	3	7	14	50
	5	0	0	0	1	2	4	6	7	8	7	12	20	75
	6	0	1	2	5	8	9	9	9	11	10	17	44	120
	7	1	2	7	9	9	13	14	13	12	12	36	94	190
	8	1	8	10	10	12	15	17	19	16	19	81	148	302
	9	9	11	13	12	12	24	26	51	53	56	189	273	440
	10	11	14	14	17	41	72	91	124	148	165	373	463	566
人的被害発生件数:		0	0~10	11~50	51~100	101以上								

図 3-4：人的被害発生件数のシミュレーション例

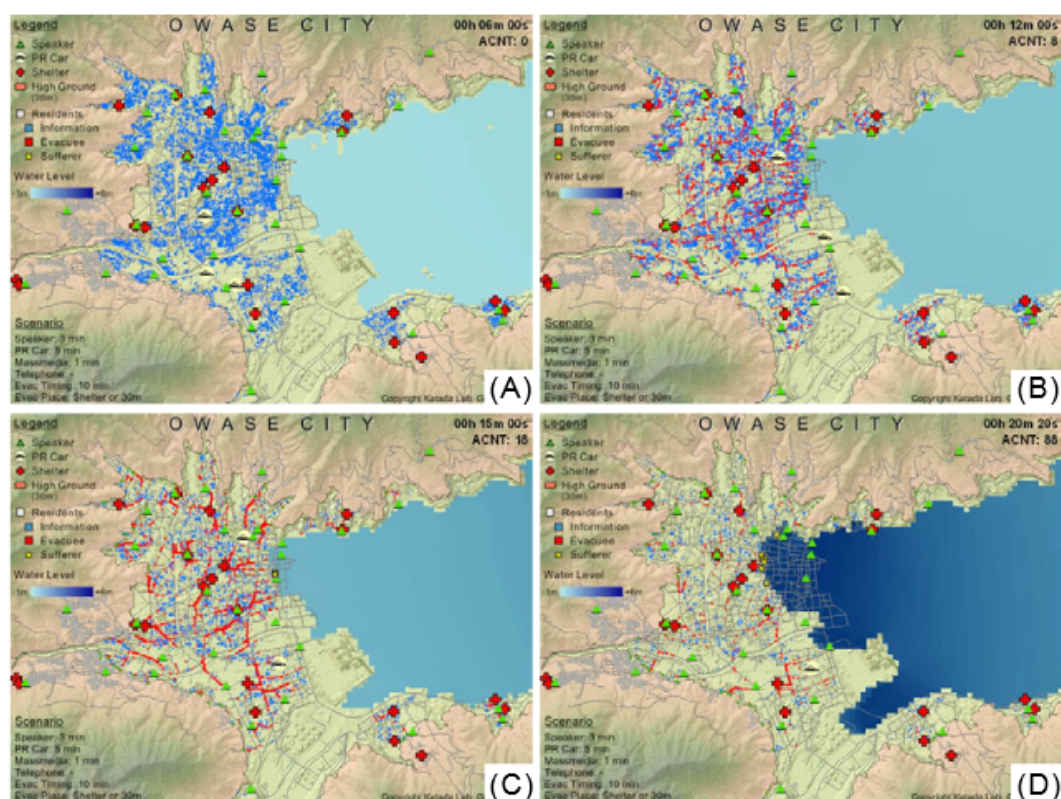


図 3-5：アニメーション出力例

これまでに、徳島県牟岐町などに導入され、迅速な避難の重要性を説く、動くハザードマップとして住民への防災教育ツールとして利用されてきている。本システムの利用方法を具体的に考える上で大いに参考になる。

第4章 提案概要

本研究では、第2章、第3章で述べた研究事例の調査結果、自動車避難の実態、および南海地震を想定した様々な避難状況やデータに基づき、大都市湾岸地域における自動車での避難行動をシミュレートし、それによって起こりうる影響の評価を行うためのデータを提供するシステムの構築、また住民に災害に対するイメージや避難方法を周知し、個人の防災意識向上を目標とする。

4.1 システムへ考慮する機能

以下に本システムに考慮する機能を示す。

- [1] **設定時間**：地震発生から、各種津波シミュレーションで予測されている時間後に、津波が湾に到達するものとし、これを該当地域の避難完了の成否を評価する指標とする。すなわち、予測されている津波到達時刻以前に避難を完了できるような施策の策定を目指す。
- [2] **避難先の制限**：指定する避難先（目的地）の数、また避難先それぞれへの受け入れ可能台数をコントロールパネルで設定できるようにし、避難先の数、避難先への受け入れ可能台数の変化によって、時間内に避難ができるかできないかの検討ができるようにする。
- [3] **避難経路**：自動車が通行する避難経路は、ユーザが設定する目的地に対して、道路ネットワーク上で最短経路となる経路を通過するものとした。また、道路上には障害物がないとし、経路を迂回することをしないように設定する。なお、車の乗り捨てや、ドライバーの心理の反映は今後の課題としたい。
- [4] **自動車の避難速度**：自動車での避難速度は、基本的に通常速度として30km/hとする。ただし、走行速度には幅を持たせる。これは、人間が運転しているため、少なからず速度にばらつきが存在するためである。また、車間距離が一定の閾値以下になった場合は減速し、閾値以上の場合は通常速度になるまで加速していくものとする[16]。
- [5] **道路事情**：道路の幅員、車のすれ違い、方向転換の実施可否などを考慮し、狭い道路は、避難方向のみを通行可とする。また、避難者が橋を利用するとき、地震発生後には普段通り利用できるとは限らない。そこで橋が利用可能、不可能かの設定ができるようにする。渋滞交差点では、各方向から来る車両が1台ずつ交互に合流するものとする。
- [6] **グラフ表示**：それぞれの橋から避難した車の台数を、X軸を経過時間、Y軸を避難台数の時系列グラフで表示する。避難している車の行動が時間を追って、2次元上で視覚的

に把握できるようにする。

第5章 システム構成

本章では、構築したシステムの概要、使い方について述べる。

5.1 開発環境

本システムの実装は、構造計画研究所が開発したマルチエージェント・シミュレータである「artisoc3.0」を使用する。artisocについて下記に説明する。

・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「artisoc」

artisocは「社会科学分野などに適用できる」こと、「簡単なプログラミングですぐにモデルを表現できる」こと、「結果を視覚的かつ直感的に把握できる」ことを目的として開発され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[16]。artisocは、汎用の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という性格上、セルオートマトン、その応用としての人工生命、社会ネットワークなどのシミュレーションプラットフォームの構築に適している。その他にも、交通、防災、取引など多様な社会現象の分析ツールとしても利用されている。

マルチエージェントシミュレーションは、シミュレーションの対象ごとに、エージェントの行動ルール(振る舞い)や、入出力形式、画面表示、操作方法などが異なるため、従来はシミュレーションの対象ごとに、これらそれぞれのソースコードを一から記述する必要があり、本来注力すべきエージェントの行動ルールの記述以外の部分を作成する負担が大きい問題があった。artisocでは、エージェントの行動ルール記述以外の入出力/画面表示部分などをパーツ化しており、それらはGUIで簡単に選択・設定ができるようになっている。また、エージェントの行動ルールを記述する方法も分かりやすい言語体系のため、習得も容易である。

artisocでのシミュレーションモデルの構築は、基本的に次の3つのステップで行われる(図5-1)。

- [1] 空間/エージェントの種類・型を定義する
 - (ア) 基本的にマウス操作だけで定義可能
- [2] エージェントの行動ルールを記述
 - (ア) Visual Basic風な分かりやすい言語体系
 - (イ) 変数や関数名に日本語を利用可能
- [3] シミュレーション結果の出力形式の設定
 - (ア) マップ表示やグラフ表示の出力形式の設定
 - (イ) テキストファイルの読み込み・書き出しが可能

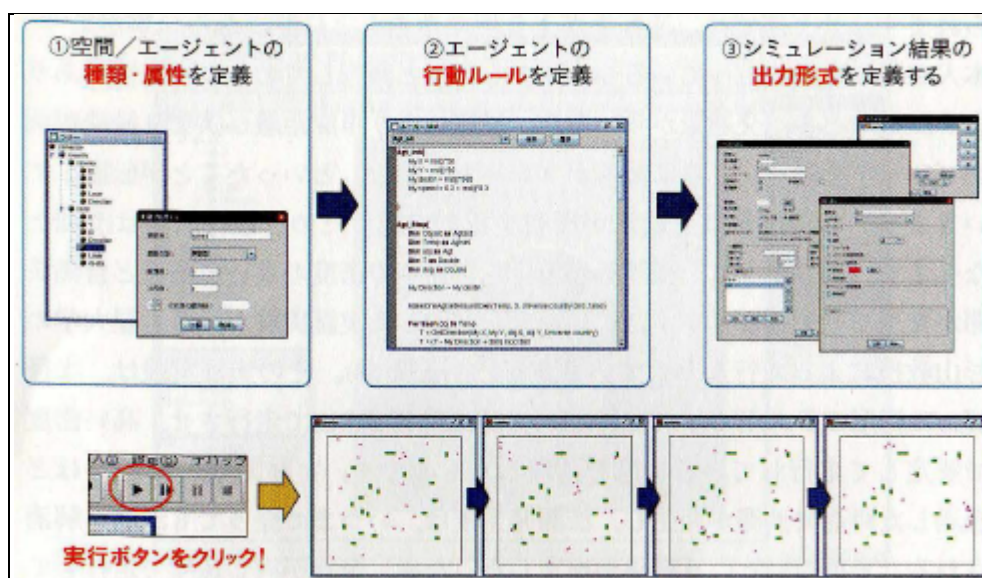


図 5-1：artisoc におけるマルチエージェント・シミュレーションの流れ

5.2 システムの概要

システムを検討する上で、具体的な対象地域を決めておくことで、機能の設計や評価を行いやすいと考えた。今回のプロトタイプシステムでは、大阪市大正区を対象地域とした。次節に対象地域について述べる。

5.2.1 対象地域

本システムでは、大阪市の大正区を対象地域とする。図 5-2 に対象地域と予想される津波被害を示す[17]。大正区は、大阪湾に面しており、周りを川に囲まれており、1つの大きな島となっている。海拔 0 メートルの地域も多く、防潮堤に設置されている防潮扉のうち、夜間に開放されているものが閉まらなかった場合には広範囲の浸水が危惧される。浸水深は、場所によっては 4m にもなる。この島から他区へ掛かっている橋は 9 つあるが、大規模地震が発生した際に通常通り利用できるとは限らない。もしいくつかの橋が利用不能になれば、区外に避難するルートが限定され、大きな混乱が予想される。また、大正区を含め港区、此花区などは埋立地が多く、液状化の危険度が高い。

シミュレーションを行うにあたって、「環境」である道路データは、シミュレーションの結果に大きく影響してくる。今回は、大正区の道路データを正確に利用するため、「GIS 道路データ変換ツール」を利用することとする。次節において「GIS 道路データ変換ツール」についての説明を行う。



図 5-2：大阪市大正区

5.2.2 artisoc 用 GIS 道路データ変換ツール

GIS 道路データ変換ツールとは、街区を対象としたマルチエージェント・シミュレーションモデルを作成する際の基礎データとなる道路データを、一般的な GIS データから artisoc に読み込むことができるテキスト形式に変換するツールである[18]。図 5-3 のように、出力する道路の精度を設定可能（交差点以外の道路ノードを間引くことが可能）であり、読み込んだ GIS 道路データからシミュレーションで利用する領域を GUI で指定することが可能なことから、artisoc 上で利用する道路データを容易に設定が可能である(図 5-4)。なお、道路は青色の線で表示される。

