

発災時刻の都市アクティビティを考慮した津波による人的被害量の推定に関する研究

片田 敏孝¹・桑沢 敬行²・金井 昌信³

¹正会員 群馬大学大学院教授 工学研究科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

E-mail:t-katada@ce.gunma-u.ac.jp

²正会員 NPO法人 社会技術研究所 (〒370-0862 群馬県高崎市片岡町1-12-16フロンティアビル2F)

³正会員 群馬大学大学院助教 工学研究科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

災害による人的被害の規模は、発災時の都市アクティビティに応じて大きく変化する。したがって、現実的な被災シナリオ想定を実施するためには、平常時における住民個々の活動状況を考慮することが必須である。本研究では、このような認識のもと、発災時刻における都市アクティビティを考慮した的確な被災想定を実施するためのプロセスを検討するとともに、そのプロセスに基づき被災シナリオ想定を実施するためのシナリオ・シミュレータを開発している。このシミュレータは、国勢調査などの統計情報に基づき、時刻に応じた住民の都市内分布を表現することによって津波発生時刻による人的被害量を推定することが可能であり、効果的な地域防災計画を立案するための戦略策定ツールとして活用することができる。

Key Words: tsunami occurrence timing, casualty estimation, resident's activities, scenario simulator

1. はじめに

防災対策の最大の目的は、人的被害の削減にある。したがって、効果的な防災計画を立案するには、まず想定する被災状況下における人的被害の規模やその発生要因を把握すること、そして、その状況を考慮した上で対応策を検討することが重要となる。

人的被害は、災害現象やそれによる物的な被害、そして、住民の活動状況との空間的、時間的な関係に応じて発生すると考えられる。したがって、的確な被害想定を実施するためには、地震を始めとする突発災害は勿論、津波や洪水などの時間的な進展を持つ災害についても、災害現象そのものに加えて、住民の空間分布や活動状況など、発災時刻における都市アクティビティを考慮することが必須となる。例えば、静岡県や内閣府中央防災会議は、東海地震や東南海・南海地震を対象とした人的被害想定を実施するにあたり、都市アクティビティを考慮するため、想定シナリオとして地震の発生時刻を設定した検討を行っている^{1),2)}。しかし、このような既往事例の多くは、都市アクティビティを考慮する条件として、実際には発災時刻における地域の滞留人口程度しか考慮しておらず、綿密な影響範囲や時間を想定する災害現象を対象とした検討と比較して、住民の空間的な分布やそ

の推移については、十分な検討がなされていない。

本研究では、このような問題の背景として、平常時における地域状況を表現するための有効な手法が確立されていない現状があると認識し、都市アクティビティを構成する住民個々の生活行動を表現するための手法について検討している。この検討に当たっては、早急な防災対策の実施が迫られている小規模地域においても適用可能な技術とすることを前提としており、国勢調査結果として公表されている各種統計情報や住宅地図など、全国を対象として整備されている情報から、地域状況を表現することを目指している。さらに本研究では、平常時における都市活動に加えて、災害時における災害情報の伝達状況や住民の避難行動、そして災害現象を総合的に考慮することによって、発災時刻を考慮した現実的な被災時のシナリオを想定するためのプロセスについて検討するとともに、筆者らが開発した災害総合シナリオ・シミュレータ³⁾を改良し、実際にこのプロセスに基づいたシナリオ分析を実施することを可能としている。

本論文では、実地域を対象にシミュレータを適用し、平常時における人口分布や人口密度の時間推移を再現するとともに、交通量観測によって得られた住民の活動状況との比較から本手法の再現性を検証している。また、津波災害の発生を想定したシナリオ分析を実施し、津波

の襲来時刻や住民の避難行動シナリオによって、発生する被害が大きく変化することを把握した。

2. 都市アクティビティを考慮した人的被害想定

(1) 災害による人的被害の発生形態とその表現方法

人的被害の発生は、災害が発生した時点における住民の空間分布に大きく依存するという特徴を持つ。特に、津波や火山など、明確な前兆現象から災害の発生までにいくばくかの時間的な余裕があり、被災地域を特定することが可能な災害については、極論を言えば災害が襲来する前に被災地の全ての住民が避難を完了していれば、人的被害が発生することはない。このことは、この種の災害における的確な災害情報の伝達、そして迅速な住民避難の重要性を強く理由付けるものであることは言うまでもない。一方、地震災害などに代表される突発的な災害については、災害が発生する以前の避難行動が困難であることから、発生した時点における日常的な住民の空間分布や行動形態に応じて人的被害の規模や要因が決定される。例えば、1995年に発生した阪神・淡路大震災では、地震が起きた時刻が早朝であったため、就寝中だった住民が多く、死因の8割以上が家屋や家具の倒壊による圧死となっている⁹⁾。仮にこの地震が昼間に発生していた場合、被害の状況は大きく異なっていたであろう。

このような災害による人的被害の発生形態の特性を考慮すると、人的被害の発生を主とした被災時の状況を適切に表現するためには、災害時における住民の避難行動のみに着目するのではなく、平常時にみられる都市の活動状況までを考慮する必要があると考えられる。そして、平常時の住民行動の中で災害の発生を表現することで、被災時点における各個人の状況を踏まえた災害時の対応行動を表現することが現実的である。このように、個々の住民による生活行動で構成される都市活動をベースに被災時の状況を表現することによって、時刻に基づいた人口やその分布の変動、そして、それぞれの住民属性を考慮するなど、避難行動のみに留まらない様々な社会状態を考慮した被災想定が可能となる。

(2) 都市アクティビティの表現に関する防災研究

都市アクティビティや住民の生活行動を表現しようとする試みは、都市計画の立案や評価に有効な手法として考案され、近年では、現実的な交通需要予測を行うための手法として、その適用が提案されている⁵⁾。藤井ら⁶⁾は、この分析手法の具体的な実装としてHagarstrand⁷⁾による時空間プリズム制約を考慮した生活行動のシミュレーションモデルを構築している。このモデルは、飯田ら⁸⁾によって世代属性シミュレータや交通流シミュレータと

連携させた交通需要予測システムの開発に適用されているほか、菊池ら⁹⁾によりGISを活用したゾーン空間から座標空間への展開手法が提案なされており、消防防災拠点の評価システムへの応用¹⁰⁾など防災を目的とした適用もなされている。これら一連の研究は、複数の都市など比較的広域を対象とした住民の行動を表現することによって、交通に関連した様々な施策を評価することを目的としている。このため、これらの研究では、交通行動の表現に重きが置かれており、ダイアリー調査やパーソントリップ調査などで得られた非集計データを利用することによって、交通に関わる個人の選択行動や地域の交通状況を精緻に表現している。

これに対し本研究は、比較的狭小な地域を対象として、任意時刻における人口の空間分布を表現し、発災時刻別の被害推計や防災対策の検討を行うことを目的としている。なお、防災対策は地域を限定せず検討する必要があるため、前述したような交通に関わる詳細な基礎情報が調査されていない小規模な地域についても対象とする必要がある。このため本研究では、各種統計値などの全国的に整備されており、一般に入手可能な情報を用いて人口の空間分布を表現することを目指すこととした。また、精緻な表現には膨大なデータや計算を必要とする交通行動については、次節において説明しているように本研究の目的を達成する範囲において可能な限り簡便的に表現するという方針を定めている。

