

地域ごとの津波避難計画策定を支援する 津波避難評価システムの開発

畑山 満則^{1,a)} 中居 楓子² 矢守 克也¹

受付日 2013年8月20日, 採録日 2014年2月14日

概要: 2011年に発生した東日本大震災は、人的・物的に甚大な被害をもたらした。防災対策は新たな転換を求められ、「減災」という考え方に基づいた施策、とりわけ避難を中心とした命を守る対策が重要視されるようになっていく。本研究では、南海トラフ巨大地震にともない34mの津波高が想定されている高知県黒潮町万行地区を対象に、エージェントシミュレーションを含む情報システムを取り入れた津波避難計画を構築してきた。本システムは、地区全体だけでなく、個人が自分自身の命を守る避難行動を計画するまで支援することを目的としている点の特徴である。本稿では、システムが果たした役割について、これまでの一連の取り組みを通して明らかになったことを述べる。

キーワード: 避難, 津波, エージェントシミュレーション, 減災

Tsunami Evacuation Evaluation System for Plan Development of Community Based Evacuation

MICHINORI HATAYAMA^{1,a)} FUKO NAKAI² KATSUYA YAMORI¹

Received: August 20, 2013, Accepted: February 14, 2014

Abstract: After Great East Japan Earthquake, the importance of effective evacuation planning is pointed out from the viewpoint of disaster mitigation and protection of people's lives. This research focuses on Mangyo area, Kuroshio, Kouchi which has a huge tsunami risk with Nankai Trough Quake. We make tsunami evacuation evaluation system to support evacuation planning. The feature of this system is for not only whole area, but also support to make their refuge plan that residents follow their lives. In this paper, we discuss about action of system introduction.

Keywords: evacuation, Tsunami, agent based simulation, disaster mitigation

1. はじめに

2011年に発生した東日本大震災は、人的・物的に甚大な被害をもたらした。この震災発生以前に、宮城県沖で津波をともなうプレート型地震の発生する確率は30年以内で99%と試算され、その被害想定がなされていたものの、想

定を大きく上回る被害が発生したことで、防災の基本的な考え方からの見直しが求められている。

日本の国家レベルにおいては、津波対策のための想定津波の考え方が再検討されている。再検討に際して、近代で最大(100年で1回程度の発生確率)に相当するレベル1津波と最大級(1000年に1回程度の発生確率)のレベル2津波の考え方が中央防災会議より示されたが、特にレベル2津波に対しては、ハード整備による対策では対応しきれないことが確認されている。このため、あらかじめ被害の発生を想定した上で、その被害を低減させていこうとする「減災」の考え方に基づいた施策を具現化していくことの重要性が指摘されており、とりわけ避難を中心とした命を

¹ 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University,
Uji, Kyoto 611-0011, Japan

² 京都大学情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University, Kyoto
606-8501, Japan

^{a)} hatayama@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

守る対策が重要視されるようになっていく。

東日本大震災の教訓に鑑み、巨大地震と津波による広域な被害の発生が指摘される南海トラフを対象とした新想定が2013年5月に内閣府中央防災会議より発表され、関東から四国にかけての広範囲で、強い揺れと巨大な津波が想定されることとなった[1]。また、内閣府が示した南海トラフ巨大地震対策においては、住民や企業、NPOなどの主体的な参加・連携による地域の総合的な防災力の向上が不可欠であると指摘されている。

一方、命を守る対策は、非常に社会的な要求の高い課題でありながら、自治体のみでは十分な実現に及ばない可能性がきわめて高いことに着目しなければならない。特に、最後に命を守るのは住民自身の行動によることから、住民参加型の対策検討が求められている。しかしながら、住民には、レベル1津波、レベル2津波の考え方が浸透しておらず、新想定レベル2津波の大きさに、避難を諦めてしまう人も多い。このような人（避難放棄者）は、レベル1津波でも、避難行動をとらない可能性が高く、それゆえに被害にあう可能性が高まることも指摘されている。このような避難放棄者を出さないためには、困難をともなう避難の問題について、どのような状況であっても、対象となる住民1人1人が取りうる最良の手段を判断し、選択できるようになる必要がある。そこで、本研究ではこのような困難をともなう住民避難の問題について、住民1人1人が逃げることができる可能性のある具体的な対策を、地域ぐるみで検討することを支援することを目的とし、エージェント技法による避難シミュレーション（以下、エージェントシミュレーションと記す）を取り入れた情報システムの構築を行った。また、避難時の不安要素となる検討事項に対して、シミュレーション結果から分析し、問題点を回避すべく検討された実現可能性の高い対策案を提示し、それをシミュレーションシステムにより評価することを試みた。

2. 研究背景

2.1 地域ごとの津波避難計画

津波避難計画は、原則として災害に対処し避難勧告などを発する権限を有する市町村が策定すべきものである。しかし、実際に避難行動をとるのは地域住民であるため、各々の地域の状況に応じた具体的な地域ごとの津波避難計画も策定する必要がある。東日本大震災の経験を経て消防庁によりまとめられた報告書[2]では、特に地域ごとの津波避難計画策定による住民など1人1人の迅速かつ主体的な避難行動の重要性が強調されており、地域ごとの津波避難計画策定にあたり住民参加型のワークショップ形式が推奨されている。このワークショップでは、①津波の危険性の理解を深める、②津波からいかに避難するかを考える、③避難訓練で検証する、④今後の津波対策を考える-アクションプランの検討という流れで避難計画策定が行われるが、

とりわけ②の段階において、避難のイメージを膨らませることが難しく、その後のステップに進んでいくことが困難になるケースがみられる。特に、南海トラフ巨大地震に関する新想定では、従来の科学的根拠のある資料のみをもとにした分析から、古文書など、これまでは分析対象としなかった資料までも対象とした分析がなされたため、これまでに経験したことのない津波高が報告された地域が多く存在する。これらの地域では、津波高の数値に圧倒され、あきらめの感情が地域住民に広がってしまい、避難への関心が失われてしまう場合が多くみられる。このような場合には、当事者である住民個人の憂慮すべき事項を丁寧に拾い上げ、それらに対する対策とその効果を、当事者自身が想像できるように工夫する必要がある。これにより、不安材料を一つ一つ消していくことで、命を守るイメージができれば、③での訓練の価値が理解でき、④でのアクションプランにつながっていくと考えられる。