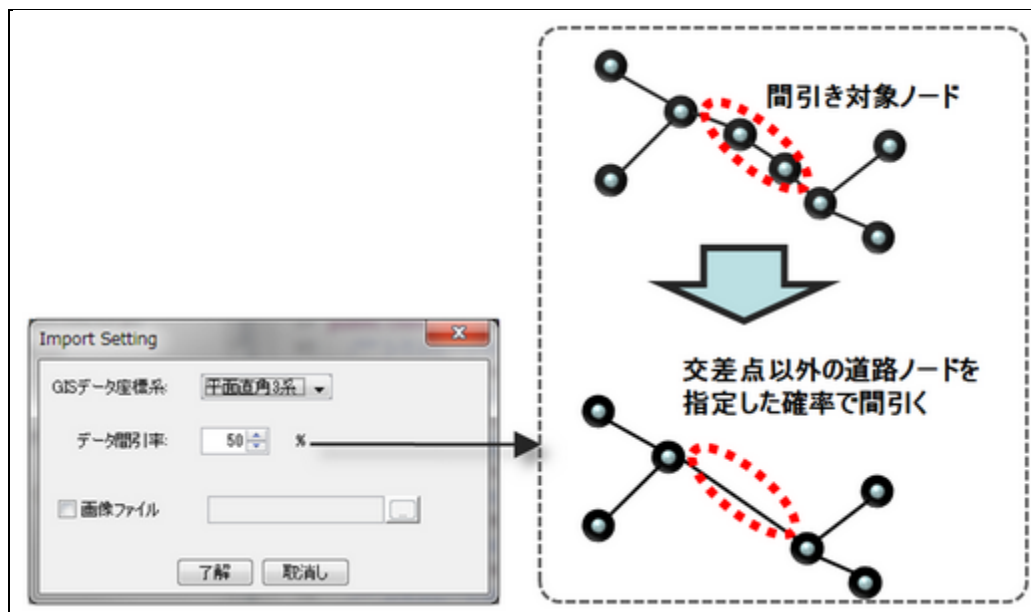


図 5-3：道路の精度を設定

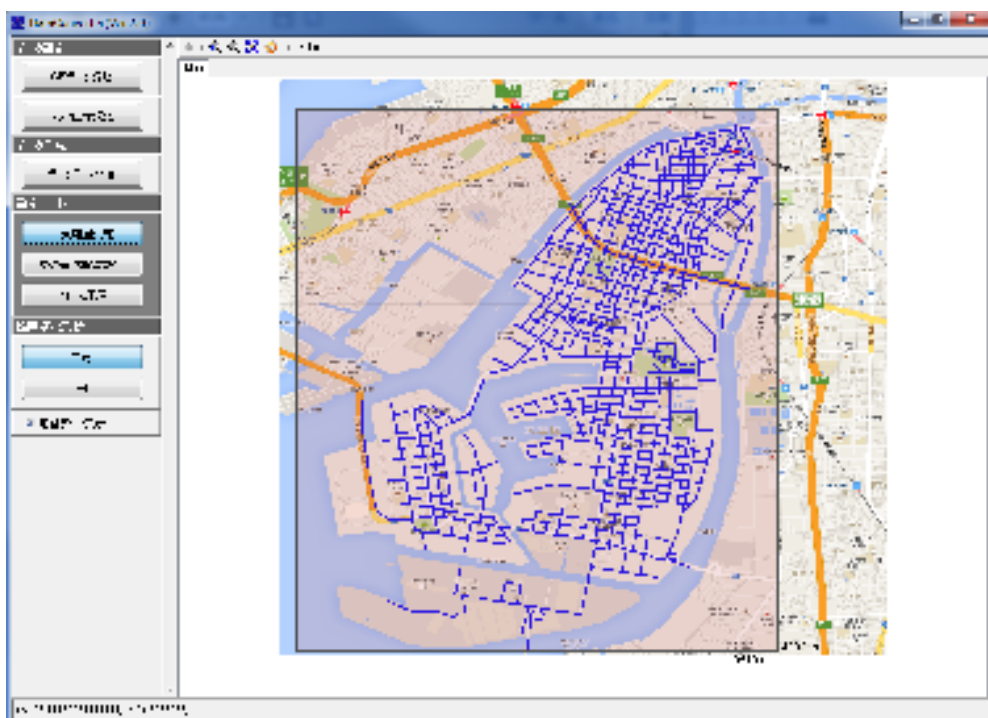


図 5-4：シミュレーションで利用する領域の設定

5.2.3 避難車両台数について

シミュレーションの基礎的初期データとして、対象とする地域において、何台の自動車が存在するのか、そしてその内の何台が実際に避難する際に使用されるのかを算出する必要がある。

何台の自動車が存在するのかは、都道府県ごとの自動車保有台数を調べればよい。今回の対象地区は大阪市の大正区なので、大正区においての計算方法を説明する。大阪市の自動車保有台数は統計値として公開されている[19][20]。これを大阪市の人口で割ると、以下のように 35% という数値が得られる。

$$\begin{array}{rccccccccc} \text{大阪市の自動車保有台数} & \div & \text{大阪市の人口} & \times & 100 & = & \text{大阪市での自動車保有率} \\ 931,811 & & 2,661,263 & & 100 & \div & \mathbf{35\%} \end{array}$$

これで、大阪市の約 35% の人が自動車を保有していることが分かった。

次に、この値を大阪市大正区の人口に掛けると、

$$\begin{array}{rccccccccc} \text{大正区の人口} & \times & \text{大正区の自動車保有率} & = & \text{大正区の自動車保有台数} \\ 67,351 & \times & 0.35 & \div & \mathbf{23,573} \end{array}$$

となる。これによって、大正区内での自動車保有台数が 23,573 台と想定できる。

この内、自動車で避難しようと考えている人の割合を特定する必要がある。野口ら[21]はアンケート調査によって、何割の人が避難時に自動車を用いて避難するかを調べた。その結果として得られた自動車利用者の割合を自動車保有台数に掛けると避難する車両の台数を出すことができ、

$$23,573 \times 0.39(\text{自動車で避難しようと考えている人の割合}) \div \mathbf{9,193(\text{台})}$$

と計算できる。

つまり、津波警報発令後、大正区内で津波から避難する自動車は約 9,200 台である。よって本システムでは、大正区において避難台数を 9,200 台として設定した。

5.2.4 エージェントについて

前節において、大正区内で津波から避難する自動車は約 9,200 台であることが分かった。これらエージェントとして表現する。各エージェントは、それぞれの目的地に向かって避難行動をとる。本来ならば、エージェント 1 つを 1 台の自動車とみなしシミュレートを行うのが従来の手法だが、避難車両 9,200 台すべてをエージェントとして画面に表示すると、膨大な計算時間が必要である。そこで今回は、エージェント 1 つを 10 台の避難車両と

みなし、画面に表示されるエージェント数は 920 個に設定した（図 5-5）。

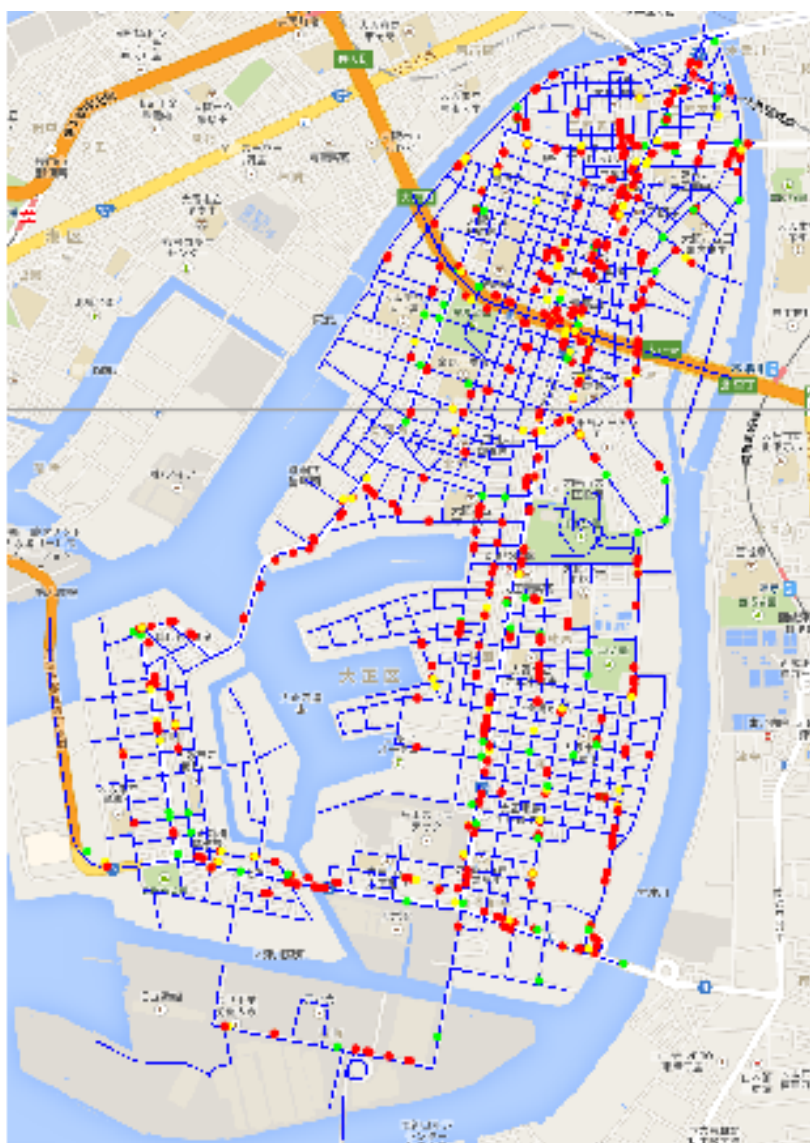


図 5-5 : エージェントの表示

エージェントを緑、黄、赤色の 3 色の丸で表示する。このエージェントの色は、前方車両との距離によって変化した速度を表す。コントロールパネルにおいて、各色の走行速度は設定できる。例えば、緑色のエージェントが、自動車の平均速度 30km/h で進むとすると、本システムでは、1 ステップを 10 秒単位で変化させているため、速度 30km/h の自動車は、10 秒間で約 83m 進むことになる。前方車両との距離が縮むに連れて、「緑色→黄色→赤色」のように色が変わり、前方車両との距離が長くなるにつれて、「赤色→黄色→緑色」のように、色と速度が変化する。表 5-1 に、エージェントの色ごとの速度、1 ステップごとに進む距離について示す。

表 5-1 エージェントの種類一覧



エージェントの色	走行速度 (初期設定)	前方車両との距離	10秒で進む走行距離
	30km/h	10mより長い	約83m
	20km/h	10m以内	約56m
	10km/h	5m以内	約28m

図 5-6 は、エージェントの視野についての説明である。図中の数字は、「0」を中心とした時の、中心からの距離を表し、この値を視野という。本システムでは、視野「1」が、実際の距離約 33m に対応している。つまり図 5-6 は、エージェントの視野が約 66m であることを示している。エージェントは、この視野の範囲内において、他のエージェントを認識することができる。

3	3	3	3	3	3	3
3	2	2	2	2	2	3
3	2	1	1	1	2	3
3	2	1	0	1	2	3
3	2	1	1	1	2	3
3	2	2	2	2	2	3
3	3	3	3	3	3	3

図 5-6 : エージェントの視野範囲

それぞれのエージェントは現在地から目的地までの最短経路を移動するものとする。これは、人間の心理として緊急時には、う回路を利用するより、最短経路を選びやすいと考えたことによる。最短経路はダイクストラ法により計算する。図 5-7 に、ダイクストラ法を用いた行動例を示す。