その他にも生活行動に着目した防災研究には、中野・本田¹¹⁾によるパーソントリップ調査に基づく震災発生時刻別の被害想定やアンケートから把握した高齢者の生活行動を再現した神崎・萩原¹²⁾による研究、また、避難シミュレーションの初期条件として人口分布などを与えている竹内¹³⁾による震災時の人的被害シミュレータの開発などがある。しかし、本研究のように対象地域の全人口を再現するとともに、時間帯に応じた人口の空間的な分布を内生的に表現し、その上で災害時の被害想定や避難対策の検討を実施することを目指しているものは見当たらない。

(3) 都市アクティビティを考慮した被災シナリオの想定プロセス

以上の考察のもと、本研究では、現実的な被災シナリオ想定を実施するために、平常時における都市アクティビティを表現するための手法を開発するとともに、住民による平常時の活動状況から災害時における避難行動までを総合的に表現するシミュレータを構築する。図-1は、都市アクティビティを考慮して被災シナリオを想定するためのプロセスを示している。本節では、このプロセスにおける各段階の概要についてまとめる。

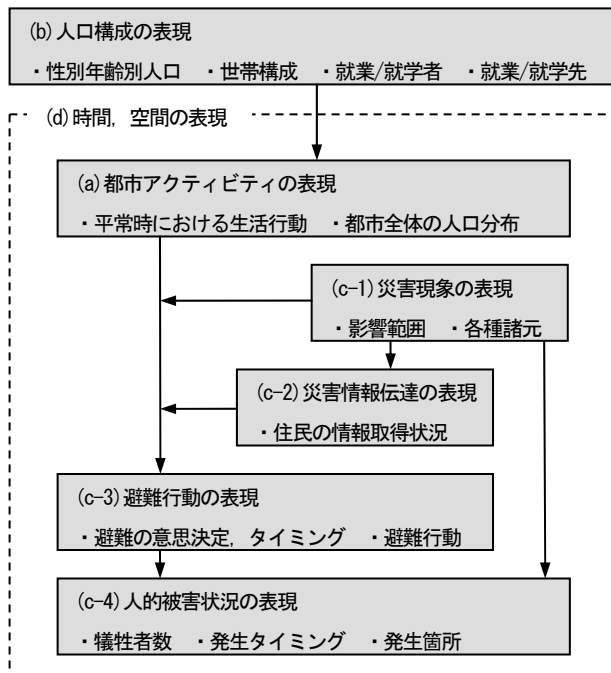


図-1 被災シナリオの想定プロセス

a) 都市アクティビティの表現

被災シナリオ想定において、平常時における都市の活動状況から得るべき情報は、発災時刻における地域住民の空間分布である。ここで人口分布のみを表現する場合は、在宅率や滞留人口といった統計情報から、想定する時間帯の地域内人口を求め、住宅や商業施設の位置にそれらの人口を割り当てることによって簡略的に表現することができる。しかし、通勤者や通学者などの時間帯によっては大きな割合を占める移動中の住民に対する避難誘導を検討するなど、実際の防災対策を検討する上で重要となる具体的な問題に対応するためには、都市の活動状況を断片的に捉えるのではなく、個人単位で表現された住民が一日の中で行う生活行動をシームレスに表現すること、そして、時刻に応じて変化する個々の住民の動きによって都市全体の活動状況を把握する必要がある。また、このような表現を行うためには、個々の住民によって行われる交通行動についても考慮する必要があるだろう。

交通行動を表現するマイクロシミュレーションモデルは、これまでに多数の研究がある^{14), 15)}。しかし、交通政策評価のために種々の条件を考慮して交通状況を精緻に表現することを目的とする既存モデルに対して、本研究では交通行動を住民活動の遷移状態として捉え、人口分布の変動を把握するために各住民の交通行動を簡略的に表現することを目的としている。したがって、本研究における既存モデルの適用を考えると、被災シナリオ想定の流れ全体に占める交通モデルのウェイトが必要以上に大きくなってしまふなどの問題が予想される。そこで本研究では、個人の生活行動やその中にみられる交通行動

の表現について次項で説明する国勢調査に基づいて再現した個人属性やパーソナリティ調査の結果として公表されている統計情報、そして近年整備が進められているGISデータなどの精緻な地理情報を反映して表現する方法を開発することとした。

都市アクティビティの表現方法については、4章で述べる。また5章では、この手法によって表現される地域の交通状況の再現性について検証している。

b) 人口構成の表現

前項において示した都市の活動状況を表現するためには、まず対象地域の人口を表現する必要がある。さらに、住民の生活行動や避難行動を個人単位で表現するためには、それらの行動特性を強く規定すると考えられる年齢や居住地、そして就業者や就学者といった日常生活における役割など、各種属性についても考慮する必要がある。

現実の人口構成を正確に反映する方法としては、自治体が管理する住民基本台帳の利用が考えられる。しかし、個人情報保護の観点から防災を目的とした事業であっても容易に利用できないことや、一番の利点である情報の正確性を保つためには、常に最新の情報に更新する必要があるなど、利用する上での幾つかの問題を抱えている。そこで本研究では、総務省が実施している国勢調査の結果を基に対象地域における人口構成を再現することとした。国勢調査の結果は、総務省統計局のホームページ (<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/>) で公開されており、全国の結果を自由に閲覧することができる。また、ここでは提供されていない詳細な結果を公開している自治体も多く、必要に応じて人口構成の再現精度を向上させることも可能である。

3章では、この人口構成の再現手法についての詳細を示している。

c) 災害時の住民避難と被害状況の表現

被災シナリオ想定の流れにおける残りの項目は、災害の発生状況(図-1のc-1)やそれに対応した避難勧告などの災害情報の伝達状況(c-2)、そして、災害の進展状況や災害情報の取得に基づく住民の避難状況(c-3)とこれらの関係によって生じる人的被害の発生状況の表現(c-4)である。本研究では、これらの項目を表現するために、筆者らが開発した災害総合シナリオ・シミュレータ³⁾を適用することとした。このシミュレータを構成するシミュレーションモデルは、行政から住民への災害情報の伝達状況や住民の避難状況に合わせて、津波など災害現象の進行状況を総合的に表現することが可能であり、これらの空間的、時間的な関係を分析することによって人的被害の発生規模を推計するなど、本研究で検討している被害シナリオの想定プロセスにおいて被災時の表現部分を担うために必要な機能を有している。ただし、このモデルは、住民を世帯単位で表現しているため、本研究

において必要となる個人属性を反映した個人単位の住民の生活行動や避難状況を表現するための改良を行っている。

d) 時間、空間の表現

実社会の状況を現実的に表現するためには、時間や空間の概念が必須であり、これらによる制約を考慮した上で、平常時における都市活動や災害時の情報伝達や避難行動が表現される必要がある。

各住民の生活行動は、時刻を基準として行われていると考えられるため、モデルによって取り扱う時間は、24時間で一日が経過する時刻を用いる。これによって、災害の発生タイミングについて「シミュレーション開始から15分後」というように設定するのではなく、「午前8時半」というように時刻で設定することとなり、現実的なシナリオライティングが可能となる。

また、津波や火山など、被災地域が限定される災害による被害を求めめるためには、日常生活や被災時の対応行動に伴う各住民の行動は、対象地域の地形的な特徴を反映して空間的に表現される必要がある。本研究で構築するモデル(以下、本モデルと呼ぶ)では、対象地域を示す空間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、住居や避難先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する。そして、これらの基本要素に加えて、住宅や商業施設といった建物、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する。