2.2 避難計画策定に関する先行研究

避難計画に関わる問題を考える際、マルチエージェントシミュレーションを利用した研究が数多くある。マルチエージェントシミュレーションはシステム全体の挙動を支配方程式で規定するトップダウン的なアプローチとは異なり、社会などの複雑な系に対し、ミクロレベルのインタラクションからボトムアップに全体の現象を観察することができるという利点がある。しかし、それらの多くは行政の計画や意思決定を支援するものであり、住民1人1人が本当に逃げることができる、より具体的な対策を地域ぐるみで検討することを支援する本研究とは目的が異なる。

たとえば、渡辺ら[3]は、マルチエージェントシミュレーションにより津波避難行動をモデル化し、防災に関する6つのシナリオを想定して、それらの効果を評価している。アンケートの回答から得られたデータをもとに避難のタイミングを各エージェントに与え、現状のまま・地震発生後3分後に津波警報が発令された場合・避難呼びかけ者がいた場合・広報車による避難勧告があった場合・それらを組み合わせた場合を想定した6つのケースを設定し、避難成功者数に着目して評価を行っている。しかしながら、この研究は、市町村が策定する避難計画を支援するものであり、地域ごとの避難計画において重要な個人の避難行動に関する部分まで踏み込んでいるわけではないという点で本研究とは異なる。

桑沢ら[4]は、災害情報の伝達状況や住民避難、そして洪水氾濫といった水害時における一連の地域状況を総合的に表現するシナリオ・シミュレータを構築している。住民自らの意識や知識の向上を促進する効果的な防災教育が重要であるという認識をもとにしているという点で本研究の目的とは近いものがある。避難行動シミュレーションモデルは、表現する要素の最小単位となる住民ごとに避難速度、

避難開始時刻、避難先を設定することが可能であり、各住民が指定した時刻になると自宅から避難先に向けて一定の速度で避難する状況が表現される。また、シミュレータによる分析結果は、防災講演会において防災教育コンテンツとして活用されている。防災教育を目的としているという点は本研究と同じであるが、主に情報伝達などを普遍化して扱っており、地域特有の避難の問題点を取り扱っているわけではないという点で本研究とは異なる。

著者らは、桑沢らと同様に、避難を避難開始時刻、避難開始位置、避難速度、避難先を設定することで、水害時の行政界を超える広域避難について、エージェントシミュレーションを用いて評価しており、対象地域にある1つの避難所のみならずすべての住民が避難するのではなく、集落ごとに分割して、適切な行き先を設定することで、全体の避難時間が短縮できることを示している [5]。しかしながら、この研究では、配布形式のアンケートによりパラメータを推定し、シミュレーションを行っているものの、分析結果としてもたらされた避難行動は、住民に還元されておらず、実行性について検討の余地を残している。

3. 津波避難評価システムの構築

3.1 提案する津波避難評価システム

これまで行われている先行研究では、地域ごとの避難計画策定の支援という課題に十分にこたえられるシステムが提案されているとはいえない。多くのシミュレーションでは、最終的に避難できる人の割合がどの程度なのか、もしくは、対策を講ずることにより避難できる人がどの程度増えるのかについての結果のみを示しているが、エージェントシミュレーションでは、この結果は再現性がなく、エージェントの設計に大きく依存することから、この結果をどのようにとらえるべきかについては設計者の解説が必要となる。しかしながら、従来型の計画策定プロセスにおいては、この結果は専門家の分析結果として扱われ、地域住民に対して十分な説明が行われていないのが現状である。住民参加型のワークショップ形式での計画策定プロセスにおいては、このような結果の捉え方を避難行動の主体である参加者が理解した上で、計画に反映していく必要がある。

そこで、本研究では、シミュレーション結果を数値だけでなく、避難行動を示すアニメーションとして提供し、避難行動のプロセスを参加者間で共有することで、実行性の高い地域ごとの津波避難計画の策定につなげることを提案する。エージェントシミュレーションはボトムアップに係全体の挙動を観察することが可能であるため、避難の際に起こる様々なプロセスから課題を発見することに役立つ。

避難行動に対しては、現状の認識と何らかの対策を講じた場合を比較することで評価する方式とする。ただし、上記に述べたように、その結果の数値だけを比較するのではなく、プロセスを見て、その原因を探ることまでを行い、行

動を評価するものとする。対策シナリオは、様々なものが考えられるが、本研究では、地域住民自身が避難のことを考えた際に不安に感じることや、津波避難に関する意識の調査をする中で問題と感じた事項をあらかじめ「検討すべき課題」として抽出し、そこに着眼点をおいてシミュレーションを実行し、分析と考察を行うものとする。現実の地域社会から抽出した課題をシミュレーションに落として検証する方法は、より現実に即した問題を押さえることが可能であるため、本研究の重要な点である。以下に津波避難評価システムの導入の一連の流れを示す (図 1)。

3.2 システム構成

津波避難評価システムは、避難プロセスを可視化し、シナリオベースで提案される対策を、最終的な避難可能人数だけでなく、そのプロセスまでを含めて評価するシステムでなければならない。そこで、システムは、場の設定、シミュレーション結果の管理、時系列での可視化が可能な地理情報システムと、マルチエージェントシミュレータを図 2 のように組み合わせたシステムとして設計した。地理情報システムには、時空間情報管理が可能な京都大学防災研究所のライセンスする DiMSIS [6] を、エージェントシミュレータには、構造計画研究所の提供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 Artisoac [7] を用いている。



図 1 津波避難評価システムの導入の一連の流れ
Fig. 1 Introduction of Tsunami evacuation evaluation system.