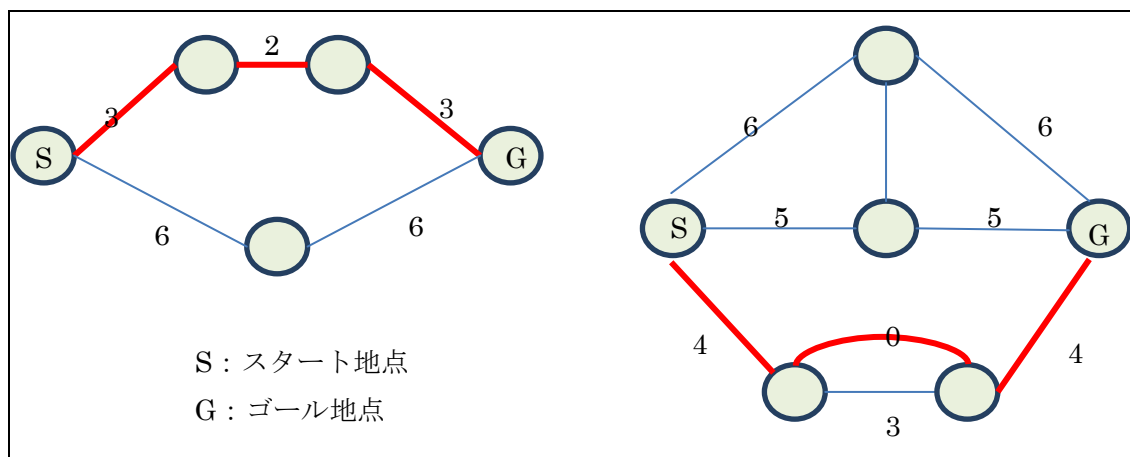


図 5-7 : ダイクストラ法を用いた行動例

5.2.5 組み込み関数

本研究において、シミュレーションに用いた組み込み関数の一覧を表 5-2 に示す。

表 5-2 システムに組み込まれている関数とその動作

関数	動作
Point	交差点を定義する。
Link	道路を定義する。
Car	避難するエージェントを定義する。
DijkstraLink	各エージェントの最短経路を取得する。
Mode	コントロールパネルにおいて、実行モード(最短経路計算、ルート取得、シミュレーション開始)を定義する。
Normal_Speed	コントロールパネルで設定する、エージェントの通常速度を定義する。
Crowded_Speed	コントロールパネルで設定する、エージェントの混雑時の速度を定義する。
Very_Crowded_Speed	コントロールパネルで設定する、エージェントの大混雑時の速度を定義する。
Count_of_Shelter	コントロールパネルで設定する、避難先の数を定義する。
Destination_(1~5)	コントロールパネルで設定する、各避難先を定義する。
Destination_capacity(1~5)	コントロールパネルで設定する、各避難先の収容台数を定義する。
Count_Car_Shelter_(1~5)	各避難先に到着した車の台数を取得する。
Evacuation_Timing_(1~7)	コントロールパネルで設定する、各避難者の避難開始時間を定義する。

それぞれの関数を以下に詳しく述べる。

① **Point**

交差点情報を格納するポイントエージェントである。地図上の X 座標と Y 座標が情報として格納されている。

② **Link**

交差点同士を結ぶ道路を定義している。

③ **Car**

地図上を移動するエージェントであり、速度、経路、視野などの情報が定義している。

④ **DijkstraLink**

ダイクストラ法で計算した、目的地までの最短経路の道路を定義している。

⑤ **Mode**

「最短経路の計算を行う」「各エージェントに経路設定を行う」「シミュレーションを実行する」の 3 つの項目をコントロールパネルで選択できるよう、定義している。

⑥ **Normal_Speed**

エージェント自身の通常速度を定義してある。本システムでは、前方のエージェントとの距離が 10m 以上あるときの速度で、コントロールパネルで設定できる。

⑦ **Crowded_Speed**

自身と前方のエージェントとの距離が、5m 以上 10m 未満の時の速度を定義しており、コントロールパネルで設定できる。

⑧ **Very_Crowded_Speed**

自身と前方のエージェントとの距離が、5m 未満の時の速度を定義しており、コントロールパネルで設定できる。

⑨ **Count_of_Shelter**

避難先の数を定義しており、コントロールパネルでその数を設定できる。

⑩ **Destination_(1~5)**

エージェントが目指す目的地を 5 つ定義しており、⑨で設定した避難先の数だけ目的地を設定できる。

⑪ **Destination_capacity(1~5)**

⑩で設定した目的地に収容できる車の台数を定義しており、コントロールパネルで設定できる。

⑫ **Count_Car_Shelter_(1~5)**

各避難先に到着した車の台数を定義しており、避難台数出力の際に利用される。

⑬ **Evacuation_Timing_(1~7)**

エージェントの避難開始時間を定義しており、コントロールパネルで設定できる。

5.2.6 出力設定

コントロールパネルで設定を行った後、実行パネルを使用しシミュレーションを実行する。実行パネルには、実行、ステップ実行、一時停止、停止の4種類のボタンを用意した。実行後、30秒ごとに、避難完了台数を表示する。シミュレート完了後は、総避難台数、各避難先への避難台数を表示する（図5-8）。

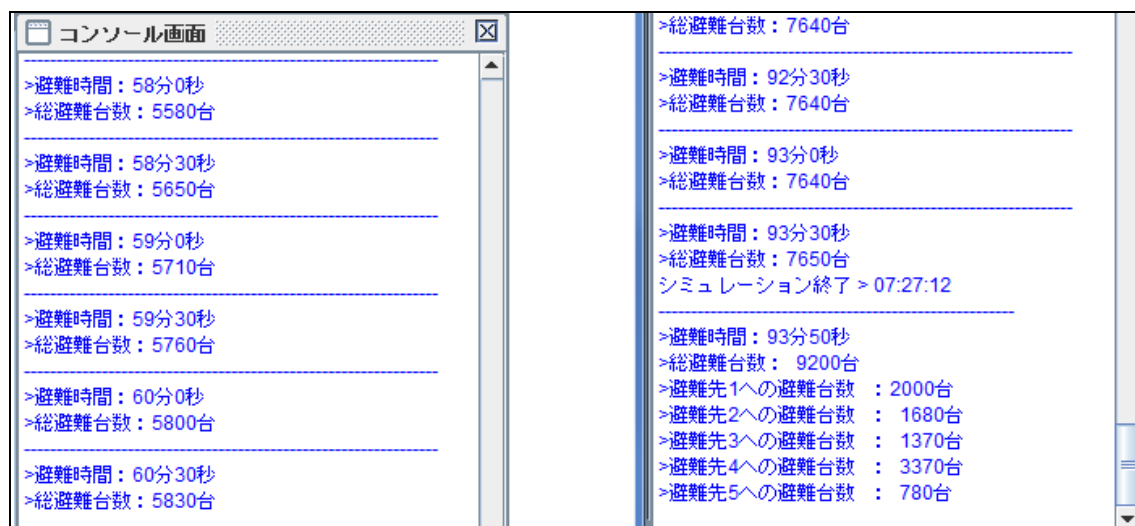


図 5-8 : 出力画面

5.3 システムの使い方

本節では、地図データの読み込み方、シミュレーションの流れ、使い方を説明する。図5-9にシステムを使用する流れを説明する。

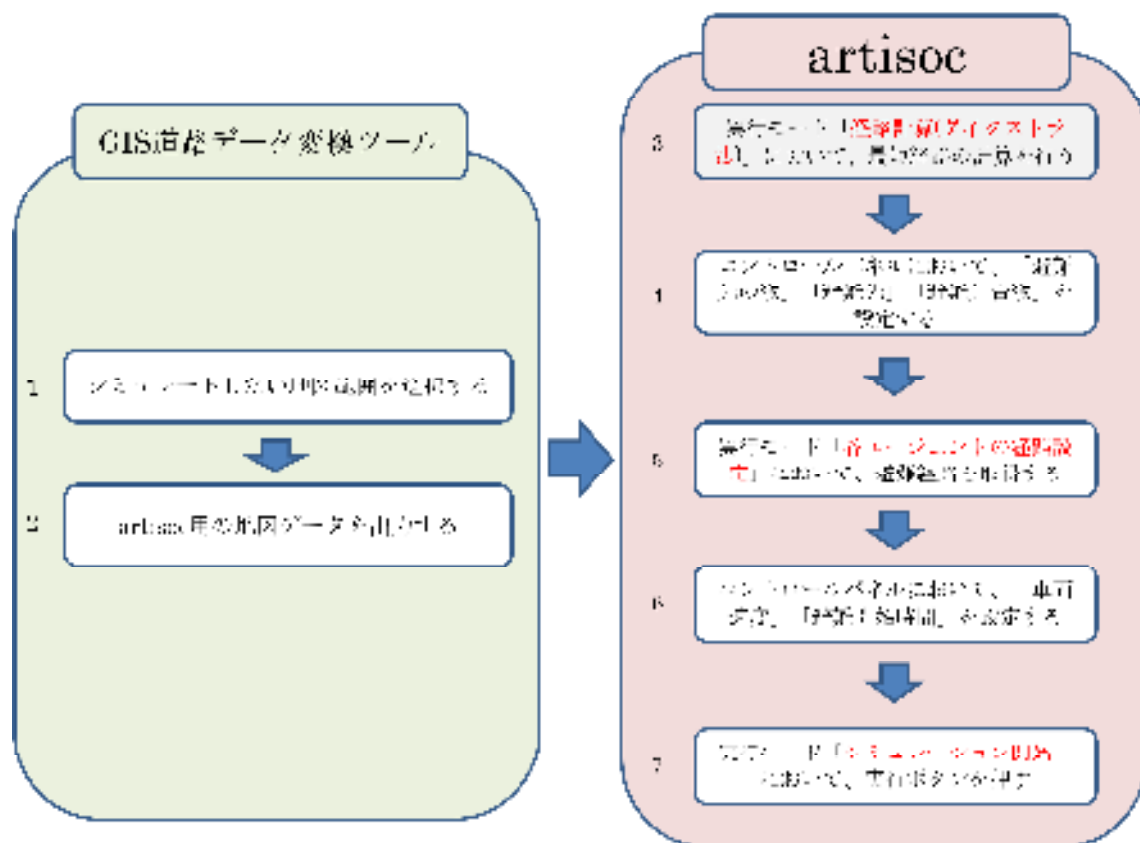


図 5-9：シミュレーションの流れ

- ① 「GIS 道路データ変換ツール」を利用し、シミュレートしたい地図範囲を指定する。
- ② 「artisoc」から読み取れるように、選択した地図データを excel ファイルとして、出力する。
- ③ 「artisoc」を利用し、コントロールパネル上の実行モード”経路計算(ダイクストラ法)”を選択し、実行ボタンを押す。この時、「Universe.DijkstraLink」のエージェント数を「0」と指定する。実行が終了すると、交差点と道路の数に対する、選択しうる交差点と交差点のパターン数が出力されるので、「Universe.DijkstraLink」のエージェント数にその数字を設定する。
- ④ コントロールパネルにおいて、避難先の数、避難先、避難先の台数を設定する。
- ⑤ コントロールパネルにおいて、実行モード”各エージェントの経路設定”を選択し、実行ボタンを押す。実行が終了すると、各エージェントが地図上にランダムに配置され、緑色の丸で表示される。
- ⑥ コントロールパネルにおいて、車両速度、避難開始時間を設定する。
- ⑦ コントロールパネルにおいて、実行モード”シミュレーション開始”を選択し、実行ボタンを押す。すべてのエージェントが目的地に到着すると、シミュレーションは終了する。

