

発災時刻別被災想定を可能にする災害総合シナリオ・シミュレーション

Development of a Comprehensive Disaster Scenario Simulator that Considers Level of Damage and the Timeframe of the Disaster

桑沢敬行¹・片田敏孝²・金井昌信³

Noriyuki Kuwasawa, Toshitaka Katada and Masanobu Kanai

抄録：災害時の被害シナリオ想定やそれに基づく防災計画の立案，そして災害情報の伝達戦略や避難誘導戦略の検討など，効果的な防災対策を実施するためには様々な検討が求められる．この問題に対し筆者らは，災害時の地域状況を総合的に表現するシナリオ・シミュレータを開発した．このシミュレータは，平常時における住民の生活行動と災害時の対応行動を考慮することで，発災時刻に応じた被災状況を表現可能であることから，的確な防災対策を検討する戦略策定ツールとして利用できる．また，本シミュレータは，任意シナリオによる計算状況を視覚的にわかり易く表現することから，災害現象や災害時の的確な対応行動を学ぶためのリスク・コミュニケーションツールとしても有効である．

Abstract: In order to execute effective disaster measures it is therefore necessary to examine various problems such as damage assumption, warning transmission strategy, and evacuation plan, etc. The purpose of this study is to develop a Comprehensive Disaster Scenario Simulator that expresses a regional situation during a disaster in order to manage these problems. This simulator expresses resident's activities in normal circumstances and the evacuation behavior during a disaster. It can also express the extent of damage and casualties with the time of occurrence of the disaster. Therefore, the use of this simulator can be twofold: One as a strategy tool to examine effective disaster prevention measures. Two, because of its visual presentation and easy-to-use interface, this simulator can be used as a risk communication tool to learn about various disaster phenomenon and appropriate actions to be taken to reduce the impact of disasters.

キーワード： 防災対策，被災想定，リスク・コミュニケーション，シナリオ・シミュレータ

Keywords : Disaster prevention measure, Damage Assessment, Risk Communication, Scenario Simulator

1. はじめに

平成 16 年 10 月に近畿・四国を中心に甚大な被害をもたらした台風第 23 号や 50 名を超える死者を出した新潟県中越地震，そして，インド洋周辺各国に 20 万人以上にも及ぶ津波犠牲者をもたらしたスマトラ島沖地震など，近年において，これまでの想定規模を超える災害が多発している．

このような状況の中，災害常襲国であるわが国においては，様々な災害による被害を最小に抑えるための効果的な対策の実施が急務となっている．しかし，実際の防災対策が遂行される自治体などに目を向けて見ると，防災対策の基本方針を定めるための被災シナリオ想定やそれに基づく防災計画の立案に加えて，災害を防ぐ各種ハード対策施設や住民に対する情報伝達施設，避難路や避難施設など様々な防災対策施設を整備する必要に迫られている．さらに，近年では地域住民の防災意識改革の必要性が認識され，そのための教育活動を実施しなければならないなど，地域の防災担当

者に求められる検討項目は膨大であり，限られた予算と時間の中で効果的で効率的な防災対策を立案し，推進していくことは非常に困難な状況となっている．

本研究では，現状の防災対策に見られる以上の様な問題に対するシミュレーション技術の有用性を認識し，発災時刻を始めとした各種シナリオ想定に基づき被災時の地域状況を表現するシミュレーションモデルを開発した．このシミュレーションモデルは，平常時に見られる生活行動や災害時における避難行動などの住民の活動状況に加えて，津波や洪水などの災害現象の進展状況を具体的に表現し，それらに基づいた被害の発生状況を推計するなど，被災地の都市アクティビティを考慮した総合的な被災シナリオの想定が可能となっている．また，本研究では，オブジェクト指向プログラム言語を用いてシミュレーションモデルを簡潔に実装するとともに，計算状況を視覚的に表示するためのプログラムや GUI を構築することによって，シナリオ設定や計算の実行，そして結果の閲覧というシミュレーションの実施に必要な一連の作業を一般的なソフト

1：学生会員 修(工) 群馬大学大学院 工学研究科

(〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1, Tel : 0277-30-1653, E-mail : kuwasawa@ce.gunma-u.ac.jp)

2：正会員 工博 群馬大学 教授 工学部建設工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

3：正会員 博(工) 群馬大学 助手 工学部建設工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

ウェアと同様な操作により行うことができるシミュレーションシステムを開発した。

本論文では、災害の挙動や住民の活動状況を総合的に表現するシミュレーションモデルの概要やそれを取扱うためのシミュレーションシステムの詳細について示している。また、本シミュレータを用いた被災シナリオ想定の実施過程や災害教育現場における活用事例を示すことによって、防災戦略ツールやリスク・コミュニケーションツールとしての本シミュレータの有効性について示した。

2. 防災対策におけるシナリオ・シミュレータの有用性

(1) 防災対策に見られる問題

a)被災時のシナリオ想定に関する問題

被災時のシナリオ想定を実施し、災害時に起こりうる被害の規模やその発生形態を把握しておくことは、効果的な防災対策を検討する上での重要な課題となる。例えば、内閣府中央防災会議の東南海・南海地震に関する専門調査会は、東南海・南海地震を想定した防災計画を策定するに当たり設置された被災シナリオを想定するための委員会であり、東南海・南海地震の発生により予測される各地の震度や津波の発生状況などを詳細に分析し、それらによる被害を把握することを主な目的としている¹⁾。また、この他にも各地の自治体を始めとする組織において、洪水や原子力発電所など防災対策が推進される様々な災害を対象とした被災シナリオ想定が実施されている²⁾。

災害による人的被害の削減を目指すためには、被災時のシナリオ想定として人的被害の発生状況を予測し、適切な対応を検討しておくことが重要である。ここで、災害による人的被害の規模や形態は、災害現象の挙動に加えて、その時の住民の分布や活動状態に大きく依存すると考えられる。したがって、地域の実情に合った的確な防災計画を立案するためには、災害現象そのものの挙動を予測することに加えて、発災時点における住民の活動状況や発災後に行われる避難行動などの住民行動を考慮した総合的なシナリオが検討される必要がある。しかし、自治体などが実施している被災想定も多くは、災害現象そのものを詳細に把握することに重点が置かれており、統計情報から概算した被災人口を用いて最終的な人的被害を推計するなど、発災時刻における個人の活動状況や分布状況までを想定し、災害現象と同等なレベルで住民行動を考慮した検討を行おうとしているものは見当たらない。

b)住民を対象とした災害教育に求められる対策

次に、住民の災害教育を目的とした対策に目を向けると、各種災害を想定したハザードマップの作成・公表や防災講演会などを開催などによって、災害に対す

る知識の向上や地域の防災計画について周知徹底を図る取り組みなどが積極的に推進されている。しかし、近年実施された津波や洪水時の避難実態調査を見ても災害時における住民の避難率が低調であったという報告が多く^{3),4)}、被災時のシナリオ想定が的確に実施された効果的な避難計画が遂行されたとしても、住民側の問題によって十分な効果が得られないという問題の発生が危惧される。

住民が避難しない基本的な理由は、災害時において自分が置かれている危険性を認識することができないことにあり、それゆえに避難の必要性を感じないことにあると考えられる。住民避難に見られるこのような問題は、防災施設の整備に伴う被災経験の減少による災害知識の欠乏や、過去の被災経験や伝承に基づく誤った知識、そして、被災時という非日常的な状況下における人間の心理特性による影響などによって誤った災害イメージを持ってしまうことなどがその主な要因として考えられており³⁾、これらの問題を打破するための効果的な災害教育の実施などが求められている。