3. 人口構成の表現

本章では、対象地域の人口構成を表現する方法について述べる。なお、ここで表現される人口には、その地域の居住者だけではなく、他の地域から対象地域へ流入する人口も含まれる。

(1) 居住者の表現

人口構成の表現は、(1)対象地域の居住者の表現と(2)居住者の役割分担や他地域からの流入者の表現という二段階に分けて実施している。本節では、まず対象地域の居住者の表現方法について示す。

a) 利用する統計情報

対象地域の人口構成を再現するための入力情報としては、国勢調査結果に示されている市町村単位の世帯数、性別ごとの人口、性別年齢別の人口構成比、家族類型ごとの諸属性、そして、就業者、就学者に関する諸属性を

表-1 利用する統計情報

No.	統計表の名称	抽出する情報
1	男女別人口及び世帯の種別世帯数	世帯数、性別の人口
2	年齢、男女別人口、年齢別割合、平均年齢及び年齢中位数	性別、年齢別の人口構成比
3	世帯の家族類型別一般世帯数、一般世帯人員、親族人員及び1世帯当たり親族人員	家族類型の構成比や平均世帯数、平均子供数
4	世帯の家族類型、世帯主の配偶関係、世帯主の年齢、世帯主の男女別一般世帯数、一般世帯人員及び親族人員	家族類型ごとの世帯主の年齢構成
5	常住地又は従業地・通学地による年齢、男女別人口及び15歳以上就業者数	年齢性別就業・就学者率、就業・就学地の地域内率、流入人口

利用する(表-1参照)。家族類型に関する情報とは、世帯の構成を「夫婦のみ」や「夫婦と子供」など16区分に分類し集計を行った統計値であり、各構成の割合や平均世帯構成人数、平均子供数などが得られる。

なお、対象地域の人口構成を表現するために、世帯構成までを再現することは必須ではない。しかし、災害時における近年の避難実態調査^{(6),(17)}によると、住民による情報伝達行動や避難行動などにおいては、家族内の連携行動が大きな役割を果たしていることが明らかとなっているため、ここでは世帯構成までを含む地域住民の表現を試みることにした。

b) 居住者と世帯の表現

居住者の表現は、まず性別ごとの人口(表-1のNo. 1から抽出)と性別年齢別の人口構成比(No. 2)に従って、性別と年齢を決定した全人口分の居住者リストを作成することから始める。次に、全世帯数(No. 1)と各家族類型が占める割合(No. 3)から家族類型ごとの世帯数を計算し、各家族構成に従って先に作成したリストから居住者を割り当ててことで世帯とその構成員を表現する。

世帯への住民の割り当てを行う際は、まず家族類型ごとの世帯主の年齢構成(No. 4)を考慮し世帯主の年齢を決定する。そして、世帯主の年齢を基準に配偶者の年齢や子供、そして両親の年齢を決定し、先に作成した居住者リストから該当する者を抽出し割り当てていく。世帯主以外の構成員の年齢を決定する際は、厚生労働省が公表している人口動態調査や自治体が公表している保健統計などに示される夫婦間の年齢差や出産年齢などの統計値を考慮する必要がある。なお、各種統計量を基準として各世帯に人口を配分するため、上記の処理のみでは残差が発生するが、この残差については、子供を有する世帯や、夫婦、子供、祖父母に当てはまらないその他の構成員を含む総人数が固定されていない世帯に、住民の年齢に応じて再配分することによって総人口に整合するよう割り当てている。

以上の方法により、対象地域の家族構成に沿った世帯構成が再現される。また、対象地域の人口モデルに従って作成した居住者リストから世帯の構成員を割り当てているため、最終的に作成される人口の構成も対象地域の実態に合ったものとなる。

c) 世帯の居住地の表現

各世帯の居住地は、市販の住宅地図に含まれている建物の用途属性から住居として判別されている建物を抽出し、ランダムに割り当てる方法を用いる。

対象地域において、字単位など詳細な区分ごとの世帯数や人口に関する情報が公表されている場合は、その数に従って世帯や人口の割り振りを行うことにより、さらに地区の特性をより反映した形で居住地を表現することができる。なお、都市部などで高層の集合住宅が占める割合が多い場合は、建物の階数や床面積などを考慮して居住地を割り当てる必要がある。

(2) 居住者の役割と流入者の表現

平常時において一般的にみられる交通は、通勤を目的とした自宅と事業所間の移動など、日常的に繰り返し行われている行動に伴うものが大半を占めていると考えられる。本モデルでは、このような毎日繰り返し行われる行動を表現するため、居住者に就業者や就学者などの役割を割り当てている。具体的には、国勢調査結果に示される年齢階級別の就業者、就学者数(No. 5)から5歳階級性別ごとの就業者と就学者の割合を抽出し、6歳から18歳以下までの居住者については、就学者として通学行動を行うかどうか、また、19歳以上の居住者は、就業者として通勤行動を行うかどうかをこの結果に従って決定している。さらに、この結果からは、就業者、就学者それぞれについて、通勤、通学先が市外である割合や自宅で就業している割合など、通勤通学先の構成についても得ることができる。また、この統計表には、市外に居住し、市内の事業所や学校に通勤通学する流入者の数についても示されており、年齢別性別の流出入人口について算定することができる。

4. 都市アクティビティの表現

本モデルでは、平常時における都市の活動状況を住民個々の生活行動によって表現する。また、住民の生活行動に伴う交通行動を通勤交通、通学交通、業務交通、自由交通、そして通過交通の5種類に分類して表現している。なお、ここで表現する交通行動とは、基本的にある建物から道路上を移動し、別の建物まで移動する行動を示す。

以下では、各交通行動の表現方法について説明する。

(1) 通勤行動

通勤交通は、就業者の役割を持つ居住者や地域外からの流入者によって行われる。前章で示した統計情報(No. 5)を利用して、まず勤務地域を市内、市外、自宅の中から決定する。ここで、自宅で就業することとなった居住者は通勤交通を行わない。また、市内に通勤する従業者については、世帯の居住地と同様な方法で抽出した事業所から通勤先をランダムに決定する。この時、一般的に事業所の規模に比例して従業員数が増加すると考えられることから、各事業所の床面積を事業所選択時の重み付けに利用することとし、床面積を対象地域の総事業所床面積で割った値を通勤先となる事業所の選択確率として用いている。また、市外に通勤する就業者については、対象地域内の道路ネットワークの端点となる他地域との接続地点(以降、接続点と呼ぶ)を擬似的な勤務先の候補地として設定し、この中からランダムに選択させることとした。なお、地域外から流入してくる就業者については、自宅の位置をこの接続点の中から選択し、地域内に住む従業者と同様に通勤先を決定している。

また、本モデルでは、通勤交通が発生する時刻を決定するため、通勤のために自宅を出発する時刻と勤務時間の分布を示す平均値、分散をパラメータ化している。従業者は、このパラメータに基づいて決定された出発時刻になると自宅から事業所に向けて移動を開始し、勤務時間が過ぎると事業所から自宅に向けて移動するという交通行動を繰り返すこととなる。