図 5-10 に本システムで利用するコントロールパネルを示す。

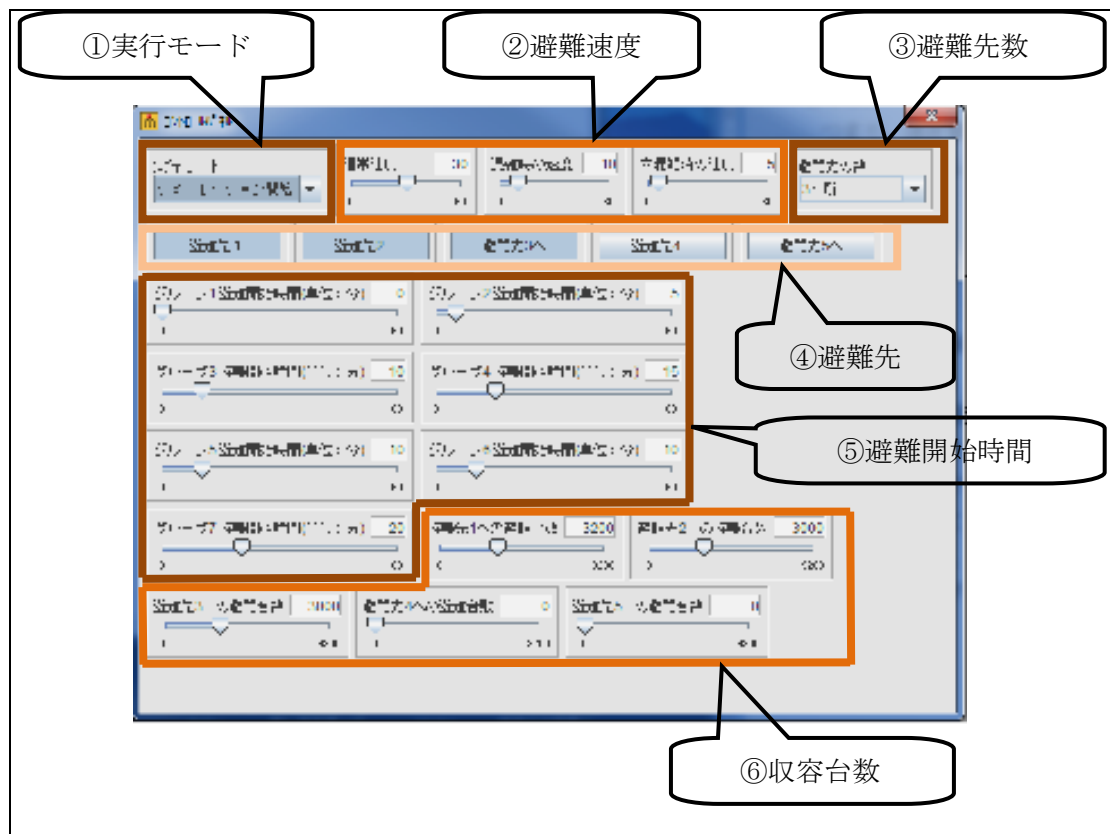


図 5-10 : コントロールパネル

以下でコントロールパネルの利用方法を説明する。

- ① ドロップダウンリストに入っている「経路計算(ダイクストラ法)」「各エージェントの経路設定」「シミュレーション開始」の3つの項目から実行モードを選択できる。
- ② 各エージェント(緑、黄、赤色)の速度を設定できる。
- ③ エージェントが避難する避難先の数を設定できる。
- ④ ③で指定した避難先数と同じ数の避難先を選択できる。
- ⑤ エージェントの避難開始時間を設定できる。本システムでは、エージェントを地図上でグループに分け、グループ単位で避難開始時間を設定する。
- ⑥ ④で指定した避難先への避難可能台数を設定できる。

5.3.1 GIS データ読み込み

「GIS 道路データ変換ツール」を起動し、「GIS データ読込」ボタンを押すと、図 5-11 のような画面が出る。「GIS データ種別」を「数値地図データ基盤 25000」に設定し、シミュレーションで利用したい範囲の GIS データを選択する。基本的に、GIS データが登録されていれば、どこの地域でもシミュレーションの対象にできる。今回は、対象地域の大阪市大正区を選択する。また、前節 5.2.2 で述べた、データの間引きもここで設定できる。

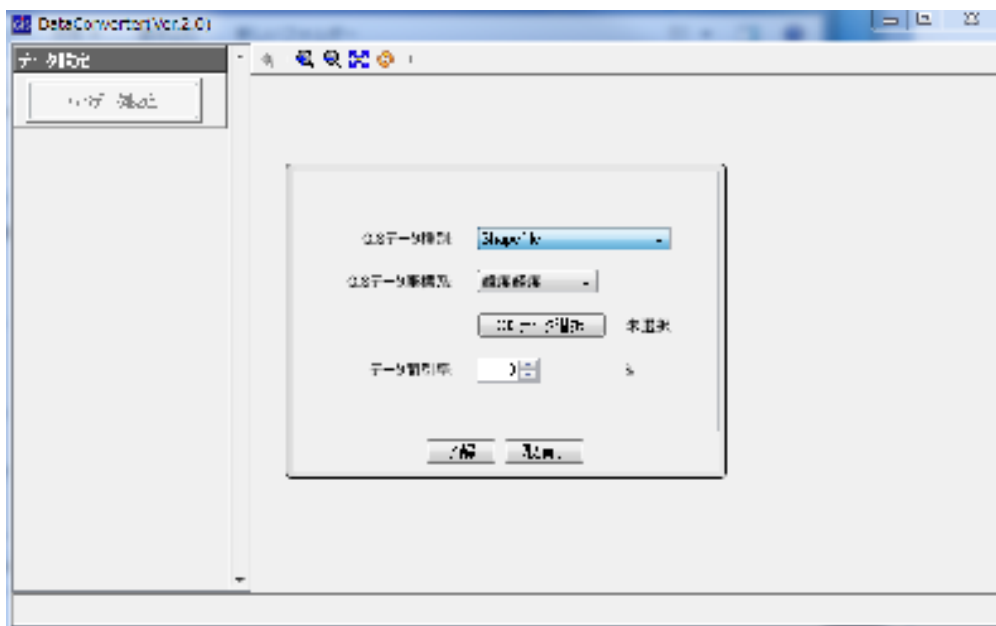


図 5-11 : 「GIS 道路データ変換ツール」 初期画面

設定が完了し、「了解」ボタンを押すと、図 5-12 のようなデータ作成画面に移動する。ここでは、「マップ画像の設定」「対象範囲の指定」「避難所位置の指定」ができる。設定した後、図 5-13 のように、出力したい範囲を指定する。データ作成欄の「データ作成開始」ボタンを押すと、excel ファイルとして、地図データを出力する。

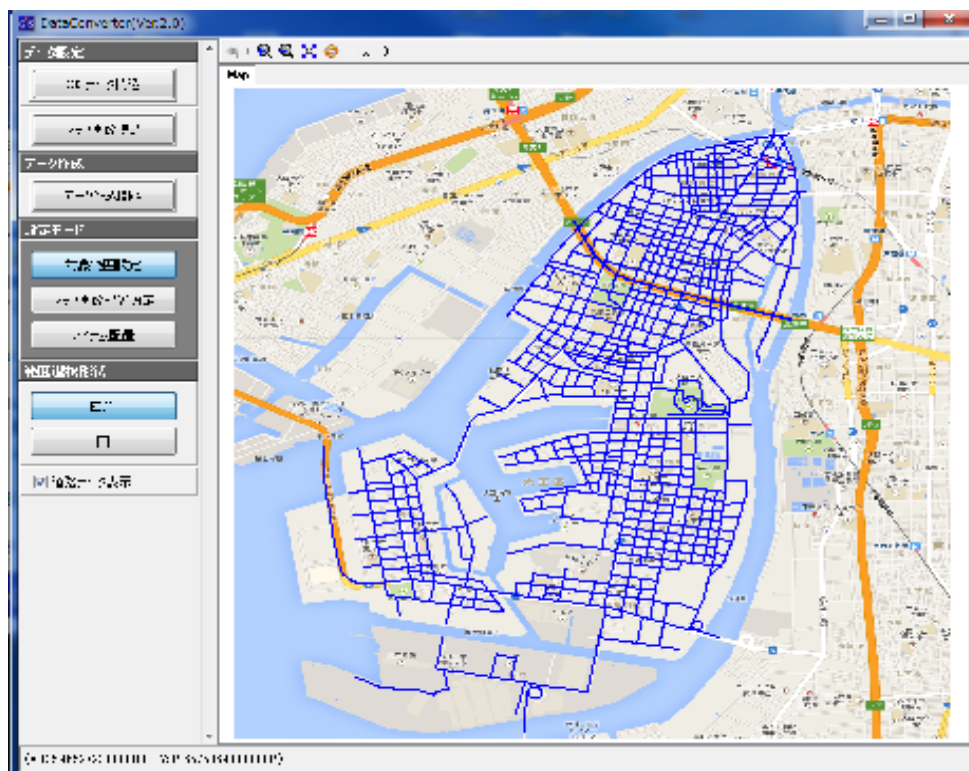


図 5-12 : データ作成画面

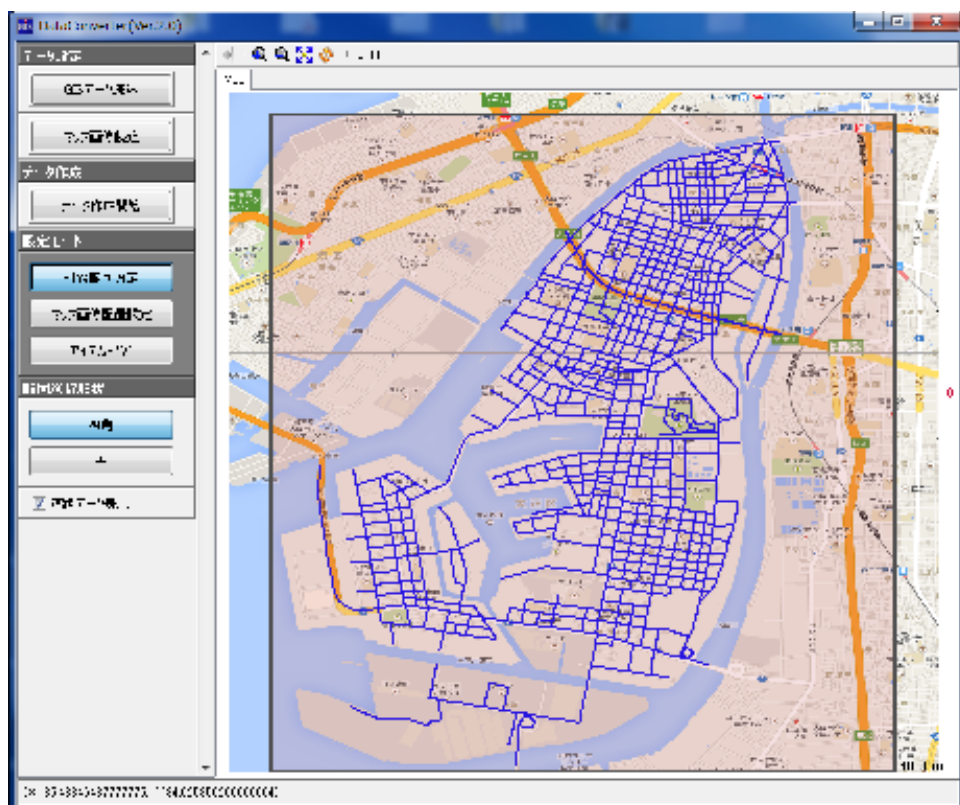


図 5-13 : 出力範囲の指定

次に、「artisoc」を起動し、地図データを読み込む。図 5-14 は「artisoc」を起動した時の初期画面である。地図データを読み込むためには、「設定」の「初期値設定」を押す。