(2) 総合的なシナリオ・シミュレータの有用性

被災時のシナリオ想定に関しては、災害現象を対象とした検討がなされている一方で、住民の避難状況や災害情報の伝達状況など、災害時における社会的な対応を対象とした研究がある^{6),7),8)}。しかし、その多くは個別の事象のみに着目していたり、各事象間の関係を静的に検討することに留まっており、時系列的に変化する災害現象や情報伝達、住民避難など被災時に見られる一連の事象を総合的に検討するものではない。確かに、住民避難や情報伝達の効率化の問題について個別に検討することは重要である。しかし、災害の進展状況に対して避難情報の伝達や避難行動が遅れることによる被害の増加や、予想外の災害の挙動により避難計画に大幅な変更を要する事態など、実際には災害現象と社会対応との相互関係を時系列的に分析することによって初めて浮彫りとなる問題が多数存在しており、これらの問題による影響の方が最終的な被害規模に対してより支配的であると考えられる。さらに、地震などの突発災害を想定する場合には、平時における住民活動の状況に応じて被害が発生すると考えられることから、現実的な被災想定を実施するためには、災害時における住民の対応行動のみならず、日常的な都市アクティビティまでを考慮することが必須となる。本研究では、以上の考察から、都市アクティビティや災害現象など被災地に見られる複数の事象を総合的に表現するシナリオ・シミュレータが有用であると考えた。

また、災害教育に見られる問題について言えば、シナリオによって災害現象が大きく変化することや的確な対応行動によって被害を最小限に抑えることが可能であることを地域住民に対して十分に認識させること

が効果的であると考え、ここで、災害時の各種状況を表現するシナリオ・シミュレータは、静的で限られた情報しか表現できない現状のハザードマップが抱える課題を解決する動的なハザードマップとしても利用できる。動的なハザードマップは、想定される災害現象が時間経過にあわせて進展していく様子に加えて、住民の避難行動など社会的な対応行動によって、発生する被害規模が大きく変化するなど、様々なシナリオ想定した場合の帰結を視覚的にわかり易く表現することができる。このような観点から、災害時における地域状況を総合的に表現するシナリオ・シミュレータは、地域に想定される災害リスクや防災計画についてわかり易く説明するとともに、住民自らが利用することによって、災害時における適切な対応行動について効果的に学ぶことができるリスク・コミュニケーションツールとしても非常に有用である。

3. シミュレーションモデルの概要

本章では、本シミュレータの中心となるシミュレーションモデルの概要について示す。

(1) モデルの特徴と開発方針

本モデルは、平常時における住民の生活行動をベースに被災時の対応行動を表現することによって、発災時刻を考慮した被災時のシナリオ想定を行うことができるという特徴を持つ。また、本モデルは、モデルの汎用性や拡張性を考慮し、以下に示す方針に基づき開発を行っている。

- ・年齢や障害の有無など個人属性を具体的に考慮した検討を可能とするため、平常時や災害時における住民行動は、個人を単位として表現する。
- ・時刻に応じた現実的な生活行動や被災シナリオを表現するため、シミュレーションは1日を24時間とする時刻に対応させる。
- ・計算効率や実用性を考慮し、津波や洪水の氾濫状況など災害の挙動の表現は、他の解析プログラムによって事前に計算されたものを利用する。
- ・検討対象地域における住民情報が入手できない場合を想定し、各種統計情報から現実の人口構成を反映した仮想的な住民を作成できるようにする。
- ・対象地域の地理的な特性を具体的に考慮した検討を可能とするため、標高や道路、建物など地域空間の表現には、GISなどで整備されたデータを利用する。
- ・各種データが整備されていない小規模地域においても適用可能とするため、入力データは総務省統計局が公開している国勢調査結果⁹⁾や住宅地図など、全国的に整備されているものを利用する。

(2) モデルの流れ

本節では、図-1に示す本モデルの概略フローに沿

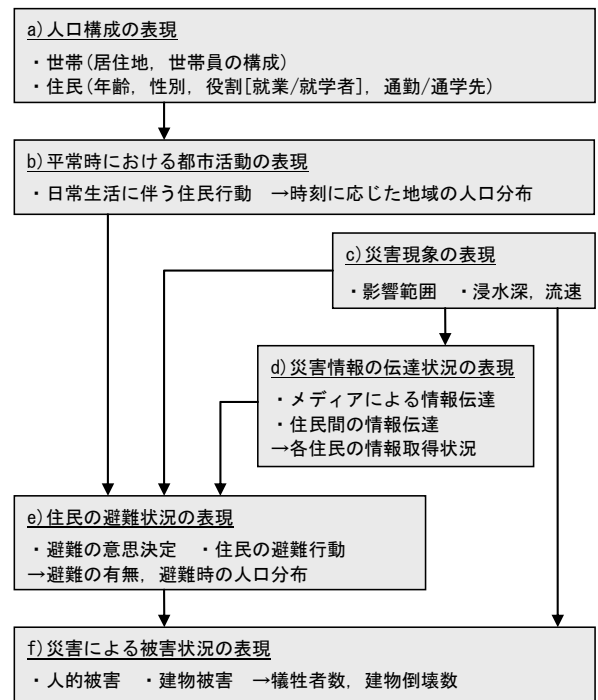


図-1 シミュレーションモデルの概略フロー

って、各工程の概要を示す。なお、本フローのc), d), e), f)の部分については、筆者らが開発した津波災害総合シナリオ・シミュレータ¹⁰⁾をベースに、時刻の概念の導入や、個人単位のシミュレーションを実施するための改良を行うことによって表現している。

a) 人口構成の表現

まず、国勢調査結果として公表されている住民、世帯、就業者・就学者に関する統計情報を利用して対象地域の世帯と住民を表現する。具体的には、性別年齢別人口から、対象地域の人口構成にあった性別、年齢の属性を持つ住民の一覧を作成する。次に、夫婦のみ世帯や夫婦と子供の子世帯など、家族構成の種類を示す家族類型別の世帯数や平均世帯人数などに基づいて世帯を再現し、先に作成した住民一覧から条件に該当する属性を持つ住民を割り当てていく。なお、各世帯の居住地は、住宅地図から抽出された地域内の住居からランダムに選択する。

次に、年齢性別ごとに示される就業者、就学者に関する統計情報を利用し、作成した住民の日常的な役割を就業者、就学者、それ以外の3種類から決定する。また、この時、就業者または就学者となった住民は、同統計結果に基づき就業就学先を自宅、対象地域内、対象地域外から選択する。

最後に、同統計結果から地域内において就業または就学している地域外の居住者人口を反映し、他地域から対象地域に流入する住民を表現する。

b) 平常時における都市活動の表現

ここでは、時刻を考慮した平常時における都市活動の状況を住民による生活行動を個別に表現することに

よって表す。住民による生活行動は、前工程で各住民に設定された就業者や就学者などの役割に応じて行われる交通行動の表現が主となる。本モデルでは、住民による平常時の行動を、通勤交通、通学交通、業務交通、自由交通、そして、通過交通という5種類の交通行動によって表現している。

まず、通勤交通とは、就業者が自宅と就業先である事業所を往復する行動を示す。通勤する事業所は、前工程で設定した就業地域の情報を参照し、就業先が市内である場合は、住宅地図に示される商業施設から選択する。ここで、事業所の従業員数は、その規模に応じて増加すると考えられるため、各建物の床面積を事業所選択時の重みとして利用している。また、市外に通勤する場合は、対象地域の端に位置する道路ネットワークの端点を仮の事業所として扱い、その中からランダムに選択している。なお、本モデルでは、通勤交通の発生タイミングを制御するため、出勤時刻と勤務時間の分布をパラメータとして用いている。

次に、通学交通は、就学者が自宅と就学先となる学校を往復する行動を示す。就学者の通学先は、就業者の場合と同様に先に設定した就学地域を参照し、市内に通学する小中学生の場合は、年齢と学校区に従って学校を選択する。小中学生以外の場合は、地域内の学校からランダムに通学先を決定する。また、通勤交通と同様に通学時刻と帰宅時刻の分布を示すパラメータによって通学交通の発生タイミングを制御している。