(2) 通学行動

高等学校までの就学者を対象とした通学に伴う交通を表現する。まず、小学生、中学生の年齢に該当する就学者については、年齢、居住地と学校区に関する情報から通学先となる学校を設定する。次に、地域外からの通学者や高校生に該当する地域内の就学者は、対象地域の中から年齢に応じた学校をランダムに選択し通学先とすることとした。また、通勤交通と同様に、地域外への通学者は、接続点のいずれかをランダムに選択し擬似的な通学先として設定している。そして、登校時刻と下校時刻の分布をパラメータとして利用し、通学交通の発生タイミングを制御する。

(3) 業務行動と自由行動

本モデルにおいて、業務交通とは就業者が事業所からいずれかの場所に移動し、一定時間経過した後、事業所に戻るか帰宅する行動を指し、通勤交通は含めない。また、自由交通は、就学者でも就業者でもない住民が自宅からいずれかの場所に移動し、一定時間経過した後帰宅する行動によって表現する。本モデルでは、これらの行動を制御するため、各住民が該当する行動を一日に実

施する回数を示す発生交通量に加えて、交通を発生させる時刻を決定する時刻別の発生確率と移動した先での滞在時間を決定するための時間分布をパラメータとして用いている。また、各交通による移動先を決定するために、対象地域外へ移動する割合を示すパラメータを設けるとともに、地域内での移動先を決定する際には、建物の床面積を考慮した就業者の通勤先の選択と同様な方法により、地域内の全建物の中から移動先を決定している。

(4) 通過行動

本モデルにおける通過行動とは、地域外の住民が業務交通や自由交通などの目的で地域内の建物に移動し、その後、他地域に移動する行動、または地域内では停止せずにそのまま他の地域に移動する行動を示す。交通の発生地点、終了地点は接続点の中からランダムに選択する。ただし、対象地域内を通過するだけの場合は、発生地点を除外した接続点の中から終了地点を選択する。

通過交通では、時刻別の交通発生確率と地域内の建物に停止する交通の割合を示す進入率をパラメータとして利用している。

5. モデルの検証

本章では、本モデルの再現性に関する検証を行う。本モデルは、任意の時刻における地域住民の分布状況を表現することを目的としているが、各時刻における住民分布の実態調査を行うことは困難であるため、ここでは交通量調査から得られた検証地域の複数の交差点における断面交通量を比較するための指標として用いることとした。なお、利用した交通量調査の制約上、本検証は自動車による交通量のみ限定したものとなっている。

(1) 対象地域と交通量調査の概要

検証対象としたのは、三重県尾鷲市の市街地を中心とした南北に4km、東西に7kmの地域である。この地域の人口は約1万8千人、世帯数は約8千世帯で市全体の約8割の住民が居住している。当地域は、西側は大台山系の山々、東側は太平洋に面しており、他地域へと続く主要な道路は、名古屋方面から尾鷲市を通過し和歌山県まで通じている国道42号のみである。また、JR線や路線バスも運行しているが、その頻度は著しく低く、交通行動の多くは自動車によって行われているという典型的な地方都市の交通事情をみることが出来る。ただし、交通量そのものは多くなく、日常的な渋滞の発生はみられない。

検証に利用した交通量調査は、2005年3月14日月曜日から16日水曜日に渡り地域内の5箇所（図-2参照）の交差点において実施したものである（図-2参照）。各交差点では、接続す

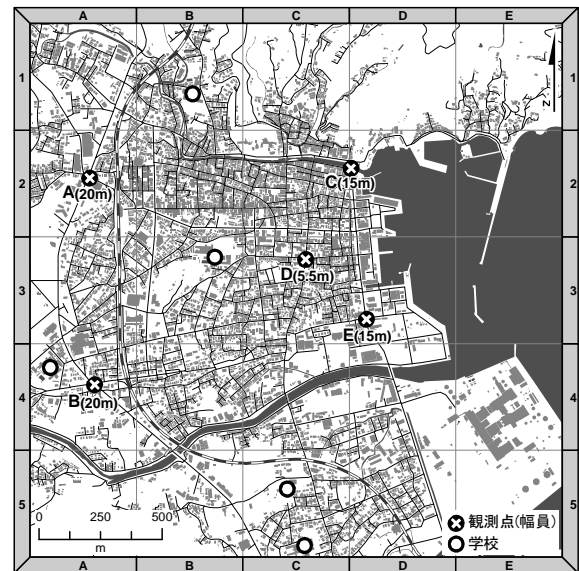


図-2 交通量観測地点

表-2 人口構成の再現結果

地域内居住者	総数	人口	
		世帯数	18,520人
就業者		区域内へ通勤	6,180人
		区域外へ通勤	1,011人
就学者		自宅にて就業	1,422人
		区域内へ通学	2,272人
流入者		区域外へ通学	71人
		就業者	1,863人
		就学者	340人

る各道路について上下車線別に1時間ごとの自動車の流入台数と流出台数が24時間に渡り観測されている。

(2) パラメータの設定

a) 人口

国勢調査の結果を利用して対象地域の人口を表現した。なお、今回対象とした地域は市全域ではないため、尾鷲市より提供を受けた対象地域内の人口に関する統計情報を利用し、国勢調査に示される市の総人口と対象地域内人口の比によって各統計結果を按分することで、その他の値を求めている。人口構成の再現結果の例を表-2に示す。

b) 交通行動

住民が行動を実施する場合は、移動経路として道路のリンク単位に設定する評価指標を考慮した経路探索により決定することとした。また、交通行動を簡便に表現するため、前述した対象地域の特性を鑑み、今回の計算では、通学以外の交通は全て自動車によって行われることとする。また、その移動速度は時速40kmとし、信号などによる交通制御や渋滞の表現は行わないこととした。また、通学行動については、徒歩によって行われる状況を想定した。

なお、本モデルでは、交通分担率や自動車速度などの条件を自由に設定することが可能である。他地域での適応においては、対象地域の特性を考慮してこれらの値を適切に設定する必要がある。

c) 発生交通量

業務交通や自由交通の発生量については国勢調査から抽出できないため、当地域の近隣を対象として実施された第4回中京都市圏パーソントリップ調査の結果¹⁸⁾を用いることとした。この結果には、5歳階級別性別の一日当たりのトリップ数の平均値が示されている。本モデルにおいて就業者でも就学者でもない住民は、自由交通以外の交通行動を実施しないため、この結果から得られるトリップ数をそのまま自由交通の発生量として利用した。一方、先に定義した本研究における業務交通については、パーソントリップ調査の業務交通とは異なり通勤交通を含めないため、パーソントリップ調査の業務交通から通勤により発生する二回分のトリップを引いた値を簡便的に業務交通の発生量として用いることとした。また、本検証では自動車による交通量のみの評価であるため、評価対象は19歳以上の住民に限定して行っている。次に、自由交通、業務交通において地域外に移動する交通の割合については、本地域に適用可能な公表値が得られなかったため、国勢調査から得られた区域内通勤者と区域外通勤者の比率である13%を設定した。なお、地域内と地域外トリップの比率については、実際にはトリップの目的ごとに適切な値を設定する必要があるが、この点については、今後の課題としたい。また、平成11年に実施された道路交通センサスの結果(<http://www.cbr.mlit.go.jp/kisei/ir/kisei-ir/index.html>)によると、国道42号の中で対象区域が含まれる区間の上下区間における24時間交通量の合計は、約2万2千台となっている。ここで上下線の交通量が等しいと仮定し、この中の半数が対象地域に向かって走行すると考えると約1万1千台の通過交通が存在することとなる。この内、既に地域外との交通として考慮されている地域外からの通勤者および地域内から地域外への通勤者を合わせた約2千9百人分の交通量を引くと、約8千台の通過交通が存在すると考えられる。ただし、実際には国道42号以外からの流入してくる交通も存在すると考えられるため、今回は通過交通の台数として1万台を設定することとした。

d) 交通の発生タイミング

通勤交通の発生タイミングは、前項で利用したパーソントリップ調査より自動車による出勤を目的とした時間帯別の交通量を参考に午前8時30分を平均とし1時間30分の標準偏差を設定した正規分布を設定した。また、業務交通、自由交通の時刻ごとの発生確率分布についても、パーソントリップ調査の結果で示される時間帯別目的別の交通量から業務交通と自由交通を目的としたものを抽