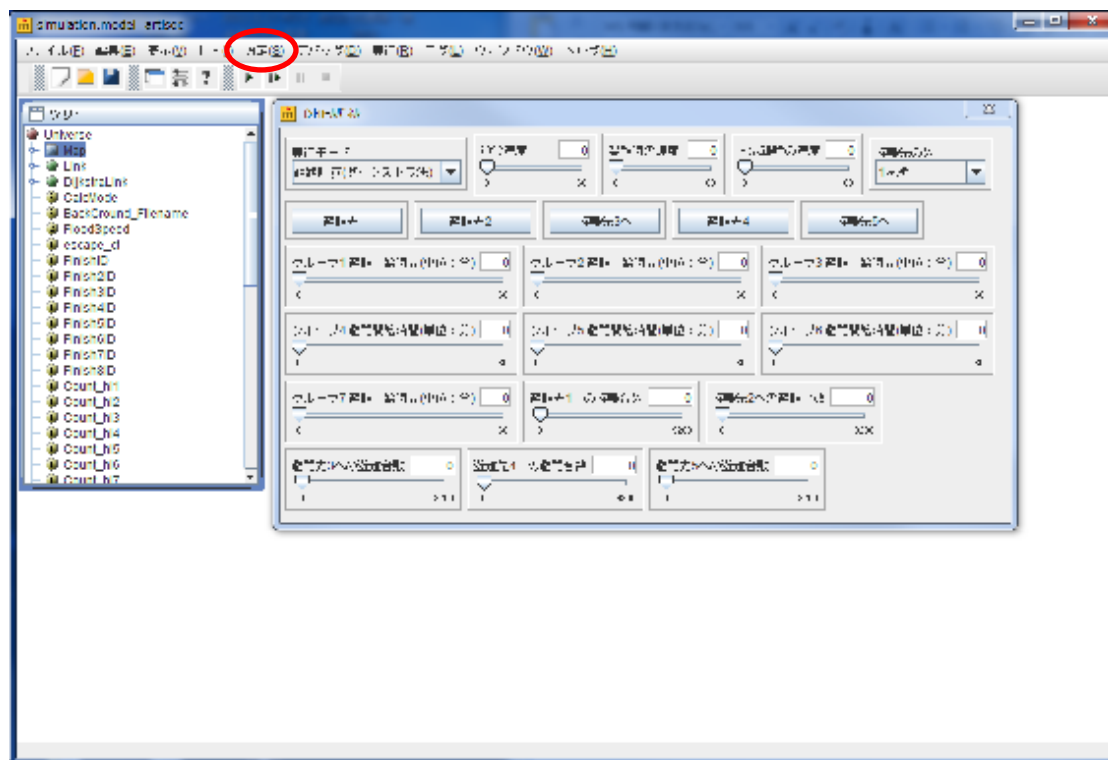


図 5-14 : 「artisoc」 初期画面

初期設定画面では、シミュレーションで利用する「環境」を設定できる。交差点をポイントエージェント、道路をリンクエージェントとして自由に設定し、ファイルとしての出力も可能である。今回は、GIS 道路データを利用するため、「ファイル入力」ボタンを押し、先ほど出力した excel ファイルを選択する。その結果、図 5-15 のような、道路データが表示される。また、地震発生後は、すべての道路が通行できるとは限らず、通行不可能な道路が出る可能性がある。そこで、この画面では、通行不可能な道路（リンク）を削除することができ、様々な道路状況を設定できる。

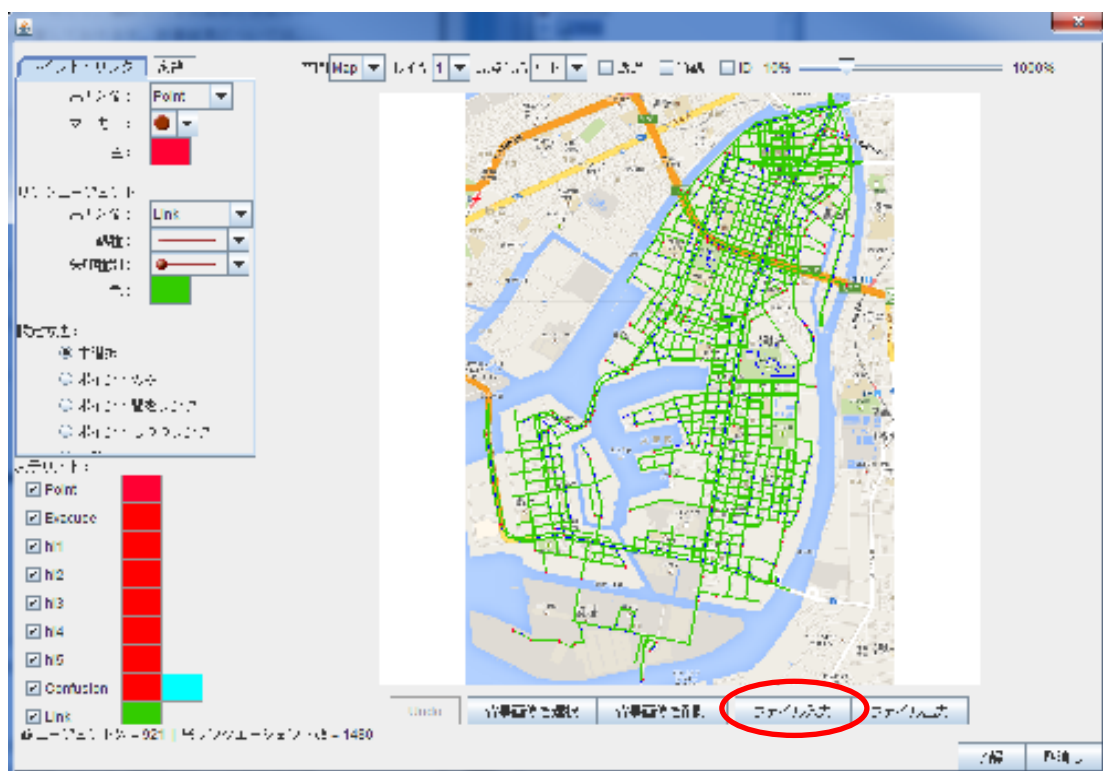


図 5-15：地図データ読み込み画面

5.3.2 最短経路計算

コントロールパネルにおいて、実行モードを「経路計算(ダイクストラ法)」に設定し、「Universe.DijkstraLink」のプロパティを開き、エージェント数を「0」に設定する。

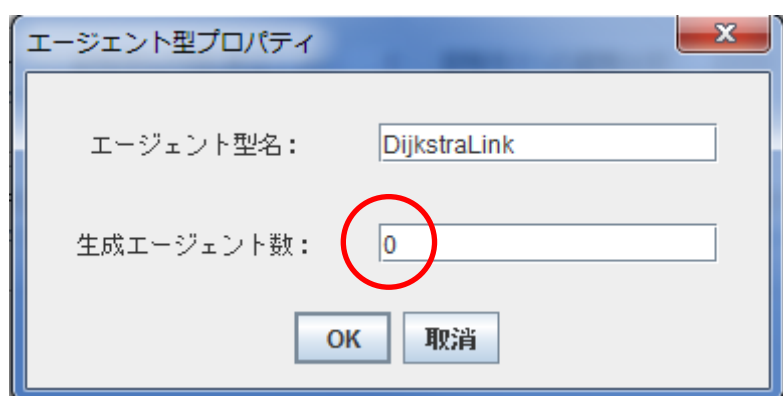


図 5-16：DijkstraLink のエージェント数の初期設定

「経路計算(ダイクストラ法)」を実行すると、交差点の数と道路の数に対しての、選択し

うる交差点と交差点のパターン数が求まり、この最短経路が計算される。今回の大正区でのパターン数は 847,320 であり、計算結果は「dijkstra.csv」に出力される(図 5-17)。計算が終了すると、再び「Universe.DijkstraLink」のプロパティを開き、エージェント数を「847320」と設定しモデルを保存する(図 5-18)。

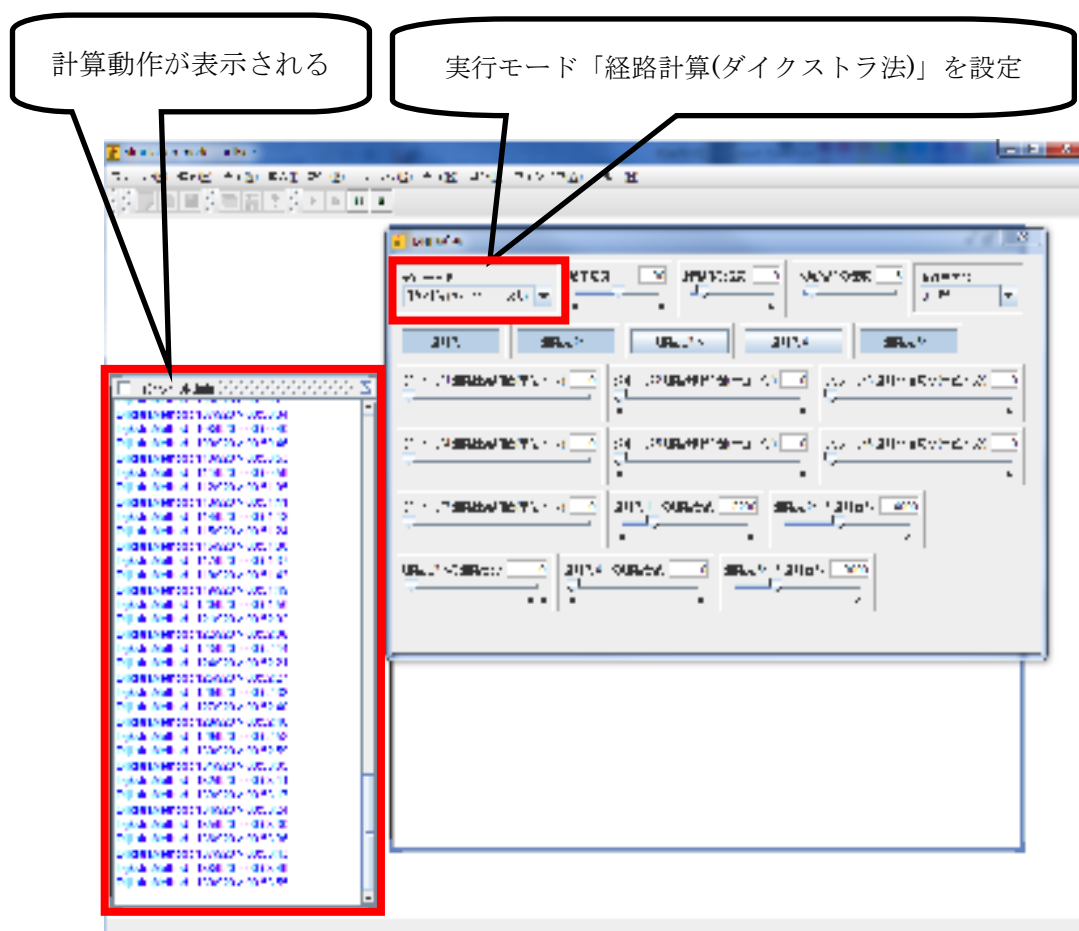


図 5-17 : 「経路計算 (ダイクストラ法)」 実行画面

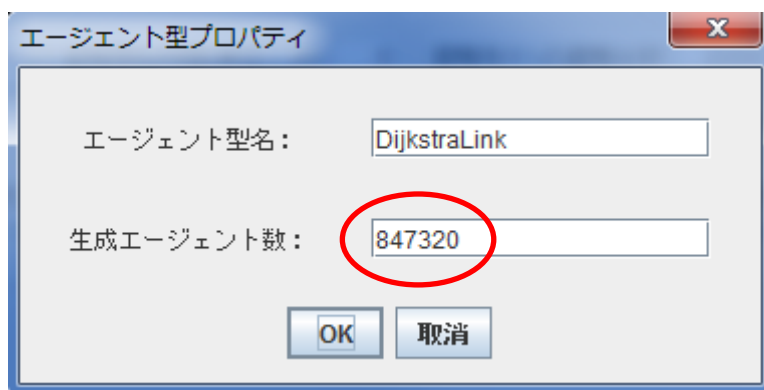


図 5-18 : DijkstraLink のエージェント数の設定

5.3.3 避難先指定、避難先への避難台数の設定、各エージェントの経路設定

コントロールパネルにおいて、「避難先の数」「避難先」「各避難先への避難台数」の設定を行う（図 5-19）。図 5-19 では、避難先の数に「3」、避難先を「避難先 1」「避難先 2」「避難先 5」とし、各避難先の避難台数を避難先 1 から 2,200 台、4,000 台、3,000 台と設定した。