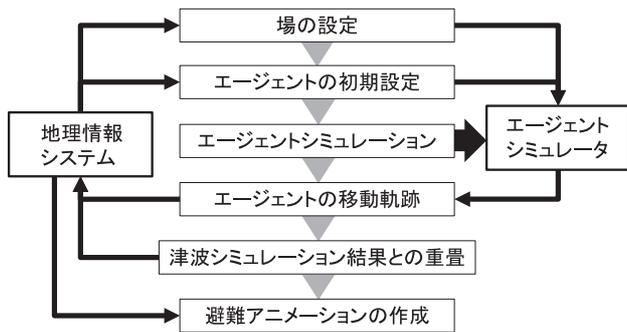


図 2 津波避難評価システムの構成

Fig. 2 Construction of Tsunami evacuation evaluation system.

対策シナリオについては、場の設定とエージェントの初期設定により実現するものとする。また特に、注目すべきポイントについては、地理情報システムにおいて強調表示するデータを作成し、これを含む形でアニメーションを作成することで対応することとした。

3.3 基盤となるデータ

ベースマップとして、国土地理院が提供する 1:2500 の基盤地図情報 [8] を利用する。この基盤地図情報は、境界を示す「行政区画境界線」、「町字境界線」、道路関連の情報である「道路線」、「道路構成線」、鉄道関連の情報である「軌道の中心線」、建物関連の情報である「建築物」、「建築物の外周線」、水に関連する情報である「海岸線」、「水域」、「水涯線」、「水部構造物線」から構成されているが、このうち避難経路領域の作成のため「道路線」、住居領域として「建物」を用いた（その他の情報は可視化時の背景として利用）。

避難経路は、道路線を境界とする領域を、交差点部分と交差点間を結ぶ移動経路部分に分割することで面領域として作成した。さらに、エージェントシミュレータとの親和性を考え、分割された領域内に、50 cm ピッチで代表点を設けることでラスタデータとして利用できるようにした。交差点部分の代表点には、その交差点を示すノード番号を与えている。移動経路部分は、移動経路領域内を次の交差点に向けて移動できるように代表点に属性情報を与えている。経路を表すリンク番号を与え、経路につながる交差点のうち、小さいノード番号を持つ交差点を始点、大きい番号を持つものを終点として方向をつける。領域を、道路線を含む三角形に分割し、道路線を上記でつけた正方向に向かうときの角度を属性とする（図 3）。建物やブロック塀などの倒壊による道路閉塞は、これら交差点や経路を表す代表点を削除することで表現することができる。

また、各ノードで最終目的地となるノードを指定すると、次に目指すべきノードを教示できるようにデータを整備した。この際には経路は最短経路探索アルゴリズムによってもたらされるものとした（住民が使う避難経路は、機械的な最短経路とならない場合もあるため、必要に応じて修正

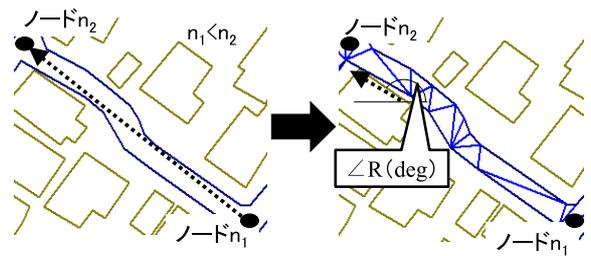


図 3 経路部分の属性値
Fig. 3 Attribute of link data.

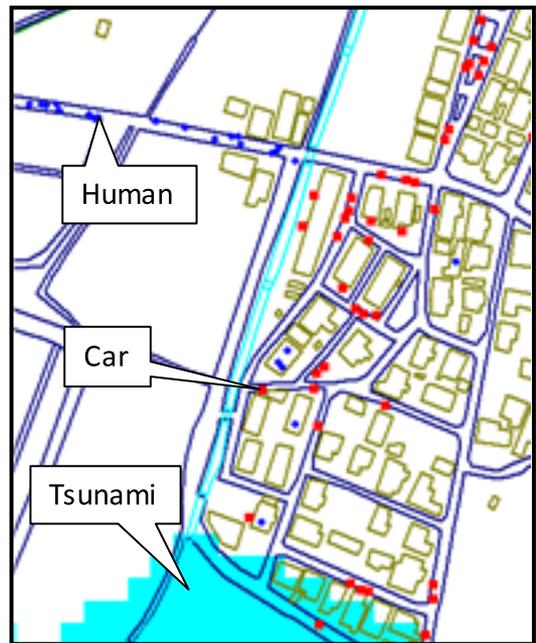


図 4 シミュレーションイメージ
Fig. 4 Simulation image.

する必要がある)。

津波シミュレーション結果は、エージェントシミュレーションの空間スケール、時間スケールに合わせてダウンスケーリングしたもの準備する必要がある。

3.4 エージェントの設計

住民、車をエージェントとして、下記のように設計した（図 4 にシミュレーション結果を GIS 上に展開したイメージを示す）。シミュレーションは、1step を 0.5 秒とし、すべてのエージェントが避難先に到達するまで行うこととした。

(1) 住民 (Human) エージェント

住民は、1 エージェントが 1 人を示すものとし、以下の属性を持つものとした。

- 位置情報
- 避難先 (ノード番号)
- 年齢
- 家族関係
- 避難速度

国土交通省が東日本大震災における津波避難者からの聞き取り調査によって判明した速度 [9]などを参考に設定する。

- 住居の耐震性
- 避難開始までにかかる時間
- 住居から出たときの道路上位置（玄関位置）
避難開始の際に住居から出る位置。玄関の場所によりどの経路上もしくは交差点上に出るかが変わる。
- 初期の方向
経路に与えられた方向角に対して、順方向（+）に行くか、逆方向（-）に行くか。
- 車を利用するか、否か