業務交通とは、就業者が事業所から何れかの建物に移動し、一定時間経過した後、事業所または自宅に移動する行動を指す。また同様に自由交通は、就業者でも就学者でもない住民が自宅と何れかの建物を往復する行動によって表現する。本モデルには、これらの交通行動を制御するため、各住民がそれぞれの交通を1日に実施する回数の平均値を示す発生交通量に加えて、時刻別の交通発生確率、そして、移動先での滞在時間を決定するパラメータがある。なお、移動先については就業者の通勤先の選択と同様に建物の規模を考慮して決定している。

最後に、通過交通とは、他地域の住民が地域内を通過し、また他の地域に移動する交通行動を指す。本モデルでは、時刻別の交通発生確率と地域内の建物で停止する割合をパラメータとして導入している。

本工程で導入されている交通行動を表現するための各種パラメータの多くは、住民の行動実態を把握するために実施されているパーソントリップ調査から取得することが可能である。

c) 災害現象の表現

ここでは、時間経過に伴う災害現象の影響範囲や挙動特性の変化について表現する。現時点において、本モデルでは津波と洪水による氾濫状況を考慮すること

ができる。なお、津波や洪水を対象とした氾濫解析は、対象範囲や精度によって数時間から数日程度の計算時間を要することや、氾濫流の挙動がシミュレーションモデルのその他の部分によって表現される住民行動による影響を殆ど受けないことなどの理由から、本モデルでは内部で氾濫解析を実施するのではなく、予め計算された氾濫解析の結果をシミュレーション内の時刻に合わせて読み込む形式を採用している。

d) 災害情報の伝達状況の表現

災害情報の伝達状況の表現では、行政から伝達される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、マスメディアといった情報伝達メディアを介して地域住民に伝達される様子、そして、情報を取得した地域住民が口頭や電話による伝達行動を行っていくことによって、地域全体に情報が広まっていく様子を表現する。

この部分の表現については、筆者らが開発した災害情報伝達シミュレーションモデル^{8),11),12)}をベースとしており、このモデルに情報伝達施設や住民の配置、そして情報伝達タイミングなどを設定することによって、各住民の情報取得の有無やそのタイミングなど、情報の伝達状況に関する情報を得ることができる。

e) 住民の避難状況の表現

住民の避難状況の表現は、災害の発生や避難勧告の発令を認知した住民が実際に避難を実施するか否か、また避難行動を開始するまでのタイミングなど、避難に関わる意思決定を表現する部分と、避難を開始した住民が避難場所にたどり着くまでの行動を表現する部分から構成される。本モデルでは、避難の有無や避難タイミングを表現するパラメータとして、避難率や災害情報を取得してからの経過時間ごとの避難確率分布などを設定できる。また、避難行動を表現する部分では、避難先や避難速度を個別に設定することが可能であり、個々の住民属性を反映した避難行動を表現することができる。

この工程においては、結果として災害の発生時刻から経過時間ごとに各住民の避難の有無、避難者の避難場所への到着状況、そして、避難者や未避難者を含んだ地域全体の住民の分布状況などが表現される。

f) 災害による被害状況の表現

ここでは、災害の進展状況と住民の避難状況を考慮した人的被害や家屋被害の発生状況を表現する。具体的には、これまでの過程において表現されている氾濫流の影響範囲と住民や建物の分布状況から氾濫域内の被災対象候補を抽出し、氾濫流の水深や流速などの流体力を参照することによって犠牲者などを判定する。

本モデルの最終結果として、本工程では犠牲者数や倒壊の危険性がある建物数、そして、それらの被害が発生するタイミングや具体的な発生箇所が出力される。

4. シミュレーションシステムの構築

本シミュレータは、地域の防災担当者が危機管理ツールとして利用する事に加えて、リスク・コミュニケーションツールとして一般住民の方にも利用される場面を想定している。したがって、簡便にシミュレーションを実施したり、シミュレーションによる計算結果をわかり易く表示したりするためのインターフェースの提供が必須である。本章では、シミュレーションモデルの実装方法について述べるとともに、構築したシミュレーションシステムの詳細について示す。

(1) モデルの実装

本節では、空間や時間の概念を表現するシミュレーションモデルの枠組みや実装方法について述べる。

a)空間の表現

本シミュレータは、対象地域を表現する基本的な要素として、標高や河川、海岸などを表現する地形、住居や避難場所など交通行動の起点終点となる建物、また、日常的な行動や避難を行う際の移動経路となる道路を考慮している。そして、これらの基本要素に加えて、防災行政無線の屋外拡声器や広報車といった情報伝達メディア、住民の避難先となる避難施設、そして、津波や洪水などの災害現象を表す要素を組み込み、各要素の有無や配置を再現することで、対象地域の空間的な特徴を表現している。

本シミュレータでは、住民や津波氾濫域など空間上に表現できる要素については、その形状的な特徴から点や線や面を表す図形によってモデル化している。各図形は、平面直角座標系などに準じたその位置を示す座標値を持っており、空間上における各要素の配置や要素間の実距離などを計算することが可能である。さらに、地理情報システムに見られる位置情報を鍵とした空間検索を実施することが可能であり、屋外拡声器の音声到達範囲内に存在する世帯を2点間の直線距離から求めたり、ある地点から最も近い避難場所の位置を線で構成される道路ネットワークから最短経路探索により検索したり、津波による犠牲者をその時点における氾濫域を示す面と避難者の分布を示す点の集合から推計することなどが可能である。

b)要素間の関連と時間の表現

「地震が発生したことに住民が気づく」や「広報車から住民が避難情報を取得した」など、シミュレータにより表現されている要素同士が何らかの関係を持つことによって発生するイベントは、要素間でメッセージと呼ばれる情報をやり取りすることによって表現している。例えば、地震の発生時は、地震の役割を果たす要素が、住民を表現する要素に対して地震の発生を意味するメッセージを発信する。また、広報車による情報伝達の場合は、空間的な検索機能を利用して周囲

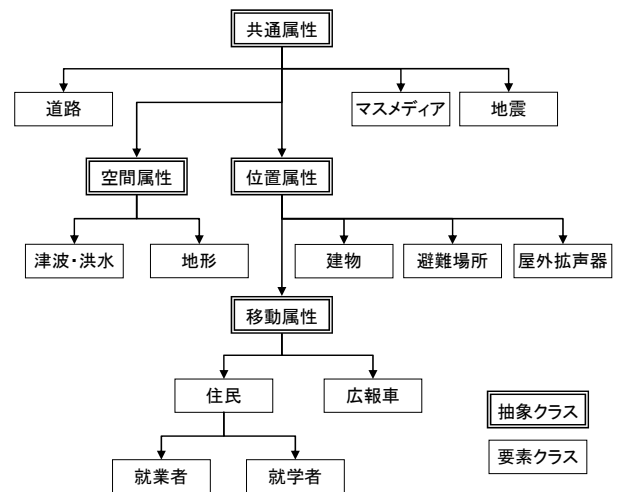


図-2 要素クラスの構成

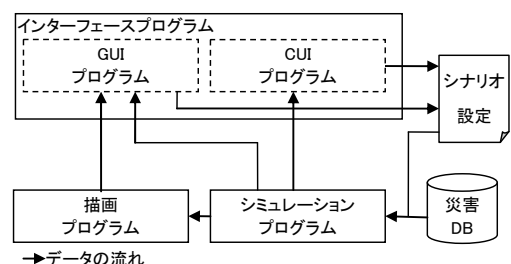


図-3 システム構成

の住民要素を抽出し、避難情報の伝達を意味するメッセージを発信している。また、「午前7時30分に学校に向けて家を出発する」など、イベントの発生に時刻を指定することが可能であり、「今進入した道路は1分で通過し、次の路地へ侵入する」など、要素が道路上を移動している状況も要素自身に対して発信するタイムラグを持ったメッセージによって表現している。

