

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

津波による人的被災リスク評価のための群衆避難モデルの開発

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-11-24 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 宇野, 喜之 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2040

博士學位論文

津波による人的被災リスク評価のための
群衆避難モデルの開発

2020年度
(2020年9月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
応用環境システム学専攻

宇野 喜之

博士學位論文

津波による人的被災リスク評価のための
群衆避難モデルの開発

2020年度
(2020年9月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
応用環境システム学専攻

宇野 喜之

目次

第1章	序論	1
第1節	本研究の背景・目的	1
第2節	本研究に関連する研究の概要	4
第3節	本研究の対象と目的・意義	7
第1項	本研究の対象と目的	7
第2項	本研究の意義	8
第4節	本論文の構成	8
第2章	津波による人的被害とその推定方法について	11
第1節	津波による人的被害推定の必要性	11
第1項	津波リスク評価の現状	11
第1項	津波被害の共通認理解のための指標	11
第2節	過去の津波による人的被害	12
第3節	津波被害における被害要因	16
第1項	本研究で取り扱う被害要因	16
第2項	地震・津波発生時の被害要因	16
第4節	津波の人的被害の推定方法	18
第3章	避難モデルの開発	25
第1節	人的被害推定に用いられる避難シミュレーション技術	25
第1項	避難モデルの種類	25
第2項	避難モデルの種類分けと組み合わせ	28
第3項	津波被害要因と避難モデルの対応	30
第2節	開発コンセプトと基本モデル	32
第3節	避難者個々の挙動を制御する「個別要素型モデル」	34
第1項	基礎式	34
第2項	避難者の個人属性の設定	37

第4節	避難経路条件設定の「ポテンシャルモデル」	40
第1項	避難経路モデル	40
第2項	避難タワー利用時の避難行動	42
第3項	津波浸水マップを用いた避難	43
第5節	地理情報システムGISデータの活用ツール	47
第1項	街区モデル	48
第2項	河川	48
第3項	避難路閉塞	49
第4項	避難路の整備	49
第6節	開発した避難モデルの妥当性確認	51
第8節	まとめ	53
第4章	開発した避難モデルを用いた人的被災リスク評価	56
第1節	津波による人的被災リスク評価	56
第2節	検討シナリオと狙い	58
第3節	ケーススタディ解析	61
第1項	ケーススタディ地区の特徴	61
第2項	津波ハザード	61
第3項	津波対策および被害要因	64
第4節	津波浸水解析	69
第1項	浸水解析モデル	69
第2項	地形モデル	69
第3項	津波浸水解析結果	73
第5節	日中・夜間と潮位による津波人的被害の変化	77
第6節	津波対策の効果	85
第1項	防潮堤・水門の海岸施設による効果	85
第2項	避難計画の違いによる人的被害変化	88
第7節	発災時の緊急対応による変化	100
第8節	まとめ	102
第5章	結論	104
第1節	群衆避難モデルの開発	104
第2節	ケーススタディ地区での人的被災リスク評価	104
第3節	今後の課題	105

用語の説明

T. P.	東京湾平均(中等)海面を指す、Tokyo Peil の略。
残余リスク	リスク低減への対応実施後に残るリスク
浸水深	津波陸上遡上後の浸水域における水深
認知バイアス	特定の事柄に対する過去の経験や利害に帰属する先入観や固定観念等の思考の偏り。
リスク	被害と発生確率を掛け合わせたもの

第1章 序論

第1節 本研究の背景・目的

津波の生起確率は数十年から数百年で、人の寿命より長い時間スケールを持つ。その間に、社会構造が変化し、津波被害の記憶の劣化や津波への意識の低下が懸念される。したがって、津波対策は、現在のみならず将来変化する社会においても効果が発揮されるよう計画および設計される必要がある。一方、日本ではこれまで予想される高い津波に対しても防波堤をはじめとするハード対策で対応が可能であると考えられていたが、2011年の東日本大震災をきっかけにして津波予測が難しいことが明確になった。津波は低頻度災害で経験やデータの蓄積が少なく、発生時期や規模を正確な予測は現在の技術では不可能であると言わざるを得ない。そのため、不断の対策と柔軟な対応によって、津波から資産や人命を守る防災・減災社会システムを構築する必要がある。近年、土木分野において、地震や津波等の不確実性を有する自然災害への対策を最適化するツールとして、リスク評価手法が期待されている。リスク評価におけるリスクの定義はいろいろあるがハザードによる被害とその発生確率を掛け合わせたものとして定義した場合、その積分によって被害の期待値が求まる。対策毎に被害期待値を求めることで、経済的に見合う対策を選定することが可能になる。さらに、リスク評価では、各シナリオでの被害状況を算出するため、それを分析により、抑えるべき被害要因が発見され被害低減方策を提案できるようになる可能性がある。そのため、リスク評価においては、発生する可能性がある事象をできる限り取り込み発生する被害を幅広く把握する必要がある。さらに、津波による被害は、沿岸域の住民の生活や産業構造に係わる人間社会と密接に関係しており、社会情勢によって受け取られ方も変わる。沿岸域の産業構造や将来の都市計画を踏まえて様々な被害要因を取り込んだリスク評価を行い、災害対応強化を図り、さらにはまちづくり計画への反映の必要が出てくる。つまり、リスク評価手法には、現在のみならず将来に変化する要因をも取り込むことができる自由度が求められる。

本研究で対象とする津波被害は、資産被害と人的被害に分けられ、資産被害は津波浸水と浸水域内の資産分布を変数として求めることができる。それに比べ、日常生活の中で偶発的に発生する津波による人的被害の推定は、人々の生活や避難行動をも変数とする必要があるため、容易ではない。例えば、日中か夜間か、日中であっても在宅中か職場勤務中か、津波発生時の状況により避難行動は様々に変化し、その結果被害も変化する。さらに、津波被害は、発生条件によって決まる避難行動だけではなく、避難者自ら

の判断に基づき選択する行動によっても被害は変化する。津波対策である防潮堤や水門などの海岸防護施設による浸水低減対策や避難経路整備や避難タワーなどの避難対策の効果も、津波発生条件によって変化することも意味している。したがって、津波対策評価においても、様々な津波発生条件や避難者個々の判断や、様々な避難行動を考慮して行われる必要がある。これまでの人的被害推定手法は、説明変数が限られており、特に避難行動による影響の詳細を防災対策の検討に取り入れることができない。このような複数要素の影響を被害推定に取り入れる場合にはシミュレーションが効果的であるが、既往研究で確認できる津波避難モデルは特定の要因に着目しており、複数の要因を変えた分析や発生確率を考慮したリスク評価を行った事例はまだ少ない。

本研究で開発した群衆避難モデルは、個別要素型モデルとポテンシャルモデルのハイブリッドモデルである。ポテンシャルモデルでは、空間解像度 1m 程度の高精細な避難経路マップによって避難タワーや避難路を考慮し、地形や避難施設の平面的配置の特性を取り込むことができる。個別要素型モデルは、マルチエージェントモデルに基づき初期位置や避難開始時刻を避難者個々の属性をランダムに与えることで被害率や避難率の統計的取り扱いが可能になるとともに、避難者個々の行動から被害拡大要因や被害低減策を詳細に分析できることが特徴である。例えば、シミュレーション結果によって得られた被害要因が、避難開始の遅れである場合には防災教育や避難行動の開始を早めるための防災情報伝達や地域毎の避難促進のしくみの構築による解決策を検討できる。被害要因が、初期位置（住民の居住・就労地域）である場合には、その地域の浸水リスクを低減するよう防潮堤整備や高台移転による対応を提案することができる。

本節の最後に、本研究が必要であるという考えに至った背景について、社会的観点毎に整理する。

● 沿岸部の災害ポテンシャル増大

日本は、太平洋プレートとフィリピン海プレートの2つのプレートが沈み込む場所に位置しており、プレート境界で発生する巨大地震や津波による被害が頻繁に起こってきた。また、太平洋で発生する台風の常襲地帯でもあり、地球温暖化が予見される中で、平野部の水害対策は喫緊の課題となっている。日本の約 37.8 万km²の国土のうち約 6 割は山間部で、住居地域や産業立地地域は海沿いの平野や山に囲まれた盆地に限られているため、高度経済成長期に利用可能な土地拡大のため海沿いの浅瀬で埋立開発が行われた。沿岸部の低地に都市が形成され人口分布が集中したことで、沿岸部の自然災害ポテ

ンシヤルは、以前よりも増大しているものと推察できる。

● 想定を超える巨大津波の発生

2000年以降、インド洋大津波や東日本大地震による津波がアジアを襲い、それぞれ22万人超と1.8万人超の死者・行方不明者となる甚大な被害が発生した。東日本大地震の大津波が襲った東北地方太平洋沿岸は、過去にも明治三陸津波や昭和三陸津波での被害を経験していたことから、主要な沿岸都市ならびに市町村では、海岸に高さ10mを超える防潮堤を建設し津波対策として十分な備えをしていると考えられていた。しかし、2011年3月11日に沿岸部を襲った津波は、対策計画時に想定していた外力を超えており、防潮堤の天端を越え背後の土地にあった建物や人命をも奪った。

● 施設計画・設計におけるリスク評価の必要性

福島第一原子力発電所の事故もあり、これまで想定を超える津波への対応が必要になった。地震や津波の分野では確率論的アプローチによる施設等の計画および設計ができるよう指針などが整備されてきている。具体的には、津波等の不確実性の高い現象については、多様な被害と発生頻度を持つハザードを前提にしたリスク評価手法が最適であると考えられ、手法確立に向けた研究や検討がなされている（例えば、福谷^[1]）。

● 津波災害と避難行動

津波リスク評価は、資産被害と人的被害からなり、資産被害を求めるための津波浸水計算については、発生津波の不確かさを考慮したロジックツリーモデル^[2]やランダム・フェーズモデル^[3]が開発され被害に発生確率を掛け合わせたリスクの評価方法が確立されている。一方、人的被害は、発生津波の現象論的不確実性に加えて、避難行動における認知的不確実性も重なるため、リスク評価手法の確立がなされておらず、課題となっている。

● 津波リスク理解の必要性

津波避難行動は、住民目線でみた場合にも、いつどのような津波が来るか、でも津波はたぶん来るという漠然とした不安のみを感じており、避難の準備などの対応の具体が分からない状況である。このような状況下においては、津波対策に関する議論を自治体や各地区で進めることは困難であり、合意形成を図ることは難しい。津波防災・減災の社会実現には、津波リスク評価や関係者が理解しやすい指標、表現が必要である。

第2節 本研究に関連する研究の概要

津波による人的被害の軽減は、自然科学と社会科学の両分野に関わる問題である。避難行動については社会科学でも取り扱われるが、本研究の対象である避難モデルは、自然科学の手法に開発された既存モデルの応用であり、社会科学に自然科学の手法を適用した実験的アプローチである。過去の津波では死者・行方不明者が調べられているが、個々の避難者の行動を知ることはできない。また、将来発生する津波による人的被害も同様であり被害を変化する要因や条件を事前には知ることはできない。したがって、いかなるシミュレーションや過去データに基づく経験モデルでもこれから発生する津波被害を正確に予測することはできない。一方で、津波浸水を低減させる防潮堤・水門は、周辺住民の生活や海岸の利用・景観に影響があり社会的コストも必要なインフラであるため事業計画の検討においては、社会的意思決定のプロセスを経る必要がある。藤井ら^[4](2002)は、土木計画の策定が特定個人や特定組織の意思決定ではなく、社会全体の社会的意思決定、あるいは複数の集団の主体が関与する集団意思決定であると出張する。社会的意思決定のためには、被害の定量化し、対策工の効果分析やリスク評価に基づく経済分析が必要となる。津波避難モデルは、被害の定量化のためのツールとして活用されることが期待できる。

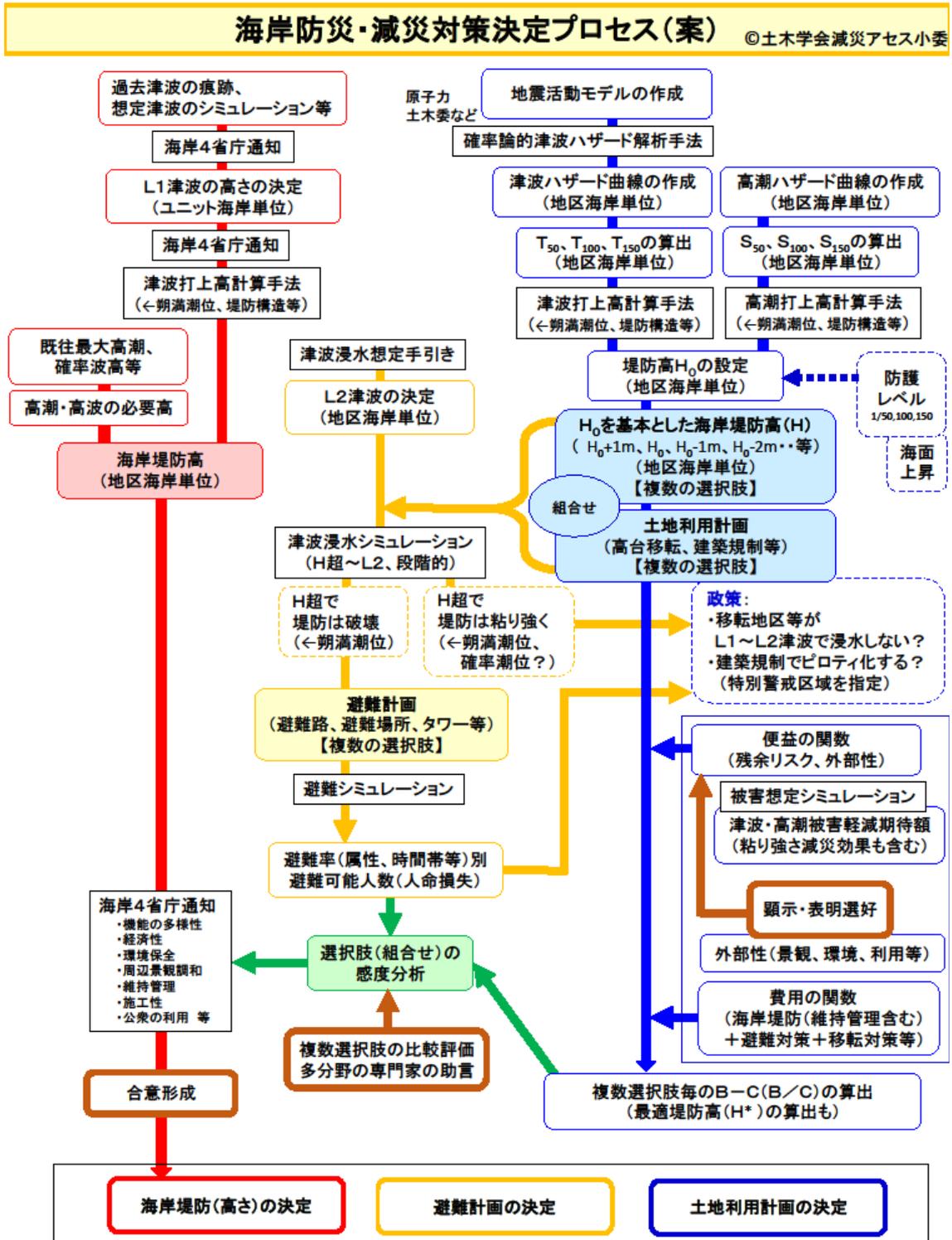
海岸防護施設の設計において資産被害評価は浸水推定に基づき行われる。発生する津波について不確実性を考慮するため、原子力委員会^[2]のロジックツリーモデルや Gouda et al.^[3]のマルチフェーズモデルが開発されてきた。これは、ハード対策のみでの対応が困難な巨大津波に対応する確率論的手法により、被害の甚大化防止や最小限に抑えるための手法である。津波被害評価や対策効果の評価には、様々な発生確率をもつハザードを考慮する確率論的手法に対して、一意的に決められたハザードによる被害やその対策を考える決定論的手法がある。2つの手法は、例えば低頻度で発生する大きな外力への対応に違いが表れる場合がある。決定論的手法を用いる場合、低頻度発生 of 巨大外力から背後地を防護しようとする心理的バイアスにより安全側で設計し過大な施設を建設する可能性がある。一方、確率論的手法では、低頻度発生 of ハザードによって大きな被害が大きい場合でも、その発生確率から期待被害値への重み付けが小さく、低頻度ハザードの施設設計への寄与度が低くなる。

東日本大震災によって、当初津波から防護する施設の設計については、発生確率が数十年～百数十年のレベル1津波と、発生頻度が千年程度の最大規模クラスのレベル2津波を考え、前者は資産を守ること、後者は人命損失を防ぐことを目標に掲げられた(例えば土木学会^[5](2014))。現在、日本は、南海トラフ巨大地震が懸念され、甚大な被害を

伴う津波への対応の難しさに直面している。海岸線沿いの土地は、既に道路や港湾などの様々な用地として利用されており新たな防潮堤の建設が困難であること、建設コストや維持コストの問題、さらに海岸の多くは背後地の住民に生活の一部であり、レクリエーションとしての価値や観光地では景観としての価値維持、自然環境への影響など、様々な課題を抱えている。一方で、浸水リスクの小さい高台への移転を予定する地域もあったが、費用負担や移転先の準備状況などが原因で当初予定されていた同計画が実行されないままの地域もある。

土木学会は、土木計画学と海岸工学の研究者から構成される減災アセスメント小委員会を立ち上げ、まちづくりと津波・高潮からの防災の両面を考えるスキーム作りを開始した。図 1-1 は、減災アセスメント小委員会の中間報告書⁶⁾(2018)に記載される、海岸防災・減災対策決定プロセスである。防潮堤規模は、発生確率を考慮するリスク評価に基づいて決定され、高地移転を含めた土地利用計画との組み合わせによる検討が示されている。さらに、避難路整備や避難場所、避難タワー等を考え、それを避難シミュレーションで評価することが明記されている。ここから、避難による効果を適切に評価できる避難モデルの重要性が確認できる。津波避難モデルに関する説明は、2章に譲る。

人命を守ることは、防災・減災の最重要な課題であるため、発災時に人的被害を最小限に抑えるための対策を考えることは極めて重要である。そのためには、ハードやソフト両面からなる津波対策による人的被害の評価手法を確立することが必要である。



出典：土木学会減災アセスメント小委員会中間報告書^[6](2018)

図 1-1 土木学会減災アセスメント小委員会^[6]が検討中の
海岸防災・減災対策決定プロセス(案)

第3節 本研究の対象と意義

第1項 本研究の対象

● 本研究の対象

前述の通り本研究の目的は、津波対策の効果や被害要因の影響を明らかにするための津波による人的被災リスク評価である。津波災害における被害要因は種々あるが、本研究での対象とするものは、図 1-2 に赤字で示した被害要因である。被害要因について工学的視点から解決策が考えられるものを対象とする。また、津波発生後の二次的な被害には、社会インフラ復旧などもあるが、本研究では発災時あるいは事前の対策のみを対象とする。

津波避難の影響因子として、避難情報や避難者の心理的作用も挙げられる。これらの要素も原理的には開発した避難シミュレーションへの取り込みは可能であるが、施設的设计や計画において直接関係しないため対象外とする。

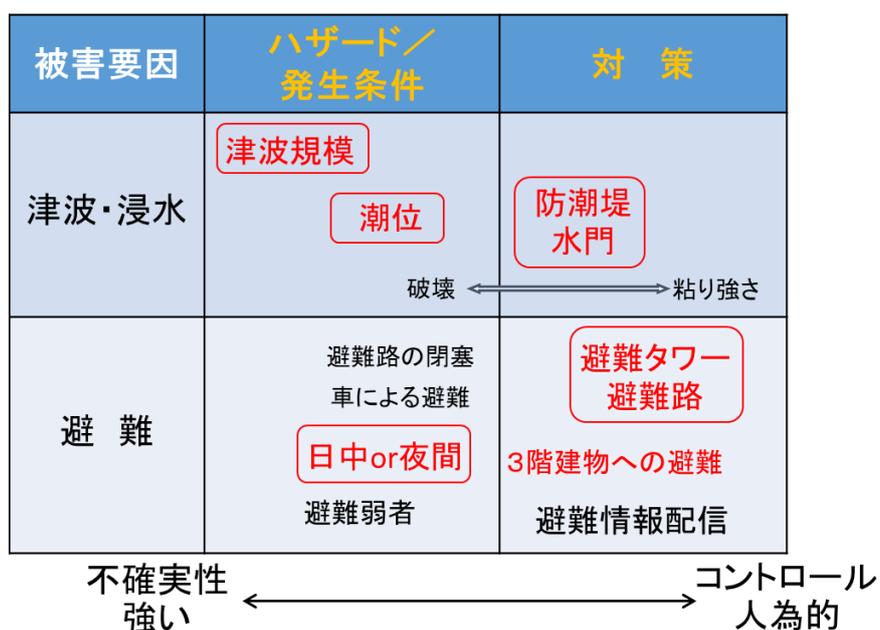


図 1-2 本研究の研究対象

第2項 本研究の意義

津波による人的被害は、津波規模のみならず、避難者の判断や地域の避難計画に基づき選択する避難行動によって大きく変化する。本研究で開発した群衆避難モデルは、夜間発生時や避難路混雑等の津波人的被害における不確実性を考慮した津波人的被災リスク評価を可能にするものであるとともに、既往の評価手法に比べて人的被害要因について詳細分析が可能になることから、ハードとソフトを組み合わせた効果的な防災対策の選定から、施策実施後の残余リスクへの減災対応まで検討が可能になる。したがって、総合的な津波防災・減災システムの構築に向けて、社会が一步前進したことを意味する。

第4節 本論文の構成

1章では、研究の背景と目的を述べ、本論文の構成を説明する。

2章では、津波被害の推定方法の現況と課題について述べる。既往研究で開発された避難モデルの特徴を整理し、人的被災リスク評価への適用性について検討する。

3章では、開発する避難モデルの特徴や、避難経路モデルを作成するためのGIS活用ツールについて説明する。また、本研究で考案した浸水リスク分布を考慮した避難行動の数値モデルへの反映方法について説明する。

4章では、ケーススタディとして実海岸を対象に、津波浸水および避難行動に影響する事象や条件をシナリオとして与え、開発した避難モデルを用いて津波による人的被災リスク評価を行う。その結果を用いて、津波人的被害の特性や対策効果、残余リスクへの対応策の効果を考察する。

5章では、本研究の結論と今後の課題を述べる。

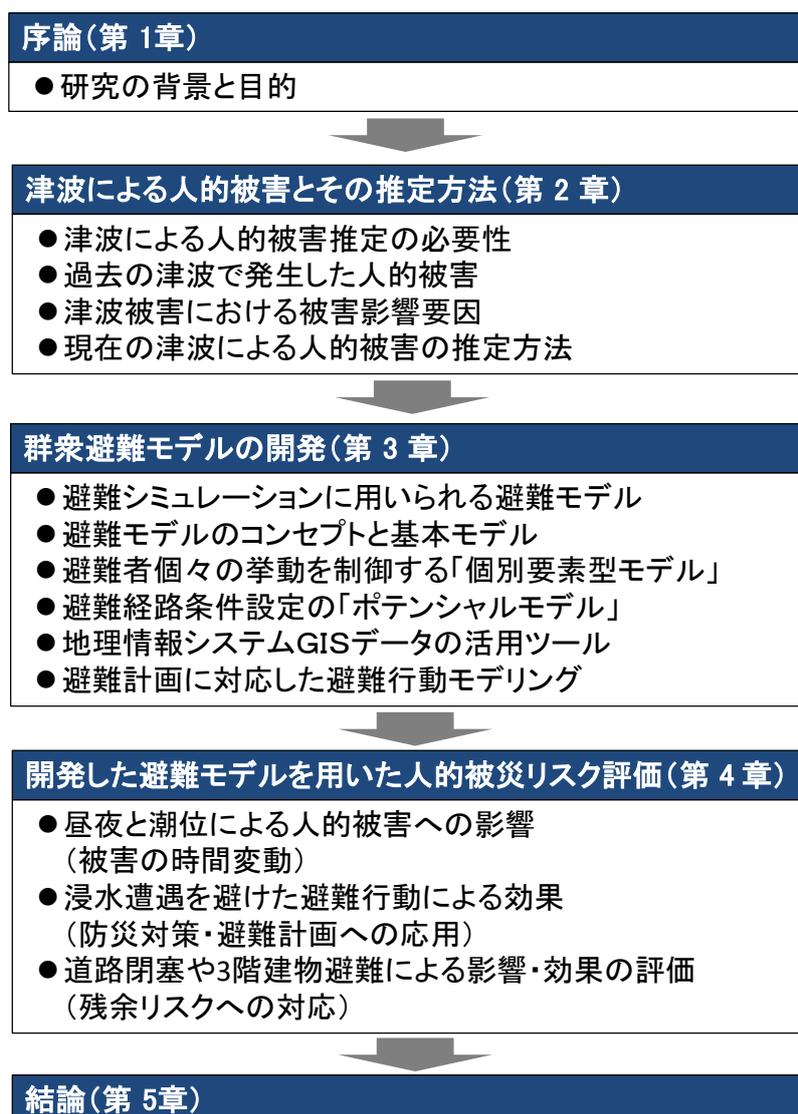


図 1-3 本論文の構成

参考文献

- [1] 福谷陽・Suppari Anawat・安倍祥・今村文彦 (2014) : 確率論的津波遡上評価と津波リスクの定量化、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.70、No.2、pp.I_1381-I_1385.
- [2] 土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会 (2016): 原子力発電所の津波評価技術、127p.
- [3] Goda, K., Mai, P.M., Yasuda, T., Mori, N. (2014): Sensitivity of Tsunami Wave Profile and Inundation Simulations to Earthquake Slip and Fault Geometry for the 2011 Tohoku Earthquake, *Earth Planets and Space*, 66:105, doi: 10.1186/1880-5981-66-105.
- [4] 藤井聡・竹村和久・吉川肇子(2002) : 「決め方」と合意形成 : 社会人ジレンマにおける利己的動機の抑制について、土木学会論文集、No.709/IV-56、pp.13-26.
- [5] 土木学会 (2014): 東日本大震災後における津波対策に関する現状認識と今後の課題、https://www.jsce.or.jp/strategy/seawall_20140930.shtml、2018-6-12 閲覧.
- [6] 土木学会減災アセスメント小委員会 (2018): 減災アセスメント小委員会中間報告書、https://coastal.jp/files/201806_JSCE_gensaiassess_midtermreport.pdf、2018-8-12 閲覧.