また、これらの属性を基にして、以下のように振る舞うように設計した。

i) 経路上のみを移動する

経路以外にも通過できる可能性がある場所（公園など）は存在するが、今回は経路上のみを移動する。

ii) 経路上でも障害物があれば回避する

路上駐車などの障害物が存在すれば、回避行動をとる。

iii) 進行方向にエージェントが存在すれば回避する

進行方向に移動速度の遅いエージェントがいたり、別の避難先に向かうエージェントとすれ違ったりする場合には回避行動をとる。

iv) 車に乗った場合は、車エージェントの動きに従う

(2) 車 (Car) エージェント

車は、1台を1エージェントとし、以下の属性を持つ。

- 位置情報
- 形 (1.5m × 3.5m, 軽トラックのサイズとする)
- ドライバー (車に最初に乗った住民)
- 定員
- 行き先 (ドライバーの避難先を行き先とする)
- 速度

また、これらの属性をもとにして、以下のように振る舞うように設計した。

i) ドライバーが乗り、一定時間待ってから発車

時間はシミュレーションごとに設定する。

ii) 車は幅が確保されないと通行しない

車の大きさに対し、その幅の中に人や障害物がない場合に進む。

iii) 動けなくなったら、ドライバーは車を降りる

一定時間車が動けないときは、車を乗り捨て、徒歩で逃げ始める。

4. 高知県黒潮町万行地区への適用

4.1 研究対象地域について

本研究では、南海トラフ巨大地震にともなう津波リスクが指摘されている高知県黒潮町万行地区 (図 5) を対象とする。

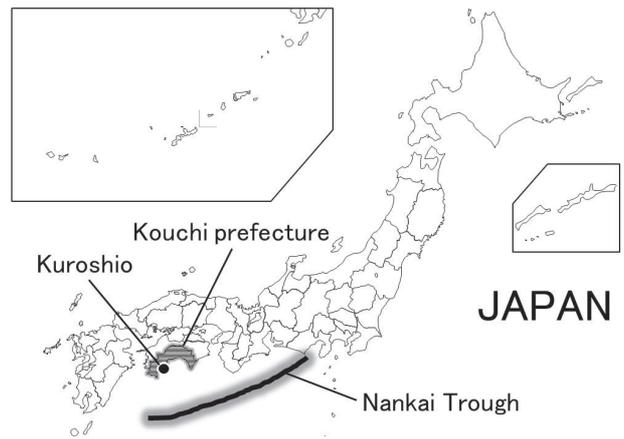


図 5 対象地域 (高知県黒潮町) の位置
Fig. 5 Target area (Kuroshio-cho, Kochi Pref.).

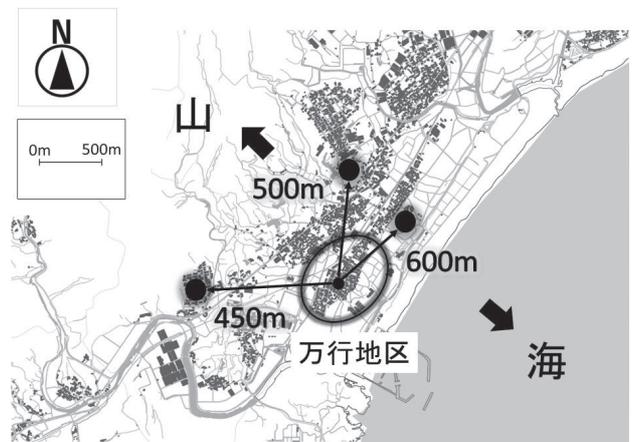


図 6 黒潮町万行地区の周辺地図
Fig. 6 Map of Mangyo Area in Kuroshio-cho.

高知県の四国紀伊半島の南岸沖の太平洋の海域には 100 年前後の間隔で「南海地震」と呼ばれる海溝型の巨大地震が起きている。その最古の記録は「日本書紀」に記された 684 年の「白鳳南海地震」であるが、それ以来最近の「昭和 21 年南海地震」までの間には 8 回の南海地震の記録が残っている。昭和 21 年南海地震は 1946 年 12 月 21 日の午前 4 時すぎに発生し、その後 4~6m の津波が黒潮町の万行地区周辺にも到達している。

2012 年 8 月 29 日に内閣府が発表した南海トラフ巨大地震による最大クラスの津波の被害において、黒潮町は 34.4m という最も高い津波高で注目されることとなった。これを受けて、「逃げて無駄」という諦めを持つ住民も少なくないが、町では津波対策の検討が精力的に進められている。たとえば、町内約 4,600 世帯それぞれがワークショップ形式で避難ルートなどを記す「津波避難カルテ」の作成や、職員 210 人を全集落に配置し、防災組織の強化や地域ごとの防災計画の作成を促進する「地域担当制」の導入などの取り組みがあげられる。

本研究で対象とする万行地区 (図 6) は、人口約 600 人、約 250 世帯が暮らしており、中心部から海までの距離が

500 m 程度の海沿いの地区で、近傍に高台がなく、最も近い高台までは健常者の歩行速度であっても 20 分近くはかかるため、避難が困難な地域である。地区の中心に数年前に建てられた津波避難タワーは高さ 12m で、100 人が収容できるが、南海トラフ巨大地震による被害想定（第二次報告）では 14m の津波が想定されたことから、新たにさらに高いタワーの建設が計画されている。また、高齢化による避難困難者の増加や、耐震診断・耐震補強の未実施などのソフト面の課題も多く指摘されており、対策は急務である。

4.2 社会調査の実施

本研究では、シミュレーションにおける属性値を推定すること第 1 目的として、対象地域の住民を対象とした社会調査を行った。調査は、2012 年 11 月 21 日から 2013 年 4 月 18 日までの期間に、累積して約 1 カ月、6 回に分けて行われた。地域の方の同行のもと万行地区の各戸を訪問し、20 歳以上の住民を対象に個別面接調査法で行った。アンケートの回答数は、アンケート不可能の 8 世帯を除く 251 世帯すべてから回答を得ている。また、回答者個人の人数では、アンケート不可能者を除いた 20 歳以上人口 472 人中 296 人で、62.7%にあたる（調査の母数としてはアンケートによる人口・世帯数を用いた）。ここでは、シミュレーションに利用した調査項目について示す。