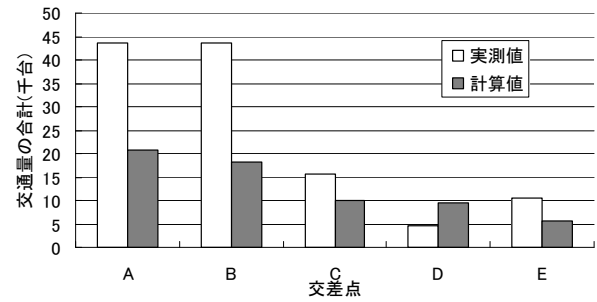


図-3 実測値との比較

出し、時刻別の発生確率分布を求めている。そして、それぞれの交通による移動先での滞在時間については、平均1時間、標準偏差を30分とする正規分布を仮定した。

(3) パラメータの調整と再現性の検証

以上のパラメータを設定したシミュレーションを実施し、各交差点の方向別、時間別、上下車線別の交通量それぞれの値の相関係数を求めたところ0.88となった。図-3は、各交差点における交通量の合計値を計算値と実測値で比較したものである。このグラフによると、ほとんどの交差点において計算値が実測値の半分程度になっているのに対して、道路の幅員が他の交差点と比べて三分の一程度である交差点D(図-2参照)だけは計算値の方が二倍程度多くなっているのが分かる。この結果から、交通行動の通過経路を距離のみを考慮した最短経路探索により決定していることから、幅員などの要因を無視した道路が選択されているためであると考察できる。実際、対象地域には幅員の狭い街路が多く、付近の居住者以外の人々が利用することが少ないと思われる道路が多い。このような場合、道路種別や車線数、幅員から適切なリンク速度を仮定し、所要時間が最短となる経路を選択する方法もある。しかし、この方法には、さらに道路情報が必要となるなど、収集すべきデータを増加させてしまう問題がある。そこで、本研究では地図情報から抽出することが可能なリンク長と幅員のみを利用して簡便に経路を計算する方法を開発することとした。本研究で用いた方法では、経路探索に用いるリンク単位の評価指標として、下式で示される距離と幅員の合成変数を利用し、経路選択時に幅員を考慮している。

$$I_n = \frac{\alpha \cdot l_n}{l_{\max}} + \left(1 - \frac{w_n}{w_{\max}} \right) \quad (1)$$

ここで、 I_n :リンク評価指標、 l_n :リンク長、 l_{\max} :道路ネットワーク内の最大リンク長、 w_n :リンクの幅員、 w_{\max} :道路ネットワーク内の最大幅員、 α :リンク長の重み係数である。図-4は、リンク長の重み係数 α を1から

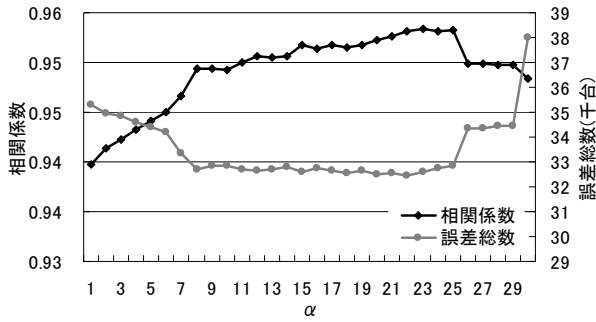


図-4 αによる相関係数と誤差の変化

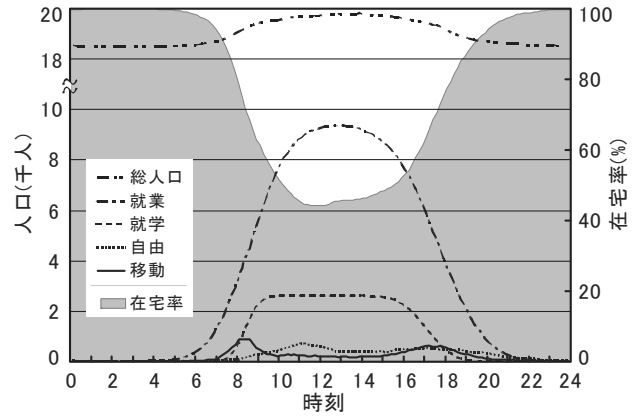


図-6 時刻別人口と在宅率

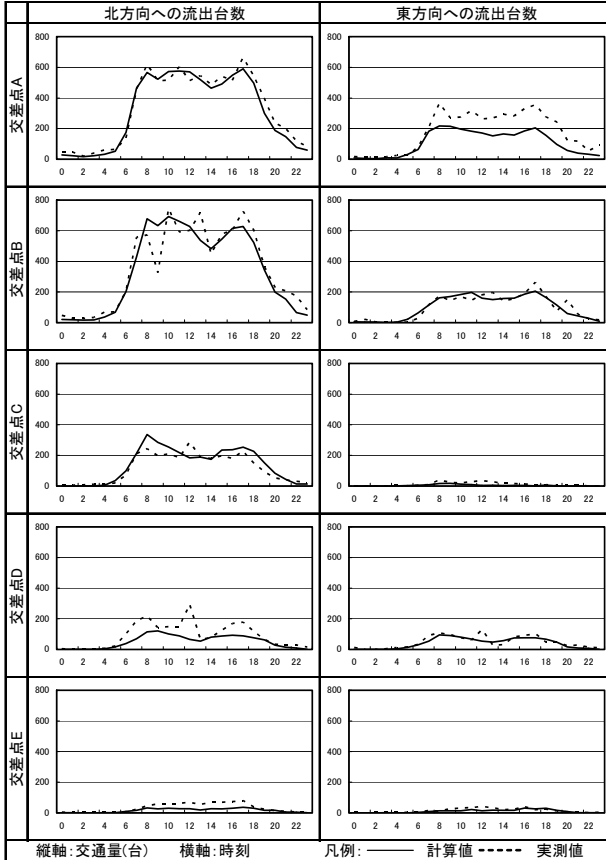


図-5 交差点別、時刻別の交通量

30まで変化させた場合の誤差総数と相関係数を示したものである。ここで、誤差総数とは、各交差点における方向別時刻別の交通量の計算値と実測値との差の絶対値を合計したものを指す。このグラフによると、 α の値が8から24の間に設定された場合、相関係数、誤差総数ともに比較的良好な結果が得られることがわかる。また、この間、誤差総数には大きな変化がみられないが、相関係数は α の値が大きくなるにつれてより良い方向に変化することがみとれる。

図-5は、 α を22に設定した場合の各交差点から北方向と東方向に流出する交通量の時刻変化を示している。全体的な交通量についてこのグラフをみると、若干計算値の方が低くなっている結果があるものの、総じて各交差点における交通量が妥当に表現されていることがわかる。