第2章 津波による人的被害とその推定方法について

第1節 津波による人的被害推定の必要性

第1項 津波被害評価の現状と課題

津波による被害は、一般的に建物や社会インフラなどの資産被害と人的被害に分けられる。被害推計の主な目的は、経済的損失や社会的影響を把握し対策を検討することである。藤間・樋渡^[1]は、発生確率と規模の違う津波による被災シナリオに対するリスク評価を行い最適な防災施設規模と防災施設後の残余リスクを明示する方法を提案している。また、山崎ら^[2]は、静岡県伊豆半島西海岸の3つの地域を対象に津波浸水解析結果を用いた人的被害と建物災害のリスク分析結果から、避難率の向上と防潮堤建設によるリスク低減量を比較した。さらに、50年間で浸水想定区域からの移転奨励施策による、リスク低減の効果や適切な堤防高さの計画に及ぼす影響などを定量的に分析した。

これらは、防潮堤や水門の海岸防護施設や住民移転によるリスク低減効果を確認するものであるが、人的被害推定には、南海トラフ巨大災害検討会のマクロ的被害想定手法を適用しているため、防潮堤高さ決定後の残余リスクに対し地域の避難路特性や詳細な避難対策によりどの程度対処できるかなどの議論ができない。防潮堤を含む社会インフラ整備などの土木事業は、残余リスクへの対応策が明確でないと、防潮堤高さ決めから議論を再度始めることになり、事業は進まなくなる可能性がある。避難タワー・ビルおよび避難路の整備や避難行動の意識付けなどの避難対策による被害低減効果を評価できる、避難行動予測手法の確立が求められている。

第2項 津波被害の共通認識理解ための指標

人的被害の定量化は、津波リスクを各地域の津波防災に関する関係者である自治体や住民が共通の認識や理解のために必要であり、認知バイアスを防止することも期待できる。地域の津波対策を検討する際には、住民や自治体、専門技術者が集まって話し合い形成を図る場が設けられるが、参加者がそれぞれの立場や考えに基づいて被害の大きさや対策の効果を各自のものさしで考えている状況では議論が進まなくなる。その要因は、専門的知識不足による認知的誤差や、立場によって無意識に情報を選択してしまう認知バイアスである場合があると皆川ら^[3](2015)は指摘する。それを排除するには科学的根拠に基づいた評価手法の確立が必要であるとともに、関係者による津波被害の共通理解や共通認識を促すための定量的評価に基づいた指標が必要になる。

第2節 過去の津波による死者・行方不明者

表 2-1 は、明治以降で 100 名以上の死者が発生した地震災害である。

地域別にみると、2011 年に東日本大震災が発生した東北地方太平洋沿岸が 3 回発生している。今後、南海トラフ巨大地震の発生が懸念されている太平洋プレート周辺では、2 年の間で連続的に発生した 1944 年の東南海地震と、1946 年の南海地震がある。海外からの到達する遠地津波の事例として、1960 年のチリ地震がある。

被害要因について把握するため、各津波による災害の特徴について渡辺^[4]の報告等に基づき整理する。

表 2-1 明治以降で 100 名以上の死者が発生した地震災害

発生年	地震名	地震規模	建物の全壊数	死者数
1896	明治三陸沖地震	M 8.2	11,723	21,959
1933	昭和三陸地震	M 8.1	7,134	3,064
1944	東南海地震	M 7.9	17,611	1,183
1946	南海地震	M 8.0	9,070	1,443
1960	チリ地震	Mw 9.5	1,571	139
1983	日本海中部地震	M 7.7	1,584	104
1993	北海道南西沖地震	M 8.0	601	230
2011	東日本大震災	Mw 9.0	121,768	19,533

Mw：モーメント・マグニチュード（Moment Magnitude scale）、中規模以上の地震でエネルギー量を表す指標値（マグニチュード）。断層面の剛性率・断層面積の合計・断層全体の変位量の平均の積である地震モーメントから算出されるが、弱い地震では計測できないため、Mw は M3 以下の地震では適切に計測できない。

(1) 明治三陸津波（1896年6月15日19時32分）

震度 2～3 程度であったとされ、地震の揺れは小さく地震による被害はなかった。一方、津波は非常に大きく、地震に比べて津波が大きいことから津波地震、あるいは周期が長かったことから低周波地震と呼ばれる特徴を持つ。津波そのものの大きさもさることながら、津波来襲の警笛となるはずの地震動が小さかったために、その被害が拡大した可能性があるとして越村^[5]は指摘する。また、金品に執着せず高所に向かって一目散に逃げる重要性を示唆する過去の記事を紹介している。

潮位記録による津波の最大全振幅は鮎川(宮城県)で 215 cm、花咲(北海道)で 94cm、銚子(千葉)76cm と広範囲に渡っている。津波の最高到達点は岩手県三陸町綾里白浜の 38.2m であり、山田町では被害が最も大きく死者 1,000 人以上が出たと報告されている。

(2) 昭和三陸地震 (1933 年 3 月 3 日 2 時 30 分)

地震による揺れは、太平洋沿岸で震度 5 であり、明治三陸津波に比べて大きいものの被害は少なかったと報告されている。一方、津波については、地震後 30~1 時間の間に津波が北海道・三陸の沿岸部を襲い甚大な被害を発生した。岩手県沿岸の津波高 10m 以上にも及び、綾里湾での到達高さは 28.7m と明治三陸津波と同様に高い。田老町田老では、人口 1,798 人のうち死者 783 人、傷者 118 人、戸数 362 棟のうち 358 棟が流出し壊滅的なダメージを受けた。田老の防潮堤建設は、この津波発生の翌年から開始し昭和 54 年に整備が完了した。

(3) 東南海地震 (1944 年 12 月 7 日 13 時 36 分)

安藤の断層モデルによれば、震源域は直線上で広範囲で、愛知県三河湾南沖から、和歌山県串本町の南東沖に至る南海トラフと平行した線上の地域で発生したとみられている。2年後の昭和南海地震との連動性があったと考えられている。地震後の津波では、震源域に近い尾鷲市を中心に熊野灘沿岸一帯で甚大な被害が発生した。三重県、和歌山県沿岸で津波が高く、波高 7m を超える津波が記録されている。御前崎では地震後約 5 分で海水が引き、地震後約 40 分に第一波が来襲したと言われる。戦時下にあったため、記録はあまり残っていない。

(4) 南海地震 (1946 年 12 月 21 日 4 時 19 分)

震度 5 の範囲が東海地方から九州地方まで広がり極めて広い。被害も同様に広がった。津波は房総半島から九州万部まで襲い、その被害は地震によるものよりも大きい。三重県、徳島県、高知県で 4~6m に達し、津波はハワイやカリフォルニアにまで達した。この地震・津波による被害は中部地方から九州までの 25 府県に及び、死者・行方不明者 1,443 人、建物全壊 1,1661 棟、家屋流出 1,451 棟とされている。被災地の多くが戦災による焦土にある状態だったため損壊建物の数字の正否は定かではないが、道路・橋・堤防・港・船・農地などの土木インフラにも甚大な被害が及んだと報告されている。また、津波は早いところで地震後 5~10 分と襲来が早く、最初は流速が小さく、大波は 3~4 回で第 2 波や第 3 波が最大、第 1 波の前に退潮があったとの報告がある(石橋^[6]、2014)。

(5)チリ地震（1960年5月22日15時11分、震源はチリ中部）

本震発生から15分後に18mもの津波がチリ沿岸を襲い、約15時間後にハワイに到達した。振幅の最大値は日本で6.1mにもなった。津波による被害が大きかったのは、リアス式海岸の奥部に位置する岩手県大船渡市で53名、宮城県南三陸町で41名であった。

福井ら¹⁷⁾(1960)によれば、三陸地方では明治三陸地震と昭和三陸地震の被害があったため、田老と山田、船の越、大槌、吉浜で本格的な防潮堤が設置されていた。宮古湾では建設中のものがあったが、他は小規模な防波堤や護岸のための施設のみであった。田老や吉浜の防潮堤は津波高が2m程度で実際の効果を発揮するには至っていないが、大槌町で防潮堤を溢流し水門の箇所が決壊したが、対岸の安渡に比べて軽減されていると考えられている。これらは、昭和8年等の近地地震による大津波の経験を基礎にしているため、被害が大きかった大船渡、高田、気仙沼、志津川等では対策を欠く結果になったと思われる。また、比較的大きい集落は繰り返し津波の被害を受けた場合でも移動が困難なために防潮堤や防潮林を設置して積極的対策を取り得るが、零細な半農半漁の小集落ではむしろ背後の高地に移動して難を逃れている事例がある。しかし、両石、白浜その他の多数の部落では、零細な住民にとっての移動による生産上の振りは免れず、やむなく低地に移動して被害があった。

(6)日本海中部地震（1983年5月26日11時59分）

渡辺¹⁸⁾(1987)によれば、深浦沖の震源付近で最初に初期破壊が起こり、数秒後それより大きな第一主破壊、さらに次に20秒後に北北東数十キロ離れたところに第二破壊が発生した、3つのイベントからなるマルチプル・ショックであると推定されている。震源に近い秋田、深浦、むつで震度5であり、有感距離は米子にまで及んだ。地震と津波による災害は1道12県で発生したが、秋田県北西部と青森県西部の市町村で大きかった。津波による被害は104名で、港湾護岸工事中の人が41人、魚釣中が18名、遠足中が13名いた。この津波では避難と警報の周知という津波対策における問題を提起した。また、日本海側では地震による津波の被害が報告されておらず、5月1日から前震と考えられる前触れがあったが危機管理が不十分だったということも中尾¹⁹⁾は指摘する。津波の周期は5～15分程度が観測されており、日本海の対岸国のロシアや韓国にも被害が発生した。

(7)北海道南西沖地震（1993年7月12日22時17分12秒）

マグニチュードは7.8～8、震度6、日本海沿岸で発生した地震として最大規模であり、震源に近い奥尻島を中心に火災や津波で大きな被害が出た。震源域が島のすぐにあったために、地震から数分で奥尻島に津波が到達し、島の人口の4%にあたる198人の死者が出た。地震発生後2～3分で島に達した津波が市街地で高さ6.7mに達し、島を開設した波が本土で反射した波と複数方向から繰り返し津波が来襲し壊滅的な被害となった。発生の4～5分後に奥尻島の対岸にある北海道南西岸のせたな町や大成町に達した。

1983年の日本海中部地震で津波被害を受けていたが、このときの到達が、地震発生から17分後であった。この経験から徒歩で迅速に移動した人も多かったが、津波到達まで時間があると判断し、自動車避難しようとして渋滞に巻き込まれたり、避難経路の選択を誤ったり、避難前に用事を済ませようとして津波に飲まれた人もいたと報告されている。

第3節 津波被害における被害要因

第1項 本研究で取り扱う被害要因

前項で述べたように、災害対策を考える場合には、様々なリスク要因を考え、備えることが必要である。地域によっては、影響が小さい無視できるリスク要因があるかもしれない、免れることのできないリスクがあるかもしれない。そのような要因を明らかにする必要がある。

津波による人的被害に関する研究は数多く枚挙にいとまがない。特に、東日本大震災は被害が甚大であったことから、社会的要望や関心が強まり、ソーシャルネットワークなどの情報発信ツールの発達も重なり様々な形態の記録や意見が残っている。それらは、今後の津波防災に役立つ情報ばかりである。ここでは、過去の津波災害にみられた被害因子や、これまでの災害では顕在化してはいないが懸念されている被害因子について、事例報告や既往研究成果から抽出し特徴を整理する。

第2項 地震・津波発生時の被害要因

自然災害の被害を増大あるいは減少させる要因として、災害の規模や災害発生時刻、避難開始時刻があることは、災害発生時の避難情報の重要性の指摘・報告などからも明らかであるが、他にも自然災害の実例から明らかになっているものや、主に研究分野などで指摘されているものがある。津波リスクを評価する上では、被害拡大を引き起こす要因について把握する必要があることから、ここに整理する。

被害要因は、(1) 浸水遭遇に関する要因、(2) 避難の経路や方法に関する要因、(3) 避難者の心理的な要因に分けて整理した。また、それらの要因が、津波の実例で明らかになったものか、主に研究分野で指摘があるものかについても留意した。

(1) 浸水遭遇に関する被害要因

「備えていた規模以上の津波の来襲」は、東日本大震災では、過去に経験していた津波に対応した防潮堤が建設されており、万全な対策を打っていると考え、事前の準備や発災時の避難行動が十分でなかった可能性がある。これに対し、奥村ら^[10](2013)は、柔軟性の高い避難対策について現地聞き取り調査を整理し、さらに安全な場所へ逃げるきっかけ等を分析した。「河川を遡上する津波」によって、沿岸部で起きなくても内陸部での発生や、沿岸部からの避難者が思わぬところで浸水と遭遇する可能性について、研究論文や国土交通省^[11]の提言がある。例えば、田中ら^[12](2012)は、東日本大震災発災時に七北田川等で津波の河川遡上や堤防越流・破壊の痕跡があることを示した上で、確定

論的設計により防潮堤天端上を津波が越流し破壊するプロセスは考えられてこなかったと報告している。2010年のチリ津波や東日本大震災の際に、**取放水路や雨水排水路を介して海水が内陸部に浸入した**と報告されている（例えば、橋本・今村^[13](2010)、高島ら^[13](2014)）。**地震津波**と呼ばれる地震自体の揺れが小さいにも関わらず大きな津波を発生する現象により避難判断が遅れるなどして浸水遭遇する危険性を指摘するものがある。例えば、1896年の明治三陸地震津波が Mw8.1 の揺れにも関わらず巨大津波が来襲した事例として報告されている。

(2) 避難経路や避難方法に関する影響要因

避難行動は、浸水域からの避難場所への到達に直接的に影響するため、人的被害の要因を考える上で、非常に重要な影響因子である。

避難行動を**避難路が電柱やブロック塀の倒壊により閉塞**し、避難者が避難場所に移動するのを妨げるようになると、ブロック塀崩壊が激しい場合や人が混雑した状況になると最悪の場合には身動きが全く取れなくなったり避難者がパニックに陥り被害が拡大したりすることも考えられる。さらに、浸水遭遇でも記載したが、**地震の揺れの小ささに係わらず発生する地震津波**は、避難者の観点に立てば津波浸水の発生を予測できず避難開始が遅れ被害が大きくなる可能性は十分に考えられる。また、人口密度が高い観光地等では、**避難タワーおよび避難ビルでの鉛直避難の場合の収容人数容量オーバーや避難経路中の狭い箇所がボトルネック**となり迅速な避難ができない場合も考えられている。たとえば、加藤ら^[15](2009)および鈴木ら^[14](2018)は、海水浴シーズンの海水浴客で溢れかえった状況を、避難者同士が衝突を回避する行動を物理モデルで表現した避難シミュレーションを行い、狭い避難路では避難速度が低下し危険が増すことを示した。また、鈴木ら^[14](2018)は神奈川県藤沢市湘南海岸で鉛直避難先となるマンションへの群衆避難を津波避難モデルにより解析し、それぞれのマンションに所要の人数が避難できるかを確認した。また、避難モデルの中には心理的な要素が組み込まれておらず、経験のない海水浴場や混雑した状況下においてシミュレーション同様に冷静な判断に基づく行動ができるかという点で懸念が残り、被害をさらに増大させる要因になりうると思われる。また、**夜間に発生した場合**についてはいくつかの課題がある。まず、起きてすぐには地震の揺れへの対応や津波への対応、避難の是非の判断、避難に適した身支度・装備の時間が日中に比べて長く必要になり避難開始が遅れる。また、避難時の歩行速度は日中に比べれば小さくなる。また、夜間発生時には地震の揺れにより**停電が発生**した場合にも、避難路の見えにくさによる歩行速度の低下や、車両との輻輳箇所となる交差

点の信号の滅灯などが避難者の動きに影響を与える。避難時要援護者が車両によって避難を行う場合には道路混雑や歩行避難者との交錯などによる被害増大が懸念されている。また、**避難場所や避難経路の分かりにくさ**は、海岸利用者などの混乱を招き円滑な避難行動を妨げる可能性があるという指摘がある（例えば、増本ら^[16](2010)）。

(3) 避難者の心理的影響

避難者の心理は、避難時の行動に影響を与え、場合によっては被害要因になる可能性がある。また、避難者の心理を踏まえソフト対策を行うことによって

実際の発災時における避難行動を考えると、危険が自分の身に及ぶことを周辺環境から感じ取った場合にも自分の身には何も起こらないと信じ込む、いわゆる**正常化の偏見**が問題になることが多い（例えば、片田ら^[17](2005)や矢守^[18](2009)）。また、佐藤ら^[19](2008)は、地震が発生した際に避難の必要性を感じた人が、避難する面倒さや津波への恐怖感を解決するため津波が来ないものと思いつく心理（**認知的不協和**）が働くことを問題としている。それら心理的影響を減らす対策として、防災教育や避難訓練など様々な観点からの取り組みがなされている。**防潮堤の設置による避難意識の低下**を問題とする研究がある。安田ら^[20](2019)は、アンケート調査により防潮堤建設が進む中で避難意識の低下に調べたが、防潮堤建設によって安心感は増すものの避難意識については確認されなかった。

第4節 津波の人的被害の推定方法

地震分野では、阪神大震災以降、確率論的地震ハザード評価とシナリオ地震動評価の手法についての議論がなされるようになった。津波分野では、東日本大震災以前、1つないしはいくつかの対象津波を災害ハザードとして設定する決定論的アプローチによって被害想定を行ってきた。

(1) 建物被害率をパラメータとする方法

自治体が行う地震・津波による被害想定では、1993年北海道南西沖地震のデータを用いて、津波による人的被害想定の基本式として、以下の式を用いている（例えば、静岡県^[21]）。なお、式中の津波による建物被害率は、首藤^[22](1992)の浸水深と被害程度の関係表から求めている。

死者数 $= 0.0424 \times \exp(0.1763 \times (\text{津波による建物被害率}(\%))) / 100 \times \text{人口}$
 ただし、北海道南西沖地震の最大 4.5% を上限とする。

重傷者数 $= 0.0340 \times \exp(\text{津波による建物被害率}(\%)) / 100 \times \text{人口}$

中等傷者数 $= 0.0822 \times \exp(\text{津波による建物被害率}(\%)) / 100 \times \text{人口}$

(2) 津波浸水深をパラメータとする経験的算定手法

越村・萱場^[23](2010)は、浸水深別死者率について、インド洋沖津波の調査結果を整理し、数値解析結果から得られる数値データと死亡率を比較し人的被害関数の提案を試みた(図 2-1)。津波浸水深および浸水高を河田ら^[24](1997)の結果と合わせて整理し、同じ津波高でも死亡率が3桁もの相違を確認した。この死亡率の相違の要因は、津波の来襲特性(到達時刻、規模、周期、振動の継続時間等)としての外力のバラつき、避難行動の有無や人々の危機意識といった社会的条件のバラつきの結果であると解釈を示している。

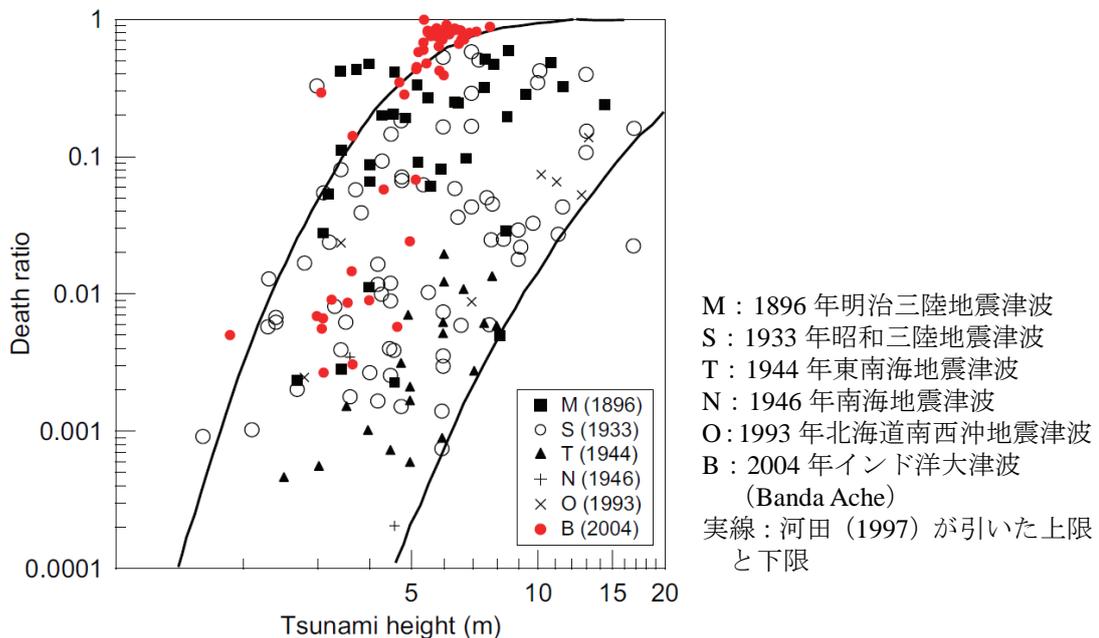


図 2-1 既往の津波災害における津波規模と死亡率の関係と Banda Ache の人的被害特性の比較 (越村ら^[24](2010)の再掲)

(3) 要避難時間および避難準備時間に関するアンケートに基づく推定方法

越村ら^[23]は、インド洋沖地震における Banda Ache での津波浸水計算結果と実際の人

的被害調査データ（死者、行方不明者、生存者）を比較して(2-1)式の津波被害関数を提案した。

$$\alpha(h) = \Phi \left[\frac{h - \mu}{\sigma} \right] \quad (2-1)$$

ここに、 h ：浸水深 (m)、 Φ ：標準正規分布の累積確率密度関数、 $\alpha(h)$ ：浸水深 h (m) の場合の死亡率、 μ 、 σ ：Banda Ache における h の平均値 ($\mu=3.75$) と標準偏差 ($\sigma=1.35$) である。

宍戸・今村^[25](2010)は、この被害関数を用い、津波による人的被害評価式を(2-2)式のように定義した。住民の避難行動における避難所要時間や津波の浸水開始時間等の効果を考慮するため、避難完了率 $\beta(t)$ と避難意向率 $\gamma(h)$ をパラメータとして取り入れた。

$$D = P \times \alpha(h) \times [\{1 - \gamma(h)\} + \{\gamma(h) \times (1 - \beta(t))\}] \quad (2-2)$$

ここに、 D ：死者数、 P ：人口、 $\alpha(h)$ ：浸水深に対する死亡率、 $\beta(t)$ ：地震(津波)発生から避難開始までの準備時間と避難所までの移動時間 t を考慮した避難完了率、 $\gamma(h)$ ：住民の避難意向率である。

また、避難完了率 $\beta(t)$ と避難意向率 $\gamma(h)$ は、避難準備時間と避難場所までの移動時間、避難判断基準(浸水深)をアンケート調査によって調べ、その結果を双曲線正接関数でフィッティングし決定することを提案している。

(4) 津波浸水計算結果から算出するマクロ的方法

南海トラフ巨大地震協議会^[26](2012)は、津波浸水解析結果を用いて、各場所で津波が到達する時間（浸水深 30cm 以上）までに避難が完了できなかったものを津波に巻き込まれたものとし、そこでの浸水深をもとに死亡か負傷かを判定する方法を提案している。①避難行動について避難有無と避難開始時期、②津波到達時間までの避難完了可否、③津波に巻き込まれた場合の死者発生度合いの3つに分けて設定した。また、東日本大震災で得られた教訓から、意識が高い地域と低い地域とで幅を持たせた避難行動パターンを取るようにしている。この中では、津波避難ビルの考慮や、揺れによる建物倒壊に伴う死者及び自力脱出困難者の考慮、年齢構成を考慮した死傷者数の算定についての3つについて提案している。

②避難完了可否については、津波浸水計算の各格子から浸水域外までの直線距離に 1.5 を乗じて求めた要移動距離を移動速度で割り、浸水域外メッシュの隣接メッシュにおける津波到達時刻と避難行動者別に比較するという手順で算出する。浸水域外メッシ

ユまでの直線距離に乗じる1.5と平均移動速度2.65km/hの設定根拠は東日本大震災での実績として用いている。藤間・樋渡^[1](2013)や山崎ら^[2](2016)は、この内閣府の手法を用いている。

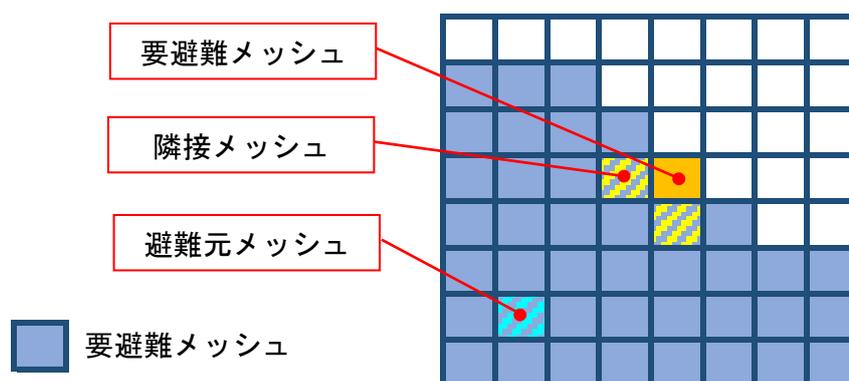


図 2-2 津波浸水計算結果から被害算出法

(5) 津波避難モデルを用いる方法

避難モデルは、地震や水害などの自然災害時や建物火災時の避難行動のシミュレートを目的とし開発され、災害発生時のボトルネック調査や避難経路の最適化問題の解決の方法として実務で用いられるようになってきている。対象とする空間のサイズや解像度によって様々あるが、市町村規模の問題を解くモデルが提案され、津波による被害推定にも適用されている。避難モデルの種類や特性などについては、2章に整理する。

(6) 各手法の比較

越村ら^[24]の津波高による判定は、自らの論文中で浸水開始時刻や避難意識などが被害発生に与えるパラメータを1つに絞ることは難しいと指摘する。また、過去の事例から人的被害を推定する方法についても、津波の伝播や浸水特性や、背後地の土地利用や人口分布、避難意識などの人的に被害の影響因子が地域毎に様々であることから、事例のように適用することは難しい。

宍戸・今村^[26]の方法は、避難場所までの距離や時間をアンケートから割り出しているため、その都度のアンケートが必要になり、過去の事例については把握できても、将来起こりうる災害については推定が難しい。また、アンケートにおける客観性確保やデータ精度の十分な検討、対策を行った場合の効果計測方法が必要になる。

内閣府^[27]のマクロ評価方法は、浸水開始時刻や避難による影響、昼と夜の状況変化を

考慮できる点で地域の状況をある程度反映しているが、津波避難タワーや避難路整備、避難行動の選択による影響や効果を直接的に考慮することができないことが課題である。津波防災地域づくりにおいては、背後域の利用まで考慮する必要があることから、詳しい解析が可能な手法が必要であると考えられる。

津波避難モデルを用いた方法は、多数ある避難モデルは避難行動の表現も様々であるが、避難者行動や避難経路などの避難条件を考慮でき、避難時の様々な被害要因の分析や避難対策の効果を調べることができる。また、群衆避難モデルの結果は統計的データとして取り扱うことができ、被害者数や被害率の定量化も可能であることから、人的被害リスク評価への適用が期待できる。

参考文献

- [1] 藤間 功司・樋渡 康子 (2013): 津波防災施設の最適規模と残余リスクを明示する手法の提案、地震工学論文集、第 32 巻、pp.345-357.
- [2] 山崎明日香・佐藤慎司・山中悠資 (2016): 伊豆半島西海岸の津波災害リスク分析に基づく総合的な津波対策に関する研究、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.72、No.1、pp.72-82.
- [3] 皆川勝・中村僚太・高橋翔天 (2015): 極低頻度の災害に対する避難行動の社会心理学的な考察、土木学会論文集 F6 (安全問題)、Vol.71、No.2、pp.I_191~I_198.
- [4] 渡辺偉夫 (1998): 日本被害津波総覧【第 2 版】、東京大学出版会、238 p.
- [5] 越村俊一 (2005): 過去の災害に学ぶ (第 4 回) 1896 年明治三陸地震津波、広報ぼうさい、No.28、https://irides.tohoku.ac.jp/media/files/earthquake/tsunami/20110324_05koshimura.pdf、2017-7-18 閲覧
- [6] 石橋克彦(2014): 南海トラフ巨大地震—歴史・科学・社会、岩波書店、pp.18-24.
- [7] 福井英夫・渡辺良雄・長谷川典夫・藤原健蔵 (1960): 三陸海岸中南部地域におけるチリ地震津波について、東北地理年報、第 12 巻、3 号、pp.80-102.
- [8] 渡辺偉夫 (1987): 1983 年日本海中部地震による津波発生時の特徴—特に地震のメカニズムとの関係、地震、第 40 巻、pp.425-433.
- [9] 中尾政之: 日本海中部地震【1983 年 5 月 26 日、秋田県および青森県の日本海沿岸】、失敗知識データベース—失敗百選、<http://www.shippai.org/fkd/hf/HA0000617.pdf>、2019-7-10 閲覧、7 p.

- [10] 奥村与志弘・中道尚宏・清野純史 (2013): 想定を超える津波からの避難の特徴と対策—宮城県志津川地区の事例分析—、Vol.69、No.2、pp.I_1366-I_1370.
- [11] 国土交通省河川津波対策検討会 (2011): 河川への遡上津波対策に関する緊急提言、<https://www.mlit.go.jp/common/000163992.pdf>
- [12] 田中規夫・八木澤順治・佐藤誠幸・細萱陽 (2012): 東日本大震災における津波の河川遡上と被害状況の把握、河川技術論文集、第18巻、pp.357-362.
- [13] 橋本貴之・今村文彦 (2010): チリ津波による被害に関する気仙沼での現地調査報告、東北大学、津波工学研究報告、第27号、pp.91-95.
- [13] 高島知行・織田幸伸・伊藤一教・本田隆英 (2014): 管路網を対象とした津波の逆流による溢水解析と溢水特性に関する研究、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.70、No.2、pp.I_341-I_345.
- [14] 鈴木章太郎・岡安章夫・宇野喜之・稲津大祐・池谷 毅 (2018): 津波群衆避難モデルにおける滞留時挙動の適正化と避難計画への活用、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.74、No.2、pp.I_385-I_390.
- [15] 加藤周平・下園武範・岡安 章夫 (2009): 個体行動特性を考慮したハイブリッド型群集津波避難シミュレーション、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.65、No.1、pp.I_1316-I_1320.
- [16] 増本憲司・川中龍児・石垣泰輔・島田広昭(2010): 観光地海岸利用者の津波に対する避難行動と避難行動意思決定に関する研究、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.66、No.1、pp.1316-1320.
- [17] 片田敏孝・児玉真・桑沢敬行・越村俊一 (2005): 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.
- [18] 矢守克也 (2009): 再編—正常化の偏見、実験社会心理学研究、第48巻、第2号、pp.137-149.
- [19] 佐藤太一・河野達仁・越村俊一・山浦一保・今村文彦 (2008): 認知的不協和を考慮した津波避難行動モデルの開発—避難シミュレーションへの心理的要素の導入—、地域安全学会論文集、No.10、pp.393-400.
- [20] 安田誠宏・吉田京香・河野達仁 (2019): 防潮堤整備が進む地域における住民の避難意思決定に関する調査及び分析、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.75、No.2、pp.I_1369-I_1374.
- [21] 静岡県地震防災センター: 第3次地震被害想定、<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/e>

- quakes/shiraberu/higai/soutei/houkokusho.html、閲覧 2018-2-1.
- [22] 首藤伸夫 (1988) : 津波災害の変遷と対策上の問題点、海岸工学講演会論文集、第 35 巻、pp.237-241.
- [23] 越村俊一・萱場真太郎 (2010) : 1993 年北海道南西沖地震津波の家屋被害の再考-津波被害関数の構築に向けて-、日本地震工学会論文集、第 10 巻、第 3 号、pp.87-101.
- [24] 河田恵昭・鈴木進吾・越村俊一 (2004) : 防災対策の不確定性を考慮した津波減災効果の評価手法、海岸工学論文集、第 51 巻、pp.1311-1315.
- [25] 宍戸直哉・今村文彦 (2009) : 津波リスクマップ作成のための人的被害評価手法の検討、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.65、No.1、pp.1346-1350.
- [26] 内閣府南海トラフ巨大地震対策協議会 (2012) : 南海トラフの巨大地震 建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要、http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/20120829_gaiyou.pdf、閲覧 2016-01-12.