① 津波の際の避難場所について

津波の際に避難する場所、その避難場所を選んだ理由、避難する上での不安、新しく建設予定の避難タワー（想定津波以上の高さ）が完成したら避難するか否か。

② フェイス項目

氏名、住所、電話番号、性別、年齢、職業、主な職場の位置、避難に介助が必要か否か、同居する家族構成、家族の性別、年齢、職業、主な職場の位置、避難に介助が必要か否か。

③ 日常の行動

日中と夜間主にいる場所

④ 避難方法について

避難手段（徒歩、自転車、バイク、車から選択）、その避難手段を選んだ理由、自宅から避難場所までの所要時間、山まで逃げる場合の避難手段

⑤ 避難行動について

地震が起きてから避難を始めるまでにしなければならないこと、避難を始めるまでに何分くらいかかるか、助けに行きたい人がいるか（いる場合は氏名、住所を聞く）

⑥ 住宅について

築年数、耐震診断や補強、家具の固定の有無

⑦ 昭和の南海地震について覚えていること

経験者のみ回答

⑧ 防災対策について

命を守るために地域で必要と思われる防災対策

⑨ 地区の魅力、最近元気がないと感じるどころ

⑩ 調査員の所感

4.3 シミュレーションでのパラメータ設定

上記の社会調査と現地での調査結果より得られたシミュレーションパラメータとその詳細度について以下に示す（住民に対する調査結果の詳細については参考文献 [10] を参照のこと）。

(1) 住民 (Human) エージェント

● 位置情報

夜間を想定し、初期位置は住居内とした。夜間人口の位置は、行政と連携している場合は、住民票をベースにするが、住民票と居住実態は必ずしも一致しないことが分かっている。また、行政と連携していない場合は、住宅地図と公開されている人口構成の統計データを利用することが多いが、前者は表札による情報のため実態を示しておらず、世帯構成も後者からの推定となる。本手法ではこれらの誤差が大きく影響するマイクロシミュレーションであるため、すべて住民からの聞き取りで同定した。従来に比べ非常に難易度の高い同定方法を取っている。

● 避難先 (ノード番号)

調査において回答のあった避難先のうち、避難タワー（地区内）、あかつき館（地区外、避難タワーの機能を持つ）、町民館（地区内）、錦野（地区北部の高台、指定避難所の入野小学校がある）、芝（地区北部の高台）、自宅の 2 階（逃げないも含む）、児童館、松原の中（地区内で少し高い地域、昭和南海地震時には津波を避けることができた）のどれかが割り振られた。緑野（地区北西部の高台）、向山（地区南西部の高台）は、津波が遡上してくる方向となる（つまり、津波に向かって避難していくことになる）ため、逃げて途中で芝に目標を変えると想定し、芝に設定した。避難タワーは、現在、町が建設を検討している新しいものを想定し、それができたらタワーに逃げたいという意見の人はすべてタワーへの避難するものと設定している。避難先の位置関係について図 7 に示す。避難先については、個別の

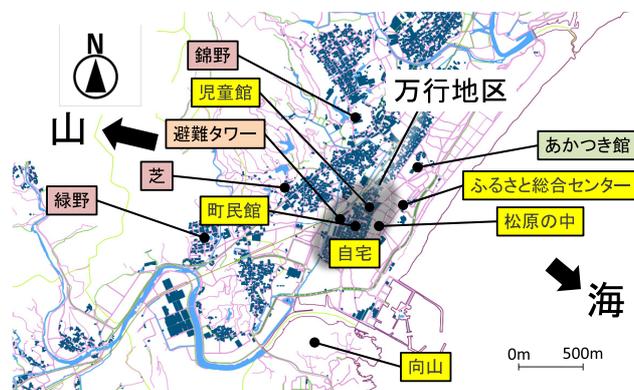


図 7 避難先の位置

Fig. 7 Location of evacuation spots.

調査が行えない場合は、行政が指定している避難区域と避難場所の組み合わせで同定するが、住民の考え方に大きく依存する項目であるため、今回は聞き取り調査により同定している。従来に比べ非常に難易度の高い同定方法を取っている。

- 避難速度

国土交通省が東日本大震災における津波避難者からの聞き取り調査によって判明した速度（10歳以上70歳未満の人の平均速度は時速2.65km、10歳未満や70歳以上の人は時速1.88km、子どもや高齢者と一緒に逃げる場合は時速1.96km）に合わせて設定した。また、世帯は基本的に同じ速度で動くこととする。移動速度に関しては、本人の自己申告や、平常時の速度のみでは同定できない。上記の値は、東日本大震災時に生き残ることができた人の情報であるため、ある意味、努力目標となっているといえる。この値が、平均値となるようにし、(健常者の平常時の平均速度 [2]: 3.6 m/s) > (10歳以上70歳未満の人) > (子どもや高齢者を含むグループ) > (10歳未満や70歳以上の人) の関係が崩れないように、速度を割り付けている。割り付ける際には、自己申告の速度や行動の不自由さを参考にした。シミュレーションでは、道路の閉塞による避難者の集中によって、部分的には設定した速度よりも遅くなることになるため、人の相互干渉という意味では、現実により近い想定になっていると考えている。シミュレーションを見てもらうことにより個人レベルでのフィードバックがかかれば、さらに精度の高い情報となる可能性がある。

- 住居の耐震性

南海トラフ巨大地震の想定では、対象地域は震度7が想定されており、耐震性の低い建物では倒壊の危険性が高い。耐震性の低い建物（1981年（昭和56年：新耐震基準の施行年）以前に建てられた木造住宅で、耐震補強していない）の近くの道路は、建物倒壊による道路閉塞を考慮した。行政は、固定資産情報として建築年、建物構造に関する情報を保有しているが、耐震補強の有無については詳細な情報を持っていない（補助金を出している市町村では、補助金申請された建物の状態のみ保有している）。今回は、調査で各戸の状態を聞いており、これをもとに推定を行っている。しかし、想定する地震動と地盤の状態などを考慮した詳細な倒壊シミュレーションは行っていない。