また、交通量の時刻変化についても午前7時前後において交通量が急激に増加する様子や午後7時頃を中心としてなだらかに減少していく傾向、そしてその変化量が実測値と同様な形で再現されていることがわかる。

6. 適用事例

本章では、本モデルの適用事例として、尾鷲市を対象として実施したシミュレーションの結果を示す。

(1) 平常時の住民の行動把握

まず初めに、災害が発生しない平常時における住民の行動状況を再現することによって、対象地域の住民の分布特性を把握する。

a) 行動パターンごとの人口と在宅率

前章で設定したパラメータと同様な条件を設定して対象地域における住民の平常時の行動パターンを再現した。図-6は、各正時における対象地域内の総人口と行動パターン別の人口、そして在宅率を示したものである。なお、在宅率は地域内の居住者のみを対象としているが、各人口は地域外からの流入者も考慮した数となっている。

この結果から、まず総人口の変化についてみると、夜間1万8千人強となっている人口が、昼間は2万人弱まで増加しており、人口の流入の結果、昼間人口が夜間人口よりも2千人弱多くなっている状況がわかる。次に、行動パターンごとの人口をみると、就業者は13時頃のピーク時で9千5百人程度であること、就学者は、9時頃から16時頃が多く、2千5百人程度であること、また、自由行動を行っている人口は、11時頃と18時頃にピークがあり、最大で千人程度であること、そして、交通量は8時半頃と18時頃にピークがあり、これらの時間帯には千人程度が移動していることなどがわかる。また、在宅率をみると、0時頃から4時頃までは100%に近く、最も在宅率が少なくなる正午付近では、約45%と人口の半数以上

が外出していることがわかる。

b) 人口分布と人口密度

ここでは、時刻ごとの住民行動を空間的に把握する。まず図-7は、行動分類ごとの住民分布を0時から20時まで4時間ごとに示したものである。この図をみると0時や4時の早朝の時間帯においては、多くの住民が自宅に留まっており、その他の行動を取っている住民が殆ど存在していないこと、8時には道路上に住民が線状に並んでいる様子から通勤通学行動により道路上に人口が分布していること、そして12時や16時には、多くの就業者が地域全体に分布していることがわかる。また、20時には就業者の分布が疎らとなり、自由行動や通過交通を行っている住民が各所に存在していることがわかる。

次に、人口の集中箇所について把握するため、人口密度を求めたものを図-8に示す。人口密度は、対象地域各所の半径100m内に存在する住民を抽出し、その数を1km²当たりの人口に換算することで算出している。この図をみると、在宅率の高い0時、4時、20時の夜間と行動が活発化する8時、12時、16時の昼間では人口密度に変化が生じていることがわかる。具体的には、夜間は住宅が多く存在しているとみられる図-2や図-9に示したインデックスでB-2、B-4、C-2、C-3に示される地域に人口が集中しており、一部人口密度が1万2千人よりも多い箇所もみられる。一方、昼間では、これらの地域の人口密度は減少し、正午には3千から9千人程度となっている。また、夜間は人口が少ない学校や大規模な事業所(図-2参照)などに就業者、就学者が集中している様子がみて取れる。

(2) 津波災害を想定したシナリオ・シミュレーション

次に、前節で示した平常時の行動に加えて、津波の挙動や住民の避難行動を表現することによって、津波災害を想定した人的被害の発生状況について把握する。

a) 基本条件

尾鷲市では、2004年9月5日に紀伊半島沖地震、東海道沖地震という二度の地震が発生しており、東海道沖地震では気象庁から発表された津波警報に応じて避難勧告が発令されている。本事例では、この時の状況を参考に各条件の設定を行った。

図-9は、図-2に対応するエリアの防災施設の配置状況と広報車の順回路、そして、想定した津波の氾濫域を示している。また、表-3は設定した各種条件をまとめたものである。

まず、情報伝達施設として対象地域内に配備されている42基の屋外拡声器と、消防署を出発し海岸沿いのルートを通る3台の広報車を設定した。また、先に示した事例では、地震発生から9分後に避難勧告が発令されていることから、防災行政無線による情報伝達と広報車の出発タイミングを9分後、更に1分遅れてマスメディアから