このような仕組みは、時刻を基準として要素間のメッセージのやり取りを管理するシステムを仲介させることによって実現している。この管理システムは、各要素が登録したメッセージを優先度付き待ち行列(Priority Queue)を利用して伝達すべき時刻順に管理し、シミュレーション内の時間の経過に応じて発行すべきメッセージを適切な相手に伝達するという処理を行う。本シミュレータでは、このような仕組みによって統一された時間尺度の下で、各要素が相互に関連を持ちながら機能している様子を表現している。

c)プログラム言語による表現

シミュレータの実装には、オブジェクト指向プログラム言語を用いており、メッセージの送受信に関わる機能など、全ての要素に共通する機能を表現した抽象クラスを基底に置き、そこから位置属性に関する機能や移動に関する機能など一部の要素が持つ機能を実装する抽象クラスを派生させながら各要素を表現するクラスを記述している(図-2参照)。

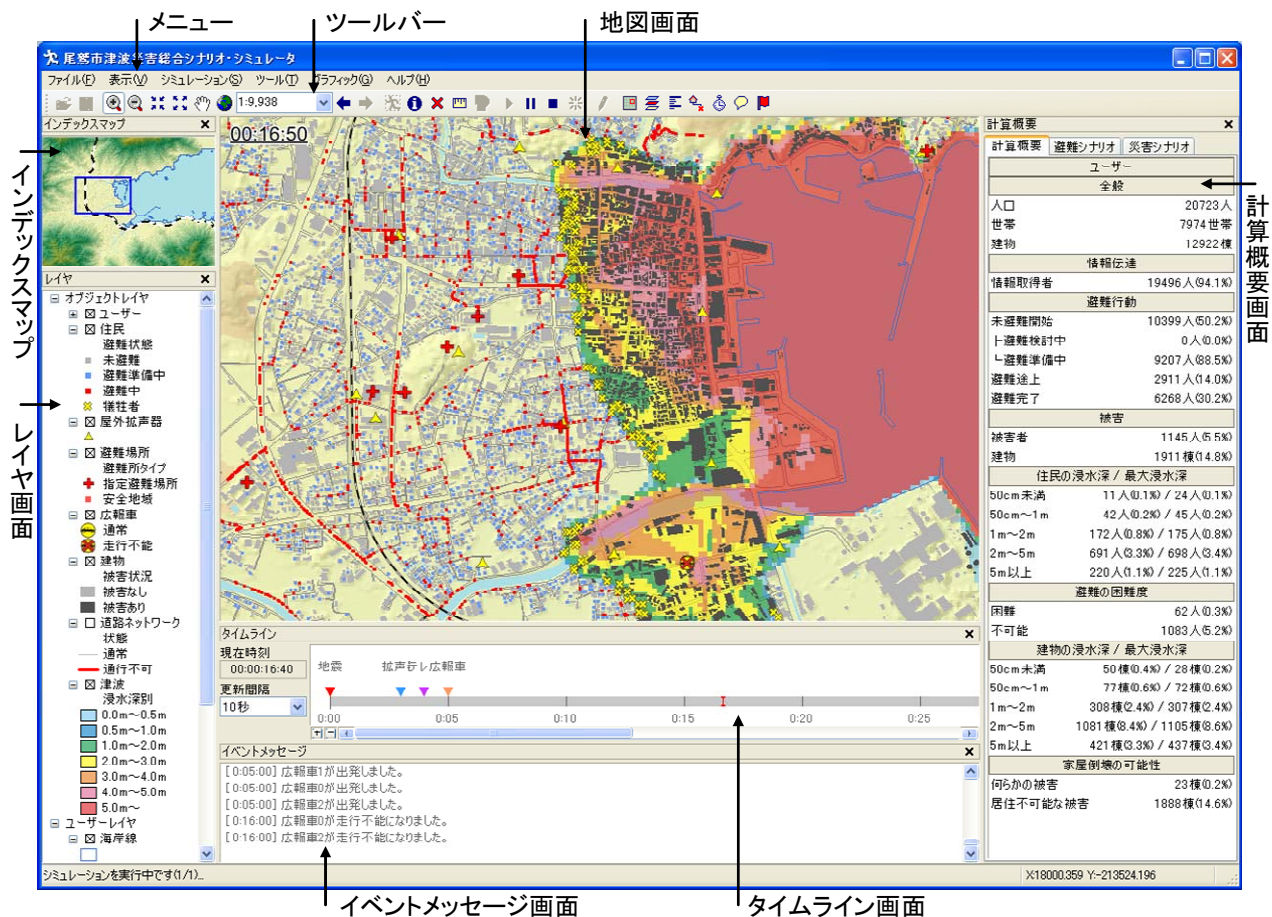


図-4 システムメイン画面

各要素クラスは、メッセージの取得をきっかけとして発生するイベントごとにその役割に応じた動作を表現するための処理が実装されており、各要素が相互にイベントを発生させ合いながら動作することによって、シミュレーションモデル全体の内容を表現する仕組みとなっている。

ただし、津波や洪水などの災害現象を表現する要素については、前章で示したとおり、計算に非常に時間を要することや他の要素の影響によってその挙動を動的に変更する必要性が低いことなどの理由から、事前に計算された結果を蓄積したデータベースを作成しておき、シミュレーション内の時刻に合わせてデータベースから読み込んだ情報を反映する方法を採用している。したがって、対象となる要素クラスには、計算結果が蓄積されたデータベースのインターフェースとしての機能のみが実装されている。

(2) システム構築

a) システムの構成

本シミュレータの構成を図-3に示す。本シミュレータは、シミュレーションプログラムと描画プログラム、インターフェースプログラムという3つのプログラムによって構成されている。

まず、シミュレーションプログラムとは、前節で説明したシミュレーションモデルの実装部分であり、複数のインターフェースに対応させるためインターフェース側のプログラムとは独立させた構成を採っている。このプログラムは、計算開始時にシナリオ設定ファイルから各種条件設定を読み込み、それらに基づいて計算を行う。また、シミュレーション実施中には、津波や洪水などの氾濫解析結果を蓄積する災害データベースを参照し、その時点における災害の進展状況を表現している。次に、描画プログラムとは、シミュレーションプログラムによって計算されている住民の分布や災害の挙動、そして、住民や建物の被害状況などを、鉄道や地形などの背景要素とともに対象地域の地図上に描画する役割を担っている。最後に、インターフェースプログラムとしては、GUI形式とCUI形式の2種類のプログラムを提供している。GUI形式のプログラムは、情報取得者数や避難者数などシミュレーションによって計算されている各種指標結果を文字情報としてリアルタイムに表示することに加えて、前述した描画プログラムを利用して計算状況を視覚的に表示する機能を有する。なお、このプログラムは、シナリオ設定データファイルを編集するためのインターフェースも提供しており、各種シナリオ設定を視覚的に行うこ

とが可能である。また、CUI 形式のプログラムは、事前に設定した複数のシナリオを一括して計算するために、コマンドライン形式で条件設定や計算を行うためのインターフェースである。本シミュレータを活用する上で、目的を達成する最適なシナリオを見つけ出すためには、種々のパラメータを変化させた多数のシミュレーションを実施する必要がある、作業の効率化や高速化の観点から複数のシナリオを一挙に計算するための処理が必須となる。

b)インターフェース

GUI プログラムによって提供されるシミュレータのメイン画面を図-4に示す。画面上部には、シナリオ設定の読み込みやシミュレーションの実施など、シミュレータの各機能呼び出すためのメニューとツールバーがある。ツールバーには、画面中央に位置する地図画面の表示縮尺を変更したり、表現範囲を移動したりするなど、一般的な GIS などのソフトウェアと同様な操作によって地図画面を扱うための機能や、シミュレーションの実行や停止などシミュレーションプログラムを操作するための機能などが割り当てられている。