図 5-20 に避難先とその番号を示す。大正区において、津波から避難する方角として、海から離れる北方向、もしくは内陸への東方向が挙げられる。図 5-20 では、北方向、東方向を避難先として設定した。

設定が完了すると、実行モードを「各エージェントの経路設定」を選択し、実行する。

実行画面では、各エージェントの経路取得状況が表示され、エージェントは地図上にランダムに配置される。

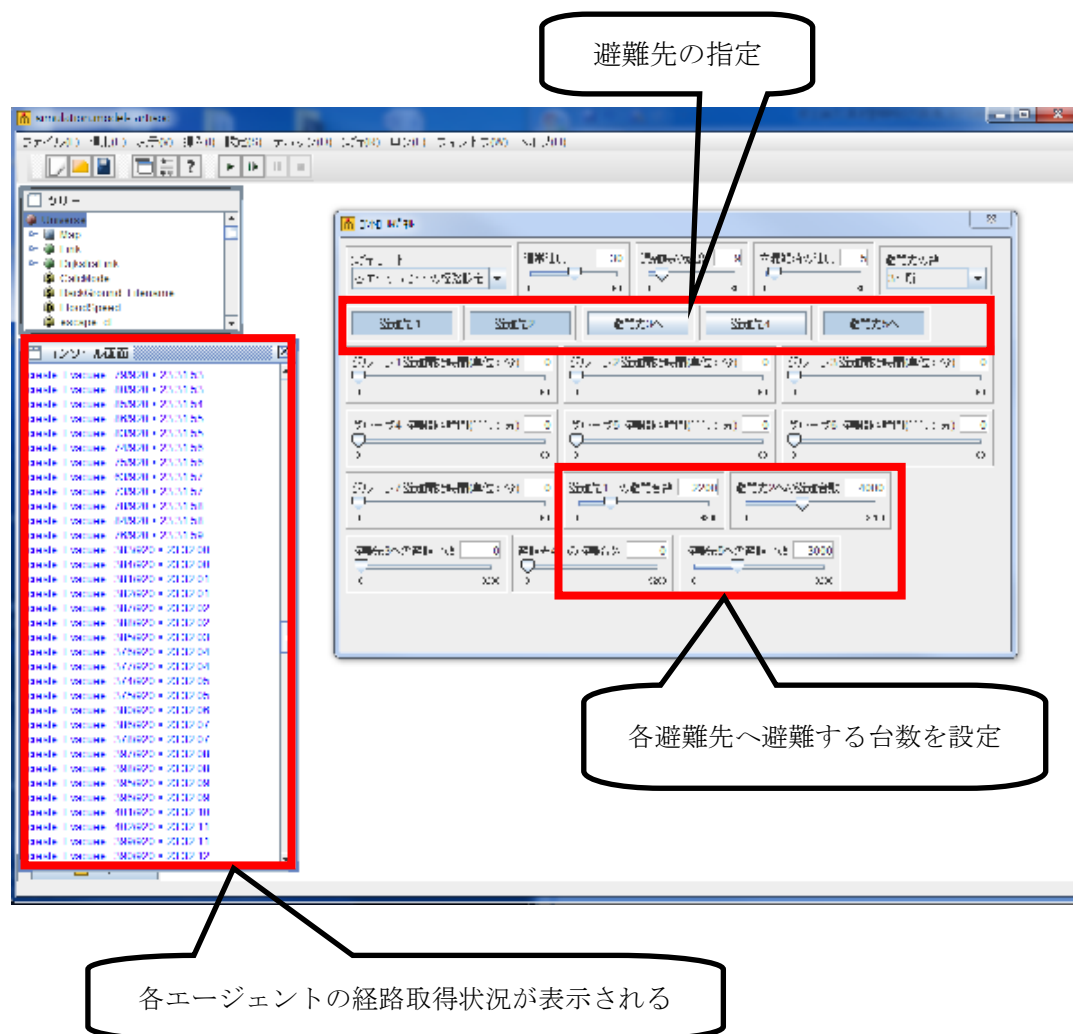


図 5-19：「各エージェントの経路設定」実行画面



図 5-20：避難先一覧

5.3.4 避難開始時間、車両速度設定、シミュレーション開始

コントロールパネルにおいて、エージェントの「避難速度」「避難開始時間」の設定を行う（図 5-21）。「避難速度」は、各エージェント（緑、黄、赤色）における速度である。

また、本システムではエージェントを最大 7 つのグループに分けることができるようにした。グループごとに「避難開始時間」を設定できる。図 5-22 に、大正区においてエージェントを 7 つのグループに分けた例を示す。

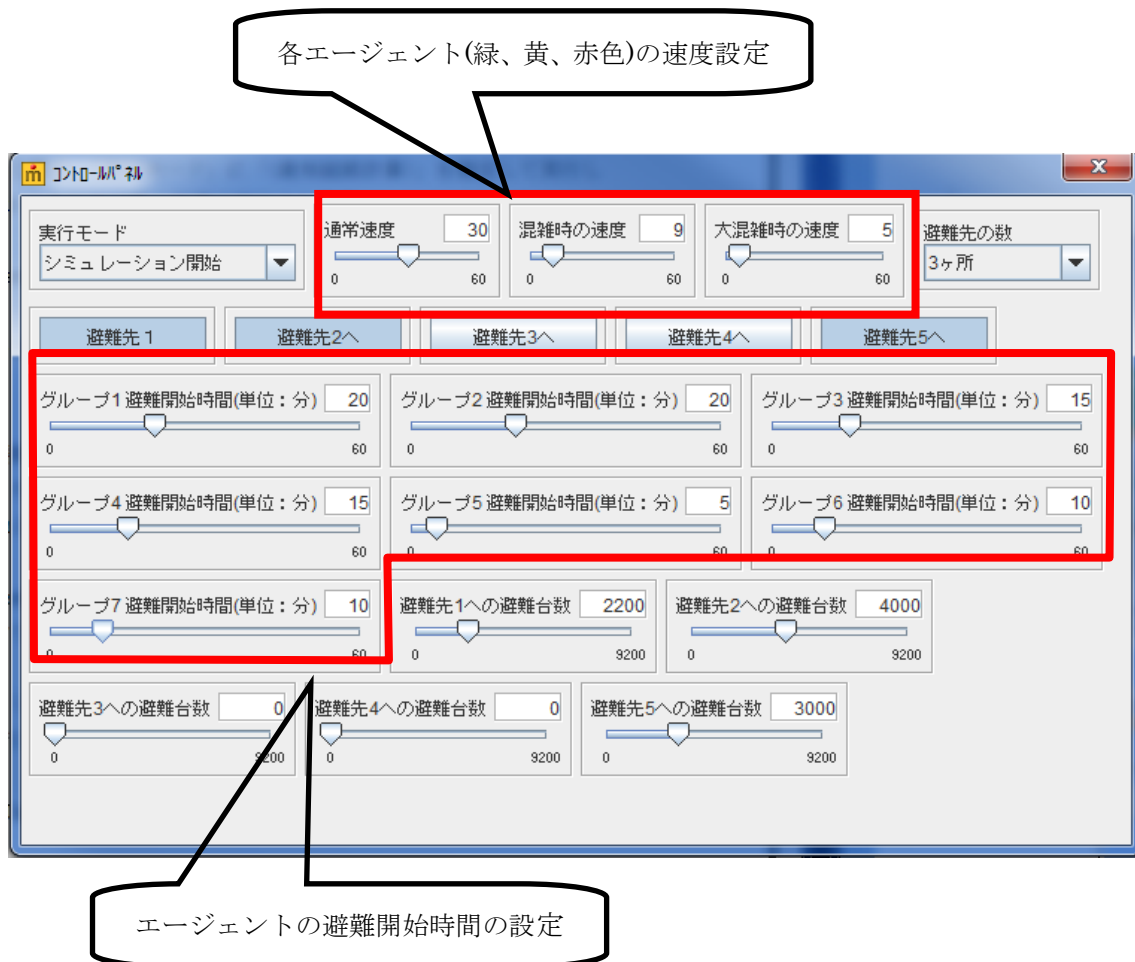


図 5-21 : 速度設定、避難開始時間の設定



図 5-22：振り分けた地区一覧

各設定が完了すると、実行モードを「シミュレーション開始」に設定し、実行を行う（図 5-23）。実行中の画面では、エージェントが避難先に避難する様子、渋滞の様子、時間ごとの避難完了台数が表示される。すべてのエージェントが避難先への避難が完了すると、シミュレーションは終了する。