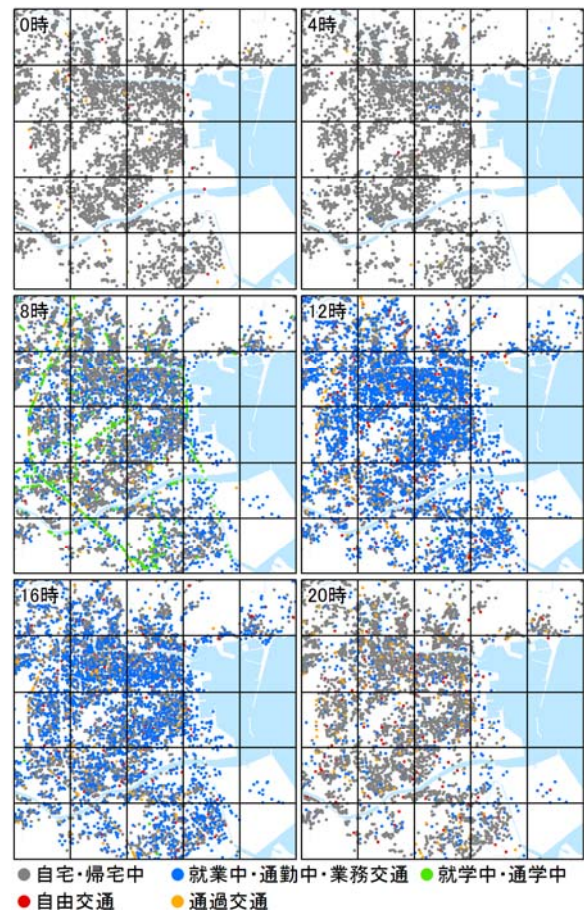


図-7 人口分布の推移

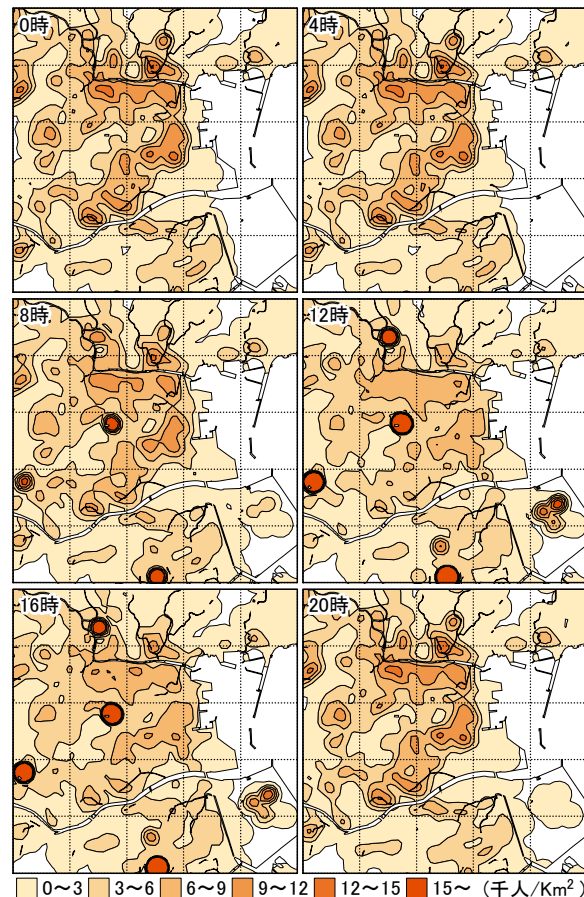


図-8 人口密度の推移

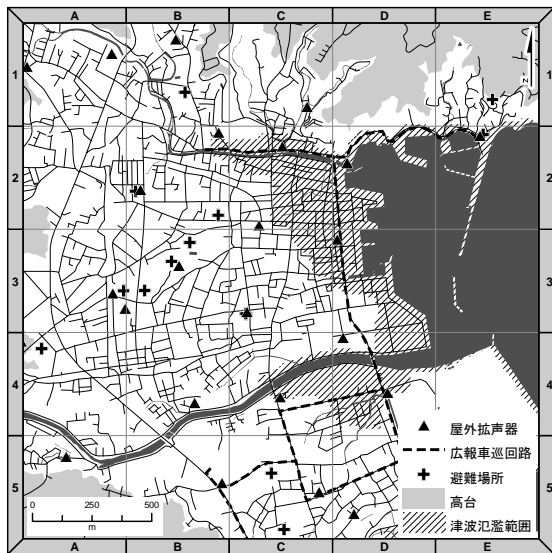


図-9 防災施設と氾濫範囲

表-3 パラメーター一覧

項目	設定値	
住民	社会状態	災害時
	歩行速度	80m/分
	電話の利用	利用しない
	避難タイミング	情報取得後 平均10.9分 標準偏差8.4分
	避難先	最寄の避難場所
屋外拡声器	音声到達範囲	250m
	聴取率	30%
	伝達タイミング	地震後9分
広報車	音声到達範囲	100m
	聴取率	40%
	移動速度	20km/h
	出発タイミング	地震後9分
マスメディア	視聴率	60%
	伝達タイミング	地震後10分
津波	想定規模	東南海・南海連動型

情報が伝達される状況を設定した。

次に、津波災害時の一時避難場所として、24箇所存在する指定避難場所と標高30m以上の高台を避難場所として設定した。また、二回目の地震時の避難実態調査¹⁹⁾によると、後述する想定津波の氾濫域では高い避難率が得られていることから、避難勧告を取得した全住民が避難すると仮定した。また、情報取得後の避難タイミングは、同調査結果を参考に平均10.9分、標準偏差8.4分の正規分布に従って決定することとした。なお、各住民の避難先は避難開始場所から道路を通り最も早く避難することができる場所を選定することとした。

最後に、災害シナリオとして、中央防災会議が想定している東南海・南海連動型地震を初期条件とした津波氾濫解析の結果を利用することとした。また、2004年12月に発生したスマトラ島沖地震による津波災害時の映像でもみられたように、津波は非常に大きな流体力を持つこ

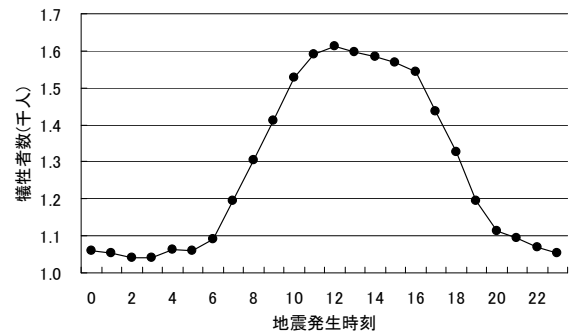


図-10 時刻別の津波による犠牲者数

とに加えて、遡上域が内陸部に及ぶ場合は、瓦礫等を巻き込みながら氾濫するという特徴を持つ。したがって、例えば浸水深が低くても被害が発生する可能性が高いと考え、ここでは、避難前、または避難中の住民が津波の氾濫域と重なった場合に犠牲者として判定することとした。なお、地震による直接的な被害については本検討では考慮しない。

b) 津波の時間帯別の犠牲者数

津波が発生する時間帯別の犠牲者数を把握するため、地震の発生時刻を0時から23時まで1時間ずつ変化させたシミュレーションを実施した。このシミュレーションでは、地震発生時刻になるまでは、前節と同様な日常的な住民の行動が表現される。そして地震発生後は、前項で設定した条件に沿って、避難勧告の伝達や勧告を聞いた住民の避難行動、そして、津波の氾濫状況が表現されることとなる。なお、シミュレーションで乱数を使用することによる結果のばらつきを除去するため、犠牲者数は、20回の計算結果による平均値を利用している。

図-10は、各正時に東南海・南海地震が発生し津波が襲来した場合の犠牲者数の推計結果を示したものである。これによると、夜間に津波が発生した場合の犠牲者数が1,000人強であるのに対して、昼間に発生した場合の犠牲者数は、正午に近づくにつれて増加し、最大で1,600人を超える犠牲者が発生している。以上から、今回の想定では、時刻によって人口分布が変化することによって、夜間よりも昼間に津波が発生した場合の方が最大で500人程度の犠牲者数が増加するという結果となった。

このように、本研究で示した手法を用いることによって、防災対策の検討シナリオとして、発災時刻を考慮することが可能となり、その時間帯における住民の活動状況を考慮した人的被害予測を行うことが可能となる。

c) 避難時の帰宅行動による被害への影響

過去に大津波を幾度となく経験している三陸地方では、「津波てんでんこ」という言葉が言い伝えられている。この言葉は、家族と離れている状況においてもかまわずに一目散に逃げなければ助からないという津波災害時の迅速な避難の重要性を訴えるものである。しかし、近年に実施さ

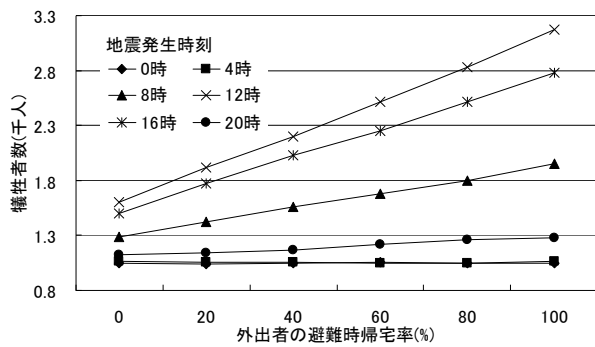


図-11 避難時帰宅率毎の犠牲者数の変化

れた津波を想定した住民の避難実態調査²⁰⁾によると、地震発生後に海の様子を見に行くといった危険な行動をとる住民も多くみられる。また、洪水災害の事例^{16), 17)}では、避難時には家族間の連携行動が行われる状況が多くみられ、避難を行う前に自宅に戻ったりする行動もみられる。そこで、ここではこのような住民の避難時の行動が人的被害規模にどのような影響を与えるのか把握するためのシミュレーションを実施した。この計算では、避難勧告を入手した時点で住民が外出していた場合、避難場所に向かう前に一旦自宅に戻り、その後避難場所に向かう割合(以降、帰宅率と呼ぶ)を操作変数として設け、この値を0%から100%まで20%ずつ変化させることによってその影響を把握する。なお、地震により道路閉塞などが起こっている状況を想定し、自宅へは全員が徒歩で移動する状況を設定した。