次に、画面左側には上部に対象地域の全域と地図画面の表示範囲を示すインデックスマップ、そして、その下には、地図画面上に表示されている各種情報の一覧やその凡例を表示するレイヤ画面がある。このレイヤ画面では、地図画面に表示されている各種情報を必要に応じて非表示にしたり、シンボルを分けて描画する際の分類方法を変更したりするなどの設定ができる。また、地図画面の下には、タイムライン画面とイベントメッセージ画面がある。タイムライン画面には、午前零時から始まる時間軸上に災害の発生や避難勧告の発令などの各種イベントを示すアイコンが表示される。このアイコンをドラッグすることで、他のイベントとの時間的な関係を視覚的に確認しながら各種イベントの発生タイミングを設定することができる。また、シミュレーション実行中には、この時間軸上に計算されている時刻が表示され、計算の進捗状況を確認することもできる。なお、時間軸の左側には、現在時刻を数値で確認したり、計算中における地図画面の更新間隔を設定したりするためのコントロールを配置している。

最後に画面右側には、対象地域の人口や世帯数、建物数などの基本的な情報や、災害情報の伝達状況や住民の避難状況、そして、被害状況に関する情報など、シミュレーションプログラムによって計算されている各種状況が文字情報としてリアルタイムに表示される。なお、この部分はタブコントロールによって切り替えることが可能であり、発生させる災害を選択する画面など、シナリオ項目を視覚的に設定するためのインターフェースなどに切り替えることができる。



図-5 対象地域

表-1 整備データ

分類	項目	数量等	参照情報
空間情報	建物	12,922 棟	電子住宅地図
	道路	176km	
	標高	6m メッシュ	
情報伝達施設	拡声器	42 基	尾鷲市提供資料
	広報車	3 台	
避難施設	避難場所	24 箇所	地域防災計画書 ¹³⁾
	高台	103 箇所	
災害	津波氾濫	4 パターン	中央防災会議資料 ¹⁴⁾
人口*	住民(世帯)	7,974 世帯	H12 国勢調査結果 ⁹⁾ , 尾鷲市提供資料
	住民(人口)	18,520 人	
	流入者	2,203 人	

*参照情報を基に本シミュレータにより推計した。

5. 適用事例

本章では、実際の津波常襲地域を対象とした適用事例を示すことによって、本シミュレータの具体的な入力出力情報や活用方法について示す。

(1) 対象地域

対象地域としたのは三重県尾鷲市の市街地を中心とした東西 7km, 南北に 4km の地域である(図-5 参照)。当地域は、熊野灘に面したリアス式海岸に位置し、過去数回に渡って津波による被害を受けている。東南海・南海地震に関する中央防災会議の発表では、南海トラフと対面していることや地形的特長から、当地域には地震発生後短時間で 7m 近い高さの津波が襲来することが予測され、その全域が東南海・南海地震防災対策推進地域に指定されている三重県の中でも、特に甚大な被害の発生が危惧されている地域の一つとなっている。

(2) 入力データ

尾鷲市を対象としたシミュレーションを実施するために整備した入力データの一覧を表-1に、またその配置を図-5に示す。まず、対象地域の空間特性を示す建物や道路、標高に関する情報は、市販の電子住宅地図やレーザープロファイラデータを加工、参照することにより整備した。次に、屋外拡声器や広報車とい

表－２ 津波シナリオパターン

No.	想定地震	防波堤の考慮
1	東南海・南海連動型地震	する
2	東南海・南海連動型地震	しない
3	スマトラ島沖地震級の地震*	する
4	スマトラ島沖地震級の地震*	しない

*2004 年 12 月に発生したスマトラ島沖地震による津波と同レベルの規模を想定するため、東南海・南海連動型地震の断層変位を 1.5 倍にして計算したもの。

表－３ 想定シナリオパターン

項目	シナリオパターン
地震発生時刻	午前 4 時、午前 8 時、正午
津波	表－２に示す 4 パターン
避難勧告発令	地震発生後 3 分、地震発生後 10 分
避難 タイミング	情報取得後 5 分、10 分 地震発生後 5 分、10 分

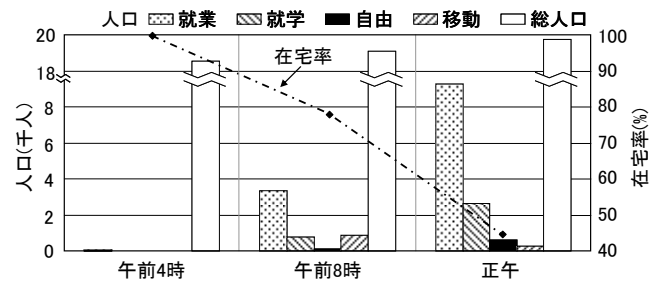
表－４ 基本条件

項目	設定値
住民	情報伝達 電話利用不可
	避難速度 80m/分
	避難先 最寄の避難場所
屋外 拡声器	音声到達範囲、聴取率 250m, 30%
	伝達タイミング 発令直後
広報車	音声到達範囲、聴取率 100m, 40%
	移動速度 20km/h
	出発タイミング 発令直後
マス メディア	視聴率 60%
	伝達タイミング 発令後 5 分

った情報伝達施設、また、津波災害時の避難施設に関しては、尾鷲市より収集した資料等を参考に作成した。なお、高台など指定避難場所以外への避難も想定されるため、数パターンの津波氾濫解析結果から安全が確認された標高 30m 以上の地域についても避難場所として設定することとした。また、津波の氾濫状況を表現するデータとして、表－２に示す地震規模や防波堤の有無を変化させた 4 パターンの津波氾濫解析結果を用意した。このデータは、12.5m メッシュの精度を持つ津波の波高や流速に関する情報が 10 秒間隔で出力されたものである。最後に、人口に関しては、国勢調査結果として公表されている統計情報を利用し、本シミュレータの機能により住民や流入人口を再現した。なお、対象地域が市全域ではないため、尾鷲市から提供された対象地域内の人口と国勢調査の結果との比較からその他の統計量を求めている。

(3) シナリオ設定

今回の事例では、まだ自宅に留まっている住民が多い午前 4 時、出勤や通学が行われる午前 8 時、そして、一日の中でも外出中の住民が多いと考えられる正午の 3 時点において地震が発生し、対象地域に津波が襲来する状況を想定する。また、避難勧告情報の伝達シナリオとしては、対象地域に存在する屋外拡声器などの情報伝達施設によって、行政の迅速な対応により地震発生から 3 分後に情報伝達が始まった場合、対応が