第3章 避難モデルの開発

本研究では、津波対策検討のための人的被災リスク評価手法の確立を目的として、ポテンシャルモデルと個別要素型モデルのハイブリッドタイプの群衆避難モデルを開発した。本章では、個別要素型モデルとポテンシャルモデルの基本モデル要素と実地形での群衆避難行動を数値的に解くための工夫点について説明する。さらに、今後の実用化に向けては客観性や汎用性の確保が必要であることから作成した GIS データ活用ツールを説明し、既往論文の方法により行った開発避難モデルの避難場所・経路選択や避難者の群衆移動特性等に関する妥当性確認の結果を示す。

第1節 人的被害推定に用いられる避難シミュレーション技術

有事の避難行動は、津波発生時の状況に反応して人々が選択するため、予測し評価することは容易ではない。既存の人的被害推定法は過去の津波災害の結果や浸水解析結果に基づくものであり、被害推定で考慮できる被害要因や被害軽減対策が限られ、津波特性や避難行動の地域性を考慮した被害推定を行うことができない。一方、数値モデルの中で避難行動をシミュレートする津波避難モデルは、東日本大震災以降の津波研究や施策分析の下で開発が急速に進んでおり適用事例も多い。

本節では、既往研究レビューで確認された避難モデルの種類と特徴、人的被害要因への適用性について整理する。なお、ここで整理するのは各モデルの基本的特性であり、他のモデルの要素を取り入れるなどの改良により、モデルの機能拡張は可能である。

第1項 避難モデルの種類

避難モデルは、避難路や移動方向などのシミュレーション対象領域の特性を表現するモデルと、避難者個々の挙動などの避難者1人の行動を表現するモデルに分けられる。前者の役割を担うモデルとしてノード・リンクモデルやポテンシャルモデル、セルオートマトンモデルがあり、後者の役割は個別要素型モデルにより物理モデルとして表現される。

(1) ノード・リンクモデル

避難者が集合や分岐する交差点や避難場所はノードとして、経路はノード間をつなぐリンクとして条件設定を行い交通流問題解くモデルである。混雑による影響は、リンク上の避難者密度から移動速度を推定し反映する。そのため、避難者の追い越しや避難経路形状の詳細を考慮した解析は難しい。

(2) セルオートマトンモデル

空間を格子状に分割し、隣り合う格子への人の動きを表現するため、避難者の1ステップでの移動は、格子サイズ以上にはならず、方向も限定されるが、計算のアルゴリズムは比較的明瞭であるため、研究事例も多い。多数の避難者を取り扱うため、結果は統計データではあるが、避難者個々の要素は持っておらず、マルチエージェントモデルと比較すると、避難者の避難行動特性による被害率の影響などについての詳細の分析はできない。

(3) 個別要素型モデル

避難者を要素と定義し、群衆流の中で接触を回避しながら避難者が動く様子は、要素間反発ベクトルで表現する。他にも、要素間に斥力を作用させ避難時のグループ行動を表現したり、壁粒子の壁境界線（面）配置により壁境界で仕切られる空間内を挙動する様子を表現したりすることができる。避難者個々に避難行動特性を属性として与えることで、マルチエージェントモデルとして用いることができる。

(4) マルチエージェントモデル

セルオートマトンがセル内の人の有無で表現し離散的空間で避難状況を取り扱いするのに対し、マルチエージェントモデルは座標プロパティ (x, y) を持ち連続的な避難者の挙動に追従するモデルである。そのため時間間隔を細かくすると、避難者は点群で表現され、避難路内を移動している状況を確認することができる。

個々の挙動特性を表現したもの。1人に与える場合もあるが、行動を共にする集団をまとめて取り扱うこともできる。

(5) ポテンシャルモデル

ポテンシャルの分布を空間的に表現することで、避難者が動く方法を与えるものである。避難場所までの距離をポテンシャル値とすれば最短距離にある避難場所が求まり、災害リスクを平面的に分布させることによって災害に合わないよう避難者を動かすことができる。ポテンシャルモデルは、主に移動方向を表すためのものだが、混雑時時の衝突回避行動などによって避難路内から街区に出た人が避難路にもどるなどの道路壁面の境界を表現できる。

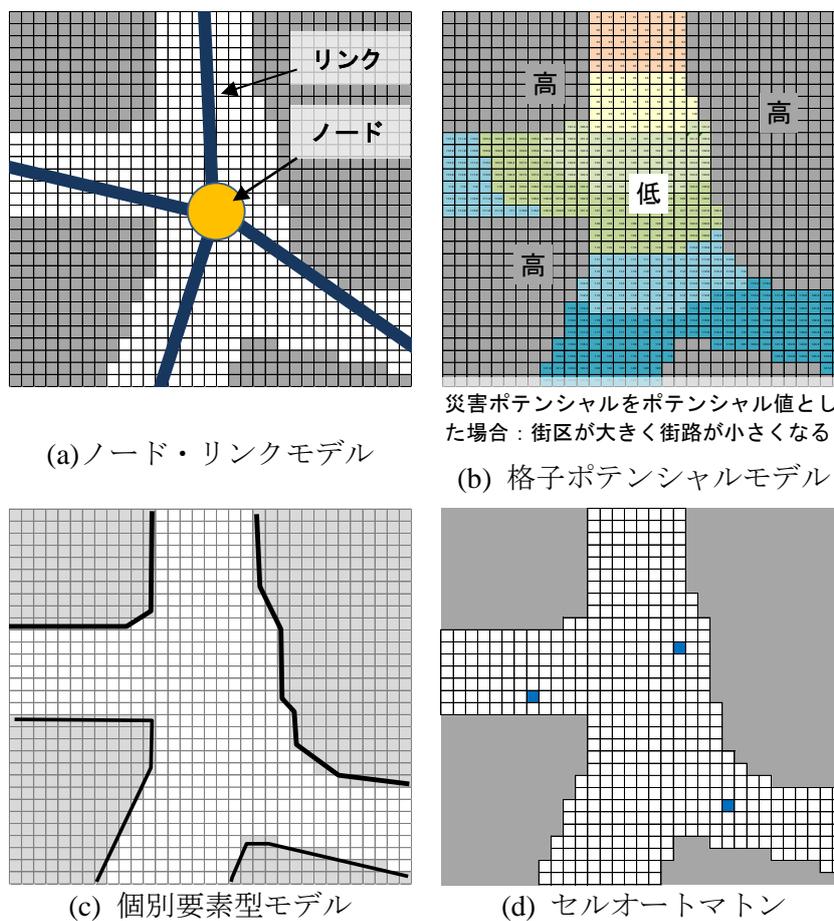


図 3-1 避難者移動の制約方法

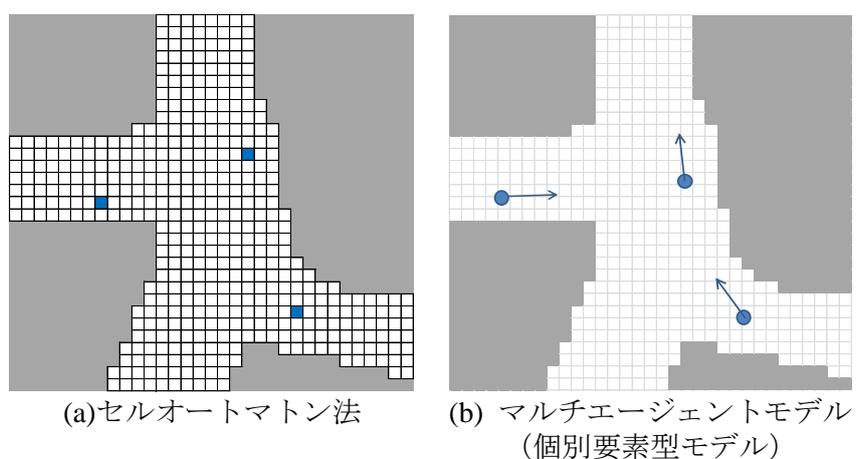


図 3-2 移動量を示す方法

第2項 モデルの種類分けと組み合わせ

空間の移動制限を表現するのは、ノード・リンクモデル、個別要素型モデル、セルオートマトンモデルである。ポテンシャルマップモデルはそれらと比較して条件として自由度は高いが、方向を表現している。

セルオートマトン法とマルチエージェントモデルの2つのモデルは、避難者位置の表現をそれぞれ離散格子(I, J)と連続的な座標系 (x, y)で行うモデルである。

ノード・リンクモデルは津波避難の研究開発対象となっており表現できないものがほとんどなく、解析しやすいという特徴を持つ。マルチエージェントモデルとの組み合わせも良いが、実際には複雑な避難経路をノードとリンクでの表現するため、解析者のノードおよびリンクの選択やデータ作成条件によって、シミュレーションの結果が変化すると考えられる。

セルオートマトン法は、単独で比較的様々な要素を取り込むことができ短所が少ない手法であるものの、避難者個々の行動と被害低減との関連を調べることができず、避難者個々の挙動を追従して調べることができるマルチエージェントモデルと比べると津波対策の効果計測や被害要因分析を目的とする本研究の要件を満たしていない。

表 3-1 避難モデルを用いた研究

		移動方向を示す				
		N/L	PM	DEM	MA	CA
移動時の境界条件	ノード・リンクモデル N/L		◎	×	△	×
	ポテンシャルモデル PM	×		△	△	×
	個別要素型モデル DEM	×	◎		△	×
	マルチエージェントモデル MA	×	◎	×		×
	セルオートマトンモデル CA	×	◎	×	×	

◎ : 2つのモデルの長所を生かせる組み合わせ

○ : 片方の長所を生かせる組み合わせ

× : 片方、もしくは両方が長所や機能を果たせない組み合わせ

△ : マルチエージェントモデルは避難者個々の個性や考えを持つため移動方向や移動境界は制御しない。何かを組み合わせることで特徴を発揮するものである。

表 3-2 避難モデルを用いた研究

	避難モデルの種類	研究の目的や特徴
横山ら ^[1] (1995)、 目黒・藤田 ^[2] (2002)	ポテンシャルモデル	地下空間での火災避難
瀧本ら ^[3] (1996)	ノード・リンクモデル	火災時避難、地下街
清野ら ^[4] (1998)、 土肥(2017)	個別要素法	地震や火災、ビル
片田ら ^[5] ^[6] (2000、2011)	ノード・リンクモデル	市町村(郡山市阿武隈川流域)、 情報伝達シミュレーション
後藤ら ^[7] ^[8] (2004、2006)	個別要素型	市街地・街区
堀ら ^[9] ^[10] (2005、2008)	マルチエージェント モデル	地震時避難
白木ら ^[11] (2006)	セルオートマトンモデル	津波避難
大鑄・小野木 ^[12] (2008)	セルオートマトンモデル	火災時避難、建物(ビル)
加藤ら ^[13] (2009)、 鈴木ら ^[14] (2018)	個別要素型モデル +ポテンシャルモデル	津波避難、海水浴場から市街地
西畑ら ^[15] (2012)	ノード・リンクモデル	市町村(気仙沼)、車両
日本地震工学会 ^[16] (2014)	ノード・リンクモデル	避難者や車両混雑による閉塞 市町村(鎌倉市海岸) 他
熊谷 ^[16] (2014)	ノード・リンクモデル	市町村(釜石市)
小柳・有川 ^[17] (2016)、 有川ら ^[18] (2016)	マルチエージェント モデル	市街地、津波避難、避難タワー
牧野嶋ら ^[19] ^[20] (2016、2017)	マルチエージェント モデル	津波避難、市町村(気仙沼市)
高畠・柴山 ^[21] (2017)	ノード・リンクモデル	市街地(鎌倉)、津波避難

第3項 津波被害要因と避難モデルの対応

第2章で整理した人的被害に影響を与える要因と、前項で調べた避難行動の基礎モデルの特性を比較すると、津波避難時の避難行動を一つのモデルで表現することは難しいと判断される。表 3-3 に整理したとおり、基礎モデルをいくつか組み合わせて、様々な条件下での避難行動を解析することで、今後の拡張も含めて多様な被害要因の調査、対策検討のための避難モデルとなる可能性がある。津波被害の要因と、各避難モデルによる表現可能性について、表 3-4 に示す。

既存モデルを調べた結果として、開発者の関心対象の被害要因や現象に着目したモデルの適用限界や汎用性の課題から、様々な被害要因を用いて津波リスクを詳細に分析した研究は少ないことが分かった。

表 3-3 避難モデルによる津波被害要因の表現可能性

分類	避難モデル	ノード・リンクモデル	ポテンシャルモデル	個別要素型モデル	マルチエージェントモデル	セルオートマトンモデル
	被害要因					
津波浸水	想定以上の津波への対応	△	◎災害ポテンシャルとして与える	×	△対応を個別に与える	○
	津波の河川遡上	△	◎災害ポテンシャルとして与える	×	△対応を個別に与える	○
	水路網からの浸水	△	◎災害ポテンシャルとして与える	×	△対応を個別に与える	○
津波避難（発生条件）	地震津波	×	×	×	◎避難開始時刻を与える	○
	避難路の閉塞	○	◎	◎	△	○
	避難タワー・ビルへの避難	○	◎	○混雑の表現	△	○
	避難路の混雑	○	○	◎	×	○
	夜間発生	△	△	×	◎	△
	停電	○	○	×	○	×
	車両	○	○	◎	△	○
（心理）津波避難	正常性偏見	×	×	×	○	×
	認知的不協和音	×	×	×	○	×

◎：詳細に表現が可能 ○：簡便法で対応可能。 ×：対応不可

△：間接的に考慮をするかどうかを機能させることができるため、他のモデルと組み合わせて対応

第2節 開発コンセプトと基本モデル

前節で比較した各種の避難モデルの特徴から、加藤ら^[13](2009)が開発した個別要素型モデルとポテンシャルモデルのハイブリッドモデルを採用する。選定理由は、この避難モデルは人的被災リスクの評価を行うために必要な、人的被害への影響がある避難行動や避難経路の設定可能という点と、マルチエージェントモデルで用いられる避難者個々の特性をランダムで与えることによって統計値として扱うことができる点である。

複雑系の解析システムには、短所もある。避難者の動きの制限が少なく、避難路モデルについても自由度が高いが故に、データ作成が煩雑になる。また、データ作成プロセスの中に、手作業が入ることで、作成データの客観性が失われ人為的なエラーが生まれることもある。本研究では、これらモデル特性由来や作業由来のエラーを回避するためのアイデアを考えツールを整備した。データの客観性のために、まずデータ作成にはGISデータを取りこみ、GISデータは公的機関などで用いられる客観データである。

避難場所および避難経路の選択モデルにおいて従来加味されることがなかった、浸水リスクを考慮した方法を提案する。

表 3-4 開発する避難モデルの機能と基本モデル

モデル	個別要素型 マルチエージェントモデル	ポテンシャルモデル
表現対象	<ul style="list-style-type: none"> ・衝突回避／グループ行動 ・避難者個々の特性（避難速度、避難開始時刻、初期位置） 	<ul style="list-style-type: none"> ・街路と街区、建物 ・避難経路 ・避難場所の設定（指定場所、標高、避難タワーおよび避難ビル）

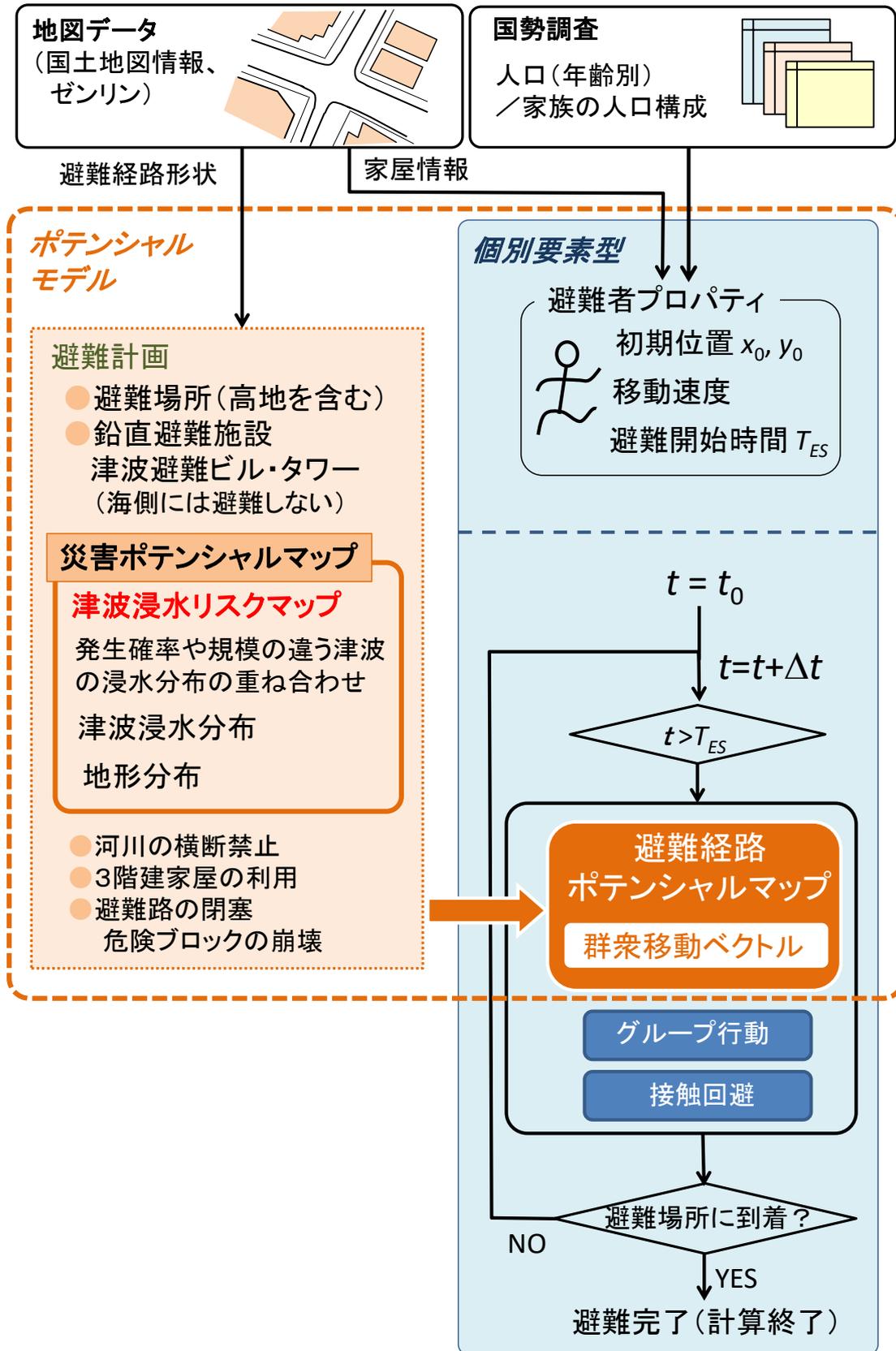


図 3-3 避難解析モデルのフロー

第3節 避難者個々の挙動を制御する「個別要素型モデル」

第1項 基礎式

(1) 要素の運動方程式

個別要素型モデルは、避難者個々の挙動を表現するもので、本研究では群衆避難を解析することにより、対象地域の人的被害の統計データとして取り扱うことを可能にしている。このように、避難者個々に固有のプロパティを持たせて計算する手法は、マルチエージェントモデルとも呼ばれる。

個別要素型モデルでは、避難者を質量と大きさを持つ仮想粒子としてみたてている。従来個別要素型モデルは、多数の個々の粒子や物体からなる数値モデルを考え、個々の有限な変位や回転を模擬的に再現するシミュレーションである。シミュレーションの中では、粒子が互いに接触したり離れたりするが、ある粒子と周囲の粒子との相互作用は、ダッシュポット（ばね）の原理を適用しており、2粒子間の接触点において力が発生する。群衆を構成する要素 i の時刻 t における運動方程式は、(1)式とした。粒子の移動速度ベクトルに影響する力として、粒子間作用力 $\mathbf{F}^{col}(N)$ 、粒子間の抗力 $\mathbf{F}^{dash}(N)$ である。この外力に加えてポテンシャルマップによる移動ベクトル \mathbf{x}_i を補正した移動速度ベクトル $\mathbf{v}_{pi}(m/s)$ からこの運動方程式と連続式は成り立つ。

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i(t)}{dt} = m_i \frac{d\mathbf{v}_{pi}(t)}{dt} + \mathbf{F}_i^{col}(t) + \mathbf{F}_i^{dash}(t) \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathbf{v}_i(t) \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

ここに、 m_i は i 番目の要素質量(kg)、 $\mathbf{x}_i(t)$ および $\mathbf{v}_i(t)$ は時刻 t における要素 i の位置および移動速度ベクトル(m/s)である。

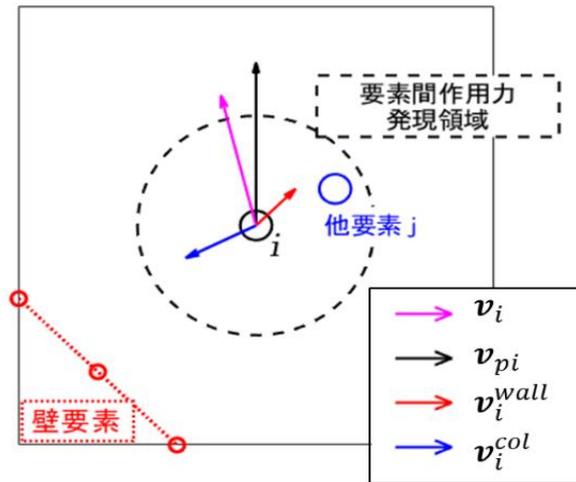


図 3-4 要素の移動速度ベクトルの概要図(鈴木ら^[22](2018))

(2)要素間作用力

人間は相互に接触する前にそれを回避しようとする心理が働き、他者との距離を一定に保とうとする。この衝突を未然に防ごうとする力が働き始める距離は心理的距離(仮想半径)と呼ばれる。この要素間作用力は心理的距離内に他者が存在する場合にのみ作用する。一方で人間自身の大きさを表したものを要素半径と呼ぶ。要素 i に働く要素間作用力 F_i^{col} (N)は

$$F_i^{col} = \sum_{j \in \psi}^n -k_{ij} \cdot (l - |d_{ij}|) \cdot \frac{d_{ij}}{|d_{ij}|} \dots\dots\dots (3-3)$$

で表される。 k_{ij} は要素のばね定数であり、 l はばねの自然長(m)、 d_{ij} は要素 i と j の重心間距離(m)である。 ψ は要素周囲に存在する要素である。衝突を未然に回避する行動は、人間の視野に基づいて発現する。このことを考慮すると要素間作用力は視野つまり進行方向に大きく働き、後方にある要素からの影響は小さくなる。そこで要素正面方向と要素 i から見た要素 j の方向のなす角を θ_{ij} (rad)とし、ばね定数を与えた。

$$k_{ij}(\theta_{ij}) = k_{max} \cdot \left(\alpha \cdot \cos \frac{\theta_{ij}}{2} + \beta \right)^6 \dots\dots\dots (3-4)$$

k_{max} は要素の最大ばね定数、 β はばね定数の下限を示す係数である。 α は要素周囲の要

素密度に依存したばね定数の制限関数である。移動時に自身の周囲の人口密度が低ければ、他者から大きく逸れて移動し、高密度下では他者の間をすり抜けて移動することから、周囲の要素密度に応じたばね定数の設定をした。

$$\alpha = \max(A, B) \dots\dots\dots (3-5)$$

本研究では、鈴木ら^[4](2019)を基に、 A を $-0.3 \rho / \rho_c + 0.8$ とし、 B を 0.5 とした。 ρ は要素重心を中心として半径 1.5m 以内の要素密度(人/m²)、 ρ_c は 2.0 人/m²とした。

(3) ダッシュポットによる抗力

要素間の作用力を速やかに減衰させるためにダッシュポットによる抗力(粘性係数)を取り入れた。この粘性係数は要素の質量 $m(\text{kg})$ とばね定数より求められる。本研究では清野ら^[4]の用いている臨界減衰値 c を採用した。 ψ は要素半径内に侵入した要素である。

$$\mathbf{F}_i^{dash} = \sum_{j \in \psi_i}^n -c \frac{(0.5 - |\mathbf{d}_{ij}|)}{dt} \cdot \frac{\mathbf{d}_{ij}}{|\mathbf{d}_{ij}|} \dots\dots\dots (3-6)$$

$$c = \sqrt{mk_{ij}} \dots\dots\dots (3-7)$$

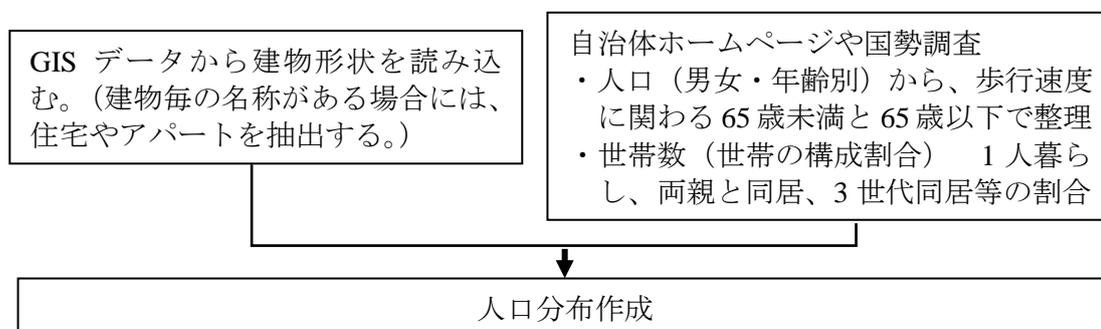
第2項 避難者の個人属性の設定

避難行動条件については、避難者個々に与えて解析を行うこととした。モデルの中では、変数として以下のものを与えられることを想定した。

- 避難時の移動速度 SP_x 、 SP_y ：坂道の低減効果
- 避難行動開始時刻 TS_{ev} ：避難者個々で変わっており、正規分布やの関数形をもって示されることがある。さらに、避難行動を行わないオプションを付け、避難行動を取ることによる効果を把握することもある。
- 避難情報 INF_{ev} ：テレビやラジオ、防災無線などから避難
- 避難行動を共にする人の有無、対象
- 初期位置 X_0 、 Y_0

(1) 条件の設定方法

条件データ作成について、4章のケーススタディにおける設定方法を例として図3-5に示す。今回は、地域全体の津波防災の評価を目的としたため、住宅から避難について検討した。日中の学校や勤務先での避難については、避難準備の状況や特別ケースとしての取り扱いとして重要になる。



日中の人口分布は、学校や地域の産業、周辺都市への移動について調べる必要がある。関連な情報は自治体ホームページなどで得ることができる。

図 3-5 避難時移動速度のヒストグラム（65歳未満、65歳以上）

(2) 乱数による設定

本避難モデルは、被害評価を目的するため、避難者個々の初期位置や移動速度、避難開始時間をランダムに与え統計データを得るものである。ここでは、避難時の移動速度と避難開始について、ガイドラインや研究論文に示される設定方法を紹介する。

●避難者移動速度

避難時移動速度は、避難率に影響を与えるため重要であるが、避難シミュレーションの各事例における設定値は異なる。

「津波避難ビル等に係るガイドライン案」では、避難可能距離を算定する際に用いる歩行速度として、1.0m/s とし、歩行困難者や身体障害者、乳幼児、重病人等については、歩行速度が低下することの考慮を指摘している。

総務省消防庁は、津波避難対策推進マニュアル検討会^[21]において、通常時の歩行速度（老人の自由歩行、群衆歩行速度、地理不案内者歩行速度）として 1.0m/s、老人の単独歩行時には 1.1m/s、群衆歩行では 1.1～1.2m/s を提案している。

上記はいずれも避難距離の計算に用いるものであり、避難タワーの位置検討などにおいては、1.0m/s を推奨しているものが多い。

高台への避難については、老人の階段上り坂昇降速度として、0.21m/s を設定しているものが多い（例えば、足立^[22]、1980）。

一方、内閣府^[23]は、東日本大震災発災時の状況をアンケート結果に基づき、徒歩での避難速度は平均 2.54km/h で、さらに歩行困難な同行者がいた場合に 1.88km/h と低い速度になる結果を示した。この速度は、東日本大震災以前の徒歩での避難速度の目安であった 3.6km/h = 1.0m/s よりも小さい。さらに、避難距離によっても避難速度に差異が発生することについても示した。

●避難開始時刻

津波避難開始時刻は人的被害に与える影響も大きく、関連する研究は多い。

総務省^[24]は、地域の実情に応じて、地震発生後 2～5 分後に避難開始できるものとし、夜間の場合には避難開始までに準備に時間を要すること、東日本大震災では震度 4 以上の揺れが 3 分以上続いた地域があることを留意する点としている。

南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループでは、すぐに避難する人は地震発生から 5 分後に避難を開始すると仮定している。

図 3-6 は、宇野ら^[25](2015)による南海トラフ地震津波による被害が懸念されている地域で行った、避難開始時間に関するアンケート調査結果である。地震が日中に発生した場合と、夜間に発生した場合での変化について調べたものである。ヒアリングの結果から、日中と夜間での避難開始時刻の累積分布はおおむね正規分布曲線で近似できている。また、日中の避難開始時刻は揺れが収まってから平均 6 分となっているのに対し、夜間では 10 分を超えている。この地域では、駿河トラフを波源とする津波避難解析結

果から、地震発生から10分頃に津波浸水が開始すると推定されており、揺れが収まるまでの時間を2分とした場合、夜間時には約7割の人が避難を開始できておらず被害が甚大化する可能性がある。

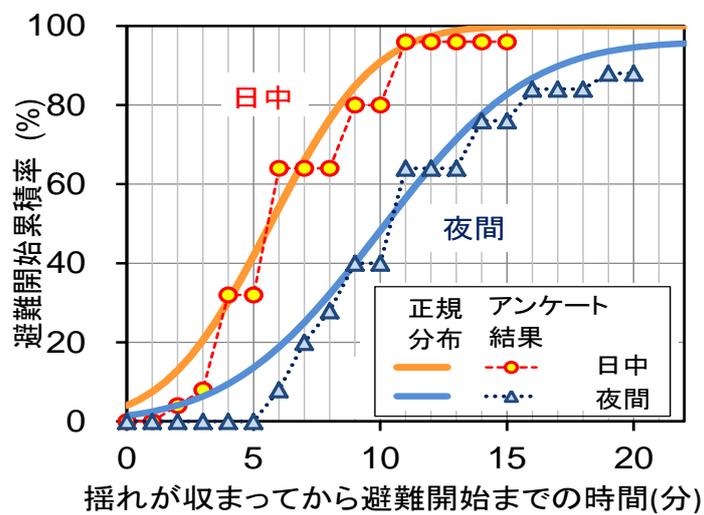


図 3-6 避難開始時間設定のためのアンケート結果

第4節 避難経路条件設定の「ポテンシャルモデル」

第1項 避難経路マップ

開発モデルにおけるポテンシャルモデルの役割は、対象地域における避難経路や避難タワー・ビルを含む避難場所の分布による影響を評価可能にすることである。そのためには、避難経路の形状を反映していることが第一条件になる。

図 3-7は、解析範囲に平面格子を設定し、道路グリッド、街区グリッド、建物グリッドの3種類に分けた結果を示す。これら避難モデルは、次節で説明するツールを用いて地理情報 GIS データに基づき作成する。避難者は、道路グリッド内を避難するが、避難者の多くは建物内から出発し、街区グリッドを通じる必要がある。建物内や街区にいる避難者は、その時刻位置から最も近い避難グリッドに向かって移動する。

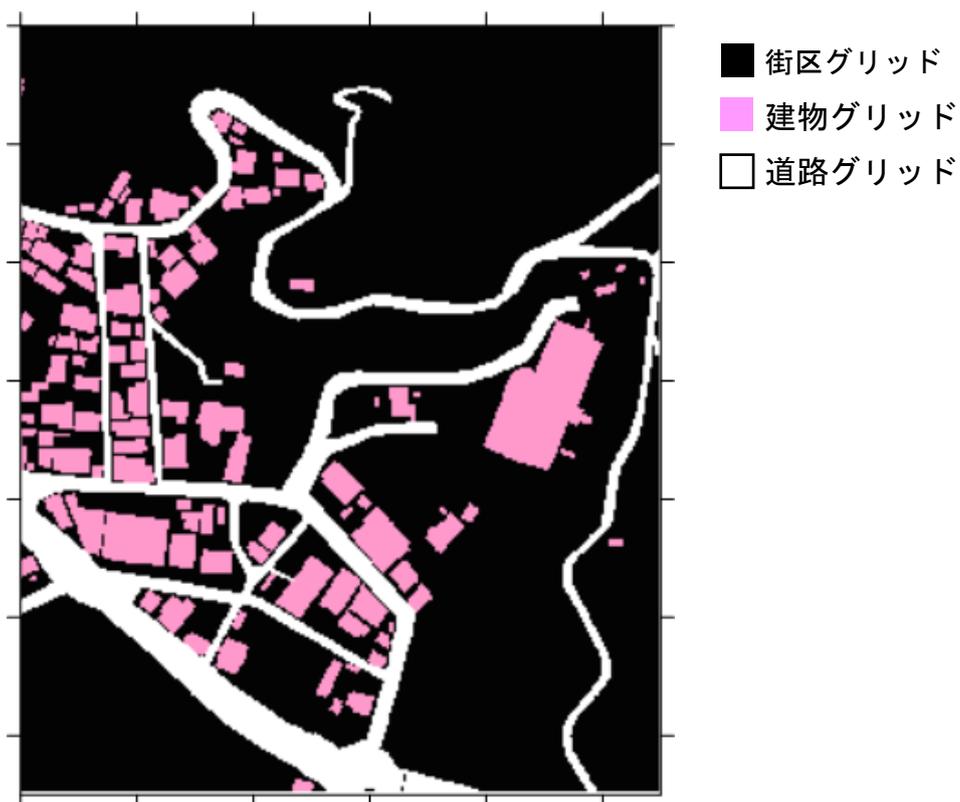
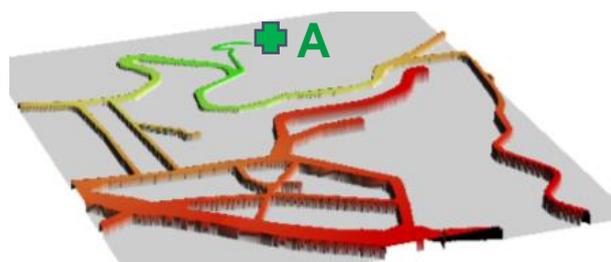