図-11は、地震の発生時刻を0時から20時まで4時間ずつ変化した場合のシミュレーション結果をまとめたものである。この結果によると、在宅率の高い0時、4時、20時などでは、外出者そのものが少なく、帰宅率の違いによる犠牲者数の変化はあまりみられないが、8時の場合では帰宅率が40%、80%と増加するにつれて犠牲者数が1,600人、1,800人と増加し、帰宅率が100%になると1,900人と外出している全ての住民が外出先から直接避難した場合と比較して、600人程度犠牲者が増加する結果となった。この傾向は、外出率が高くなる時間帯では更に顕著となり、16時では帰宅率100%で1,300人の増加、12時では、1,600人増加する結果となっている。なお、この犠牲者数の増加は、自宅に戻る行動によって避難場所への到達時刻が遅延することが大きな要因であるが、津波を発生させずに避難行動だけを帰宅率0%と100%で比較すると、避難が完了するまでに要する全住民の平均時間は、8時の場合で2.4分の増加、16時の場合は4.4分の増加、そして、12時の場合は5.8分の増加となっている。津波氾濫域となる沿岸部の周辺には避難場所が存在しないため、この付近の住民は更に避難タイミングが遅れることによってこのような犠牲者数の変化が発生する結果となっている。

7. おわりに

被災シナリオは、災害の発生時刻とその時の都市の活動状況に応じて大きく変化する。したがって、的確な地域防災計画を策定するためには、都市の活動状況までを考慮した総合的な検討が当然求められる。本研究では、この課題へ対応するため、平常時における都市アクティビティの表現や、その下での被災シナリオの表現プロセスについて検討した。そして、災害総合シナリオ・シミュレータをベースに実際にこのプロセスに基づいたシナリオ分析を実施することを可能とした。

本研究では、単純な適用事例を示すことに留まっているが、本モデルは、住民個々の生活行動によって構成される社会全体の活動状況や地域の地理的な特性をベースに被災時の地域状況を表現するという特徴を有していることから、個人の属性や時刻に応じて変化するその空間的な分布状況を把握することによって初めて検討が可能となる。以下のような検討事項について適用可能であると考えている。

- ・時間帯別の人口分布を考慮したピンポイントな情報伝達戦略や避難戦略の検討
 - ・地震発生時の在宅者と家屋倒壊を考慮した被害推計
 - ・学校や地域組織など、時間帯に応じて変化する住民組織を考慮した避難計画の立案
 - ・高齢者や障害者の分布を考慮した災害弱者の避難問題
 - ・災害時における自動車を利用した避難行動の影響分析
- 今後は、地域防災計画の策定における具体的な問題に対する適用方法の検討や追加すべき機能の検討など、本シミュレータの実用化に向けたさらなる研究開発を推進する予定である。

また、本研究では、三重県尾鷲市を対象にテストケースを実施し、交通量の実測値との比較からその再現性を検証している。しかし、人口構成の再現や生活行動の表現については独自の簡略的な手法を用いていることや発生交通量の設定に一部問題があるなど、パラメータの妥当性や住民分布の再現性についての改善や検証、また、他地域への適用性の検証などの課題が残されている。これらの課題は、本研究の成果である人的被害想定プロセス全体を構成する要素技術に対する課題として位置づけられており、個々の要素に関する研究成果を取り込むことによって改善していくことが必要と考えている。

謝辞：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。

参考文献

- 1) 静岡県：第3次地震被害想定結果，2001。

- 2) 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，2005.
- 3) 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.
- 4) 消防庁：阪神・淡路大震災の記録 第1巻，ぎょうせい，1996.
- 5) 北村隆一：交通需要予測の課題：次世代手法の構築に向けて，土木学会論文集，No. 530/IV-30. pp. 17-30, 1996.
- 6) 藤井聡，大塚祐一郎，北村隆一，門間俊幸：時間的空間的制約を考慮した生活行動軌跡を再現するための行動シミュレーションの構築，土木計画学研究・論文集，No. 14, pp. 643-652, 1997.
- 7) Hagerstrand, T.: What about People in Regional Science? *Papers of the Regional Science Association*, 24, pp. 7-21, 1970.
- 8) 飯田祐三，岩辺路由，菊池輝，北村隆一，佐々木邦明，白水靖郎，中川大，波床正敏，藤井聡，森川高行，山本俊行：マイクロシミュレーションアプローチによる都市交通計画のための交通需要予測システムの提案，土木計画学研究・論文集，No. 17, pp. 841-847, 2000.
- 9) 菊池輝，小畑篤史，藤井聡，北村隆一：GISを用いた交通機関・目的地点選択モデル：ゾーンシステムから座標システムへの地理空間表現手法の移行に向けて，土木計画学研究・論文集，No. 17, pp. 605-611, 2000.
- 10) 菊池輝，藤井聡，北村隆一：GISと生活行動シミュレータPCATSを利用した消防防災拠点の評価，土木計画学研究・論文集，No. 19(1), pp. 313-320, 2002.
- 11) 中野敦，本田武志：都市における時刻別地域別人口分布と震災被害に関する研究—PT調査データの分析に基づいて—，阪神・淡路大震災土木計画学調査研究論文集，pp. 75-82, 1997.
- 12) 神崎幸康，萩原良巳：高齢者の生活行動を考慮した減災計画のための基礎的研究，土木学会年次学術講演概要，pp. 482-483, 2001.
- 13) 文部科学省 研究開発局，独立行政法人 防災科学技術研究所：大都市大震災軽減化特別プロジェクト 平成15年度 成果報告書，III-1, pp. 59-98, 2004.
- 14) 例えば，堀口良太：交通運用策評価のための街路網交通シミュレーションモデルの開発，東京大学学位論文，1996.
- 15) 例えば，坂本邦宏，久保田尚，門司隆明：地区交通計画評価のための交通シミュレーションシステムtiss-NETの開発，土木計画学研究・論文集，No. 16, pp. 845-854, 1999.
- 16) 及川康，片田敏孝，浅田純作，岡島大介：洪水避難時における世帯行動特性と世帯員の役割分担に関する研究，土木学会水工学論文集，第44巻，pp. 319-324, 2000.
- 17) 片田敏孝，金井昌信，吉岡琢郎：新潟豪雨災害にみる住民の世帯員間連携行動に関する研究，土木計画学研究講演論文集，No. 31, CD-ROM, 2005.
- 18) 中京都市圏総合都市交通計画協議会：第4回パーソントリップ調査（平成13年調査）人の動きからみる中京都市圏のいま，2003.
- 19) 桑沢敬行，金井昌信，細井教平，片田敏孝：津波避難の意思決定構造を考慮した防災教育効果の検討，土木計画学研究・論文集，Vol. 23, No. 4, pp. 345-354, 2006.
- 20) 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年宮城県沖の地震・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.

(2006. 9. 26 受付)

STUDY OF CASUALTY ESTIMATION METHOD DUE TO THE TSUNAMI THAT CONSIDERS RESIDENT'S ACTIVITIES DURING NORMAL CIRCUMSTANCES AND DURING A DISASTER

Toshitaka KATADA, Noriyuki KUWASAWA and Masanobu KANAI

The extent of damage due to a disaster depend greatly on resident's situation at the onset of a disaster. Therefore, it is critical to consider resident's activities during normal circumstances in order to execute practical damage assessment. The purpose of this study is to examine the procedures involve in undertaking a damage assessment by considering resident's activities both before and during a disaster. This simulator has the ability to integrate residents demographic data along with various activities being undertaken in order to produce various disaster scenarios. In that regard, the simulator would be an effective tool for effective disaster mitigation since it has the ability to simulate multiple real-life scenarios.