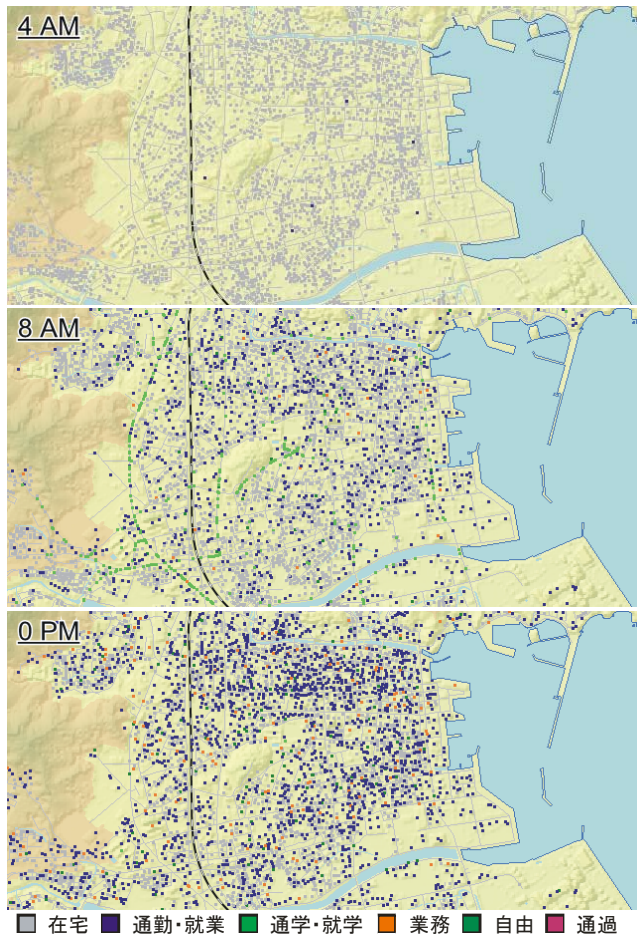
図－６ 人口と在宅率

少し遅れて地震から 10 分後に情報伝達が始まった場合を設定した。最後に、住民の避難シナリオとしては、情報を取得した 5 分後に避難行動を開始した場合と 10 分後に避難した場合、そして、自主的な避難行動が行われ情報取得に関わりなく地震発生から 5 分後に避難を開始した場合と 10 分後に開始した場合の 4 パターンを設定した。以上のシナリオパターンを表－３に、また、共通して用いた基本条件を表－４にまとめる。なお、今回の適用では、津波の影響のみを考慮することとし、地震によって直接発生する被害は考慮しない。また、計算に乱数を利用することによる結果のばらつきを除去するため、各シミュレーション結果としては、20 回計算を行った平均値を用いる。

(4) シミュレーション結果

a)人口の推移

まず始めに、今回想定した地震発生時刻における住民の分布状況について把握する。設定した各時刻における人口と在宅率を図－６に示す。また、図－７は、シミュレータ上に表現される各時刻の人口の分布状況を出力したものである。これらの図を合わせて見ると、午前 4 時の時点では、在宅率が 100%に近く殆どの住民が自宅に居る状況であることがわかる。また人口分布図から就業者が僅かに存在していることがわかる。また、午前 8 時の状態では、就業者や就学者が増加し、在宅率は約 80%となっている。また、移動中の住民が 1 千人弱と多いのも特徴的で、人口分布を見ると地域の主要な道路上に通学中や通勤中であると考えられる就業者や就学者が存在しているのがわかる。そして、正午の時点の結果を見ると、就業者は約 9 千人、就学者は約 2,500 人、そして自由行動中の住民が 600 人程度となっており、在宅率で見ると 45%程度と半数以上の住民が自宅外で活動中である状況を把握できる。この時点の人口分布を見ると、市街地と思われる地域に就業者が多く分布している状況が見られ、夜間と比較して人口集中地域が変化している状況を推察できる。また、この間の総人口の推移を見ると、午前 4 時の時点の総人口が約 18,500 人であるのに対して、正午の時点では、2 万人弱となっていることから、この地域は流出者よりも流入者の方が多く、昼間人口が夜間人口よりも千



図一 7 人口分布

人程度増加するという状況を把握できる。

b) 情報取得状況と避難状況

次に、設定したシナリオごとに避難勧告情報の取得状況と避難状況を把握する。表一 5 は、今回想定している地震発生の各時刻において避難勧告が発令され、それに基づいた避難行動が行われた場合のシミュレーション結果を示している。なお、ここでは想定時刻ごとの情報伝達や避難、そして被害状況の変化を把握することに焦点を絞るため、情報を取得した全住民が避難行動を行う状況を想定した。

まず、全住民の中で情報を取得した住民の割合を示す情報取得率を見ると、想定時刻ごとの結果に顕著な傾向は見られない。しかし、避難勧告を発令してから各住民が情報を取得するまでに要した平均時間を示す情報取得時間を見ると、想定時刻が正午に近づくにつれて取得時間が遅くなっており、今回の条件では、昼間の人口分布の方が情報伝達に時間を要する傾向にあると言える。また、避難行動を開始してから避難場所に到達するまでの時間である避難所要時間についても、正午に近づくにつれて若干時間が大きくなる傾向が見られ、昼間の人口分布の方が避難場所までの距離が全体的に遠くなっている状況を推察できる。

以上の状況と住民の避難タイミング、行政からの避

表一 5 情報伝達状況と避難状況

想定時刻	午前 4 時	午前 8 時	正午
情報取得率	97.6%	97.0%	97.2%
情報取得時間	3.4 分	4.0 分	4.6 分
避難所要時間	4.5 分	4.7 分	4.8 分

表一 6 シナリオごとの避難完了時間

		避難完了時間(分)					
発令タイミング		－		地震後 3 分		地震後 10 分	
避難開始 タイミング		地震後		情報取得後			
		5 分	10 分	5 分	10 分	5 分	10 分
想定時刻	午前4時	9.5	14.5	14.0	19.0	21.0	26.0
	午前8時	9.7	14.7	14.8	19.8	21.9	26.8
	正午	9.8	14.8	16.1	21.1	23.1	28.1

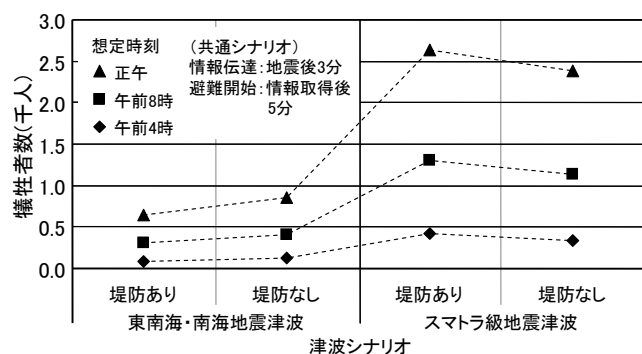
表一 7 シナリオごとの犠牲者数

		犠牲者数(人)					
発令タイミング		－		地震後 3 分		地震後 10 分	
避難開始 タイミング		地震後		情報取得後			
		5 分	10 分	5 分	10 分	5 分	10 分
想定時刻	午前4時	0	40	85	305	530	1,440
	午前8時	4	174	309	552	867	1,651
	正午	0	393	645	967	1,292	1,935

難勧告の発令タイミングの各シナリオを考慮して計算された住民の避難完了時間を表一 6 に示す。この時間は、地震発生時刻からの経過時間を示している。この結果によると、地震後 5 分で避難を開始した場合、地震発生から避難が完了するまでに平均 10 分弱、一方、情報伝達と避難行動の両方が最も遅れた場合のシナリオでは、地震発生から避難が完了するまでに平均 26 分から 28 分程度の時間を要することがわかる。