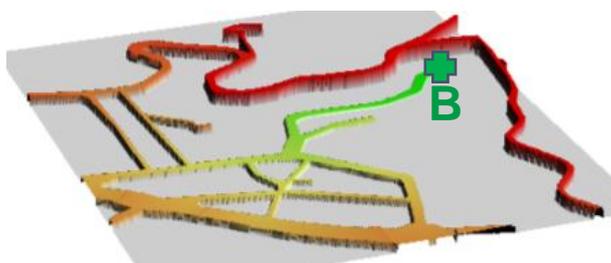
図 3-7 街路と街区、建物のグリッドの分布

道路グリッドにいる避難者は、避難路グリッド内を移動し、避難場所あるいは浸水エリア外を目指し移動する。本モデルでは、移動方向を決定するためにポテンシャルマップを作成する。分かりやすい方法としては、現在位置から最も近い避難場所に向かって移動するよう設定する方法であり、最も採用されている方法でもある。この方法では、避難場所から各セルへの距離を計算し、ポテンシャル値として与え、避難者はポテンシャル値が小さくなるように移動する。つまり、避難場所に近づく方向に移動する。

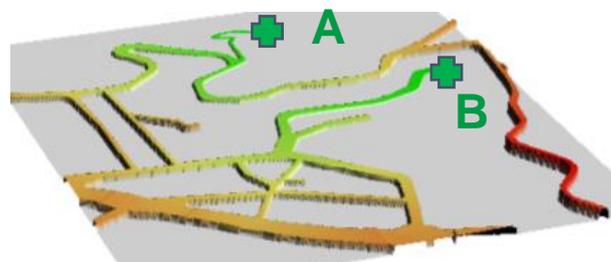
図 3-8 には、避難場所までの距離をポテンシャル値とするポテンシャルマップを示す。この図では、避難場所が A と B の 2 箇所ある場合の避難ルートを設定している。通常避難場所は複数分布する地域での最短距離避難行動は、複数の避難場所までの距離を表すポテンシャルマップを作成し、それらを重ね合わせたポテンシャルマップから最短距離にある避難場所に移動するように解析する。



(a) A を避難場所とする場合のポテンシャルマップ



(b) B を避難場所とする場合のポテンシャルマップ



(c) A および B を避難場所とする場合のポテンシャルマップ

図 3-8 複数の避難場所がある場合のポテンシャルマップ作成方法

第2項 津波浸水マップを用いた避難

目黒・織田^[26](2005)は、災害要因の分布をポテンシャルマップに取り込む避難モデルを提案した。しかし、津波群衆避難モデルで表現する避難行動に災害要因を事前情報として取り入れた例はほとんどない。

本項で提案する避難経路選択法は、避難者の初期位置から最も近い避難場所を選択する避難方法とは異なり、事前に実施する津波浸水計算結果に基づき津波浸水確率が小さい領域へ避難するものである。前項で示した最近傍避難場所への最短避難行動は、津波浸水に関係なく選定されるため、避難場所は浸水する確率がほぼゼロだとしても、浸水遭遇確率が高まる方へ一時的に移動する避難プロセスが含まれている可能性がある。

津波避難シミュレーションでは、津波ハザードマップに示される浸水エリアの外や避難タワーへの避難を対象として実施されることが多い。地方自治体が公開する津波浸水ハザードマップには一般的に生起確率が非常に小さい最大規模の地震による浸水域が示されるが、実際に直面する津波が最大規模の地震によるもので広範囲の津波浸水を発生させるものとは限らない。グーテンベルク・リヒター則に基づけば、最大規模の地震によって発生する津波浸水エリア、つまり津波ハザードマップに示されるような津波浸水は発生する確率が低く、実際の津波に対する避難行動は容易になる。津波ハザードマップが最大クラスの津波浸水エリアを採用する理由は、避難者の避難意識向上や、浸水確率の十分低いところまで避難を誘導させることを目的としているためであると推察する。一方、浸水エリアが最大規模の津波に対しては避難が難しい地域であっても、それより浸水エリアが小さい津波に対する避難行動は容易になることが考えられる。発災時にいる場所より安全な地域に避難することは可能である場合がある。ここで提案する避難行動は、リスク評価の考えの下で、人的被災リスクを最小化する行動の1つであり、地域の場所毎の浸水可能性を考えない避難行動により発生する避難行動時の被害に対する対応法の1つであるということもできる。

本研究で提案する避難方法は、次のとおりである。対象地域に浸水および人的被害を発生させる津波には様々あるが、それぞれの津波が生起確率を有するという仮定と、一般的に津波浸水は海岸線や河川に近い場所や標高の低い場所で発生しやすいという空間分布の特性を持つことを踏まえ、津波浸水の発生確率がより低い方への避難が浸水への遭遇確率を下げると考えることができる。実際に個別の避難者が津波浸水に遭遇する否かは避難開始時刻などの避難者個々の他の行動要素にも依存するものの、避難群衆の避難経路選択として浸水確率の小さい方向へ避難した場合には、地域全体の被害率が低

減すると期待される。また、被害が発生する場合にも、発生確率やハザード規模を考慮した人的被災リスク全体が小さくなるものと考えられる。

本避難モデルは、複数の津波モデルによる浸水分布を重ね合わせた浸水確率マップを用いて、避難方向を求めるポテンシャルマップを作成する。例えば図 3-9のように、対象地域で浸水確率に応じて領域分けを行う。避難者は、領域毎の浸水発生確率を考慮し、今いる場所よりも浸水確率が小さい方へ避難するよう避難経路を見つけ移動する必要がある。最近傍の避難場所への避難するための最近傍探索モデルを流用して、その避難経路を見つけ避難することが可能である。

(1)浸水確率マップからポテンシャルマップの作成

一方、対象地域の地形や浸水の境界となる水涯線が入り組む場合などは、浸水確率マップを取り込むとポテンシャル値が一方向に減少あるいは増加せず、ポテンシャル値の平面分布が谷のようになり避難者が止まる場合がある。浸水確率マップの解像度に依存し、マップが複雑になると避難者が止まるエリアが生まれる可能性は高くなると考えられる。止まることなく浸水確率の低い方へ移動するように条件にするには、図 3-10のように、避難経路中で違う浸水確率が分布しないように浸水確率マップに処理を行う必要がある。そのようにして得られた、修正後の浸水確率マップは図 3-11のとおりであり、群衆は赤矢印の方へ避難する。

(2)浸水確率マップ作成の注意事項

対象地域では、異なる浸水確率を有する3領域でエリア分けをした。波源モデルが4つであるのに対し3領域で設定したのは、安政東海地震と5地震総合モデルの浸水域が顕著な違いがなかったためである。本提案方法の避難群衆の移動方向は、ポテンシャルマップの基礎データである浸水確率マップで決まり、浸水確率マップによって被害発生状況が大きく変化する。浸水確率マップを作成する際のモデル津波と、被害推定に用いたモデル津波が同じであったため、本提案方法の効果が如実に表れていると考えられる。それは、浸水確率マップ内で表される浸水確率分布と被害推定を行う際のモデル津波による浸水確率分布と等しくなる場合には、避難者の移動方向が浸水に遭遇する確率を小さくする方向と完全に一致するからである。浸水確率マップを作成する際のモデル津波に、被害推定を行う場合のモデル津波が含まれていない場合やそれが他のモデル津波と異なる浸水分布になる場合には、被災リスクを小さくする方向と、その津波による浸水域との関係が違う場合に、被害が低減しない可能性がある。したがって、ポテンシャルマップを作成するための浸水確率マップおよびその基礎データとなるモデル津波

の選定は、被害低減効果を期待する上では非常に重要である。

(3)ポテンシャルマップ作成における課題

浸水確率分布のみによるポテンシャルマップ作成ではなく、浸水時間や標高を考慮することで被害が低減する可能性がある。北村ら^[28](2019)は、様々なモデル津波を発生させ、避難者毎に避難場所や避難経路について考えられる全ての組み合わせを適用して、被害が発生しない避難経路を選択させる経路選択モデルを提案した。時々刻々変化する浸水プロセスの津波浸水モデルにおける解析精度は、地形の精度や空間解像度、地物や地表面特性の再現に依存するため容易ではないが、個別の浸水プロセスではなく様々な浸水プロセスを1つのマップに浸水分布のみを考慮し、相対的な被害発生確率を考える本提案モデルにおいては、浸水開始時間の考慮により、被害率を低減させることは可能であると考えられる。

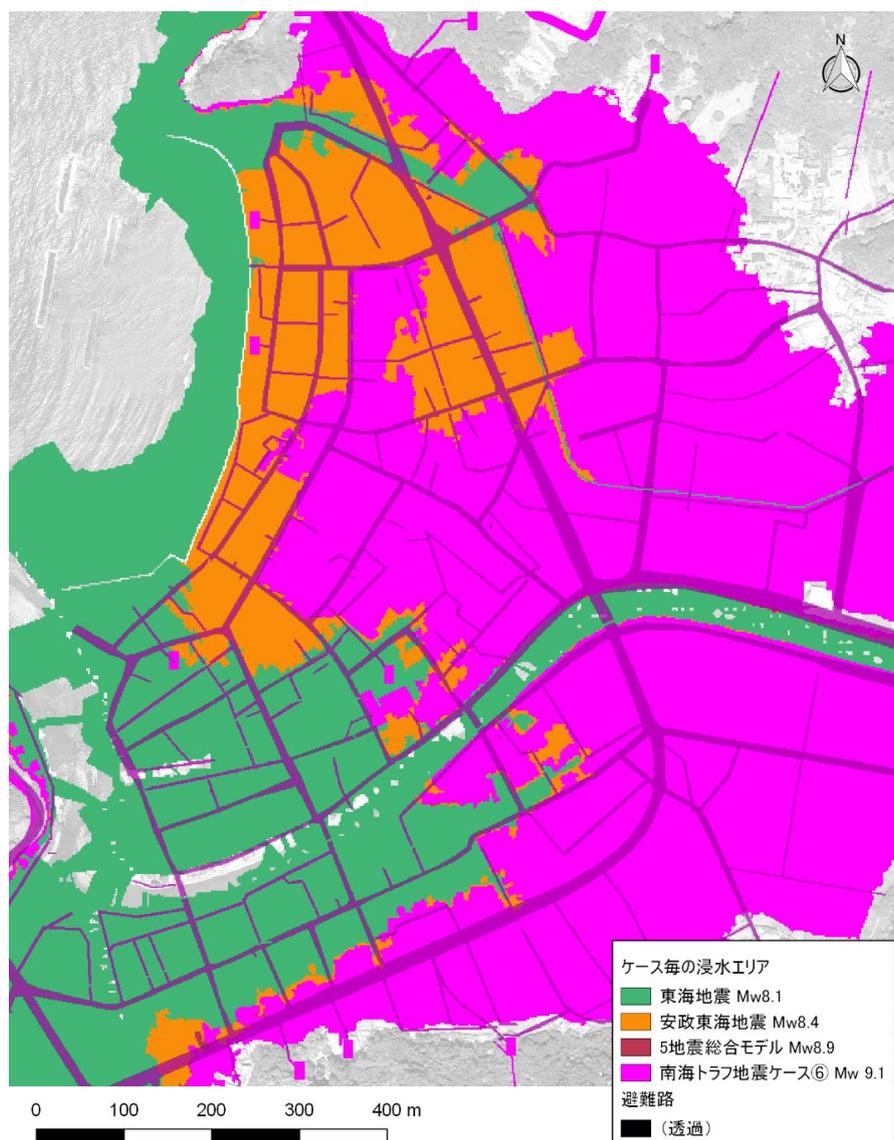


図 3-9 津波ケース毎の浸水エリア（防潮堤高さ T.P. 7.5m、潮位：T.P. +0.6m）

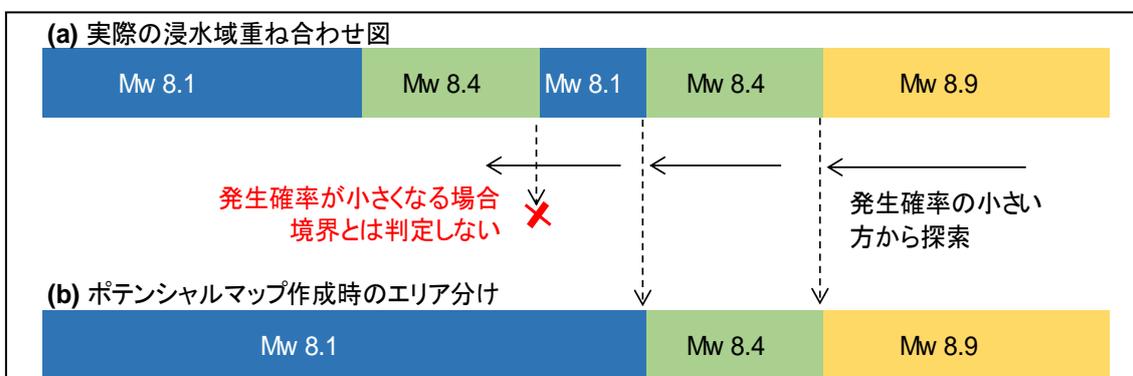


図 3-10 避難路の浸水リスク領域分け手順



図 3-1 1 浸水解析結果に基づき分けた区分図
(防潮堤高さ 7.5m、潮位 : T. P. +0.6m)

第3項 避難タワーへの避難の取り扱い

避難タワーは、比較的海岸線近くに建設されることが多い。それは、海岸線や河口の近くにいる避難者が十分高く浸水が発生しない高台までの避難が難しい場合に一時避難場所として利用するためである。しかし、高地に比べて避難タワーが近いという理由により海に向かって避難する場合には、浸水確率の高い方に向かっていてるため被害にあう確率が高くなると考えられる。小柳・有川^[27](2016)は、避難シミュレーションを用いて、海側への避難による被害者増大の可能性を指摘している。

したがって、本避難モデル開発では、避難タワー利用時の海側避難をしないようポテンシャルマップを作成するツールを作成した。

- (i) 避難タワーがない状態で、ポテンシャルマップを作成する。
- (ii) 避難タワー位置のポテンシャル値 P_{TOWER} をストックする。
- (iii) 避難タワーに避難する可能性のある範囲を設定する。
- (iv) (iii)の範囲内で、避難タワーまでの距離が、 P_{TOWER} から一定距離 dP を差し引いた値も大きい格子群（これは避難タワーよりも海側にある格子、あるいは避難タワー位置よりも浸水リスクの高い格子にあたる。）を抽出する。ただし、避難タワーまで連続している必要があるため、避難タワーからノイマン隣接グリッドで探索する。
- (v) (vi)で抽出した道路グリッドの集合に避難タワーまでの最短距離ポテンシャル分布を与える。



(松崎町ハザードマップを元に作成)

図 3-12 津波避難タワーへの避難

第5節 地理情報システム GIS データの活用ツール

開発する群衆避難モデルで表現する避難経路情報、ポテンシャルマップは高解像度かつ避難経路の複雑な形状を表現可能にする。作業者の判断介入による解析結果のばらつきや、煩雑さを回避するためのモデル簡略化である。前者により結果の信頼性の低下が懸念され、後者によりモデルによる説明能力の低下である。例えば、ノード・リンクモデルは、交差点などの分岐や通過経路、ゴール地点などを、ノード（接点）とリンク（接続網）で表現することで、幾何学的条件の設定を簡略化している。ただし、地図情報の選択とモデル化、混雑時の移動速度の低下などを作業者が設定することになり、解析結果への影響要素が増える。本手法で提案するツールは、国土地理院の公開する国土情報地図システムやゼンリンが商用ではあるが一般向けに作製している地図の電子データを活用した避難経路のモデル、ポテンシャルマップの作成を手助けするツールである。必要範囲の GIS データを入手した後に、最小限の手数で計算条件を設定することが可能になる。データは、GIS 上で様々な情報を重ね合わせることが可能にする Shapefile 形式を基本としている。ポテンシャルマップを作成には、道路縁の情報と避難場所の位置情報を読み込むことで、避難経路となる道路や歩道を反映した地図を作成する。さらに追加で、河川位置や浸水マップを入力することで、考慮したい様々な避難行動条件を設定することが可能になる。

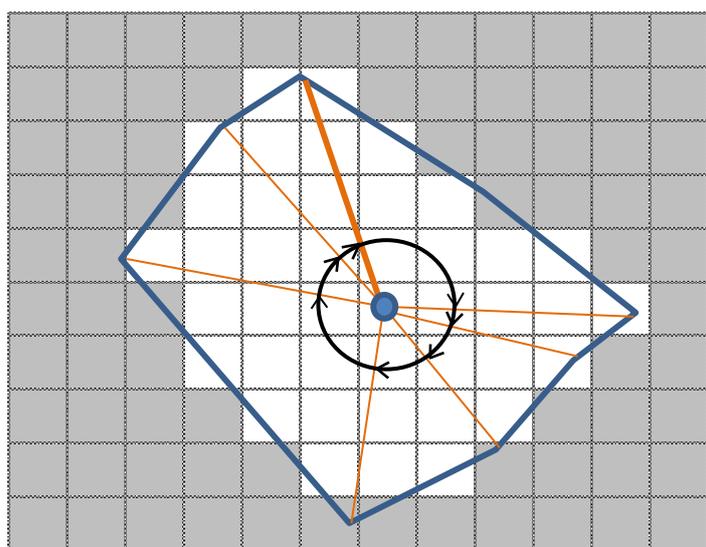


図 3-13 建物周縁データに基づく建築物格子の作成

第1項 街区モデル

自宅から避難経路までは、最も近い接点に向かって直線で移動する。建築物の外周データの地点群の中心付近をスタートすることになる。

避難開始前に自宅からの避難経路が浸水してしまった場合には動けなくなる。浸水解析の中で建物損壊を考慮するモデルであれば、建物損壊の有無によって当該避難者の被災判定を行う。

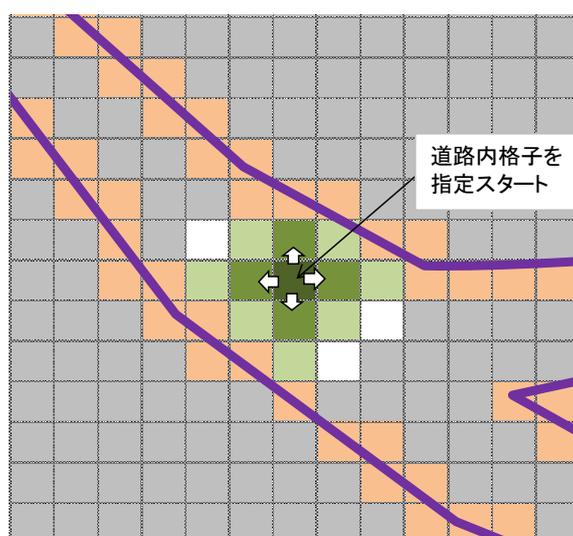
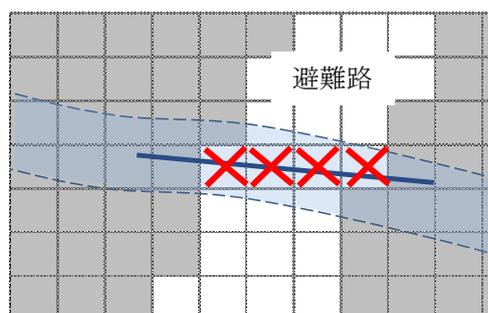


図 3-14 道路グリッドと街区グリッドの仕分け選別

第2項 河川

河川遡上などにより河岸部では周辺と同じ内陸でも浸水しやすく、浸水開始時刻も早い場合がある。河川橋梁部で街路グリッドを分断し、橋梁は横断できないことや橋梁がある河川側に近寄らないように設定する必要がある。その場合には、図 3-15 のとおり、河川箇所を道路セルを



設定方法は道路閉塞と同様である。道路グリッドを横断する青い線の位置のグリッドは街路グリッドにして横断できなくする。

図 3-15 河川を横断する道路グリッドの河川境界処理

第3項 避難路閉塞

自治体等が発行する津波ハザードマップには、避難計画を策定するための危険ブロック塀（耐震性が低いブロック塀）や急傾斜地崩壊危険区域が記載されることがある。また、小さい街区が集合する地区では、古いブロック塀や電柱によって地震発災時に避難路としての通行が危ぶまれる歩行者用道路がみられる。避難行動時の被害要因になることから、図 3-16 に示すように、避難経路が閉塞した条件とすることで、被害の程度の解析や避難経路として使用できるよう強化しそのときの効果を評価することができる。

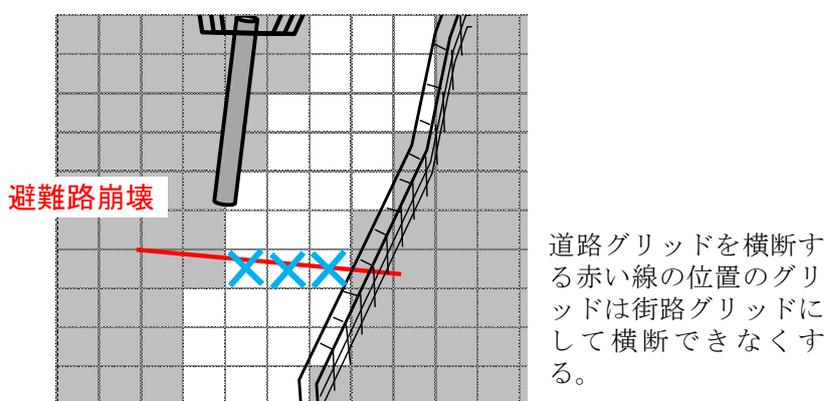


図 3-16 避難経路付近にブロック塀があり道が閉鎖する場合の編集ツール

第4項 避難路の整備

複雑な形状である避難経路は、避難場所まで遠回りさせる可能性がある。

各場所から最近傍の避難場所までの最短距離で表されるポテンシャルマップを用いて、避難経路の整備が望まれる場所の抽出方法について事例により示す。図 3-17 (a) は、各場所と避難場所の直接距離 L_D と、避難路形状を考慮した避難場所までの距離 L_P の比 L_P/L_D の平面分布である。この値が大きい場所は直線距離に対して、避難経路を使った距離が長い場所であり、遠回りしている可能性がある場所であると言える。図の凡例が閾値とする $L_P/L_D=1.5$ という値は、中央防災会議による津波人的被害のマクロ推定方法で各場所から避難場所までの距離を求める際に用いる各場所から避難場所までの距離倍率である。つまり、マクロ手法では非浸水エリアまでの直線距離の 1.5 倍を避難できるかにより被害を推定しており、避難経路の設置場所の検討や被害低減効果を直接行うことはできない。一方、本モデルの解析プロセスで出てくるポテンシャルマップを用いることで、避難経路内で遠回りの要因となっている箇所の抽出し、避難経路整備の提案をすることが可能になる。本分析によって抽出された避難経路整備の必要箇所は、

図 3-17 (b)に示す斜面が遠回りの要因となっていた。

避難路整備による効果が期待される場合には、図 3-18 に示す通り避難経路整備実施箇所の始点と終点を避難路セルに結んだラインデータを作成する。これを取り入れたポテンシャルマップにより、避難経路による効果の評価が可能になる。

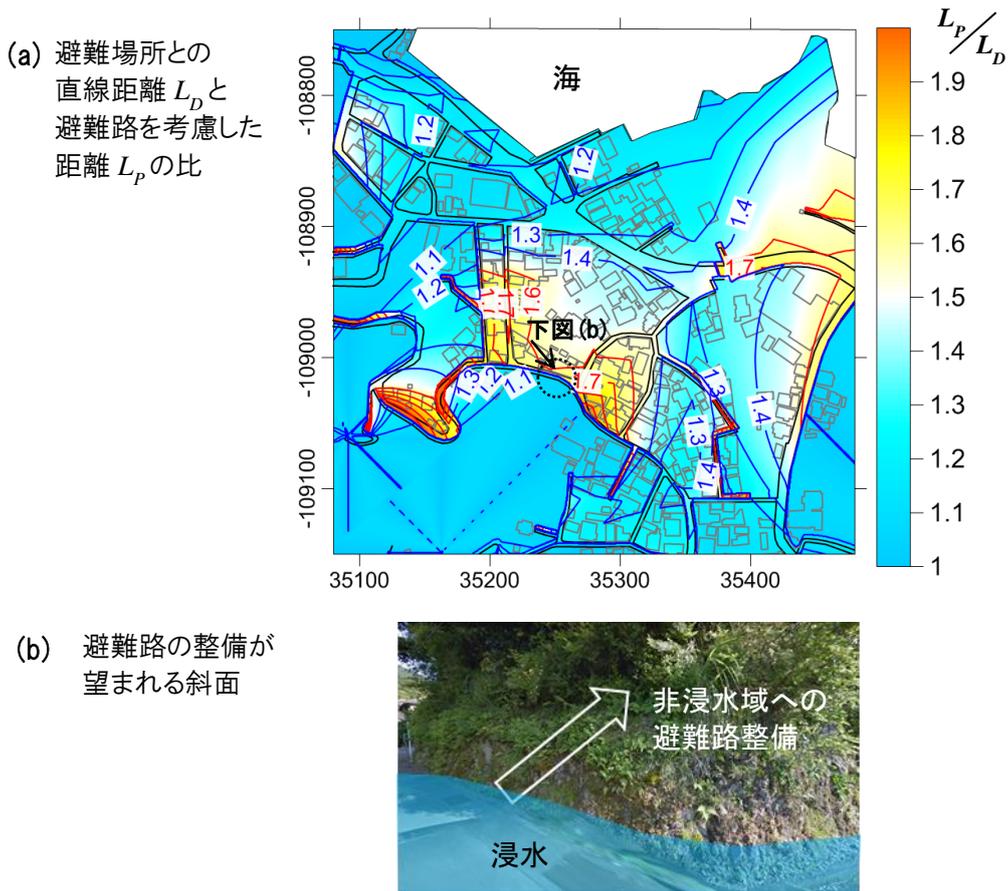


図 3-17 避難路の解析

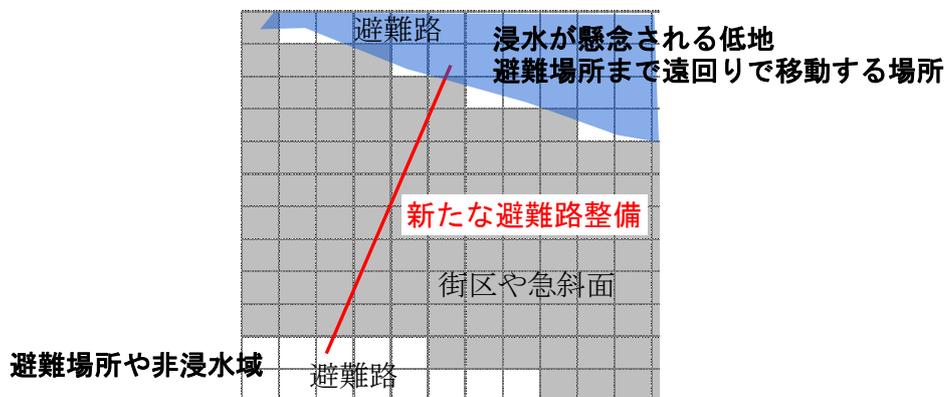


図 3-18 避難路整備ツール

第6節 開発した避難モデルの妥当性確認

堀ら^[29](2015)は、物理モデルに基づく数理問題を解析する自然科学シミュレーションと異なり、避難シミュレーションのような社会科学シミュレーションでは、モデルと数理問題が必ずしも明確には記述されないことを明記し、品質保証を行う際のボトルネックになると指摘するとともに、品質保証として検証と妥当性確認の合理的方法を提案した。品質保証の検証の項目は、(i) 避難者の発生、(ii) 避難者の移動速度、(iii) 避難者の避難路選択、(iv) 避難路の状態が移動速度に与える影響、(v) 避難者と周囲との干渉を挙げた。また、妥当性確認は、避難者の集団の挙動を対象として、東北地方太平洋沖地震で津波と津波火災により甚大な被害があった宮城県石巻市門脇町・南浜町での地震発生直後の津波避難事例をもとに行っている。避難経路および避難者発生エリアは図3-19に示す条件を、避難者行動条件は表3-5および表3-6に示す条件を与えた。これらの条件は、東日本大震災津波避難合同調査団が実施した地震発生後の避難行動に関するヒアリング結果に基づき、妥当性確認に適切と考えられるように設定された。

堀らは、開発元が異なるベクトル総研と、構造計画研究所、東京大学堀研究室、京都大学清野研究室の4種類の避難モデルによるエリア別避難完了率の時系列変化を比較し妥当性を確認した。本研究で開発したモデルは、車での避難を考慮しない清野研究室開発のモデルと比較した。図3-20により、2つの避難完了率の時系列変化は、同じように推移している。各モデルでは、避難者の発生位置の設定や、避難先や避難路の選択をモデル内で行っており、解析結果の違いはそれらの不確実性要因によるものである。