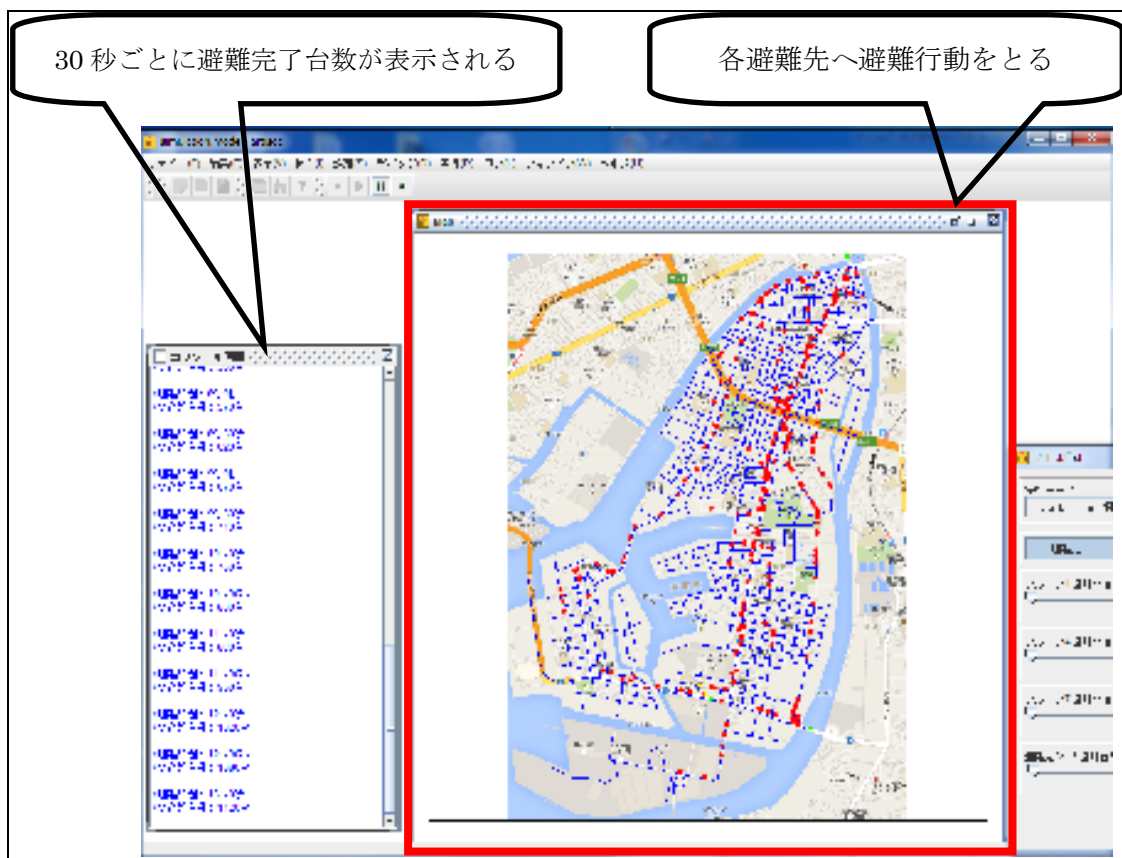


図 5-23 : 「シミュレーション開始」 実行画面

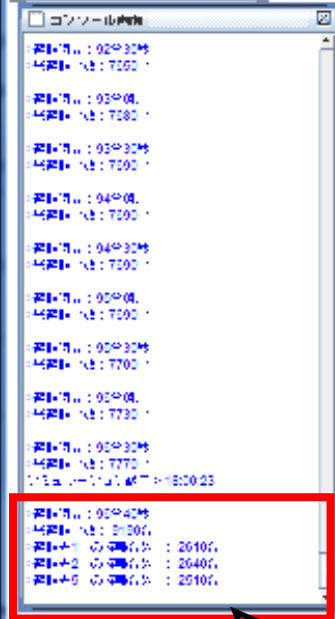
5.3.5 実行結果の表示

シミュレーションが終了すると、シミュレーションの実行結果データが文字とグラフで表示される（図 5-24）。文字では、以下の 3 つの情報が表示される。

- ① 経過時間
- ② 総避難台数
- ③ 各避難先への避難完了台数

またグラフ表示では、X 軸を経過時間(分)、Y 軸を避難台数(台)として、各避難先への避難完了台数、総避難台数が表示される。

避難状況が時系列で表示される



文字でデータが表示される

図 5-24：実行結果の表示画面

第6章 評価と今後の展望

本章では、実装したシステムを用いて得られたデータや結果を述べる。また、システムや結果について、専門家から得た評価について述べる。

6.1 シミュレーションの結果について

本システムを用いて様々な条件下でシミュレーションを実施した。以下で避難先数、避難開始時間等をそれぞれ変更し実行した例を紹介する。

① 避難先数：5箇所

避難先への収容台数：それぞれ 1840 台

避難開始までの時間：0 分

図 6-1 にコントロールパネルでの条件設定を示す。この条件のもと実行を行うと、図 6-2 のような結果となった。避難時間は約 95 分であった。



図 6-1：①コントロールパネルでの条件設定



図 6-2 : ①シミュレーション結果

東日本大震災では、地震発生後津波から避難行動を開始するまでの時間は、人によってばらつきが見受けられ、平均 17 分であった。図 6-3 に、東日本大震災において、津波から避難行動を開始した時間分布を示す。そこで、次の②では、避難開始時間を、15 分もしくは 20 分と設定し実行する。

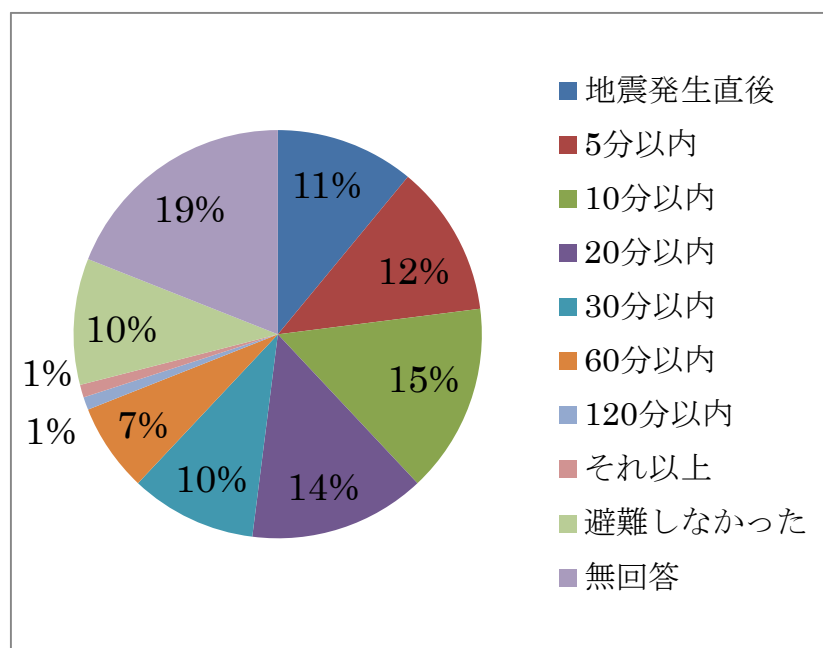


図 6-3 : 何分後に避難したか(東日本大震災)

② 避難先数 : 5 箇所

避難先への収容台数 : それぞれ 1840 台

避難開始までの時間 : 15 分、もしくは 20 分

図 6-4 にコントロールパネルでの条件設定を示す。この条件のもと実行を行うと、図 6-5 のような結果となった。避難時間は約 119 分であった。これは、大阪湾に津波が到達されると予想されている 120 分とほぼ同時刻である。

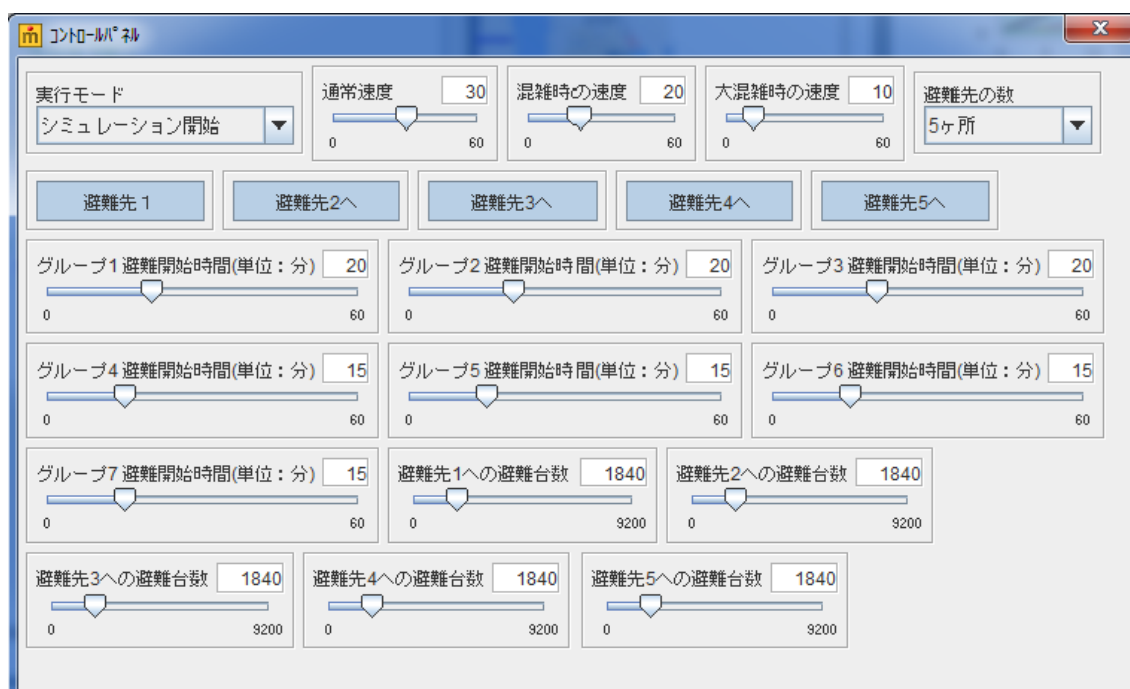


図 6-4 : ②コントロールパネルでの条件設定

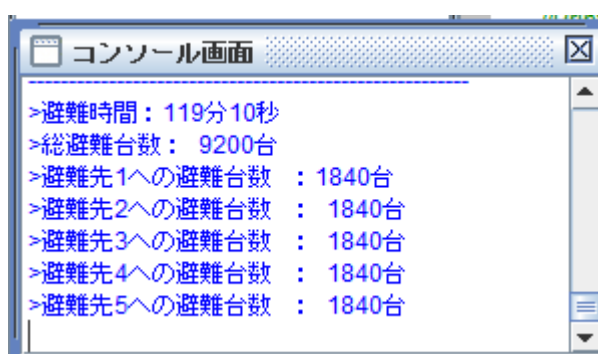


図 6-5 : ②のシミュレーション結果

さらに、古い建築物の多い大阪を考慮し、大正区から他区へ掛かる橋のうちの 2 か所が崩壊し、残りの 3 か所から他区へ避難する状況を想定した (③)。

③ 避難先数：3箇所

避難先への収容台数：避難先2へ3000台、避難先3へ3000台、避難先4へ3200台

避難開始までの時間：15分、もしくは20分

図 6-6 にコントロールパネルでの条件設定を示す。この条件のもと実行を行うと、図 6-7 のような結果となった。避難時間は約 125 分であった。

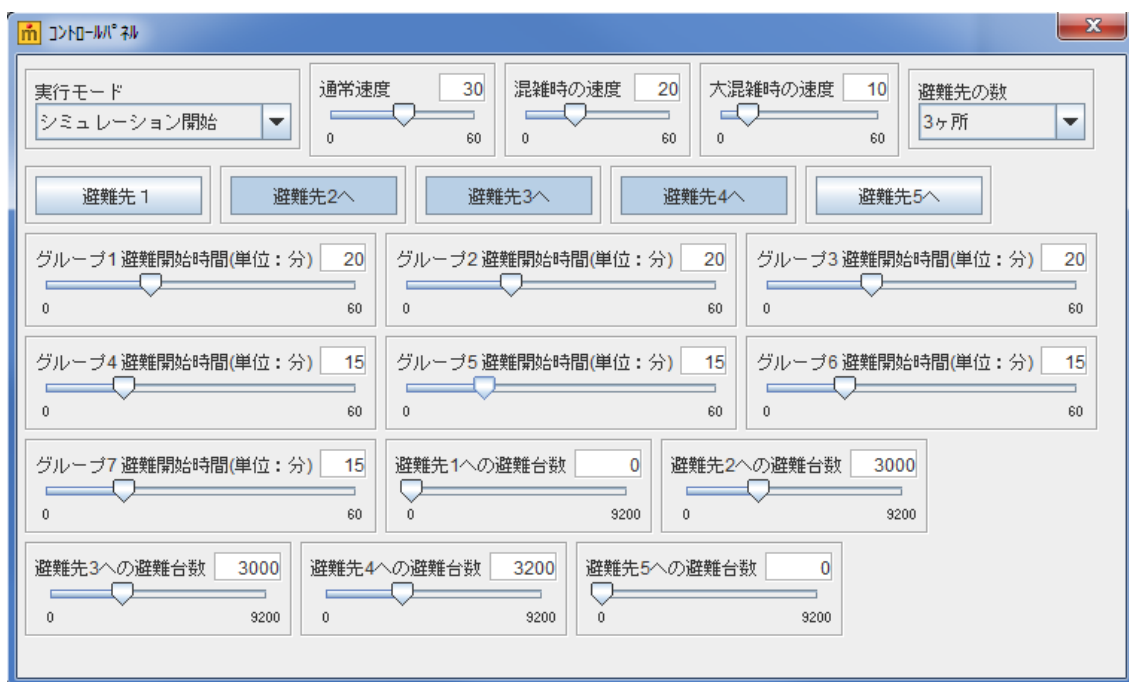


図 6-6：③コントロールパネルでの条件設定

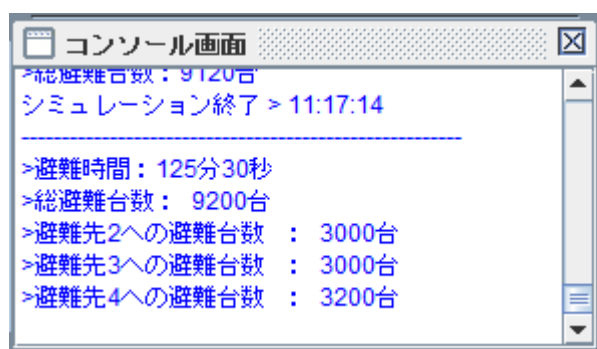


図 6-7：③シミュレーション結果

6.2 結果の整理

前章において、3種類の条件のもとシミュレーションを実行した。地震発生後、すぐに津波からの避難行動を開始し、地震の影響ですべての橋が通行止めにならなかった場合、避難時間は約95分となり、津波到達予測時間の2時間以内に避難が完了する。しかし、津波からの避難開始時間が遅れる、地震の影響で橋が利用できない状況の場合、津波が到達するまでに安全に避難が完了しないことが分かった。津波からの避難開始時間が遅れ、いくつかの橋が利用できない③の状況下では、図6-8のように大きな渋滞が3か所で見られた。