c) 人的被害の発生状況

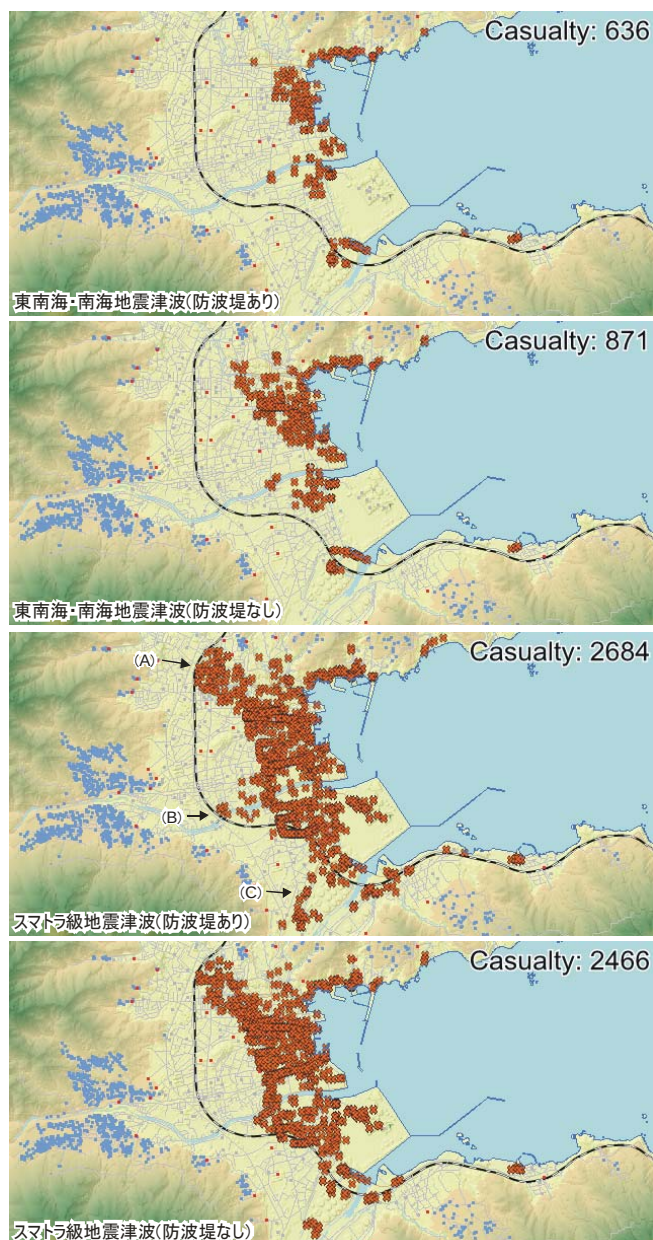
最後に、シナリオごとの人的被害規模について把握する。まず、表一 7 は対象地域に整備されている防波堤を考慮した状態で、東南海・南海地震による津波が発生した場合の犠牲者数をシナリオ別にまとめたものである。この結果から、避難勧告の発令が地震発生から 3 分後に行われた場合で、住民がその情報を取得してから 5 分後に避難を開始したシナリオについて見ると、午前 4 時に地震が発生した場合の犠牲者が 85 人であるのに対して、午前 8 時では 309 人、そして、正午の場合では、645 人と地震が発生する時刻が変化することで犠牲者数に 7 倍以上の差が生じる結果となっている。この結果には、前項で把握した避難完了時間の違いに加えて、津波氾濫域の人口分布の変化が影響していると考えられる。次に、同じ勧告発令タイミングで、情報取得から 10 分後に避難を開始した場合を見ると、午前 4 時に地震が発生した場合の犠牲者数は 305 人となっている。したがって、このシナリオの場合、住民の避難行動が 5 分遅れることによって、200 人以上犠牲者が増加してしまうことがわかる。さらに、この条件から避難勧告の発令を地震発生の 10 分後とした場合で被害が最も大きい正午のシナリオを見ると、



図－8 津波シナリオ別犠牲者数

1,935 人という最初に見たシナリオから 20 倍以上も多い犠牲者が発生している。一方、住民が避難勧告に頼らずに地震発生後 5 分で避難行動を開始するシナリオを見ると、犠牲者数はゼロから数名程度に留まっております。迅速な自主避難行動によって被害を最小限に抑えることが可能であることを示唆する結果となっている。

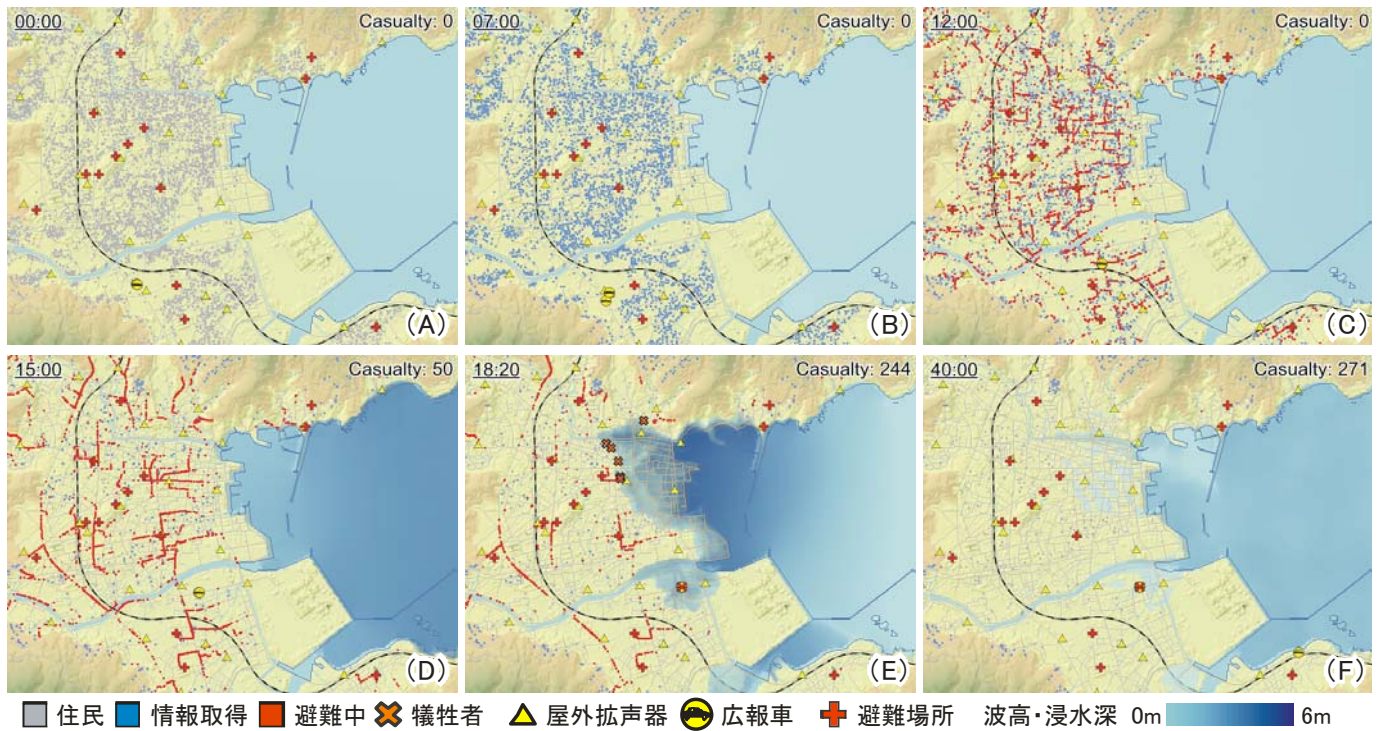
次に、津波シナリオ別の犠牲者数の変化を図－8 に示す。なお、この結果は、避難勧告が地震の 3 分後に発令され、情報取得から 5 分後に避難が開始された場合を想定している。まず、この図から防波堤が考慮された状態の東南海・南海地震津波とスマトラ島沖地震級の地震による津波(以下、スマトラ級地震津波と呼ぶ)の結果を見ると、想定時刻にかかわらずスマトラ級地震津波の方が 4 倍程度多い犠牲者数が発生することがわかる。また、東南海・南海地震津波を想定したシナリオから防波堤の考慮の有無に注目すると、防波堤を考慮した場合は、考慮しない場合の 7 割程度の犠牲者数となっており、防波堤の効果を確認できる結果となった。ただし、スマトラ級地震津波の場合は、この結果は逆転していることがわかる。図－9 は、正午を想定した場合の津波シナリオごとの犠牲者の分布を示している。この図を見ると、防波堤を考慮した東南海・南海地震津波では、犠牲者の発生箇所の多くが北側の沿岸周辺部に存在しているのに対して、スマトラ級地震津波を想定した場合は、沿岸部全体に犠牲者が分布しており、特に北側の河川においては、対象地域を縦断する鉄道付近にまで津波が遡上し犠牲者が発生している様子が見て取れる(図－9 の A)。また、スマトラ級地震津波を想定した場合に見られた防波堤の有無による犠牲者数の逆転現象について把握するため、下 2 枚の図を比較すると、湾の中央を流下する河川と南側の河川周辺において、防波堤を考慮したシナリオの方が広い範囲に犠牲者が分布していることがわかる(B,C)。この結果から、スマトラ級地震津波を想定した場合、北側の防波堤の存在によって、南部地域における津波の遡上域が広がり、被害が増加する可能性があることがわかる。