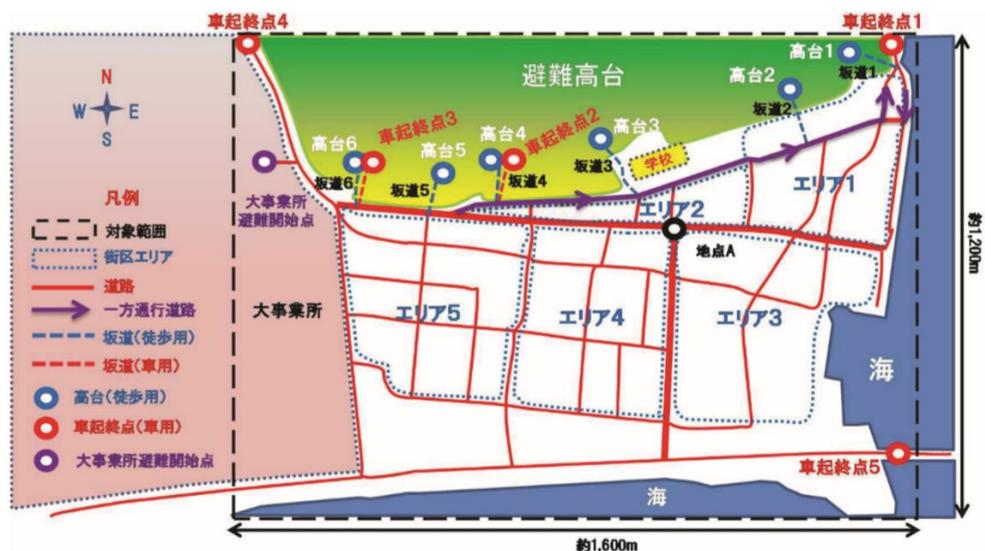


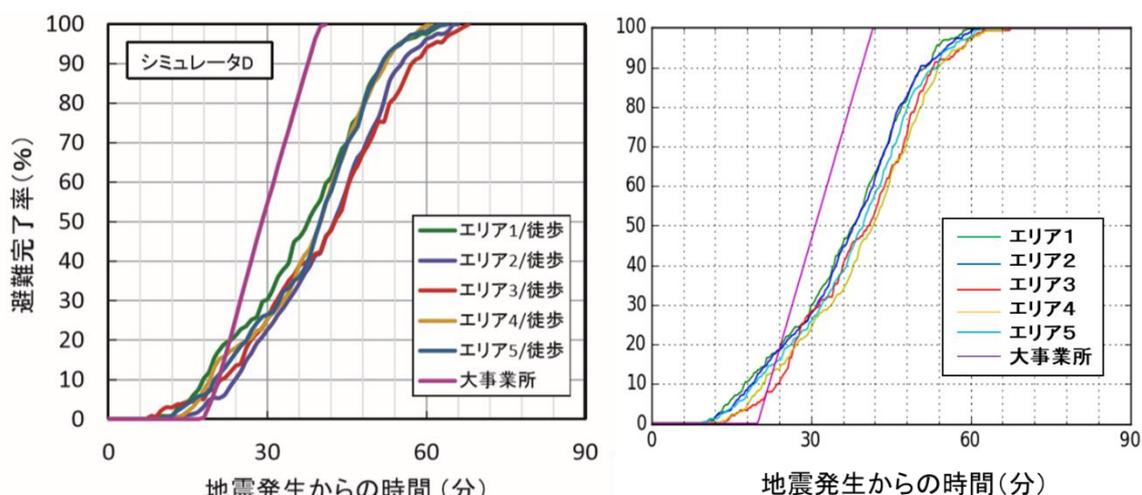
図 3-19 避難モデル妥当性確認解析の対象地域の概略図（堀ら^[29]から抜粋）

表 3-5 避難モデル妥当性確認解析の避難者一覧（堀ら^[29]から抜粋）

	シナリオ	発生場所	徒歩人数	発生時間	行先	避難経路	移動速度
1	住民の 徒歩避難	エリア1	295人	避難開始 時間分布 A	高台1～ 6のいづ れか	シミュレ ータの仕 様に従う	健常者 1.3m/s 避難困難者 1.0m/s
		エリア2	375人				
		エリア3	150人				
		エリア4	300人				
		エリア5	330人				
5	大事業所 からの避難	事業所避難 開始地点	1,300人	1秒間隔	高台6	シミュレ ータの仕 様に従う	1.3m/s

表 3-6 地震発生から経過時間と避難者発生比率（堀ら^[29]から抜粋）

地震発生 からの 経過時間	0～6分	6～11分	11～16分	16～21分	21～26分	26～31分
発生比率	0%	5%	10%	8%	7%	12%
地震発生 からの 経過時間	31～36分	36～41分	41～46分	46～51分	51～56分	56～61分
発生比率	16%	20%	12%	7%	3%	0%



堀ら^[29](2015)図7の一部を再掲

(a) 清野研モデル

(b) 本研究の開発モデルの結果

図 3-20 避難完了率の時間変化

第7節 まとめ

本章では、津波発災時の被害予測および評価の指標となる被害率を、避難モデルにおける浸水遭遇率とし、人的被害に影響を与える要因を取り込むことができる避難モデルの開発を行った。

このモデルは、マルチエージェントモデルが避難者個々の有事の行動や被害判定を積み上げることで統計的な取り扱いを可能とするモデルである。そのため、津波対策や影響因子による被害のリスク評価に対応する。リスクとは被害と発生確率を掛け合わせたものであり、昼と夜の避難行動の違いによる被害や、例えば被害確率が分かっている構造物があれば構造物の破壊による被害などの不確実性を伴うものの評価に用いられる。例えば、避難開始時刻や避難時の歩行速度については、避難者個々に異なるため、解析時にはそれをランダムで与えることで、統計的な取り扱いを可能にする。対象とする避難者数の確保は必要であり、例えば母数の少ない地区ごとでの解析を行う場合には、基礎条件をランダムに与えた複数回の試行から結果を抽出する必要がある。

ポテンシャルモデルは、従来から避難経路を比較的自由に設定できるものであったが、津波避難の分野においては、実問題の際には境界条件設定も含め、避難計画や不確実性をいかに数値化しポテンシャルマップへの反映方法がこれまでの研究では示されずにいた。本研究では、複数の津波浸水解析結果を重ね合わせて、浸水リスクマップを作成し、浸水確率の低い方へ避難する避難計画を反映したシミュレーションを可能にした。

本モデルの妥当性は、堀ら^[29] (2015)の手法にならい、避難者群衆の挙動の結果として表れる避難完了率の時間推移を他モデルと比較することにより確認した。

参考文献

- [1] 横山秀史・目黒公郎・片山恒夫 (1995) : 避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用、土木学会論文集、Vol.513、pp.225-232.
- [2] 目黒公郎・藤田卓 (2002) : ポテンシャルモデルと VR を組み合わせた新しい避難シミュレーションツールの開発、生産研究、第 54 巻、pp.401-404.
- [3] 瀧本浩一・三浦房紀・清野純史 (1996) : 防災要員と避難者の間の情報の伝達を考慮に入れた避難行動シミュレーション、土木学会論文集、No.537、pp.257-266.
- [4] 清野純史・三浦房紀・八木宏晃 (1998) : 個別要素法を用いた被災時の避難行動シミュレーション、土木学会論文集、Vol.591、pp.365-378.

- [5] 片田敏孝・金井昌信・細井教平・桑沢敬行 (2011) : 希望者参加型の防災実践の限界－津波避難個別相談会の実施を通じて－、土木学会論文集 F5 (土木技術者実践)、Vol.67、No.1、pp.1-13.
- [6] 片田敏孝・浅田純作・桑沢敬行 (2000) : 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、2000.
- [7] 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎・丸山由太 (2006) : Boid 型群衆モデルによる津波避難シミュレーションの提案、海岸工学論文集、第 53 巻、pp.1311-1315.
- [8] 後藤仁志・原田英治・久保有季・酒井哲郎 (2004) : 個別要素法型群衆行動モデルによる津波時の避難シミュレーション、海岸工学論文集、第 51 巻、pp.1261-1265.
- [9] 堀 宗朗・犬飼洋平・小国健二・市村強 (2005) : 地震時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法の開発に関する基礎的研究、社会技術研究論文集、3 巻、p.138-145.
- [10] 堀 宗朗・宮嶋宙・犬飼洋平・小国健二 (2008) : 地震時避難行動予測のためのエージェントシミュレーション、土木学会論文集 A、No.64、No.4、pp.1017-1036.
- [11] 白木渡・井面仁志・有友春樹 (2006) : Live Design のための参加型避難シミュレーションシステムの開発、第 61 回年次学術講演会講演概要集、pp.379-380.
- [12] 大鑄史男・小野木基裕 (2008) : 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・リサーチ学会和文論文誌、2008 年 51 巻、pp.94-111.
- [13] 加藤周平・下園武範・岡安章夫 (2009) : 個体行動特性を考慮したハイブリッド型群衆津波避難シミュレーション、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.65、No.1、pp.1316-1320.
- [14] 鈴木章太郎・岡安章夫・宇野喜之・稲津大祐・池谷 毅 (2018) : 津波群衆避難モデルにおける滞留時挙動の適正化と避難計画への活用、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.74、No.2、pp.I_385-I_390.
- [15] 西畑剛・森屋陽一・安野浩一郎・今村文彦 (2012) : 津波からの避難車両のモデル化と渋滞等の評価、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.68、No.2、pp.I_1316-I_1320.
- [16] 熊谷兼太郎 (2014) : 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動の津波避難シミュレーションによる再現性の検証、土木学会論文集 D3 (土木工学)、Vol.70、No.5 (土木計画学研究 論文集第 31 巻)、pp.I_187-I_196.
- [18] 有川太郎・野地徹・平野弘晃・遠藤雅人 (2016) : 防護施設の津波避難に及ぼす影響に関する考察、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.72、No.2、pp.I_1561-I_1566.
- [20] 牧野嶋史泰・今村文彦・安倍祥 (2017) : 多数シナリオ津波避難シミュレーションに

- よる確率的避難安全性の評価、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.73、No.2、pp.1513-1518.
- [21] 高島知行・柴山知也 (2017): 来訪者を対象とした避難シミュレーションに基づく津波対策効果の検討、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.73、No.2、pp.1507-1512.
- [22] 足立啓・小松和郎・荒木兵一郎 (1980): 障害者を考慮した住宅団地の研究 (その1)歩行行動から見た障壁の分析、日本建築学会大会学術講演梗概集 建築系、Vol.55、pp.1233-1234.
- [23] 内閣府 (2013): 防災情報のページ 関係法令・資料等、津波避難を想定した避難路・避難施設の配置および避難誘導について(平成 25 年 4 月)、URL : <https://www.mlit.go.jp/common/000233464.pdf>、2018/7/16 閲覧.
- [24] 総務省東北管区行政評価局、青森行政監視行政相談センター、秋田行政監視行政相談センター (2018): 津波避難対策に関する調査「県庁市町村の津波避難対策調査」結果報告書、平成 30 年 7 月、https://www.soumu.go.jp/main_content/000562141.pdf、2019 年 3 月閲覧.
- [25] 宇野喜之・鳴原康子・岡安章夫 (2015): 津波人的被災リスク評価のための群集避難シミュレーションの開発、土木学会論文集 B2(海岸工学)、71 巻 2 号、I_1615-I_1620.
- [26] 目黒公郎・織田浩平 (2005): 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、第 57 巻、第 4 号、pp.155-159
- [27] 小柳雄揮・有川太郎(2016): 津波避難シミュレーションを用いた津波避難タワーの効果の検討、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.72、No.2、pp.I_1567-I_1572.
- [28] 北村 福太郎・稲津大祐・池谷毅・岡安章夫(2019): 津波浸水を考慮した避難経路選択に与える地形と浸水特性の影響、土木学会論文集 B3(海洋開発)、Vol.75、No.2、pp.I_758-I_790.
- [29] 堀宗朗・末松孝司・荒木秀朗・奥村与志弘・土肥裕史 (2015): 避難シミュレーションにおける品質保証の現状と今後の展望、日本地震工学会論文集、第 15 巻、第 5 号(特集号)、pp.144-157.

第4章 開発した避難モデルを用いた人的被災リスク評価

第1節 津波による人的被災リスク評価

津波などのハザード発生による被害は、ハザードの規模だけでなく発生時の資産や人口の被害対象の状況によって大きく変化する。被害に影響する要因やハザードを含む様々な被害影響因子を考慮するため、津波による人的被災リスク評価は、図 4-1 に示す流れで行われる。

まず、被害を変化させるハザードや被害要因の選定を行う。この際には、ハザードが被害に与える影響は、地域性やその他の被害要因や条件によっても変化することは留意が必要であるが、ここでは被害に影響を与えうる要因や条件を洗い出す。次に、洗い出した被害要因や条件に対して、ハザードの地域特性や避難者の行動特性を考慮しシナリオを策定し、各シナリオの被害評価を行う。さらに、各シナリオの発生確率を被害に掛け合せリスクを算出する。被害要因や条件によって発生確率が求められない場合がある。発生確率は各シナリオにおける重みづけを意味し、各シナリオのリスクの積分によって地域間の被災リスク比較や被害低減策の重要性や対策の効果が明らかになるため、発生確率が不明なものについては、対策を講じる必要性に関する議論を深めることができないことから、被害発生要因の抽出のみならず発生確率に関する分析にも努める必要がある。最後に、リスク評価により経済性や効率性を考慮した対策事業が選定された後に、その対策によって防ぐことができるハザードと、対策後の防ぎ切れない残余リスクへの対応を考えることになる。

ハザードの規模や様々な被害要因の発生条件は地域毎に異なり、被害を大きく変化させる。例えば、海岸背後に避難に適した高い土地がある場所もあれば、河口砂州上に形成された低地の市町であれば避難が困難な場所もある。土地の特性や津波特性が違えば、同じ対策を行っても発揮される効果が異なるため、対策の優先順位などが当然ことになってくる。次節以降では、ケーススタディとして、4千人規模の市町村地域に開発した群衆避難モデルを適用して、異なる規模のハザードと津波人的被害を変化させる要因のシナリオ分析を行い、開発した避難モデルが津波リスクにおける地域特性を分析可能にするか、適切な対策を提案できるかを確認した。具体的には、得られた被害算定結果から、ハザード規模やシナリオの違いによる被害状況の変化などを考察し、被害の定性的な把握に留まらず、定量化な評価を可能にするかについて検討した。

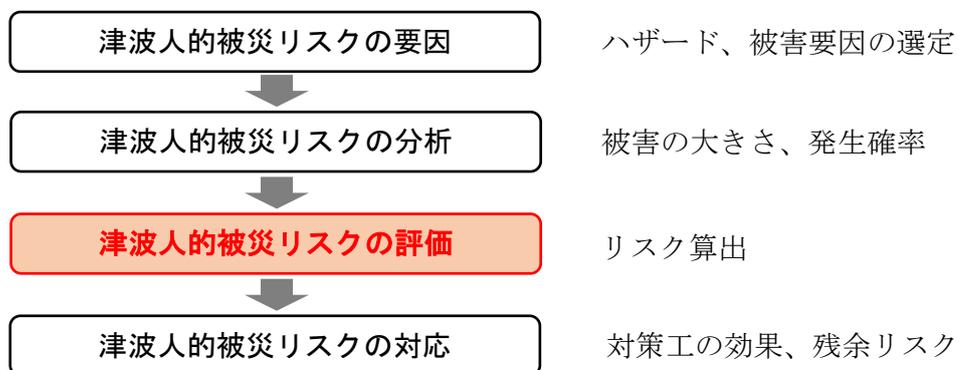


図 4-1 津波人的被災リスク評価の流れ

第2節 ケーススタディの解析シナリオと狙い

リスク評価には、ハザードによる被害規模だけでなく発生確率も考慮する必要がある。津波はその規模に応じて生起確率があると考えられており、ハザードカーブとして表現される。ハザードの結果として発生する被害は、様々な要因で変化する。津波人的被害を変化させる要因には、2章で整理したように津波浸水に関する要因や避難行動に関する要因などがあり、それら被害要因は不確実性を有する。津波をハザードとした場合、津波が発生する震源位置や発生時刻などの条件、避難路閉塞などの不確実性要因による被害変化の把握は、対策方法の選定や対処方法を考える上で重要である。

そこで、不確実性のある被害要因による人的被害の変化と、その対応策の検討と効果の現れ方、一定の対策を行った後の残余リスクとその対応策について調べることにした。また、開発した群衆避難モデルを用いた津波による人的被災リスク評価を行い、モデルの有効性を検証する。

ケーススタディ対象とする地域は、南海トラフ地震および駿河トラフで発生する津波による被害が懸念されている伊豆半島西側の沿岸市街地とした。津波の防災・減災対策の検討手順を図 4-2 のように想定し、解析シナリオを設定した。

解析シナリオは、以下のとおり3段階に分けた。

(1)津波発生時の潮位や日中・夜間発生による被害変化

浸水状況は潮位によって変化し、夜間は睡眠中から避難を開始するため避難開始時刻が遅れるなどの避難行動が日中と異なるなどの日中と夜間の避難行動には相違が出る。よって、これらは人的被害に時間変化を与える2つの被害要因であり、それぞれ時間という説明変数で、被害規模に影響を与える。日中・夜間の避難行動は、避難者個々の個人差はもとより発災時によって様々であるが、避難開始時刻と避難速度を標準被害率の時間変化や、津波規模による被害の変化との関係について調べ、その有意性を調べる。

(2)防潮堤や水門等の津波防護施設や、避難経路選択方法など避難計画による被害変化

ケーススタディ地域で現在検討されている防潮堤嵩上げと水門建設のハード的対策による効果についてリスク評価を試みた。具体的には、発生確率を考慮したリスクカーブを作成し、ハード対策の効果が異なる規模や発生確率を有するハザードにどのような効果を発揮し、弱点があるのかを分析した。また、どのような事前準備による被害軽減策として本研究で提案する浸水確率を低い方向への避難について、避難モデルの解析方

0

法の確認を合わせて行うとともに、そのような避難行動計画の効果を検証した。

(3)津波に対する暫定的対策として人的被害軽減の効果が期待される3階建物への避難、緊急の対応を必要とする道路閉塞による被害変化

発災時の対応の効果を検討するものである。3階建物避難は、暫定的ではあるが一定の津波対策を行った後に残る残余リスクへの対処法として考えられる。また、避難路として利用される道路が閉塞した場合の被害増大についても調べる。これらは、突発的ではあるが、事前に耐津波性を強化した建物建設や避難路整備などの対応次第によって対処方策にもなりうる。

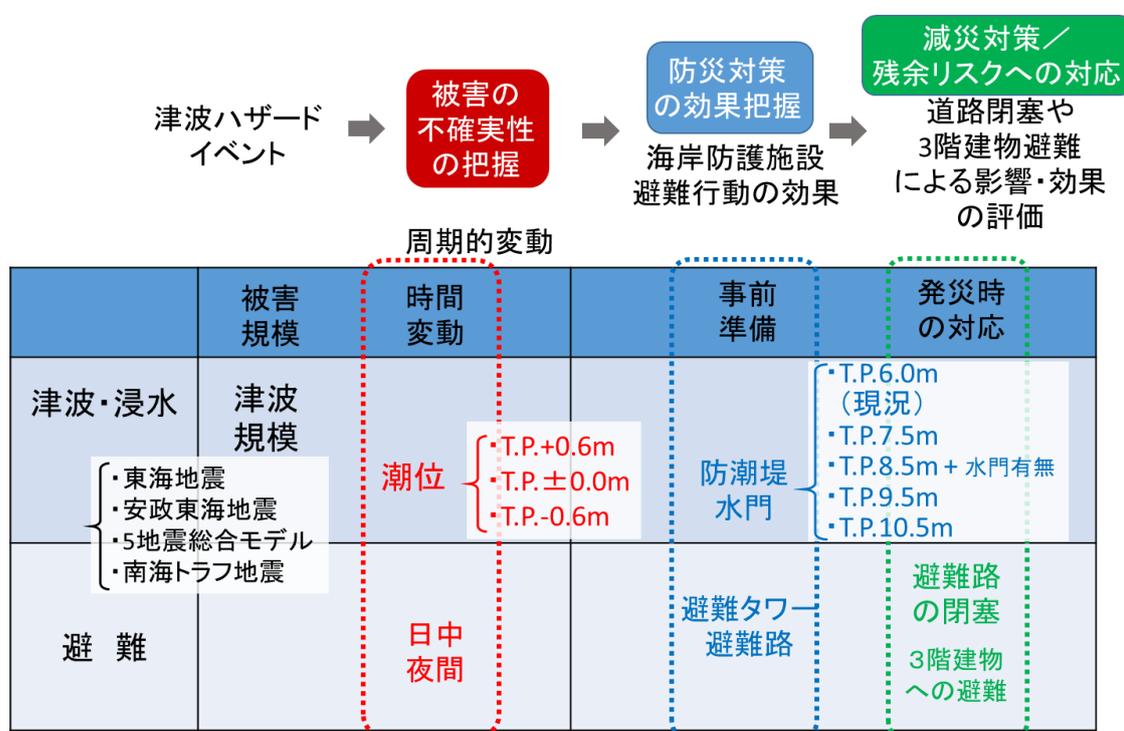


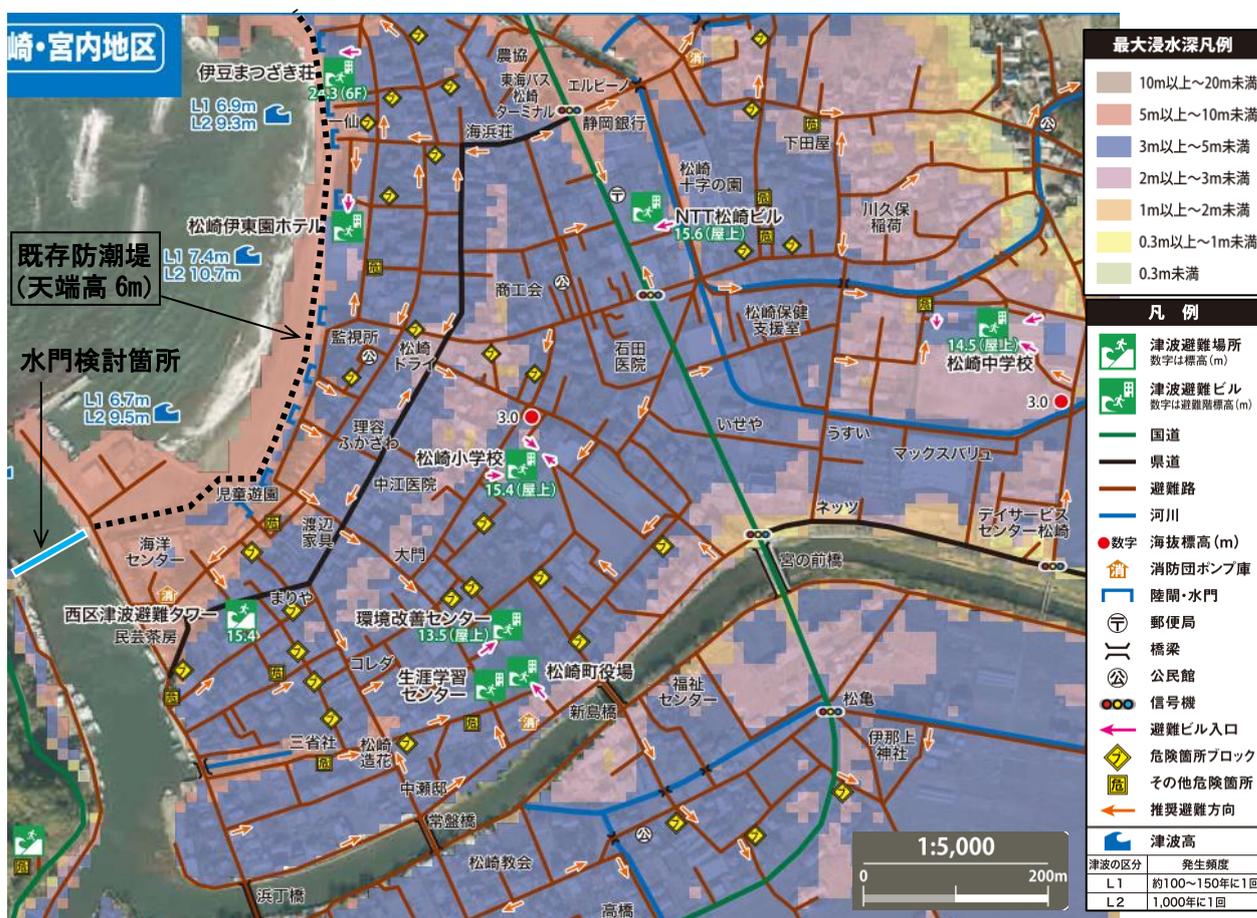
図 4-2 分析するシナリオと狙い

第3節 ケーススタディ解析

第1項 ケーススタディ地区の特徴

伊豆半島南西部の海岸沿いにある人口約四千人の市町をケーススタディ地域として選んだ。町の64%が山林であるが、町中心部を流れる2つの河川により流域に500haの耕地をもつ伊豆半島西側最大の平野になっている。町内には史跡も多く、なまこ壁作りの建物が印象的などころで、町の中心部には温泉があり、夏の海水浴などを含めて多くの観光客が訪れる。桜餅に使われる桜葉は、全国の約7割が松崎町で生産されている。

景観がよく、観光業が盛んであり、高い防潮堤による景観悪化が懸念されているが、一方で、町の協議会で津波対策について、浸水域を低減させるため、住民から水門設置が要望されている。避難タワーを通常使える施設にするよう要望が出ている（静岡県¹¹）。



松崎町ホームページの松崎・宮内地区津波避難地図（平成28年3月）を基に編集
https://www.town.matsuzaki.shizuoka.jp/docs/2016032300016/file_contents/松崎・宮内地区.pdf

図4-3 ケーススタディ地域の最大クラス津波の浸水予測図と避難場所等分布



図 4-4 松崎地区の海岸風景

第2項 津波ハザード

ケーススタディ対象地域は駿河トラフで発生する津波による被害が懸念されており、東海地震モデル、安政東海地震モデル、5地震総合モデル、南海トラフ地震ケース6の4つの津波波源モデルを用いて人的被災リスク評価を行うこととした。各波源モデルのマグニチュードおよび生起確率、地殻変動に伴う水位分布の設定方法を表4-1に整理する。

波源モデルの発生確率は、藤間・樋渡^[3]を参考に、50年間でM8.0程度の津波が1回発生すると仮定し、グーテンベルク・リヒター則に基づいて地震発生頻度を(4-4)式の密度関数を用いて求めた。

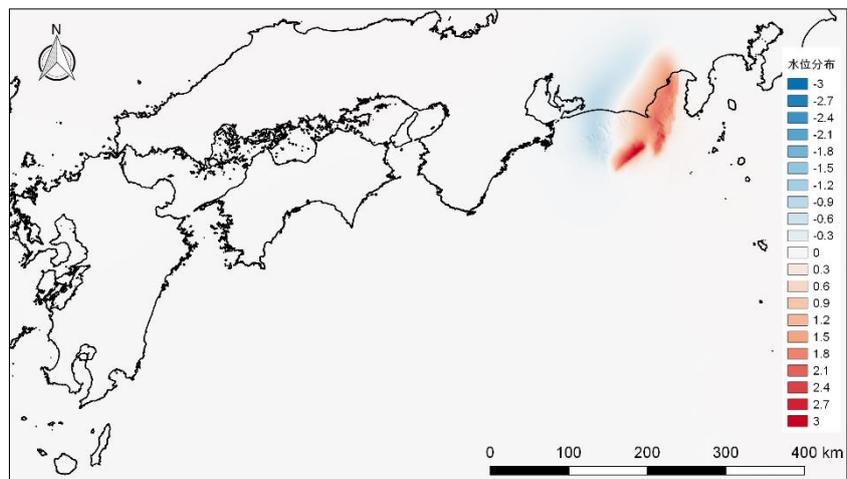
$$p(M) = p_0 / (10)^{b(M-M_0)} \dots\dots\dots (4-4)$$

ここで、 $p(M)$ は50年間でマグニチュード M の地震が発生する生起確率とし、 $p_0=1$ 、 $M_0=8.0$ 、 $b=1$ を標準の設定とした。

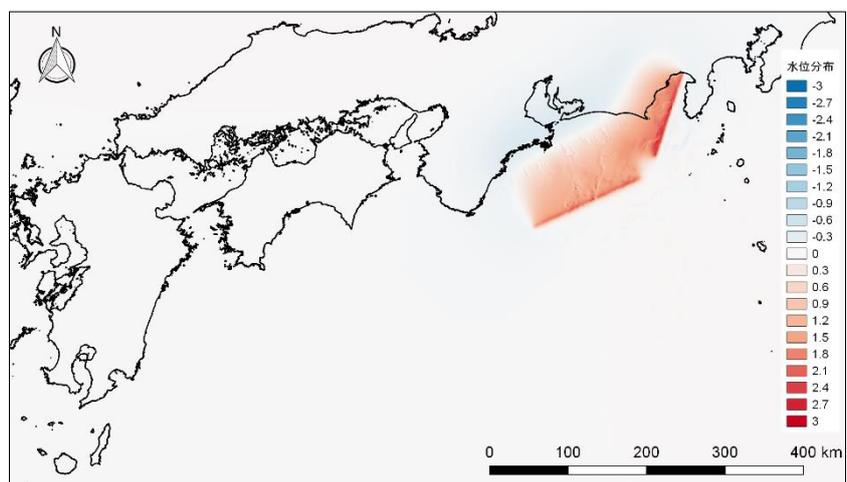
静岡県^[4]が津波被害推定のために設定した5地震総合モデルは、1707年宝永地震、1854年安政東海地震、1854年安政南海地震、1944年昭和東南海地震、1946年昭和南海地震の震度の重ね合わせから、各地点における最大の震度を再現できるように強震動生成域の強さ等を設定したモデルで、山崎ら^[5]を参考に Mw 8.9 とし生起確率 397年を求めた。

表 4-1 波源モデルの一覧

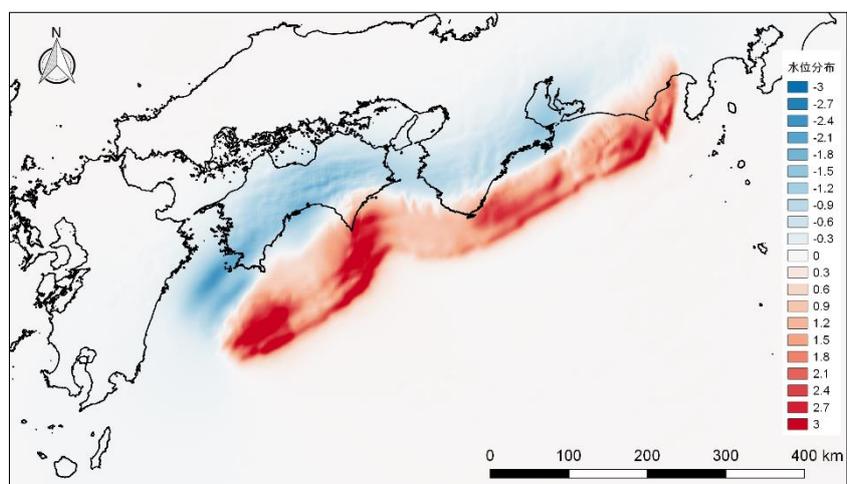
波源モデル	マグニチュード	生起確率	地殻変動に伴う
東海地震モデル	Mw 8.1	63	石橋モデル(1976)
安政東海地震モデル	Mw 8.4	126	石橋モデル(1976)
5地震総合モデル	Mw 8.9	397	静岡県第4次想定
南海トラフ地震ケース6	Mw 9.1	629	内閣府