- 避難開始までにかかる時間

耐震性の低い建物にいる人には建物倒壊を想定し、一律で待ち時間を設定した。耐震性の高い建物に住んでいる人は、地震の揺れにより動作ができない時間を3分（揺れが収まるまで2分と体制を整えるのに1分と想定）とし、さらに、耐震性の低い建物に住んでいる人は、建物倒壊の可能性を考慮して、動き出すまでにさらに10分を追加している（この設定は、すべての人が、避難の意識をあげ、事前準備をしている状態を示している。当初は準備期間をさ

らに10分程度見込んでいたが、22分で津波が到達する地域のため、この設定ではほとんどの人が動き出した時点で津波に追いつかれてしまう。そこで、自助努力で解決できる時間は、考慮しない設定とした）。これらの数値は、津波被害のあった東日本大震災や、震度7を記録した阪神・淡路大震災時の被災者から得た値を参考に決めている。しかしながら、これらの災害時には、完全に倒壊した家で下敷きになった人を助け出すためには1時間以上かかった事例も多数報告されている。ここでは、被害は軽微で、1人で助けきれぬ程度の被害と考え、10分としている。また、完全な耐震改修ができなくても、寝室や玄関に至るまでの通路などの部分耐震化や家具固定を施した際には、この時間は5分に低減できると仮定している。これらはいくまで仮定であり、避難行動の努力目標的な意味合いが強い値である。

- 車を利用するか、否か

避難手段として車をあげている人は、近くに車があれば乗り込むようにした。駐車場から車を出すことは難しいことと、対象地区は夜間には路上駐車が多いことを考慮してこのような行動をとるようにした。

(2) 車 (Car) エージェント

- 位置情報

夜間の路上駐車的位置を別途調査し、設定した。調査結果はある日の状態であるが、駐車車両の総数は、別の日でもそれほど変化していないことを確認しており、実態に近い位置情報を示していると考えている。

- 定員

乗用車の平均的な定員で5名とした。軽トラックであれば、現実には荷台にもっとたくさんの人を乗せることも可能であるが、道路交通法に違反するため、今回はこのように設定した。

- 速度

平常時の平均的な速度と災害時の歩行者の量を勘案して、健常者の歩行速度の3倍となる7.95km/hとした。この速度は地区内に平常時に動いている速度の半分程度であるが、道が細いため、道路上に数人の人がいれば、この程度でしか走行できないことは現地で確認した。

(3) 津波シミュレーション

中央防災会議の想定 [1] のうち、黒潮町付近に最大の津波が到達するシナリオに基づいたシミュレーション結果をダウンスケーリングし、京都大学の鈴木助教より提供していただいた。地震発生から23分後に対象地域の南側から津波が来ることが分かる。津波シミュレーションに関しては、東日本大震災時に高さを過小評価していたことが指摘されているが、到達時間はおおむねあっていたことが知られている。本システムでは津波に追いつかれない避難を検討するため、シミュレーションの時間を利用することとした。この地震・津波のシナリオは、その他のシナリオに比

べて対象地域に最も早く津波が到達するものであるため、1つの目標として価値があると考え、設定している。

これらのパラメータは、エージェントの動きにより相互に関連していくため、どれか1項目のパラメータでも現実と大きくかけ離れた値が設定されてしまうと、系全体の安定性を著しく低下させ、結果の信頼性を落とすことになる。今回は、全世界帯に対する社会調査の結果をベースに、過去の災害時に計測された値などを勘案して慎重にパラメータを同定しており、同定されたパラメータの信頼性についても現地調査などでチェックしているため、目的に対して十分信頼できる結果を導出できるパラメータ構成となっていると考えられる。

5. 避難計画策定支援への適用に関する考察

5.1 検討すべき課題の抽出

本研究では、検討すべき課題として、地域住民自身が避難のことを考えた際に不安に感じることや、津波避難に関する意識の調査をする中で、著者らが津波被災地や他地域での防災の取り組みから得た知識と照らし合わせて問題と感じた事項を取り上げている。後者は、特に「住民が無意識のうちに危険と思われる行動を計画しているもの」(一部の住民が「危険である」と気づいており、他の住民が気付いていないといった状況も含む)に相当するものであり、津波発生時に深刻な影響をもたらす可能性がある事項でもある。4.2節に示す社会調査において、得られた情報から、検討すべき課題として以下の5つを設定した。

(a) 地震発生から避難開始までに許される時間

津波到達までの時間が23分程度と限られており、避難先までの距離と徒歩での移動を考えると、地震発生からできるだけ速やかに避難を開始するのが望ましい。しかしながら調査では、避難開始までにかかる時間を20%の人が分からないと回答しており、それ以外の人からも、どの程度猶予時間があるのかを知りたいという意見がみられた。避難先までの距離との関係もあるので、個人レベルで数値目標を持ってもらう必要があると考え、検討事項として取り上げた。

(b) 事前に計画した場所にこだわって避難すべきか否か。

避難場所については、事前に決めている世帯がほとんどであった(297世帯中290世帯)が、実際の災害時には、避難開始の遅れ、避難ルートの状態、避難者の集中、場合によっては自身の怪我などにより避難訓練時のような速さで避難することができない場合もある。過去の事例では事前の計画にとらわれて、被害にあった人もいることから、検討事項として取り上げた。

(c) 避難タワー下にたどり着いた人がタワーに上ることができるのか否か

地区内から高台までは距離があることから、高齢者や足の悪い人は避難タワーに逃げることを考えていることが多

い。地区でも、タワーまでくればなんとかなるという声かけをしており、高齢者がタワーに多く集まる可能性は高い。しかし、タワーは、現状で8m、新想定にともなう新設タワーは14m以上の高さとなる。これは、一般建築物に置き換えると3階以上の高さまで上らなければならないということになる。高齢者1人では上れない場合、補助者が必要となるが、タワーを昇降して補助することは、補助者にとっても危険をとまなうためできるだけ避けたい。そこで、十分な補助者(引き上げ要員)が確保できるのかという観点で検討項目として取り上げた。