図－9 津波シナリオ別犠牲者分布

6. リスク・コミュニケーションツールとしての活用

本シミュレータは、シミュレーションモデルによって表現される災害時の地域状況をアニメーションとして表示する機能を持つ。図－10 は、本シミュレータにより作成したアニメーションの一例を示している。この例では、左上に示される地震発生からの経過時刻に合わせて、地震直後の住民の分布状況(図－10 の A)から屋外拡声器や広報車といった情報伝達メディアによって住民に情報が伝達されている様子(B)、情報を得た住民が避難場所に向かって避難している様子(C,D,E)、そして、津波の襲来とともに逃げ遅れた住民の中から犠牲者が出現している様子(D,E,F)などが表現されている。なお、右上の数字はその時点における犠牲者の累積数を示している。



図－１０ 計算結果のアニメーション例

このようなアニメーションは、設定したシナリオやその結果を視覚的に確認するために有用であることに加えて、専門的な知識を持たない一般の住民に対する災害教育のためのコンテンツとしても有効である。例えば、このようなコンテンツを見ることによって、地域に予想されている津波の遡上範囲や浸水深、そしてそれらが地震発生からの経過時刻に応じてどのように進展していくのかなど、静的なハザードマップからは得ることのできない種々の情報を視覚的にわかり易く把握することができる。さらに、本シミュレータは、シナリオ設定によって表現内容を様々に変化させることが可能であるため、想定規模の災害では安全と示されていた地域が若干規模を変化させただけで簡単に被災範囲に取込まれてしまう場合があることや、行政や住民の対応行動によって発生する被害規模に非常に大きな差が生じること、さらには利用者自らが想定する行動がどのような帰結をもたらすかなど、災害現象や災害時の対応行動のあり方について効果的に学ぶことができる。

筆者らは、このようなコンテンツを実際にご利用した具体的な災害教育にも取り組んでいる。前章の事例で取り上げた三重県尾鷲市では、様々にシナリオ設定したシミュレーション結果のデータベースから、利用者が自由にシナリオを選択して結果を閲覧することができる Web システムを公開している(図－１１参照)。また、平成 16 年 5 月 6 日に開催した津波防災講演会を始めとして、数回に渡り市民とのリスク・コミュニケーションツールとして本シミュレータを活用している。



図－１１ 尾鷲市動く津波ハザードマップ¹⁵⁾

なお、この尾鷲市では平成 16 年 9 月 5 日に 2 度に渡る地震が発生しており、2 度目の地震では津波警報の発表に応じて避難勧告が発令されている。この時の住民の避難実態を把握するために行われた調査によると、沿岸部の地域において 7 割を超える避難率が見られるなど、地域住民に高い防災意識が醸成されている様子が明らかとなった。

7. おわりに

効果的な防災計画を立案するためには、被災時に想定される種々の問題を考慮した対策を検討する必要がある。本研究では、このような問題に対応する地域防災対策の戦略策定ツールとして、平常時から災害時に見られる地域の社会状況を総合的に表現することによって現実的な被災シナリオを想定することができるシ

ナリオ・シミュレータを開発した。このシミュレータは、シミュレーションによる計算状況を視覚化することによって、設定シナリオに応じた地域の被災状況を具体的に分かりやすく表現することが可能となっており、災害現象や災害時における適切な対応行動について効果的に学ぶ事ができるリスク・コミュニケーションツールとしても活用することができる。

本シミュレータは、平常時における個人の生活行動をベースとして、災害現象の進展状況とそれに応じた社会対応の状況を具体的に表現するという、実際の社会構造に基づく表現構成を採っていることから、年齢や障害の有無などの個人属性を考慮した避難困難者の問題や、地震に伴う家屋倒壊や道路閉塞を考慮した実効性のある避難計画の検討など、災害時に見られる個人や社会の状態を反映した様々な問題に対して適用することが可能である。今後は、シミュレーションモデルの改良することによって、表現精度の向上や表現内容の充実化を目指すとともに、想定シナリオにおける最適な対応策を検討するための支援機能など、防災戦略ツールとしての機能開発や、計算結果の視覚的な表現方法や操作性の改善などによるリスク・コミュニケーションツールとしての研究開発を進めることが課題である。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト、科学技術振興機構社会技術研究システム ミッション・プログラム I による研究助成を受けた。また本研究の遂行に当たっては、尾鷲市危機管理室からの協力や財団法人日本気象協会からの津波氾濫解析データの提供を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 内閣府中央防災会議：東南海、南海地震の被害想定について、東南海、南海地震等に関する専門調査会 第14回資料、<<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/14/>>,(入手 2005.2)。
- 2) 静岡県：第3次地震被害想定結果、2001年5月。
- 3) 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ー2003年宮城県沖の地震・気仙沼市民意識調査からー，土木学会論文集，No.789/II-71，pp.93-104，2005年5月。
- 4) 群馬大学災害社会工学研究室：平成16年7月新潟豪雨災害に関する実態調査 調査報告書，<<http://www.ce.gunma-u.ac.jp/regpln/>>,(入手 2004.12.17)。
- 5) 片田敏孝：洪水ハザードマップの効果と今後の課題，消防科学と情報，財団法人 消防科学総合センター，pp.9-14，2002。

- 6) 高悼琢磨，椎葉充晴，堀智晴：水害避難行動のミクロモデルシミュレーションと制御に関する研究，土木学会論文集，No.509/II-30，pp.15-25，1995。
- 7) 藤岡正樹，石橋健一，梶秀樹，塚越功：津波避難対策のマルチエージェントモデルによる評価，日本建築学会計画系論文集，No.562，pp.231-236，2002。
- 8) 片田敏孝，及川康，田中隆司：災害時における住民への情報伝達シミュレーションモデルの開発，土木学会論文集，No.625/IV-44，pp.1-13，1999。
- 9) 総務省統計局：平成12年国勢調査，<<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2000/>>,(入手2005.1)。
- 10) 片田敏孝，桑沢敬行：津波に関わる危機管理と防災教育のための津波災害総合シナリオ・シミュレータの開発，土木学会論文集D，Vol.62，No.3，pp.250-261，2006。
- 11) 片田敏孝，浅田純作，桑沢敬行，及川康：災害情報伝達の実用型シナリオ・シミュレータの開発，土木情報システム論文集，Vol.8，pp.89-96，1999。
- 12) 片田敏孝，浅田純作，桑沢敬行：GISを用いた災害情報伝達のシミュレーション分析：土木情報システム論文集，Vol.9，pp.49-58，2000。
- 13) 尾鷲市防災会議：尾鷲市地域防災計画 震災対策編，2003。
- 14) 内閣府中央防災会議：東南海，南海地震に関する報告，東南海，南海地震等に関する専門調査会 第16回 資料，<<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/>>,(入手 2005.2)。
- 15) 三重県尾鷲市，群馬大学災害社会工学研究室：尾鷲市動く津波ハザードマップ，<<http://dsel.ce.gunma-u.ac.jp/simulator/owase/>>,(入手2006.2.21)。