(a) 東海地震モデル

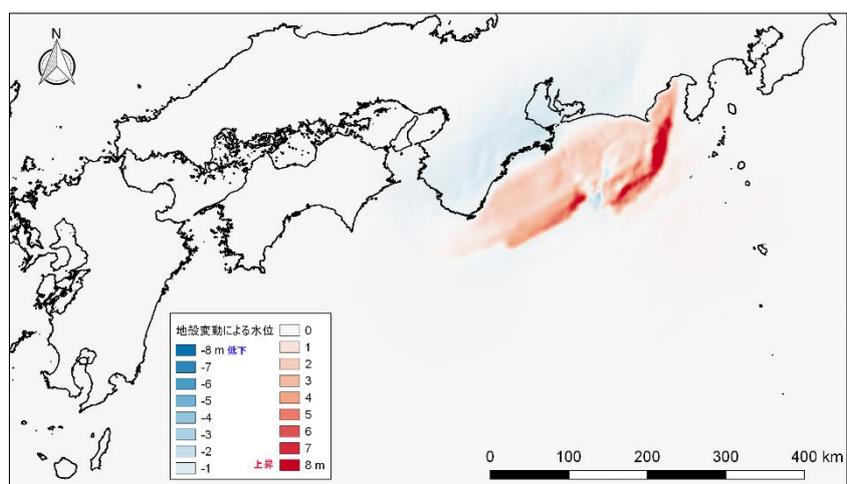


(b) 安政東海地震モデル

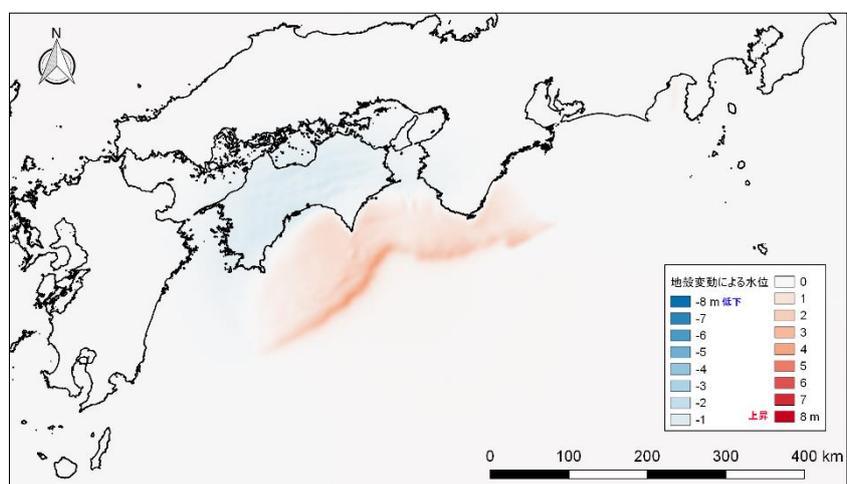


(c) 5 地震総合モデル

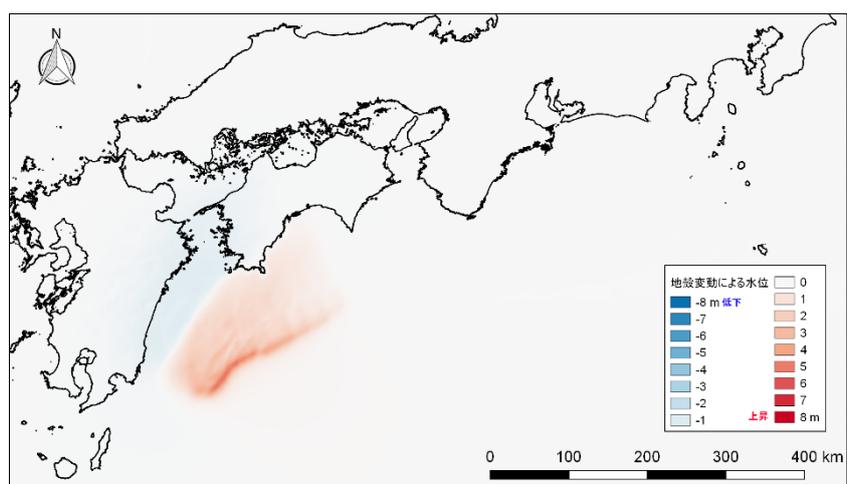
図 4-5 初期水位分布（東海地震、安政東海地震、5 地震総合モデル）



(a) 0~100s の変動量の積分



(b) 100~200s の変動量の積分



(c) 200~300 s の変動量の積分

図 4-6 南海トラフ地震ケース⑥の地殻変動による水位変動分布

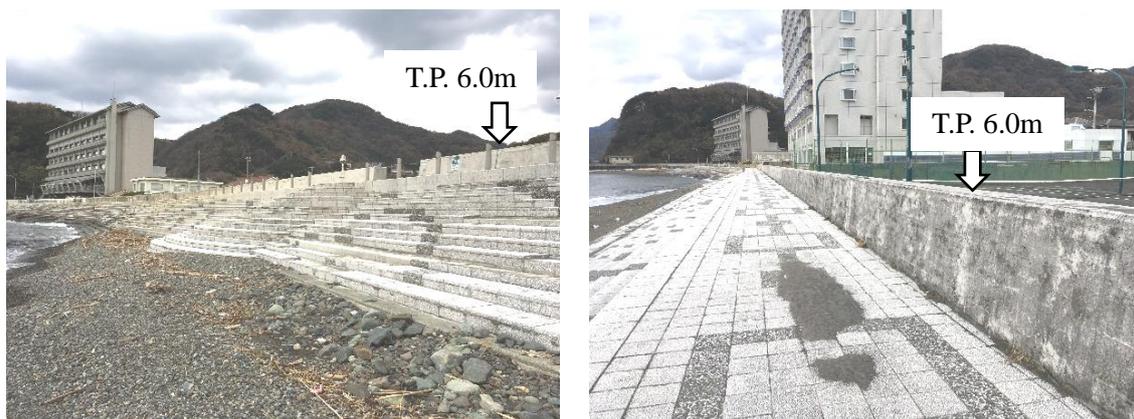
第3項 津波対策および被害要因

(1) 防潮堤・水門

図 4-7 に示す現在の防潮堤高さは T.P. 6.0m である。対象地域では、L1 津波対応として T.P. 7.5m、L2 津波対応として T.P. 11.0m の防潮堤の建設を検討している。また、海岸線横には、河口幅約 70m の河川があり、津波発生時に津波遡上が懸念される。市街地の浸水を防ぐためには、防潮堤と同程度の高さの水門の建設が必要であり、議論されている（例えば、松崎町^[2]）。

本研究では、津波浸水低減対策として 7.5、8.5、9.5、10.5 m と防潮堤の天端を嵩上げたケース、それと同じ高さの水門を建設した場合、しなかった場合の浸水解析を実施し、被害低減効果を確認する。

防潮堤および水門は、内閣府^[3]を参考して、天端上の越流水深が 2 m 以上となった時点で破壊するものとした。



(撮影者：宇野、撮影日：2017年12月7日)

図 4-7 松崎海岸背後の海岸護岸および防潮堤

(2) 避難タワー

図 4-3 に示すとおり、海岸線背後に西区津波避難タワーが建設されている。河口付近は防潮堤より低い場合でも浸水が発生し、土地も低く避難が困難であるため、設置されていると考えられる。頂上広場の標高 15.4m である。



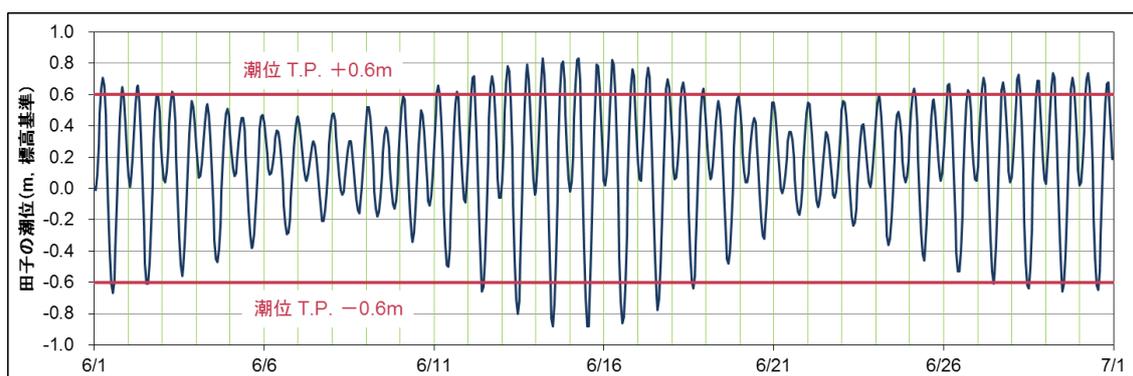
(撮影者：宇野、撮影日：2017年12月7日)

図 4-8 松崎海岸背後の海岸護岸および防潮堤

(3) 潮位条件

津波伝播・浸水過程における潮位の高さによる主な影響として、浅海域での津波の伝播速度の変化と、護岸や防潮堤を乗り越えるために必要となる津波水位の変化による浸水深分布や浸水面積の増減が考えられる。一方、潮位による水位変化量は時空間分布があるが、今回浸水解析および避難シミュレーションは 30 分間であることから、計算海域全体の水位を潮位条件に変えて解析を行った。

潮位条件は、気象庁の予測潮位表のグラフ (図 4-9) から、低潮位時と高潮位時をそれぞれ T.P.-0.6m と T.P.+0.6m とした。



出典：気象庁ホームページ（潮位予測：田子）を基に作成

図 4-9 西伊豆町田子の予測潮位（2018年6月12日～7月17日）と計算潮位

(4)被害要因箇所の把握

避難路にあるブロック塀や電柱、急斜面の崩壊などによる経路の閉塞は避難における妨げとなり、被害拡大の要因になりかねない。一方、3階建ての建物は、緊急避難場所として利用すれば被害低減につながる重要な資産である。ケーススタディ対象地域は河川の河口に特徴的な三角州上の低地が広がり、高台までの距離がある。したがって、狭い街路で閉塞の恐れのある個所や、緊急避難場所として活用できそうな建物があれば、対策や活用して、被害を軽減に役立てる必要がある。そこで、当該地域にどの程度危険地帯や緊急避難場所となりうる建物があるかを調べるために、全戸調査を行った。

第4節 津波浸水解析

第1項 浸水解析モデル

津波の数値計算には支配方程式として非線形長波理論式を用い、Staggard Leap-frog 差分法を解くことを行った。具体的には、防衛大学が開発した NDA-PACK (元となるソースコードは Goto et al.^[6])を用いた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

第2項 地形モデル

津波浸水計算に用いた地形は、内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会^[7]による提供データを用いた。各領域の範囲は、 および  のとおりである。

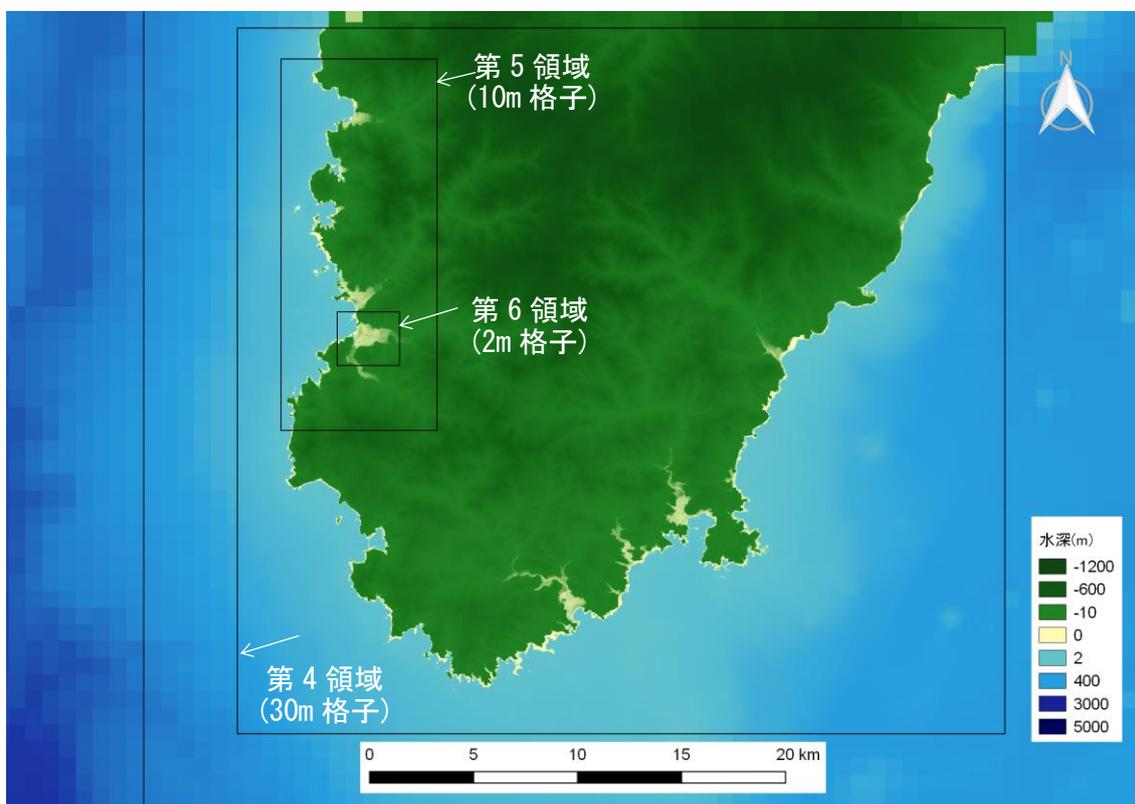
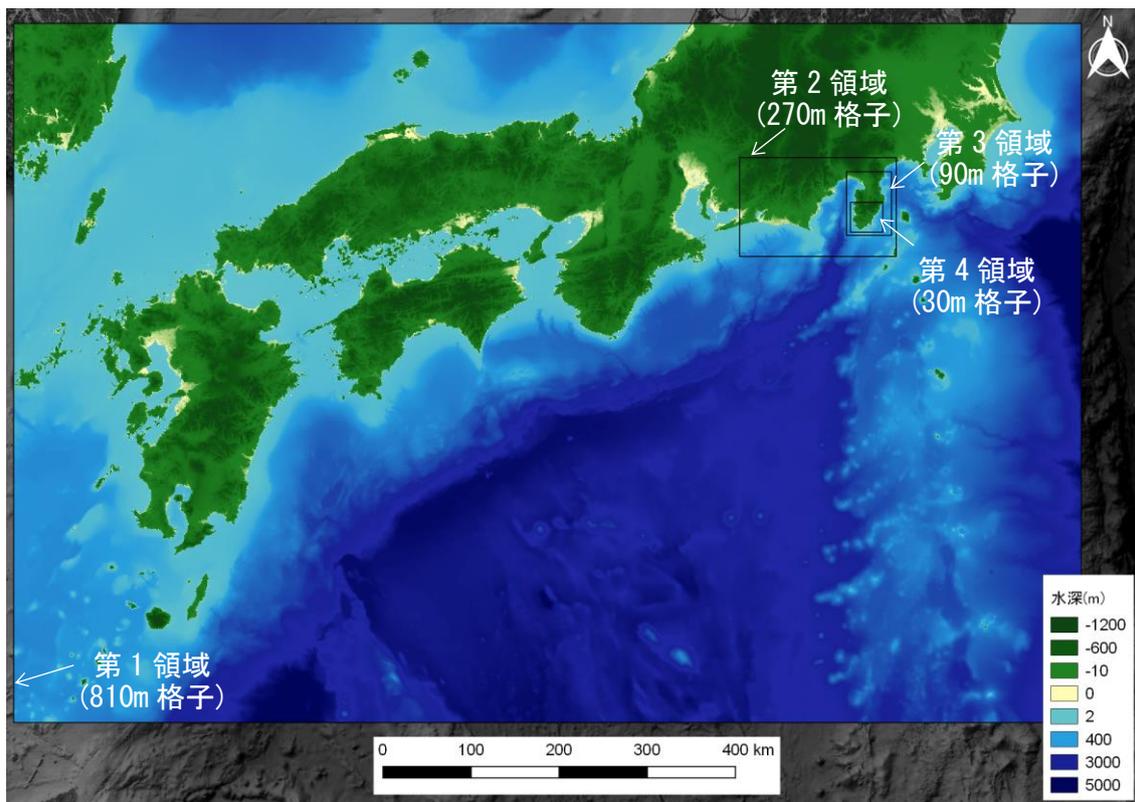


図 4-10 津波伝播計算に用いた水深分布図 (上: 第1~4領域, 下: 第4~6領域)



図 4-1-1 津波浸水計算に用いた水深分布図（第6領域）

防潮堤および水門は、地形データ上に所定高さを入力した。それらは、天端上 2m 以上の水位で破壊する条件にした。建物について、全戸調査によって調べた階数に応じた高さ（階数×6m）を該当するセルの地形データに加味し、建物の間を流入する津波の状況を表現した。

表 4-2 津波浸水シミュレーション条件

項目	設定
基礎方程式	非線形長波方程式
波源モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 東海地震モデル ・ 安政東海地震モデル ・ 5 地震総合モデル (静岡県モデル) ・ 南海トラフ地震津波モデル ケース 6
防潮堤条件と水門条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ T.P. 6.0m (現況) ・ T.P. 7.5m (1.5m 嵩上げ) ・ T.P. 8.5m (2.5m 嵩上げ) ・ T.P. 9.5m (3.5m 嵩上げ) ・ T.P. 10.5m (4.5m 嵩上げ) <p>防潮堤 5 ケースに対して、水門のありケースと無しケースを実施し、その天端高さは防潮堤と等しくした。</p> <p>建物は地形条件として与え、最狭部でも 2 メッシュ(4m)で表現した。ただし、越流水深が 2m を超えたら破壊することとし周辺の地表面高さになるものとした。</p>
地震による地盤変動	隆起、沈降ともに考慮
潮位変動	気象庁潮位データから、以下 3 条件を設定 <ul style="list-style-type: none"> ・ T.P.+0.6 m (高潮位) ・ T.P.±0.0m ・ T.P.-0.6 m (低潮位)
計算格子間隔	810m、270m、90m、30m、10m、2m
計算領域 X ₀ , Y ₀ : 南西端位置 (平面直角座標Ⅷ系) NX, NY: 東西方向, 南北方向格子数	<ul style="list-style-type: none"> ・ 810m: X₀= -932700, Y₀= -720000, NX =1500, NY = 990 ・ 270m: X₀= -106500, Y₀= -185400, NX = 660, NY = 420 ・ 90m: X₀= 15000, Y₀= -161100, NX = 570, NY = 810 ・ 30m: X₀= 19500, Y₀= -157500, NX =1230, NY =1140 ・ 10m: X₀= 21600, Y₀= -142800, NX = 750, NY =1500 ・ 2m: X₀= 24300, Y₀= -139650, NX =1500, NY =1300
計算時間	30 分間 (避難に要する時間で停止)
マンニングの粗度係数	0.025 (陸上の浸水域は平面格子サイズ 2m で建物形状を再現し、その時の建物高さは地盤上から全戸調査で調べた階数×3m とした。
地形データ	内閣府 南海トラフ地震検討委員会[3]

第3項 津波浸水解析結果

図 4-12 に、津波浸水解析結果の一例を示す。5 地震総合モデルによる最大浸水深分布であり、3つの潮位条件、水門の有無による違いがみてとれる。

表 4-3 は、波源モデルと潮位条件、海岸施設規模別の津波浸水域に分布する人の数、曝露人口を整理したものである。地震規模が大きく、潮位が高いほど曝露人口が多くなる傾向がみられる。防潮堤高さについても高いほど曝露人口が減少する傾向はみられるが、一定まで上げると曝露人口の減少が止まる。これは河川域を流入する津波によって陸域が浸水するためである。今回解析対象としている総人口は4,125人であることから、南海トラフ地震のケースでは、防潮堤天端を4.5m嵩上げしても高潮位時に7割以上、低潮位時でも現状防波堤高の場合には7割近くの人口が浸水域内に存在することになる。

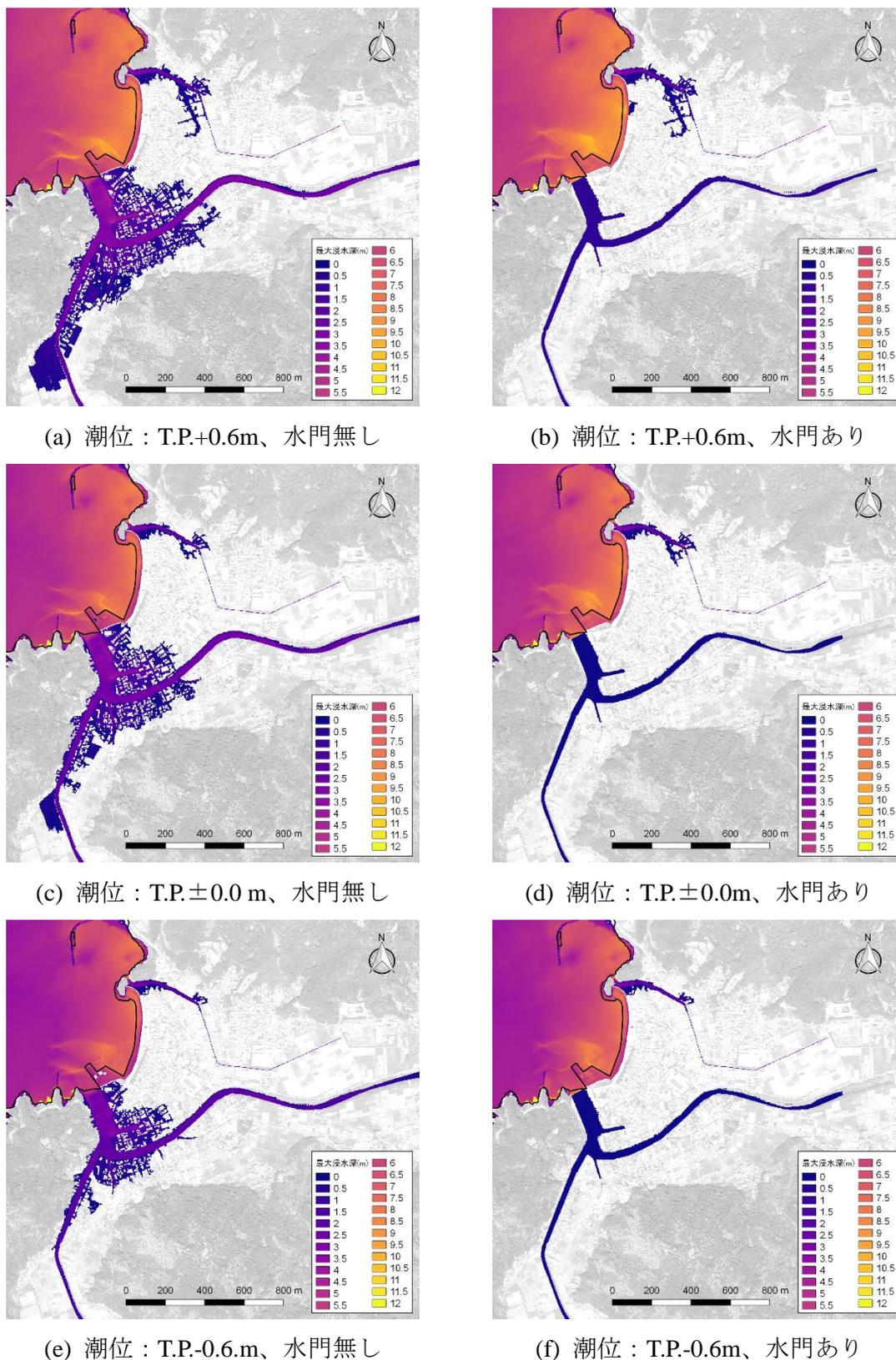


図 4-12 最大浸水深分布 (5 地震総合モデル、防潮堤・水門天端高 T.P. 10.5m)

表 4-3 ケース別の浸水域内の曝露人口

	防潮堤天端 高さ	潮位条件		
		高潮位 T.P.+0.6m	平均潮位 T.P.±0.0m	低潮位 T.P.-0.6m
東海地震	現状 T.P.+6.0m	545 (139)	287 (13)	108 (1)
	1.5m 嵩上げ T.P.+7.5m	498 (0)	284 (0)	99 (0)
	2.5m 嵩上げ T.P.+8.5m	498 (0)	284 (0)	99 (0)
	3.5m 嵩上げ T.P.+9.5m	498 (0)	284 (0)	99 (0)
	4.5m 嵩上げ T.P.+10.5m	498 (0)	284 (0)	99 (0)
安政地震	現状 T.P.+6.0m	1834 (1342)	1115 (799)	680 (554)
	1.5m 嵩上げ T.P.+7.5m	894 (343)	430 (62)	192 (9)
	2.5m 嵩上げ T.P.+8.5m	679 (46)	394 (8)	190 (0)
	3.5m 嵩上げ T.P.+9.5m	668 (13)	389 (7)	190 (0)
	4.5m 嵩上げ T.P.+10.5m	668 (13)	389 (7)	190 (0)
5 地震総合 モデル	現状 T.P.+6.0m	1818 (1330)	1097 (740)	545 (459)
	1.5m 嵩上げ T.P.+7.5m	777 (278)	415 (57)	203 (9)
	2.5m 嵩上げ T.P.+8.5m	668 (36)	384 (8)	195 (0)
	3.5m 嵩上げ T.P.+9.5m	647 (13)	384 (7)	195 (0)
	4.5m 嵩上げ T.P.+10.5m	659 (13)	384 (3)	209 (0)
南海トラフ 地震	現状 T.P.+6.0m	3005 (2987)	2938 (2917)	2620 (2611)
	1.5m 嵩上げ T.P.+7.5m	2945 (2895)	2648 (2461)	2102 (1576)
	2.5m 嵩上げ T.P.+8.5m	2803 (2564)	2359 (1638)	1899 (796)
	3.5m 嵩上げ T.P.+9.5m	2418 (1682)	2106 (803)	1128 (265)
	4.5m 嵩上げ T.P.+10.5m	2293 (865)	2025 (335)	1067 (168)

表中 ()は、防潮堤と同じ高さの水門があった場合の曝露人口

東海地震モデルと安政東海地震モデル、5地震総合モデルは、南海トラフ巨大地震に比べて、浸水開始が約2分早い。これは、南海トラフ巨大地震が震源から開始する断層破壊の時空間分布を考慮し最初の破壊点から5分程度掛けて全ての場所で地殻変動による水位変化が与えられているのに対し、他の3ケースでは地殻変動とそれによる初期水位の平面分布を一度に発生させているためである。南海トラフ地震の場合には、駿河トラフ付近の断層破壊が地震発生から一定時間経過後に発生したため、津波到達ならびに浸水開始時刻に遅れが発生していると考えられる。本研究では、浸水域の規模が及ぼす人的被害への影響を考察するため、被害算定を行う際の津波避難シミュレーションでは、南海トラフ地震以外の3ケースの津波浸水解析結果を2分遅らせて適用した。

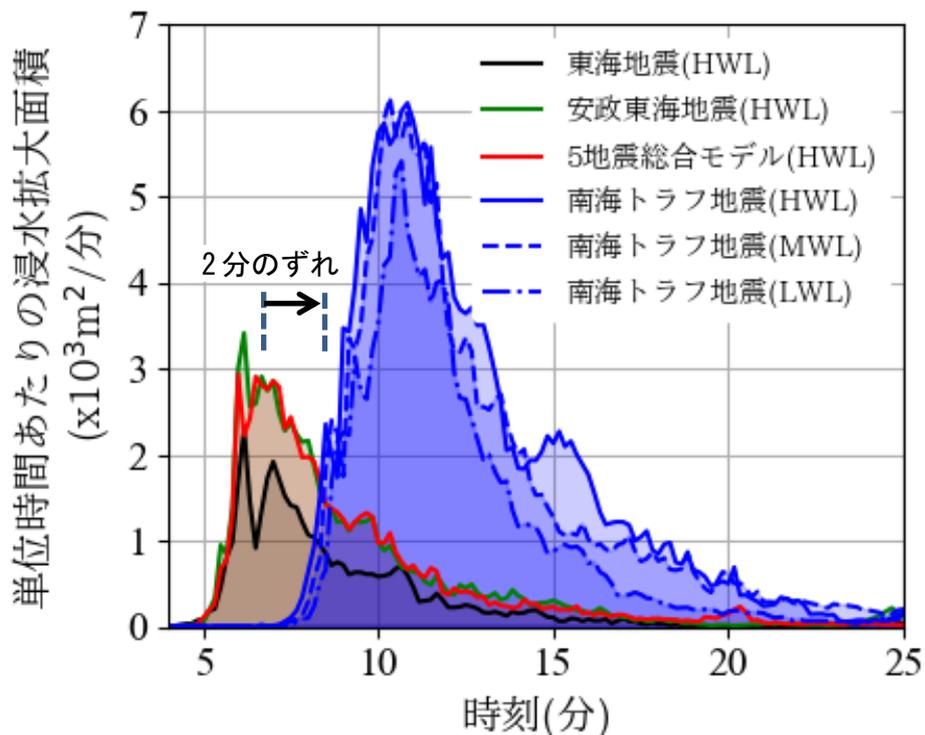


図 4-13 日中・夜間、潮位による被害率の変化（波源モデル別）

第5節 日中・夜間と潮位による津波人的被害の変化（被害の時間変動）

津波による被害は、津波発生域から伝播する過程での沿岸部に到達するまでの変形による津波の高さによって変化する。津波リスクを考える上では、まず津波ハザードによる影響を考える必要がある。ここでは前節で説明した駿河トラフ付近を初期水位分布発生源とする4つのモデル津波を用いる。

津波被害に影響を与える被害因子について、既往文献などに基づき2章で整理した。本節では、時間を変数とする津波被害要因である、潮位と日中・夜間の発生時刻を取り上げて津波人的被害の変動性について分析を行う。

潮位は、津波の伝播過程で変形に影響し、防潮堤や水門の海岸施設の天端高を見かけ上変化させ、津波ハザードに直接的に影響し浸水域を変化させる。例えば、高潮位条件で発生した津波は防潮堤を越流し背後地の被害を大きくする可能性がある。また、潮位は潮汐に伴う海水面の変動で、約半日周期を変動周期とする関数として表される。

津波避難行動に焦点を当てると、潮位と同様に時間に関係して被害を変化させる要因として、津波発生の時間帯による避難行動の違いが挙げられる。すなわち、日中と夜間による避難行動の違いによって津波人的被害にも顕著な違いが表れる。例えば、夜間、特に睡眠中に津波が発生した場合には、揺れに対する反応や避難判断の遅れにより避難の初動が取りづらくなるとともに、視界が悪い暗がりの中での避難になり移動速度が低下し、被害が拡大する可能性が指摘されている。

避難行動条件として、表4-4を設定した。また、避難者の被害は、避難シミュレーションにおける避難者位置の浸水深が0.5m以上になることを判定基準とて行った。

表 4-4 避難行動条件

項目	設定
群衆避難の移動方向	避難者個々の最短距離にある避難場所を選択して避難する。ただし、海側避難を制限した。
発生時刻による避難条件 (日中と夜間)	初期位置：地図建物データおよび人口統計資料等から乱数を用いて設定（日中と夜間で同条件） 65歳以下の成人の歩行速度 S および地震発生から避難開始時刻 T (地震から揺れの収まり2分含む) 日中： S [m/s] = 1.0 ± 0.10 σ T [min] = 6.0 ± 3.0 σ 夜間： S [m/s] = 0.8 ± 0.08 σ T [min] = 10.0 ± 3.0 σ 65歳以上の歩行速度は、健常者の7割とした。

図 4-14 は、単位時間当たりの浸水拡大面積と避難完了率および被害率を、地震ハザードと水門の有無を組み合わせ示したものである。3つのケースで浸水拡大面積に、8~9分に一度ピークがあり、その後下がり、再度上昇する。一度下がるのは、津波の遡上先端部が防潮堤に到達し、防潮堤前面で浸水が一度妨げられるためであると考えられる。防潮堤が津波から避難者を守る効果として浸水開始を遅延する効果があるが、この浸水拡大速度が一度下がることはそれを支持するものである。