(d) 避難で車を使うことは可能か否か

徒歩での移動に不安のある人が多く、東日本大震災でも車での避難者が多数いたことから、車での避難を希望する人は多い。車での避難については、地区でのルール(一方通行にする、優先度の高い人のみを使う、できるだけ多くの人を乗せるなど)を作ることで対応できる可能性があると考えられているが、地域の道路事情に大きく依存する。そこで、車での避難の可能性があるかについて検討事項に加えた。

(e) 助け合い活動は行ってもよいか否か

調査では、26組の方が事前に助け合うことを決めていることが分かった(主に親族間での助け合い)。津波避難においては「てんでんこ」と呼ばれる各個避難が推奨されており、東日本大震災でも多くの避難者が「てんでんこ」を実践している。しかしながら、1人で避難することができない状態にあることが分かっている場合、それは諦めにつながる。避難放棄者を出さないためには、どの程度の助け合いが可能なのかを評価し、その制約条件内での対策を考えることも必要であると考え、検討項目として取り上げた。

なお、これらの検討項目は、地域の問題を十分にとらえたものではない。見えていない問題を検討事項として抽出することは容易ではないが、アンケートの分析などを行ったうえでほかに検討すべき事項がないか、今後さらに十分な検証を行う必要がある。

5.2 提案システムを利用した避難対策の検討と評価

5.2.1 検討事項(a)(地震発生から避難開始までに許される時間)について

4章で設定したパラメータを用いて現状での避難行動(シナリオ0)をシミュレーションし、津波シミュレーション結果と重畳してみたところ、603人中180人が津波に追いつかれるとの結果を得た。この結果を、アニメーションとして可視化し、その要因を探ってみたところ、耐震化されていない家に住んでいる人の避難開始時間が遅いことが分かった。これに対して、実行性があるシナリオとして考えられたのは、住宅の部分耐震化や家具固定を行い、家屋が倒壊しても揺れがおさまる体制を立て直して(3分)から5分以内(つまり地震発生から8分以内)で家をでること

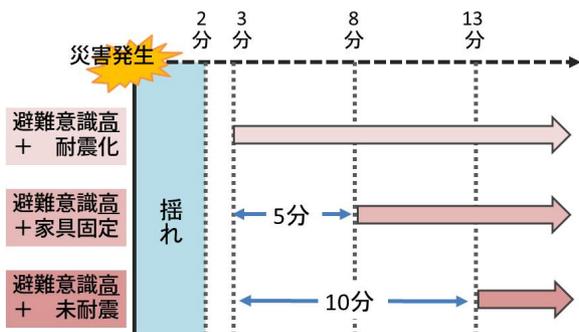


図 8 避難意識, 家具固定, 耐震化による避難開始時間

Fig. 8 Evacuation start time.



図 9 芝・錦野からタワーへの進路変更

Fig. 9 Switch of evacuation spots from Hill “Shiba” and “Nishikino” to Tsunami evacuation tower.

である (図 8)。この対策を行った場合 (シナリオ 1) にはシミュレーション上では, 新たに 37 人が逃げ切れることが分かったが, まだ問題は解決しないことも分かった。しかしながら, これ以上の時間短縮は実質的に不可能であることから, これ以外の対策との組み合わせにより問題解決案を探ることとした。

5.2.2 検討事項 (b) (事前に計画した場所にこだわって避難すべきか否か) について

シナリオ 1 では, 芝や錦野といった山側の高台に向かっている避難している人の多くが地区を出てから, 高台にたどり着くまでの間に津波に追いつかれているということが確認できた。特に, 津波は地区の南西部から到達するため, 地区の南西部から芝に逃げる人が追いつかれる傾向にある。そこで, 高台へ行くために地区の入口にあたる地点を通過する際に, 地震発生から一定時間以上たっていた場合は, 目的地を変更するというシナリオ (シナリオ 2) が考えられた。この地点からはタワーは近いため, 時間をうまく設定できれば, 津波から逃げ切ることができることが分かった。図 9 に津波の侵入角度, 引き返しポイント (地区の入り口にあたる部分), 変更する避難経路の位置関係を示している。シミュレーション上では地震発生から 10

分で芝から, 13 分で錦野から目的地を避難タワーに変更することで, 逃げないことや安全とはいえない避難場所を示した人を除くすべての人が, 津波に追いつかれることなく逃げ切ることが示されている。つまり, 検討事項 (b) に対しては, タイミングによっては目的地を変えることも考える必要があることを示唆している。しかも (c) で指摘してされている事項についてもクリア可能である (理由は後述)。しかし, この場合, 360 人がタワーに逃げることとなり, タワーの収容人数の目安として示されている 300 人をオーバーすることもあわせて分かった (タワー上の面積は 300 m² あり 360 人が入れないわけではない)。シミュレーションで示された 10 分, 13 分はあくまで目安であり, 訓練などを通じて確認・修正が必要である。また, 折り返し地点の人に地震発生からの経過時間をどのように伝えるかについて検討する必要がある (すでに地震発生からの経過時間を知らせることを決めた自治体も存在する)。

5.2.3 検討事項 (c) (避難タワー下にたどり着いた人がタワーに上ることができるのか否か) について

避難タワーは, タワーの上までのぼって初めて安全となるため, 到達した時点で安全が確保されるわけではない。そこで高齢者 (70 歳以上) が避難タワーに避難するときに, 補助者となる引き上げ要員 (10 代から 50 代までの人) が 2 人いればその 2 人が 1 人の高齢者を引き上げるという設定にして検証を行った。シナリオ 0 やシナリオ 1 では, 歩行速度の問題から高齢者が避難タワーに到達する時間が補助者候補となる若い世代に比べて遅く, タワーに到達する時間が津波到達時間直前になってしまうため, 危険を冒して引き上げを行うかを検討しておく必要があることが分かった。しかしながら, 地震発生からある一定時間で進路変更をするシナリオでは, 進路変更してタワーに来る人に引き上げ要員となる人が含まれているため, うまく引き上げられる可能性があることも確認されている。対策としては, 高齢者ができるだけ自力で階段を上れるように訓練しておくこと, 避難タワーにゴンドラ (電気を必要としない手動のもの) の設置を検討する, 避難先をタワーに変更し折り返してきた健常者は, 高齢者の避難を補助するという 3 点が示された。