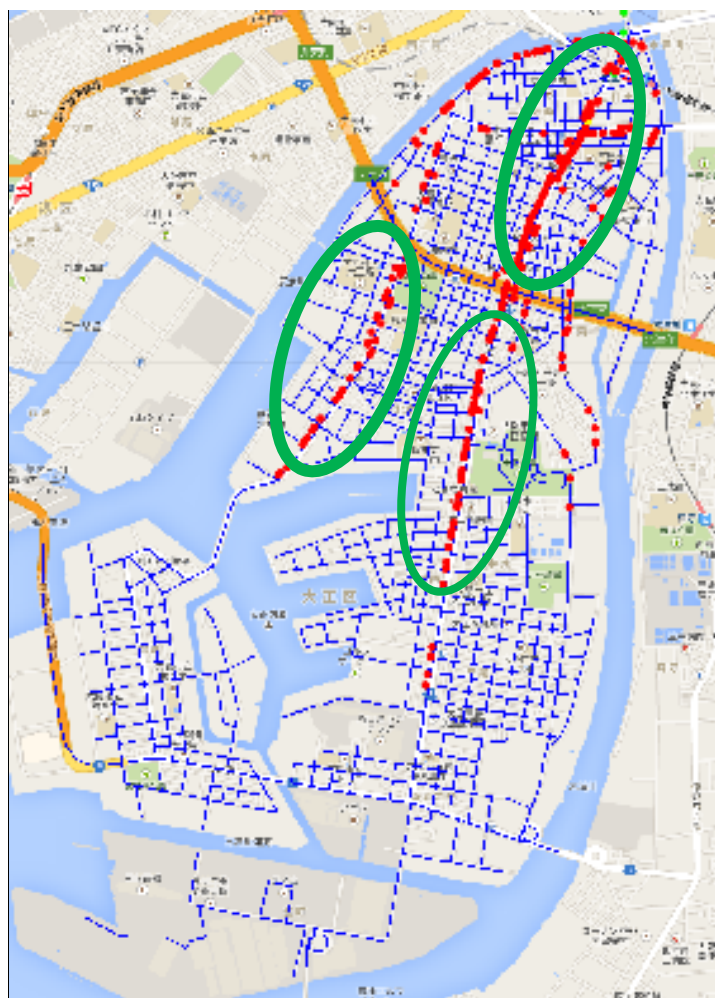


図 6-8：条件③での渋滞の様子

今回のシミュレーションでは、避難途中道路上には障害物がないことを前提条件とした。また、避難先は大正区からそれぞれ橋を渡り終わった場所に設定した。実際には、大正区を含め、大阪市は古い建物が多く、液状化の危険性が高い場所であるため、避難するにあたって障害となる建物崩壊、道路の液状化が起こる危険性が高い。また、避難先である他区においての渋滞を考慮していないため、今回のシミュレーションのように避難先へ車両

をスムーズに収容できるとは限らない。もし避難先の区で渋滞が発生していれば、大正区から他区へ避難するだけでも、2 時間を超えると予想できる。

今後は、道路上の障害物の設定や、避難車両の避難先への収容方法などを検討する必要がある。

6.3 専門家による評価について

本システムの目的や機能に関して、ひょうご震災記念 21 世紀研究機関の林真弘氏、吉岡潤也氏に評価を依頼した。評価は 2014 年 1 月 21 日に、神戸市中央区の「人と防災未来センター」の会議室にて実施した。評価では、本研究とシステムの概要を説明した後、システムのデモを示し、本システムを使用する側からの観点からのコメントを依頼した。要した時間は 1 時間であった。

以下にヒアリング項目、得た評価やコメントについて述べる。

6.3.1 ヒアリング項目

評価では、本研究とシステムの概要を説明した後、質問を行った。以下にヒアリング項目を示す。

- ① 本システムを使う立場からの良い点、悪い点。
- ② 追加すべき機能。
- ③ 今後の研究についてのコメント。

6.3.2 評価結果

本システムについて、以下のような評価、コメントを得た。

① 避難先の設定について

大正区からの避難先は、周りの他区ではなく、例えば「浸水高 1m 未満の場所」に設定すべきである。地震の影響で他区も同じ状況の中、そこへ避難しても効果的ではない。また、今回避難先として設定してある「避難先 5（東方面）」に関しては、その先に街があり、道も悪いため、適切な避難先ではない。津波浸水想定地図のデータを組み合わせて避難先を決めるのが好ましい。また、地震発生後から時間経過によって、避難者が向かう避難先、避難行動は変化するので、その配慮も必要である。

② 対象地区について

大正区は、災害から避難する際に悪条件が多い土地である。古い建物や、液状化の危険性、海に面しており、予想される避難先には大きな街があり、多くの人が溢れている。車での避難となれば、徒歩で避難する人の障害となってしまうため、要援護者のみが自動車を利用できるようにするなど、車の台数を制限する必要がある。大

正区ではなく、人口の少ない地域や車での避難を余儀なくされる地域に本システムを適用するのが有効ではないか。

③ 障害物の設定について

阪神淡路大震災や東日本大震災においても、地震の影響で道路上に障害物が発生し、通行できない箇所が多く存在した。大阪市は、建物が古く、地盤が弱い部分が多いため、これまでの地震による障害以上が予想されるため、障害物の設定が細かくできる方がシステムとしても有効であり、好ましい。

④ 研究の方向性について

避難行動全体のシミュレーションを行った上で、特定の避難者に着目した避難シミュレーションがあれば良い。例えば、要援護者が津波からの避難行動を行う場合、車が必要となる。その場合、車に乗り込む時間を考慮すると周りの避難者より多くの時間がかかってしまう。そんな状況においても、要援護者が無事に避難できるルートを経路探索システムが提案できると、具体的に様々な施設の避難方法の検討を行っている行政にとって有意義なものであると思われる。

また、避難者が避難先へ向かう時、「このルートは危険だ」「ここは避難者が集まると危険だ」など、避難に障害となる要因を発見できると、その障害要因への対策検討に役立つ。「このルートなら安全に避難できる」といったパターンを見つけ出すシステムが求められるのではないかな。

6.4 考察と今後の課題

ひょうご震災記念 21 世紀研究機関の林真弘氏、吉岡潤也氏へのヒアリングの結果、避難行動全体に着目するのではなく、全体的な避難行動のシミュレーションの上で、特定の避難者に着目した避難シミュレーションが有意義であるとの方向性の示唆を得た。避難者を特定することで、行政や避難者自身が具体的な対策を立案しやすくなるとともに、避難者自身の防災意識向上に効果的であり、避難する際に自身が取るべき行動を明確に理解できるためである。

また、関西地方に東日本大震災と同等の揺れが発生した場合、これまでの想定以上に建物の崩壊、液状化が発生し、多くの人々がパニックに陥ることが危惧されている。しかし大阪市のよう大都市では、避難誘導が詳しく検討されていない。このような現状において、本システムを用いて「安全に津波から避難する方法を検討」する必要性を指摘された。

以上の観点から、今後は、避難先への安全な避難方法の提案を含めたシミュレーションシステムの開発を検討し、実装していきたい。それとともに、地震による道路状況の変更を細かく設定でき、様々な条件を考慮できるシステムの開発を進めていきたい。

また、対象地域を大都市だけでなく、要援護者の多い地域や津波予想被害の大きな地域を対象とし、どうすれば車を用いて安全に避難を完了することができるのかを検討できるツールの検討が必要である。そのため、避難車両の台数の制限や、様々な状況に合わせた

最適な避難ルートの取得、避難方法の取得などが必要となってくる。今後は、評価で指摘をいただいた部分を取り入れ研究を進めていくことで、様々な地域において車での津波避難方法の策定に貢献するシステムとしていきたい。

第7章 あとがき

本論文では、津波避難時に自動車を用いた避難がどのような状況を生み出すかを計算機シミュレーションにより模擬し、行政が対策を検討する基礎データを提供するとともに、住民に災害に対するイメージや避難方法を周知して防災意識向上に繋げ、地域の防災上の脆弱性の把握を促進するツールを開発することを目的とし、津波警報時の大阪湾における自動車による避難状況分析ツールを実装した。構築したシステムは、ひょうご震災記念 21 世紀研究機関の林真弘氏、吉岡潤也氏にヒアリングを行い、今後の課題やシステムの方角性を確認することができた。今後は、システムの向上に励み、汎用性の高いシステムを目指したい。

参考文献

- [1] 総務省消防庁災害対策本部：「阪神・淡路大震災について（確定報）」(2006)
<http://www.fdma.go.jp/data/010604191452374961.pdf>.
- [2] 社会実情データ図録：東日本大震災で確認された津波の高さ(2011)
<http://www2.ttcn.ne.jp/honkawa/4363b.html>.
- [3] 気象庁：震度について(2011)
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/shindo/shindokai.html>.
- [4] 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国を概観した地震動予測地図 2010 年版
(2010) <http://www.jishin.go.jp/main/pamphlet/leaflet/leaflet.pdf>.
- [5] 静岡県防災局防災情報室：津波からの避難 (2012)
<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/chosa/sonae/tunami02.html>.
- [6] 日本経済新聞：「命守るため」車避難、ルール作り急ぐ,(2012.07.20).
- [7] 防災対策推進検討会議 津波避難対策検討ワーキンググループ 第 5 回会合：自動車で安全かつ確実に避難できる方策 (2012).
- [8] 大鑄史男、小野木基裕：セルオートマトン法による避難流動のシミュレーション、日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌、pp.94-111(2008)
- [9] 目黒公郎：津波災害時の避難行動シミュレーションモデルの開発、生産研究、Vol. 57 No. 4 pp.343-347 (2003)
- [10] 伊藤和明（編）：津波防災を考える、岩波書店（2005）
- [11] 片田敏孝、児玉真、桑沢敬行、越村俊一：住民の避難行動にみる津波防災の現状と課題-2003、宮城県沖の地震・気仙沼市民意識調査から-、土木学会論文集、No.789/II-71、pp.93-104、2005.
- [12] 鈴木介、熊谷純、今村文彦：地理認知度を考慮した避難シミュレーションモデルの開発、東北支部技術研究発表会講演概要、pp.524-525(1999).
- [13] 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、土木学会東北支部講演概要、pp.524-525(2001).
- [14] 社団法人 交通工学研究会（編）：やさしい交通シミュレーション、丸善株式会社(2000).
- [15] 片田敏孝、桑沢敬行：災害総合シナリオシミュレータを用いた津波リスクコミュニケーションツールの開発、土木計画学研究講演論文集、Vol.29（2004）（CD-ROM）
<http://dsel.ce.gunma-u.ac.jp/doc/n080.pdf>（2014 年 2 月 3 日参照）
- [16] 兼田敏之（編）：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）
- [17] 大阪市危機管理室危機管理室：津波・水害から命を守るために 防災マップ 大正区（津波・水害）(2013) <http://www.city.osaka.lg.jp/kikikanrishitsu/page/0000011973.html>.
- [18] GIS 道路データ変換ツール for artisoc (2013) <http://mas.kke.co.jp/tools/GIS.html>

- [19] 近畿運輸局調：大阪府域・大阪市域・堺市域における車種別自動車保有台数（2013）
<http://www.city.osaka.lg.jp/kankyo/cmsfiles/contents/00000006/6885/103.1-3.pdf>.
- [20] 大阪市市政：人口統計、推計人口
http://www.city.osaka.lg.jp/shisei_top/category/1756-3-0-0-0.html
- [21] 野口洋平、仲谷善雄：シナリオに基づく津波襲来時の住民避難行動シミュレーション