次に、南海トラフ地震(a)と5地震総合モデル(b)比較する。南海トラフ地震の浸水拡大面積のピークは5地震総合モデルの2倍以上あり、浸水面積は単位時間当たりの浸水拡大面積の積分で、水色の面積であるが、2つのケースが比較にならないほど南海トラフ地震津波の浸水面積が大きいことが分かる。一方で被害率の変化を2つのケースで比較すると、被害発生の開始時刻は防潮堤をちょうど乗り越えた地震発生後約9分であり、ほぼ同時刻から発生しているのは、津波浸水発生時刻の調整によるものである。その後、南海トラフ地震のケースでは、ピーク時で2倍以上となる浸水拡大面積速度によって、日中および夜間に急激に被害を増加させている。一方、5地震総合モデルによる被害は、浸水拡大の速度が小さいためか、南海トラフ地震モデルと比べると被害率が緩やかに増大し、最終的な被害率も小さくなっている。

同じ5地震総合モデルでも、水門なし(b)と水門あり(c)では、被害率が異なる。その直接的な要因は、水門による浸水低減と浸水開始時刻遅延の効果であるが、まず、津波が到達するまでは2つのケースで違いはないが、防潮堤および水門の到達後の浸水拡大において大きな相違がみられる。津波浸水過程の違いに伴い、被害率の上昇にも相違が発生する。浸水面積が拡大している間は被害が拡大するものの、単位時間当たりの浸水拡大面積が小さい水門ありのケースでは被害率の増大が小さく、浸水が継続する時間も短いことから被害が小さくなっている。これは、津波浸水プロセスと避難行動によって浸水域から逸脱しようとする避難者の挙動の関係が、被害率の時間変化、すなわち被害発生プロセスを決めているということになり、最終的な浸水深の時間変化からだけでは被害率を推定することが困難であることを示唆していると考えられる。

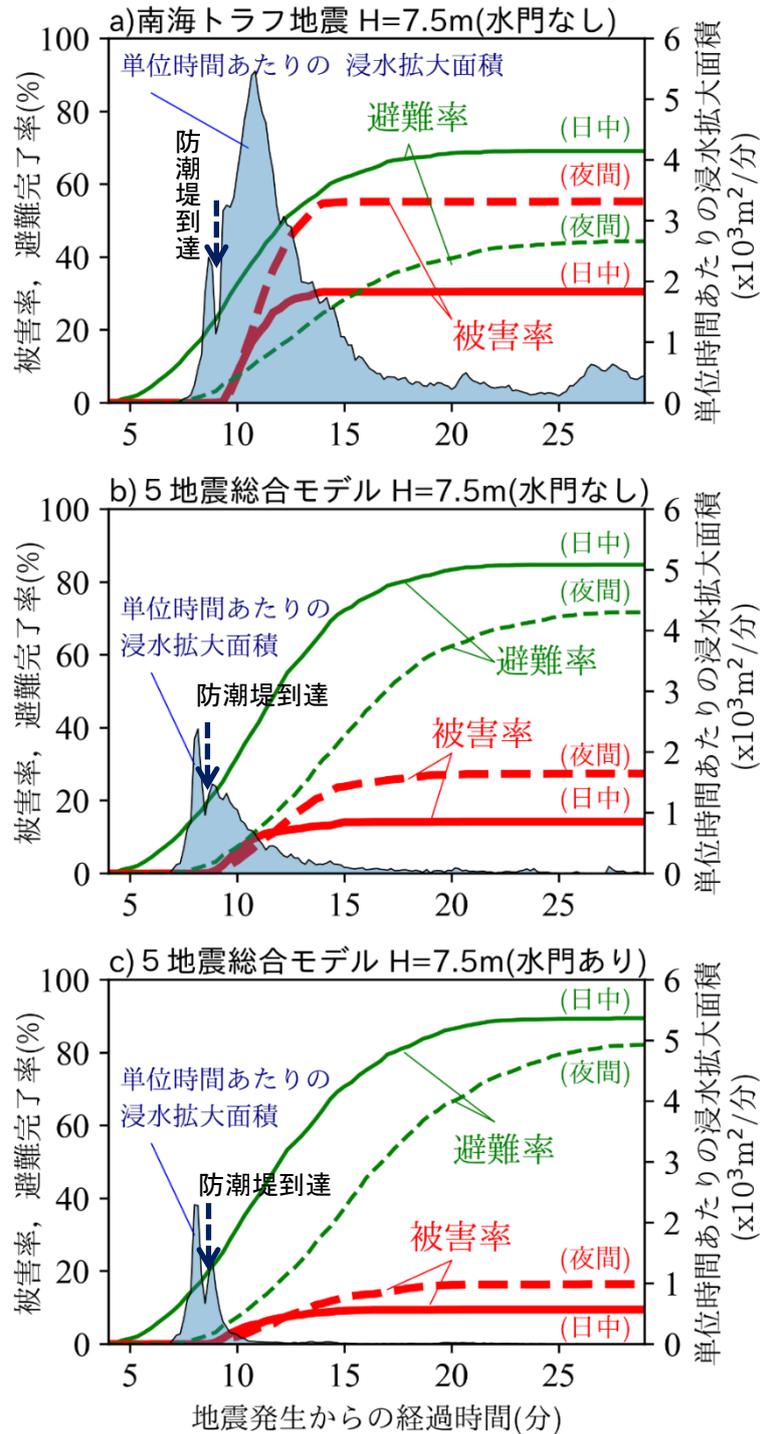


図 4-14 浸水域拡大速度と避難完了率と被害率の時間変化

図 4-15 は、波源モデルおよび潮位毎に整理された防潮堤天端高と被害率の関係図であり、上の(a)は日中で、下の(b)は夜間の結果である。

地震規模と潮位によって、被害率が增大する傾向が確認できる。

当該地域で L2 津波に指定された最大規模の南海トラフ地震ケースの低潮位時の被害率が、L1 津波の 5 地震総合モデルや安政東海地震の満潮位時のそれと同程度になっており、潮位条件による影響が異なる地震規模で発生する津波による被害と比べても有意であることを示唆する結果が得られた。

さらに、夜間の被害率は、日中の 1.5 倍程度になる傾向となっている。

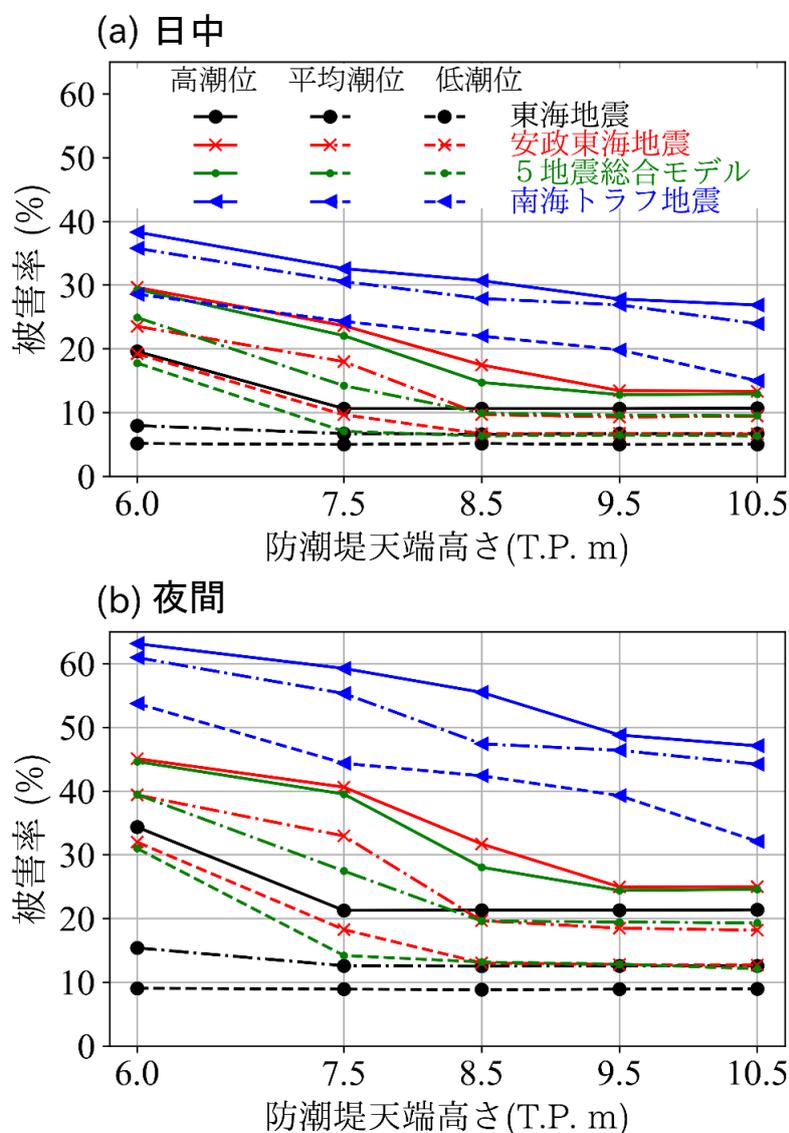
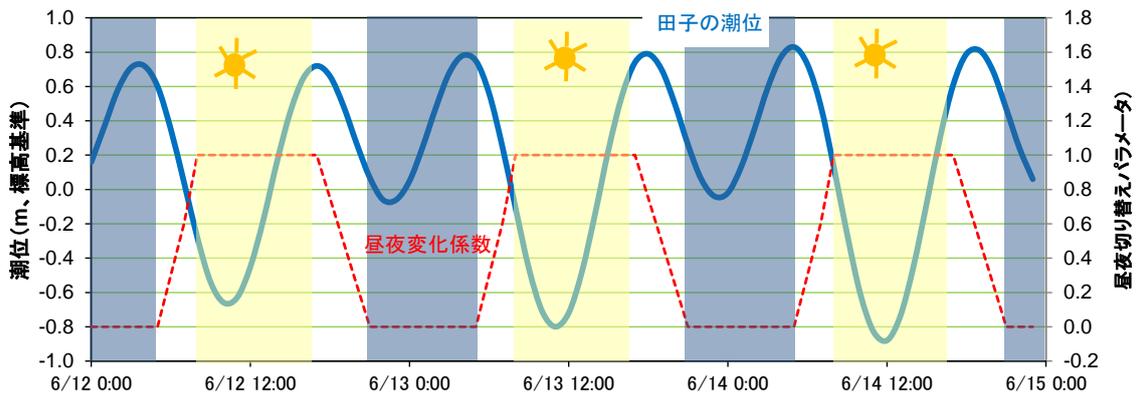


図 4-15 日中・夜間、潮位による被害率の変化（波源モデル別、水門なし）

昼と夜の被害率は、主に日射による避難路の見えやすさや寝てすぐの判断力を考慮したものであり、潮位変動と重なり合うことで、一日のうちで変動する。図 4-11 の結果を用いて、波源モデル毎の被害率の時間変化を簡便な方法で算出した。

潮位は、気象庁検潮所、田子の天文潮位データを用いた。

昼と夜の切り替えは、図 4-16 に示す変動を被害率に直接掛け合わせることにした。5～8 時と 17～21 時は切り替えの時間であり、線形で補完した。



出典：気象庁ホームページ（潮位予測：田子）を基に作成

図 4-16 被害率に乗じる昼夜パラメータの時間変化

図 4-17 には、防潮堤高を 7.5m、水門はなし、日中での被害率の時間変化を示す。この期間は、朝方の潮位が高く、夜間避難条件になっているので、被害率にピークがみられる。また、最も被害率が低くなるのは、日中 12 時前で潮位も最も低くなる時間である。被害率自体は、津波規模毎に異なるが、被害率の最大の時刻と最低の時刻で 2～5 倍もの差が確認できる。夜間に潮位が最高に達する今回のケースの場合には特に津波発生に注意が必要であることを示唆する結果が得られた。

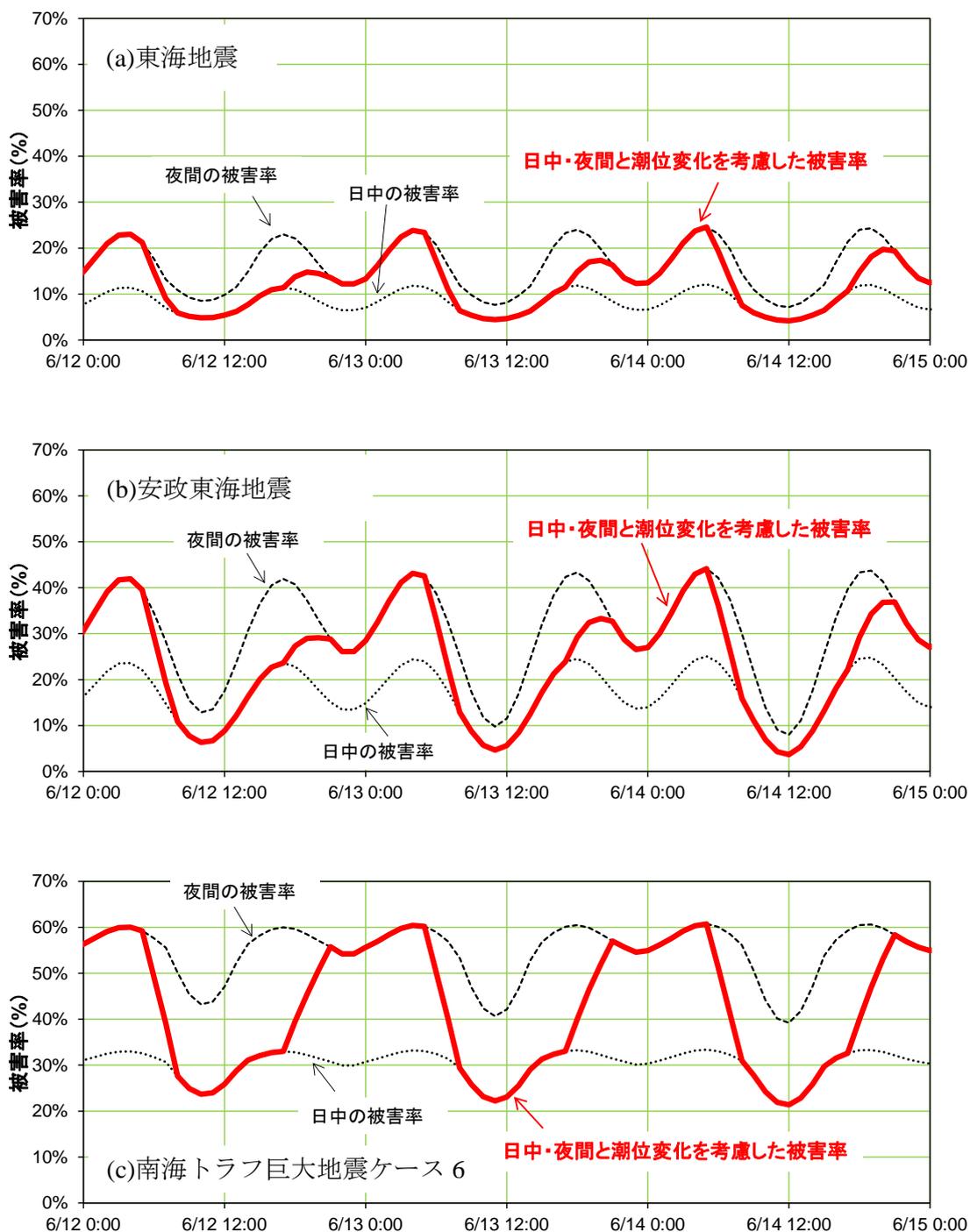


図 4-17 各ケースで求めた被害率の時間変化 (防潮堤高 7.5m、水門なし)

年間の天文潮位データを用いて、津波規模毎の被害率を比較すると、津波規模が大きいほど被害率はおおむね増大する傾向が確認できる。また、津波規模が大きいほど、年間の最大と最小の差が大きくなること、津波規模の違いと同じかそれ以上に時刻による変化が大きくなる傾向がみてとれる。これらは、津波による人的被害の特性であり、資産被害や浸水深から推定される人的被害において、このような差異は表れないと考えられる。つまり、夜間や日中の違いを考慮した津波避難モデルの有意性を示唆する結果となった。

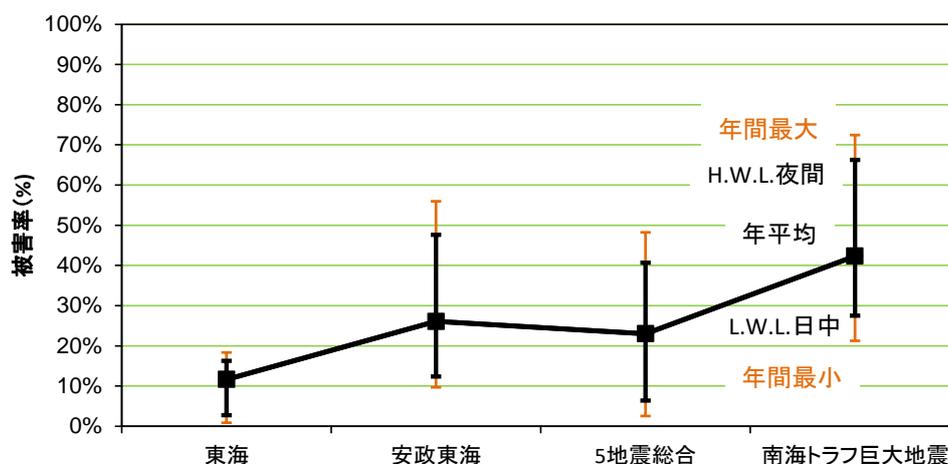


図 4-18 地震規模による被害率の変化（防潮堤高 7.5m、水門なし）

図 4-19 は、4 ケースの津波の被害率を年間で求め、その発生頻度を被害率 5% 刻みで算出したものである。津波の規模が大きいほど、大きい被害率ランクの発生頻度が高くなる傾向が確認できる。南海トラフ地震津波のケースでは、二山型の分布をしている。これは、日中と夜間の被害率の差が大きいためであり、被害率を算定する際の日中・夜間の割合を決めるパラメータの影響が大きい。

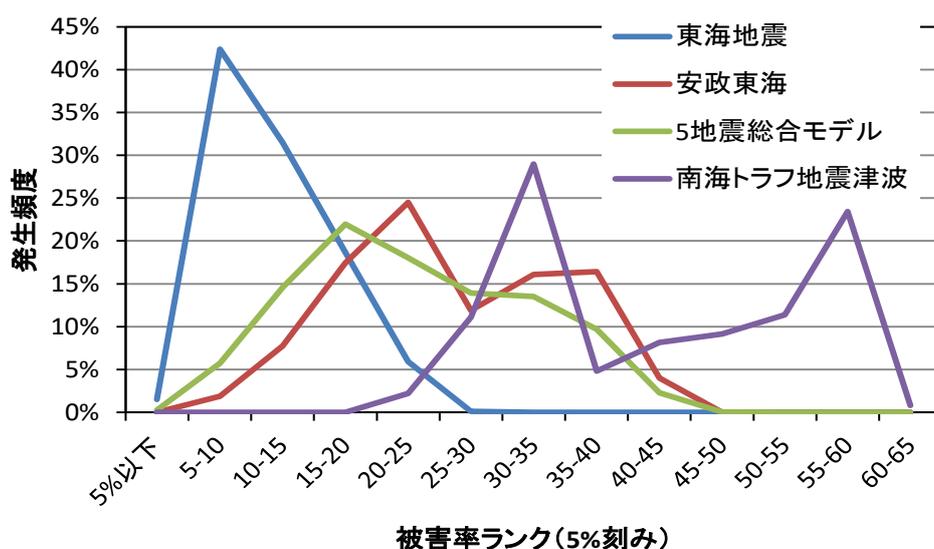


図 4-19 各津波ケースの被害率発生頻度

これらの津波の発生確率を考慮すると、図 4-19 のようになり、被害発生頻度は東海地震に由来する 5~10%が高いものの、安政東海地震や 5 地震総合モデルによる 30~40%程度の被害もその 1/3 程度の発生頻度になっている。

津波被害と発生確率を説明する際の表現として、潮位や日中・夜間、各津波の発生確率を考慮することで、より津波災害への理解が深まるとともに、より効果的な津波対策の検討につながる事が期待できる。

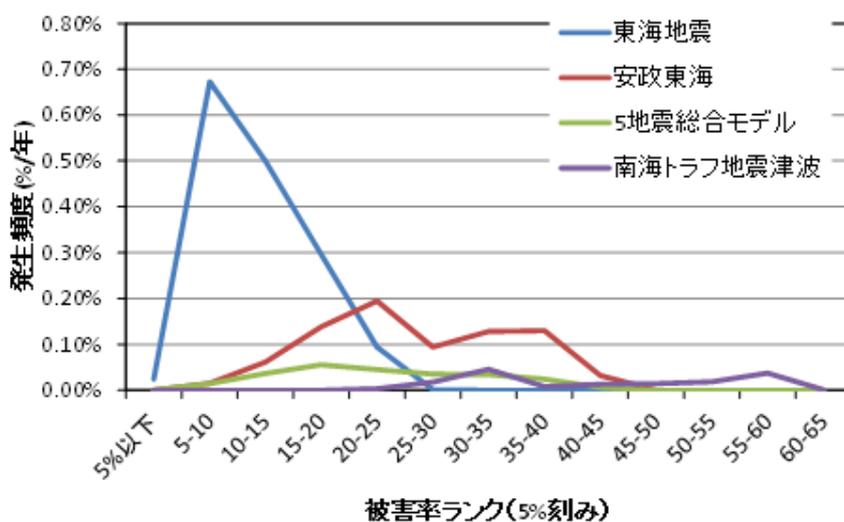


図 4-20 津波の年間発生確率を考慮した被害率発生頻度

第6節 津波対策の効果

第1項 防潮堤・水門の海岸施設による効果

図 4-2 1 に、天端高 6m の現況防潮堤を 7.5m、8.5m、9.5m、10.5m に嵩上げした場合、さらに同じ高さの水門を設置した場合の被害率のリスクカーブを示す。リスクカーブは、図 4-2 0 の被害率と発生頻度の分布から、発生頻度の累積を被害率の高い方から求めることで得られる。本研究ではさらに 4 つのモデル津波のリスクカーブに津波の生起確率を掛けて積分して求めた。また、海岸防護施設と浸水との関係を、表 4-5 に整理する。

防潮堤天端高 $H=6.0\text{m}$ (現状)と $H=7.5\text{m}$ の場合には、浸水が防潮堤の天端高に応じて発生し、被害も浸水拡大の状況に応じて変化する。 $H=6.0\text{m}$ と $H=7.5\text{m}$ を比較すると、天端が高い方が同じ被害率の場合の超過確率が小さく、水門なしとありでは水門によって浸水が軽減されるため水門なしの超過確率が小さくなる。

防潮堤天端高 $H \geq 8.5\text{m}$ の場合には、防潮堤天端上での津波越流はほとんど発生しない。そのため、津波被害は水門の有無によって決まる。したがって、リスクカーブは、水門があるケースとないケースで傾向が分かれ、水門ないケース群と水門ありケース群の曲線は重なっている。

図 4-2 1 には、超過確率 50 年、100 年、200 年をグラフ中に示した。現状の $H=6\text{m}$ 、水門なしの条件では、50 年に 1 度は被害率 7%以上の被害が発生すると推定され、50 年と 100 年では、それぞれ 2 割、3 割の被害率が発生する結果となっている。

表 4-5 防潮堤・水門と浸水・被害発生状況

防潮堤・水門条件	(a) $H \leq 7.5\text{m}$ (水門なし・あり)	(b) $H \geq 8.5\text{m}$ (水門なし・あり)
浸水条件	 <p>防潮堤・水門上の越流は天端高に応じて発生</p>	 <p>防潮堤上の越流はほぼ発生しない 水門がない場合河口から浸水</p>

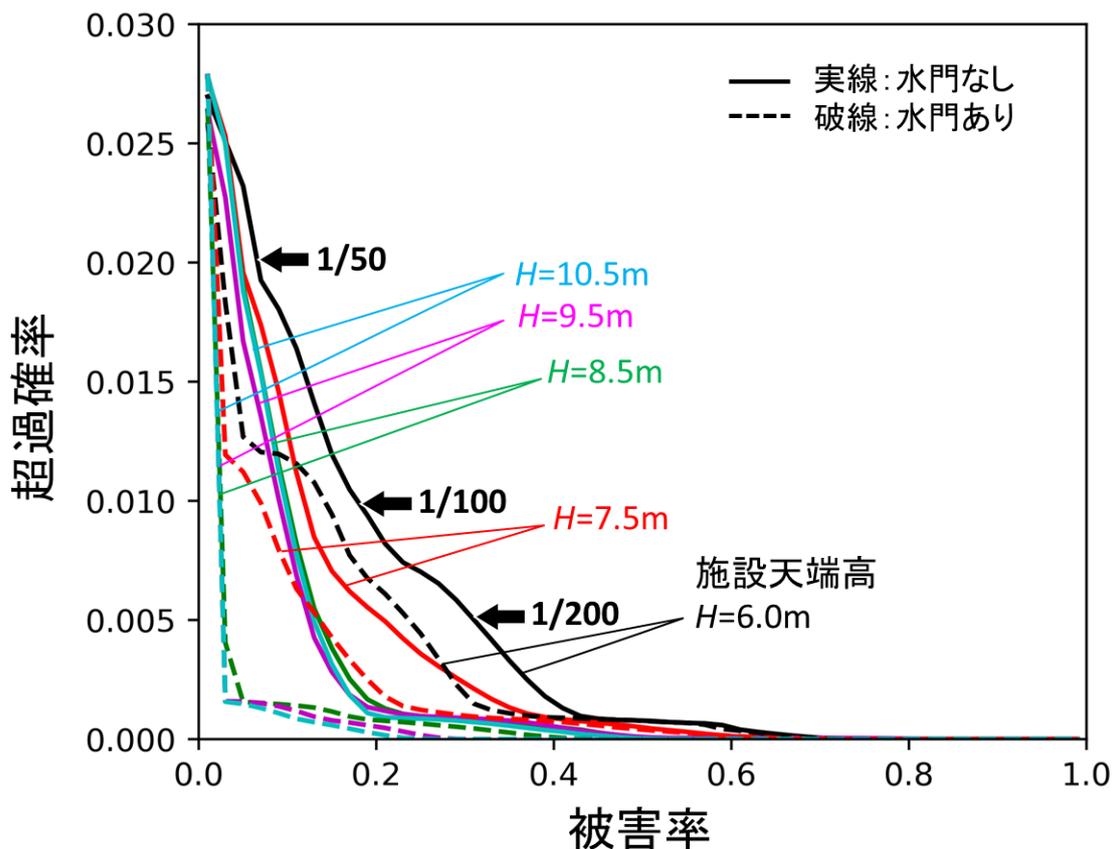


図 4-2 1 防潮堤・水門によるリスクカーブの変化

リスクカーブにおける未超過確率が 0.0025(400 年に 1 度の被害)以下に着目すると、図 4-2 2 になる。そのときの海岸施設による浸水低減効果は、表 4-6 になると推察される。

防潮堤天端高 $H \leq 7.5\text{m}$ のケースには、防潮堤および水門での津波越流が発生するものの、天端高に応じた被害変化がみられる。被害率が大きくなるにつれて、水門の有無による差が小さくなる。津波浸水解析で天端上越流水深が 2m を超え防潮堤破壊が考慮され、防潮堤がない状態になりその効果が小さくなるためと考えられる。

防潮堤天端高 $H \geq 8.5\text{m}$ で水門がないケースには、防潮堤天端上を越流はするため天端高による影響もあるが、水門がなく河川を遡上する津波による被害が卓越し、天端高による影響が小さい。一方、防潮堤天端高 $H \geq 8.5\text{m}$ でも水門があるケースには、水門があり防潮堤を含めた施設天端上の越流量によって被害が変化する。そのため、水門なしに比べて天端高による変化が顕著である。

図 4-2 2 には、超過確率 500 年、1000 年、2000 年の位置を矢印で示した。500 年に 1 度発生する被害は、現状 $H=6\text{m}$ かつ水門なしのケースの被害率 0.4 を最大として、防潮堤嵩上げと水門設置によって被害率はゼロに近くなっている。一方、1000 年や 2000

年に一回の被害の場合には、防潮堤嵩上げと水門設置により検討ケースで最大規模の低減施設としても1~2割の住民に被害が発生する結果となった。

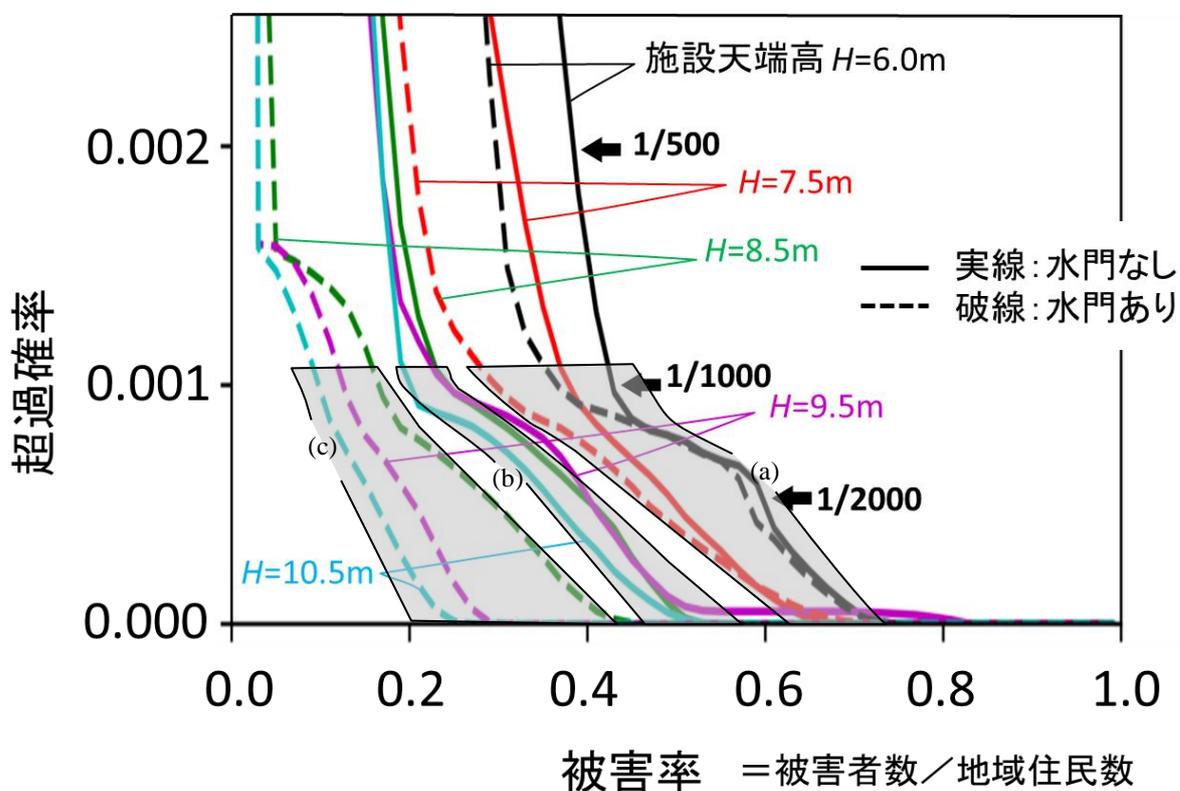


図 4-2-2 防潮堤・水門によるリスクカーブの変化（超過確率 0.0025 以下を拡大）

表 4-6 防潮堤・水門と浸水・被害発生状況（超過確率 0.001 以下の場合）

防潮堤・水門条件	(a) $H \leq 7.5\text{m}$ (水門あり)	(b) $H \geq 8.5\text{m}$ (水門なし)	(c) $H \geq 8.5\text{m}$ (水門あり)
浸水条件	<p>防潮堤・水門の破壊による浸水</p>	<p>防潮堤上の越流は天端高に応じて発生 水門がなく河口から浸水</p>	<p>防潮堤・水門上の越流量は天端高に応じて発生</p>