5.2.4 検討事項 (d) (避難で車を使うことは可能か否か) について

そもそも地区内の道路は狭く, 家屋やブロック塀の倒壊と路上駐車されている車両の影響が重なり, 地区内での車移動は不可能であることが示された。家屋倒壊の影響を受けない地区の外側を通る道路は利用できる可能性があるが, 利用ルールを決めておかないと地区全体の避難率を向上させるものにはなりえないことが分かっている。また, シミュレーションでは明示されていないが震災による道路の破損の影響も考慮しておかなければならない。

5.2.5 検討事項 (e) (助け合い活動は行ってもよいか否か) について

地区内ではあるが、比較的距離の離れた場所に居住する親族を助けたいという場合、特に避難方向とは逆方向への向かっての助け合い行動は、両者ともに津波に追いつかれてしまう可能性があることが分かった。しかし、助ける人と助けられる人のペアを可視化すると、ペアを入れ替えることで移動距離を少なくすることができることが分かった。助け合い活動のための移動距離が短ければ、少しの時間であれば助け合いを行える時間を取ることも可能であることは、シミュレーションにより示されており、地域内で情報を共有しペアを再構築することが重要であることが分かった。

6. まとめ

本研究では、地域ごとの津波避難計画の策定を支援する津波避難評価システムについて報告した。システムは、地理情報システムとマルチエージェントシミュレータを連結する形で構成され、結果として避難可能な人数を示すことだけでなく、そのプロセスをアニメーションとして可視化することで、避難を妨げる要因を分析できる機能を有するものとして設計、構築を行った。

提案したシステムを南海トラフ巨大地震における最大クラスの津波想定において、地区全体が津波の被害にあうことが指摘された高知県黒潮町内の万行地区の避難計画作成に向けた地域活動に適応しその有効性を示した。この研究活動では、対象地区全世帯の避難意向をインタビューし、その結果をもとにシミュレーションを構築した。インタビュー調査を行う中で、地域住民が何気なく話してくれる内容から、憂慮すべき事項をひも解き、それが引き起こすことについてシミュレーションを用いて考察することで、対策案を提案した。この対策案はシミュレーション上では効果を上げることが確認できたが、今後はこれを実現するために、実地の訓練を行っていく必要がある。訓練により新たなパラメータを同定し、シミュレーションにリアリティを持たせることで、新たな課題を見つけていくというステップを積み重ねることができれば、地域の災害対応力はそれにとともに上がっていくはずである。今後は、このようなプロセスの確立するための方策についても研究を進めていきたいと考えている。

謝辞 本研究は、文科省プロジェクト「巨大地震津波災害に備える次世代型防災・減災社会形成のための研究事業—先端的防災研究と地域防災活動との相互参加型実践を通して—」により実施された研究成果の一部である。聞き取り調査や検討課題の抽出においてご協力いただいたNHK高知局、黒潮町役場、黒潮町万行地区の方々に、ここに深く感謝を申し上げたい。

参考文献

- [1] 中央防災会議防災対策推進検討会議南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフ巨大地震対策について（最終報告）、内閣府防災情報のページ（2013）、入手先（http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku.wg/pdf/20130528_honbun.pdf）（参照 2013-06-30）。
- [2] 消防庁国民保護・防災部防災課：津波避難対策推進マニュアル検討会報告書（2013）、入手先（<http://www.fdma.go.jp/neuter/about/shingi.kento/h24/tsunami.hinan/index.html>）（参照 2013-05-13）。
- [3] 渡辺公次郎，近藤光男：津波防災まちづくり計画支援のための津波避難シミュレーションモデルの開発，日本建築学会計画系論文集，Vol.637，pp.627–634（2009）。
- [4] 桑沢敬行，片田敏孝，及川 康，児玉 真：洪水を対象とした災害総合シナリオ・シミュレータの開発とその防災教育への適用，土木学会論文集，D 部門，Vol.64，No.3，pp.354–366（2008）。
- [5] 畑山満則，湯川誠太郎，枝廣 篤，多々納裕一：エージェントベース広域避難シミュレーションシステムの開発—滋賀県姉川・高時川下流域を対象とした事例研究，土木計画学研究・論文集，Vol.27，No.2，pp.323–330（2010）。
- [6] 畑山満則，松野文俊，角本 繁，亀田弘行：時空間地理情報システム DiMSIS の開発，GIS-理論と応用，Vol.7，No.2，pp.25–33（1999）。
- [7] 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（2010）。
- [8] 国土地理院：基盤地図情報サイト，入手先（<http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html>）（参照 2013-05-10）。
- [9] 国土交通省都市局：東日本大震災からの津波被災市街地復興手法検討調査（とりまとめ）（2012）。
- [10] 中居楓子，畑山満則：住民の避難行動の分析および地域住民との連携による避難計画の検討と評価：高知県黒潮町における災害リスク・コミュニケーションの事例研究，土木計画学研究講演論文集，Vol.47，CD-ROM(54)（2013）。



畑山 満則

2000年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士後期課程修了。博士（工学）。2002年京都大学防災研究所助手，2005年同助教授，2007年より同准教授となり，現在に至る。災害時の自治体情報システム，時空間GIS，レスキュー活動支援システムに関する研究に従事。FIT2003論文賞，山下記念研究賞（2004年）等を受賞。土木学会，計測自動制御学会，地理情報システム学会等の会員。



中居 楓子（学生会員）

2012年3月自由学園卒業。同年より，京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻修士課程に入学，現在に至る。2013年度山下記念賞受賞。



矢守 克也

京都大学防災研究所・巨大災害研究センター・教授。同上阿武山観測所・教授，人と防災未来センター上級研究員等を兼任。博士（人間科学）。専門は，社会心理学，防災心理学。主著に、『巨大災害のリスクコミュニケーション』

『防災ゲームで学ぶリスク・コミュニケーション』，『防災人間科学』等がある。