第2項 避難計画の違いによる人的被害変化

3章で、生起確率の異なるモデル津波の浸水分布を重ね合わせた浸水確率マップを用いて浸水遭遇確率を小さくする浸水遭遇回避の避難行動を避難モデルで解析可能にしたことを説明した。本項では、ケスタディ地域で、通常の最短距離探索による避難を行い被害率の違いを分析する。

また、避難場所として高地のみとする場合と、高地避難に加えて避難ビルやタワーへの鉛直避難を行った場合についても比較し、それぞれの避難行動による効果と本避難モデルを用いた場合に得られるメリットについて分析する。

図 4-23 は、まだ避難タワーやビルは含まず、地形データから 15m 以上の場所への避難をする場合のポテンシャルマップである。避難者は、避難経路内をポテンシャル値の減少方向に避難する。図 4-24 は、それに避難タワーやビルの鉛直避難を加えたもので、避難場所を中心とする2つの同心円のうち大きい円は鉛直避難施設の影響範囲、すなわち内側の人だけがその施設を目指して避難行動をする境界を表している。一方、小さい円は、鉛直避難施設におけるポテンシャル値の補正ポテンシャル値 dP を表す同心円であり、鉛直避難施設を考慮した場合のポテンシャルモデル P^*_{Tower} は、同施設がない場合の鉛直避難施設のポテンシャル値 P_{Tower} から dP を差し引いた値 $P_{Tower}-dP$ とし、そこを起点に大きい同心円内のポテンシャル値 $P^*(x,y)$ を再算出する。 $P(x,y)$ と $P^*(x,y)$ の小さい方が採用される。したがって、 dP だけ陸側にいる場合にも鉛直避難施設を利用し、海側にいる場合にも dP を考慮する場合としない場合では、 dP を用いた場合の方が鉛直避難施設を利用する人が増えることになる。

図 4-25 は、浸水確率マップに基づき、浸水確率の高い地域から低い地域へ避難を行う場合のポテンシャルマップである。ポテンシャル値は、津波浸水毎に算出する。すなわち、浸水領域の境界では常にゼロから始まる。本マップでは色が濃いほど次の浸水確率領域あるいは避難場所に近くにいることを表し、色が濃くなる方へ移動する。図 4-26 は、さらに低地にある避難タワー・ビルへの鉛直避難を考慮した場合であり、鉛直避難のポテンシャルマップへの反映方法は、上記の最短距離探索と同じ手法を用いた。



図 4-23 最短距離探索ポテンシャルマップ（鉛直避難なし、 $H=7.5\text{m}$ 、高潮位）



図 4-24 最短距離探索ポテンシャルマップ (鉛直避難あり、 $H=7.5\text{m}$ 、高潮位)



図 4-25 浸水確率ポテンシャルマップ（鉛直避難なし、 $H=7.5\text{m}$ 、高潮位）

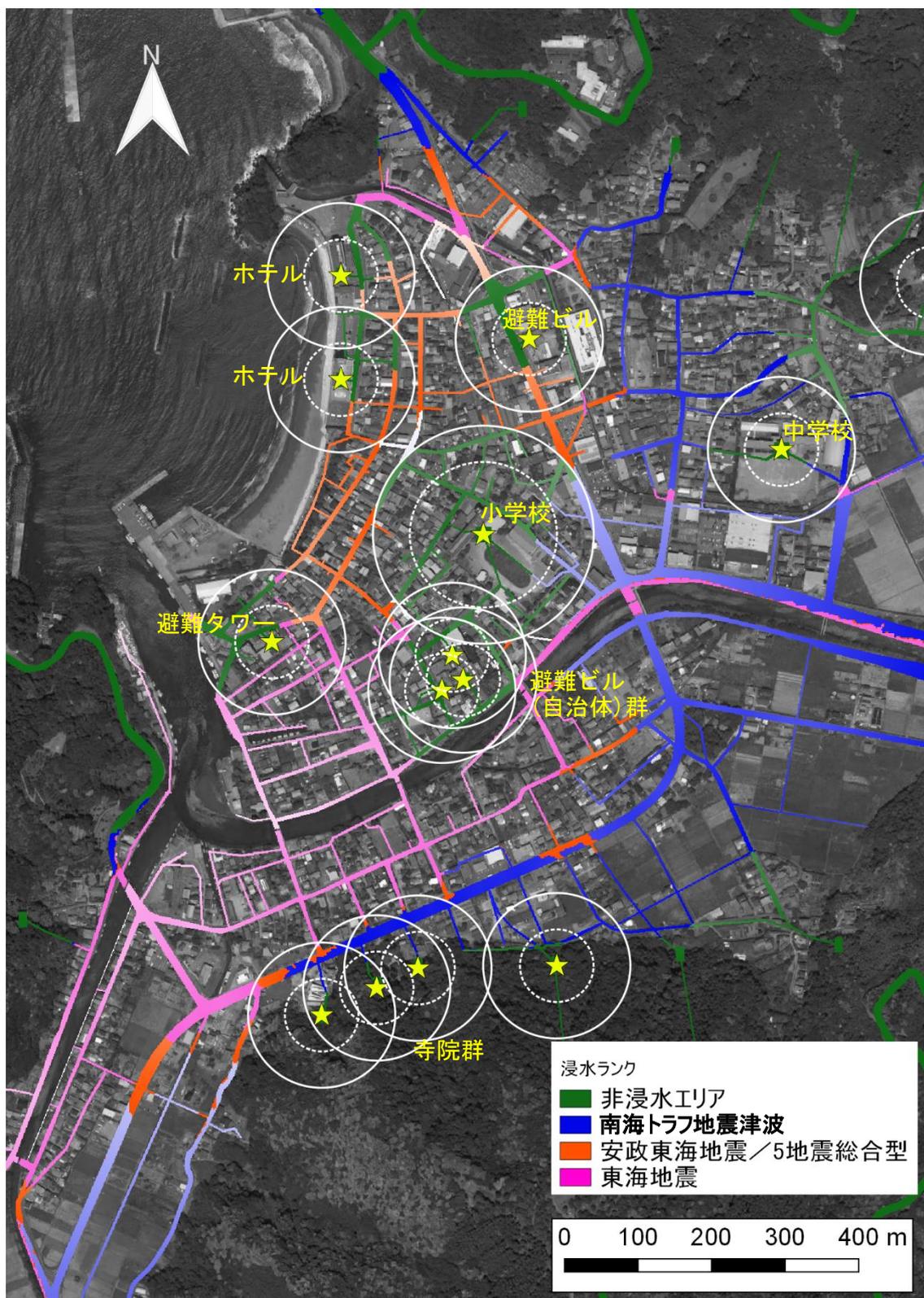


図 4-26 浸水確率ポテンシャルマップ（鉛直避難あり、 $H=7.5\text{m}$ 、高潮位）

表 4-7 に示す被害率を比較すると、浸水遭遇確率を軽減する行動により、3つの波源ケースでもともに、軽減している。東海地震は、他の2つの波源に比べて変化が小さいのは、東海地震による浸水範囲が大きく、浸水遭遇確率を軽減する動きの効果が得られなかったものと考えられる。減災対応として、効果が表れやすいようにリスクが小さい方に最短でいけるような避難路の整備が考えられる。

南海トラフ地震の場合には、ケース B と D で、6%以上 (240人以上)の被害率の低減効果が得られた。これは、浸水確率が高い海側にある2つのホテルへの避難者が減ったことと、海側から避難する避難者の避難経路の中にある小学校があり、浸水に間に合ったものと推定される。また、浸水確率の小さい個所にある避難タワーに避難し、まさにそこが浸水しなかった場合には、避難指示解除後に自らの力で行動できる可能性がある。一方、一時避難した場所の周辺に浸水が生じた中には、救助を求めねばならず、2次災害の危険や救助のコストが発生するため、浸水確率の小さいエリアの避難タワーは避難完了に加えて経済的な行動であると考えられる。

表 4-7 避難行動の違いによる被害率

	東海地震	5 地震総合	南海トラフ巨大地震 ケース 6
A. 高地避難	30.2 %	34.6 %	50.2 %
B. 高地避難 +避難ビル・タワー	9.9 %	27.3 %	46.8 %
C. 浸水確率低減	27.3 %	30.7 %	48.4 %
D. 浸水確率低減 +避難ビル・タワー	8.8 %	19.5 %	40.2 %

浸水遭遇確率低減避難の効果とその要因について分析するため、表 4-7 に示す避難条件で避難シミュレーション結果について考察する。表 4-9～表 4-12 に、浸水しない領域と各波源モデルの浸水域内に初期位置を持つ避難者の被害者数、避難先一覧を整理した。浸水域毎の特性を明らかにするため、各浸水域の人数は、発生確率が低い波源モデルの浸水域内にいる被害者数、および避難者数を差し引いたものを示す。つまり、安政東海地震の列で示される避難者には、東海地震の避難者でカウントされた場合にはカウントの対象とならない。

最も被害者数が多いケースは、表 4-10 の高地避難と海側避難なしを組み合わせた場合である。対象地域は低地が広がっており、高地避難を基本とすると避難場所到着まで時間が掛かる。そのため、避難タワー・ビルの鉛直避難を実施することが必要になるが、海側避難をしない場合には、鉛直避難をできない人が増え、その避難者が高地を目指して避難する際に浸水にあってしまうことが要因である。一方、海側への避難をする場合には、浸水が開始していない間に避難を完了する人が増え、海側避難をしない場合に比べて被害が軽減する。

一方、浸水遭遇確率低減避難を実施する場合には、高地を目指した避難を選択する場合に比べ、被害が軽減することが期待される。まず、浸水遭遇確率低減避難と海側避難ありを組み合わせて行動した場合、高地避難と海側避難ありを組み合わせた場合とほぼ同数になる。これは、どちらも低地にいる避難者の多くが鉛直避難を選択するためであり、低地での避難行動が同一になっているためである。

最後に、浸水遭遇確率低減避難と海側避難を組み合わせた場合については、被害者数が最も少なくなっていることが分かる。これは、浸水確率が小さくなる方向に避難することで、特に南海トラフ地震での浸水域にいる避難者が検討条件である安政東海地震の浸水域に入りにくくなっている効果が表れたものである。また、鉛直避難先は小学校が800人と他の施設と比べて群を抜いて大きい。また、他の避難行動条件における小学校の利用者数に比べても大きいことが分かる。これは前述した避難経路と小学校の位置関係によるものであり、避難者個々の行動の効果を評価できる本群衆避難モデルの効果と言える。ただし、南海トラフ地震の浸水域内の人でも、被害者が発生している（表 4-12 赤点線枠）。本来であれば、南海トラフ地震の浸水域の中あるいは浸水確率ゼロの領域にいるはずであり、設定した行動条件から被害にあわない。本避難モデルでは、自宅から最も近い避難路に移動することを前提としているため、浸水域外の自宅から浸水域の街路に出た結果である。本モデルの改良すべき課題である。

表 4-8 避難行動の違いによる被害率

避難行動	避難タワーおよび 避難ビルの利用の 海側避難	被害者総数	被害者数一覧
高地避難	海側避難あり	463	表 4-9
高地避難	海側避難なし	727	表 4-10
浸水遭遇確率低減避難	海側避難あり	458	表 4-11
浸水遭遇確率低減避難	海側避難なし	392	表 4-12

表 4-9 安政東海地震発生時の被害者数（高地避難+海側避難なし）
 （各セルの右は領域内の人口、左は被害者数を示す。）

浸水域別	非浸水域		東海地震		安政東海地震		5地震総合モデル		南海トラフ地震	
被害者数	4	1476	153	284	61	146	4	6	505	2212

避難開始時刻	非浸水域		東海地震		安政東海地震		5地震総合モデル		南海トラフ地震	
0～1分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1～2分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2～3分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3～4分	0	134	0	16	0	10	0	2	0	140
4～5分	0	248	0	33	0	24	0	0	0	300
5～6分	0	182	0	30	0	17	0	0	0	230
6～7分	3	218	56	71	23	29	2	2	150	364
7～8分	1	231	97	115	38	54	2	2	355	705
8～9分	0	201	0	5	0	2	0	0	0	204
9～10分	0	154	0	12	0	5	0	0	0	153
10～11分	0	108	0	2	0	5	0	0	0	116
11～12分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12～13分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13～14分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14～15分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15～16分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16～17分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17～18分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18～19分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19～20分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

避難開始時刻	非浸水域		東海地震		安政東海地震		5地震総合モデル		南海トラフ地震	
ホテル群		0		0		6		0		224
自治体建物		0		30		0		0		31
寺院群		0		0		0		0		0
小学校		0		0		0		0		0
中学校		4		0		0		0		0
高校		0		0		0		0		0
避難タワー		0		7		3		0		41
企業ビル		0		0		0		0		0
3階建物										
その他高地		0		0		0		0		0

表 4-10 安政東海地震発生時の被害者数（高地避難+海側避難あり）
 （各セルの右は領域内の人口、左は被害者数を示す。）

浸水域別	非浸水域		東海地震		安政東海地震		5地震総合モデル		南海トラフ地震	
被害者数	6	1476	150	284	22	146	2	6	283	2212

避難開始時刻	非浸水域		東海地震		安政東海地震		5地震総合モデル		南海トラフ地震	
0～1分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1～2分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2～3分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3～4分	0	134	0	17	0	10	0	2	0	153
4～5分	0	248	0	32	0	34	0	0	0	338
5～6分	0	182	0	36	0	24	0	0	0	254
6～7分	3	218	45	65	2	12	2	2	42	289
7～8分	3	233	105	117	20	43	0	0	241	614
8～9分	0	199	0	5	0	11	0	2	0	249
9～10分	0	154	0	10	0	7	0	0	0	188
10～11分	0	108	0	2	0	5	0	0	0	127
11～12分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12～13分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13～14分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14～15分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15～16分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16～17分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17～18分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18～19分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19～20分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

避難開始時刻	非浸水域		東海地震		安政東海地震		5地震総合モデル		南海トラフ地震	
ホテル群		0		0		5		0		206
自治体建物		0		0		12		0		129
寺院群		61		0		0		0		0
小学校		10		0		0		0		183
中学校		78		0		0		0		222
高校		22		0		0		0		0
避難タワー		0		3		10		0		136
企業ビル		0		0		5		0		231
3階建物										
その他高地		0		0		3		0		24

表 4-1 1 安政東海地震発生時の被害者数（浸水遭遇確率低減避難＋海側避難あり）
（各セルの右は領域内の人口、左は被害者数を示す。）

浸水域別	非浸水域		東海地震		安政東海地震		5地震総合モデル		南海トラフ地震	
被害者数	6	1476	150	284	22	146	2	6	278	2212

避難開始時刻	非浸水域		東海地震		安政東海地震		5地震総合モデル		南海トラフ地震	
0～1分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1～2分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2～3分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3～4分	0	134	0	17	0	10	0	2	0	153
4～5分	0	248	0	32	0	34	0	0	0	338
5～6分	0	182	0	36	0	24	0	0	0	254
6～7分	3	218	45	65	2	12	2	2	42	289
7～8分	3	233	105	117	20	43	0	0	236	612
8～9分	0	199	0	5	0	11	0	2	0	249
9～10分	0	154	0	10	0	7	0	0	0	190
10～11分	0	108	0	2	0	5	0	0	0	127
11～12分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12～13分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13～14分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14～15分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15～16分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16～17分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17～18分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18～19分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19～20分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

避難開始時刻	非浸水域		東海地震		安政東海地震		5地震総合モデル		南海トラフ地震	
ホテル群		0		0		5		0		206
自治体建物		0		0		12		0		129
寺院群		61		0		0		0		0
小学校		10		0		0		0		183
中学校		78		0		0		0		222
高校		22		0		0		0		0
避難タワー		0		3		10		0		136
企業ビル		0		0		5		0		231
3階建物										
その他高地		0		0		3		0		24

表 4-12 安政東海地震発生時の被害者数（浸水遭遇確率低減避難+海側避難なし）
（各セルの右は領域内の人口、左は被害者数を示す。）

浸水域別	非浸水域		東海地震		安政東海地震		5地震総合モデル		南海トラフ地震	
被害者数	4	1476	124	284	24	146	2	6	238	2212

避難開始時刻	非浸水域		東海地震		安政東海地震		5地震総合モデル		南海トラフ地震	
0～1分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1～2分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2～3分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3～4分	0	134	0	17	0	10	0	2	0	155
4～5分	0	248	0	45	0	34	0	0	0	319
5～6分	0	182	0	40	0	25	0	0	0	247
6～7分	3	218	27	48	1	11	2	2	76	313
7～8分	1	231	97	115	23	43	0	0	162	556
8～9分	0	201	0	5	0	13	0	2	0	276
9～10分	0	154	0	12	0	5	0	0	0	211
10～11分	0	108	0	2	0	5	0	0	0	135
11～12分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12～13分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13～14分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14～15分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15～16分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16～17分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17～18分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18～19分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19～20分	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

避難開始時刻	非浸水域		東海地震		安政東海地震		5地震総合モデル		南海トラフ地震	
ホテル群		0		0		3		0		85
自治体建物		0		33		5		0		18
寺院群		41		0		0		0		0
小学校		1		0		14		0		800
中学校		26		0		0		0		122
高校		1		0		0		0		0
避難タワー		0		3		6		0		12
企業ビル		0		0		5		0		35
3階建物										
その他高地		0		0		0		0		16



図 4-27 指定避難場所分布図

第7節 発災時の緊急対応による変化

第1項 シナリオ設定

(1) 避難路閉塞の発生

津波避難地図(図4-3)に示される危険箇所は、地震の揺れによってブロック塀が倒壊し、避難者の通行が不可能になる可能性のある箇所である。

対象地域では、車が1台通れる程度の幅の狭い道が多くある。避難路の不通による影響の程度把握は、対策の必要性や避難計画立案において有意な情報となる。避難路の閉塞についても、確率的取り扱いを行うべき事象であるが、対象地域に多くみられる1～1.5車線程度の狭い道路を全て不通とした場合で解析を行った(図4-28)。

防潮堤天端高などの違いによる被害率の変化がみられるものの、全体として避難路の有無によって1割程度の違いがみられ、避難路の整備は津波規模や防潮堤に限らず一定の効果が期待できることが示された。今後は避難路閉塞についても、地震ハザード毎の地盤の揺れや発生確率を考慮し、他の要因と同様にリスク評価に取り込むことが可能にすることが必要である。発生確率を考慮することで、避難路整備が他の対策に比較して重要であるかが分かり、整備の優先順位を考えることが可能になる。

(2) 3階建て建物への避難

ハード対策のみでは被害低減が難しい場合、避難行動対策がある。ここでは暫定的対策として各地域で行われている3階以上の建物への避難委について、その効果を確認した(図4-28)。

南海トラフ地震のケースでは、鉛直避難施設や高知の避難に比べて、3階建て建物への避難によって、約500名が避難できる結果となり、津波や地震に耐え緊急避難所となる施設を緊急避難場所として指定することの効果が確認できた。しかし、本津波浸水計算における建物破壊の解析精度は未確認であり、今後より精度の高い耐津波脆弱性評価方法が期待される。また、津波火災による2次被害にも注意が必要である。

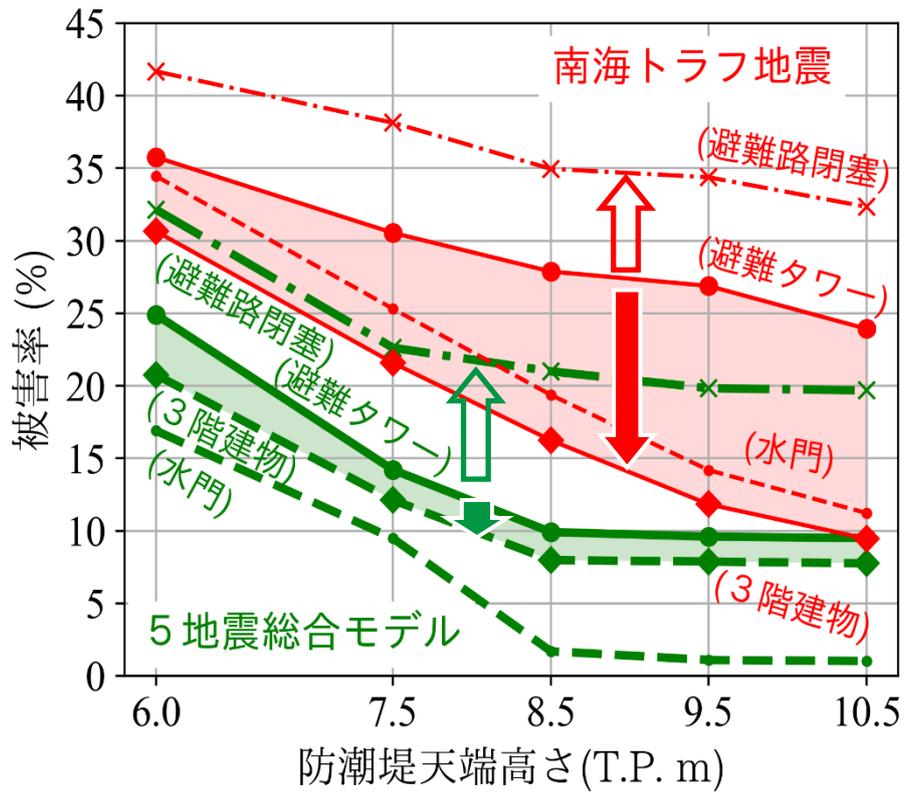


図 4-28 3階建て建物や避難路の不通による被害率の変化

第8節 まとめ

開発した避難モデルを、今後南海トラフ巨大地震による被害が懸念されているケーススタディ地域に適用した。避難行動における避難経路性状や計画を想定したポテンシャルマップを作成し、各シナリオにおける被害率を比較し、開発モデルによって人的被災リスクが可能であることと、効率的な避難対策の検討に資するデータとなることを明らかにした。

人的被害の時間変化に寄与する日中と夜間の避難、潮位の違いによる浸水域変化を合わせて解析した。潮位と日中・避難によって人的被害は、検討した津波ケースにおいて津波規模間の変化と比べて、同程度かそれ以上に変化していた。また、被害率を5%刻みでランク分けし被害率ランクの発生頻度を算定し、さらに津波の発生確率を乗じて、4ケースを合わせて被害率の発生頻度を求めた。このグラフは専門家知識を持たない住民などが、津波リスクを理解するのに効果を発揮すると期待できる。

浸水確率の平面分布を考慮した避難行動を避難モデルの中で解析し、人的被災リスクの低減効果を示すことができた。一方、最大クラスの津波発生時には、避難者が浸水エリアに集中し避難者が集中し被害がより大きくなると考えられるため、避難タワーやビルなどの対策と合わせて考える必要がある。

3階建物への避難や避難路閉塞の発災時の緊急対応について分析した。本ケースでは、3階建物による被害低減効果は浸水規模によって異なり、避難路閉塞については津波規模に関わらず効果は同程度であった。今後は建物や避難路施設の破壊確率を考慮した解析により精度を上げる必要がある。

参考文献

- [1] 静岡県ホームページ：賀茂地域（1市5町）で進める津波対策地区協議会、http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-810/kamo_tsunami.html、2018-6-10 閲覧。
- [2] 松崎町(2020)：松崎町津波防災地域づくり推進計画参考資料、URL：https://www.town.matsuzaki.shizuoka.jp/docs/2020060200019/file_contents/keikaku.pdf、2020-7-5 閲覧。
- [3] 藤間 功司・樋渡 康子 (2013)：津波防災施設の最適規模と残余リスクを明示する手法の提案、地震工学論文集、第32巻、pp.345-357。
- [4] 静岡県：静岡県第4次地震被害想定関連資料、<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/4higaisoutei/shiryou.html>
- [5] 山崎明日香・佐藤慎司・山中悠資 (2016)：伊豆半島西海岸の津波災害リスク分析に

基づく総合的な津波対策に関する研究、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.72、No.1、pp.72-82.

[6] Goto C. Ogawa, Y. Shuto, N., and Imamura, F., IUGG/IOC TIME Project Numerical method of tsunami simulation with the Leap-frog scheme, UNESCO, 126 p.

[7] 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会において検討された震度分布・浸水域等に係るデータ提供について、http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/data_teikyou.html、2016-5-15 閲覧.

第 5 章 結論

本研究では、人的被災リスク評価手法の確立のための群衆避難モデルの開発と、それを活用して津波リスクを理解するためにケーススタディ地域に開発モデルを適用し、津波による人的被災リスクについての考察を行った。

第 1 節 群衆避難モデルの開発

本研究で対象とするのは、防潮堤や水門による津波防護や避難対策の効果を調べるための人的被災リスク評価であることから、開発する群衆避難モデルに取り入れる被害要素を検討した。既往研究によって津波避難モデルとして活用されている避難モデル手法の特徴と、考慮すべき被害要素の比較から、個別要素型モデルとポテンシャルモデルのハイブリッドモデルとし、リスク評価への適用のため個別要素型モデルで考える避難者に個々の特性を与えるマルチエージェントモデルの考え方を踏襲した。

開発したモデルには、避難路条件作成を効率的かつ客観的に行うために GIS データ処理ツールを適用することで、様々な避難条件や地形条件に対応するようにした。また、ポテンシャルモデルが得意とする被害を軽減させるように避難するという特性を生かし、浸水リスクマップから避難経路を持てる方法を提案した。

第 2 節 ケーススタディ地区での人的被災リスク評価

ケーススタディ地域に、開発した群衆避難モデルを適用し以下のことが分かった。

- ・ 潮位と日中・避難によって人的被害は、検討した津波ケースにおいて津波規模間の変化と比べて、同程度かそれ以上に変化する。被害率の発生頻度に、津波の発生確率を乗じて年間の被害発生確率を求めた。本結果により、専門家知識を持たない住民などの津波リスクに対する理解の向上を期待できる。
- ・ 浸水リスクを考慮した避難行動を避難モデルの中で解析し、人的被災リスクの低減効果を示すことができた。それは、避難タワー・ビルの効果や影響によって変化し、最大クラスの津波に対しても、避難経路中に避難施設を効果的に配置することが有効であることを示した。また、浸水リスクの小さい場所の避難タワーに避難することで 2 次被害を軽減できる可能性を示した。本手法が、人的被災リスク評価のみならず、避難計画の検討にも活用できることが確認できた。

- ・ 3階建物への避難や避難路閉塞の発災時の緊急対応について分析した。本ケースでは、3階建物による被害低減効果は浸水規模によって異なり、避難路閉塞については津波規模に関わらず効果は同程度であった。これまで、リスク評価に加えることがなかった事象についても、開発した避難モデルによって被害軽減効果を評価できることが分かった。避難路の閉塞などの被害が発生する確率を考慮する必要があることが今後の課題になったものの、津波対策実施後の残余リスク軽減のための減災対策についての検討に利用できることを示すことができた。

第 3 節 今後の課題

津波被害の状況を理解する場合には、被害の大きさのみならず、被害の発生確率を考慮することが重要であることが本研究で確認された。今後は、建物や避難路施設の破壊確率を考慮した解析により精度を上げることで、3階建物への避難や避難道路の整備による津波対策についても防潮堤などの防災施設などと同じように評価できるようにする必要がある。

津波人的被害は、ハザードの大きさのみならず、津波が海岸部に到達し陸域に浸水が発生する時刻による変化も大きい。今回はモデル津波が4ケースと少ないため、到達時間に関する分析は不可能であったが、今後はさらに津波リスクを理解する上での重要な課題として検討する必要がある。同様に、今回提案した浸水確率マップに基づく浸水遭遇確率低減避難においても、モデル津波のケースが少ないことから解析ケースを増やしその妥当性や適用範囲について検討する必要がある。

謝 辞

プロジェクト研究員として津波避難に関する研究に携わるようになってから今日までの約7年間にわたり、熱心かつ丁寧な御指導・御鞭撻を賜った岡安教授に深甚なる感謝の意を表するとともに、深く御礼申し上げます。先生には、本論文のテーマや論文構成など数多くの御助言・御指導をいただきました。先生のご指導なくしては、本論文の完成は成し得ませんでした。また、先生には、研究に対する姿勢だけでなく公私にわたり多くのことを学ばせていただきました。

本学大学院 池谷毅教授には、深い専門知識から終始適切な御助言を頂き、また、常に暖かく丁寧に御支援、御助言いただきましたこと、深く感謝いたします。谷和夫教授には、研究に取り組む姿勢から自分が成し遂げたいこと、成し遂げなければならないという信念の大切さを教えて頂きました。稲津大佑准教授からは、本研究の社会貢献の可能性や重要性について議論させて頂き、いろいろなことに気づくことができました。ここに深く感謝致します。

京都大学 多々納裕一教授、関西大学 安田誠宏准教授、土木学会減災アセスメント小委員会の先生方、ご関係者の皆様には委員会の活動に参加させて頂き、津波被害やリスク評価の研究分野の奥深さや、まちづくりと防災計画といったこれまで考えていなかった新たな社会科学分野の取り組みについて考えるきっかけを頂きました。深く感謝申し上げます。

東京海洋大学沿岸工学研究室旧研究員 嶋原康子様には津波浸水解析について素人同然だった私にデータ作成から計算まで様々に協力していただきました。防衛省から同じ社会人ドクターとして研究を共にさせて頂いた北村福太郎さんには、研究活動における集中力や取り組む姿勢を学ばせて頂きました。研究室で社会人経験があるお二人とのやりとりは日々の研究の中での楽しい時間でもありました。御礼を申し上げます。

東京海洋大学 沿岸域工学研究室で一緒に研究活動をした皆さんには、ケーススタディ地区での現地踏査や検討会での議論、レクリエーションを含む様々な研究室の活動によって自分が感化され研究の活力を与えて頂きました。感謝するとともに、皆さんの今後の活躍を楽しみしていることを伝えたいと思います。

株式会社エコー取締役社長 柴木秀之博士には、仕事をしながら研究活動をする際の難しさを理解して頂き、様々な面でご指導・ご支援頂きました。

最後に、これまであらゆる面で支え続けてくれた妻 綾子と長男 祐平にも心から感謝します。