

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

津波避難所と経路の最適割り当てに関する研究

| | |
|-------|---|
| メタデータ | 言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-06-22 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 北村, 福太郎 メールアドレス: 所属: |
| URL | https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1896 |

博士学位論文

津波避難所と経路の最適割り当てに関する研究
**Allocation of Tsunami Evacuation Routes and Refuges
for Minimizing Expected Casualties**

令和元年度

(2020年3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

北村 福太郎

Fukutaro Kitamura

要約

多くの被害を生んだ東日本大震災以降、ハード対策とソフト対策を総動員した津波対策に取り組むこととされている。ソフト対策の一つである避難を適切に行うことは、人的被害を最小限に留めるうえで重要である。避難経路や避難所の設定あるいは選択においては、これまで多くの場合、最寄りの避難所への最短経路が採用されているものの、津波の浸水特性を考慮して浸水を避けるように経路設定することで、被災者数を減少できる可能性がある。この研究では、避難中の津波遭遇者を最小化するために、想定される様々な津波について、津波に遭遇しにくい避難経路および避難所を、災害発生前に割り当てることのできる数値計算モデルを開発し、その効果を検証した。この研究の新規性は、津波遭遇までに最も時間的猶予を与える避難経路等を選択する点と、想定される多くの津波に対して有効な、一意の避難経路等を、災害発生前に割り当てる方法を示している点にある。

第 1 章では、この研究の背景や、目的、論文の構成を示した。

第 2 章では、地震津波避難の実態と行政の基準を整理し、この研究の意義を示した。加えて、既往研究を整理し、この研究が目指す割り当てモデルは未だ開発されていないことを示した。

第 3 章では、避難所および避難経路の割り当てモデルの構築を行った。このモデルは、想定される様々な津波に対して高い確率で総被災者数を減少させる避難所と避難所への到達経路とを、避難者毎に求める。具体的には、ある特定の想定津波に対して、避難所の位置から順次、安全に避難するために避難開始が必要となる地震発生からの経過時間、すなわち猶予時間を計算していく。この与えられた猶予時間分布を避難開始地点から大きくなる方へ遡ることで、猶予時間を最大とする避難所と避難経路が設定できる。このとき求めた猶予時間分布上のすべての地点が避難開始地点となることから、短時間で地域全体の避難経路と避難所の設定が可能となる。この方法により、対象津波において、すべての避難者に対して実行地域全体の避難所および経路割り当てを行う。さらに、この操作を想定される複数の津波について実行し得られた割り当て群の中から、各想定津波の発生確率を考慮して、地域全体の被災者数の期待値を最小化する割り当てを求める。これを最適割り当てとし、この割り当ては、想定される様々な津波に対して高い確率で被災者数を減少させることを示した。

第 4 章では、モデル地形を用いてこの方法で選択される避難所等の特徴を分析した結果、最短経路選択に比べて開発モデルで常に猶予時間を多く確保できる避難所等が選択されることなどを示した。

第 5 章では、実在する 3 つの地域でこのモデルの適用性の検証と、このモデルによる割り当てで猶予時間が大きくなる地域の分析、最適割り当てを与える想定津波のもつ特徴などについて検討を行なった。従来の最短経路選択と比較した結果、最適割り当てにより、想定するほぼすべての津波に対して、被災者数を減少することを示した。また、浸水範囲のうち、周辺地域に比べて浸水開始時間が遅れるような地域や浸水範囲外となる場所が付近にある地域で特に効果が高くなることを示した。さらに、最適経路は、広範囲に浸水を及ぼす津波シナリオで得られることを示した。以上の結果から、どのような地域でもシナリオ数を限定して最適割り当てを算出でき、その最適割り当てを採用することで多くの津波に対して被災者数を減少できる可能性があることを示唆した。

第 6 章では、この研究の結論を述べるとともに、このモデルを河川洪水に適用できることや、経路をあらかじめ割り当てられることで地震対策を行うべき経路を選定できることなど、モデルの有用性を示した。

目次

| | |
|--|----------|
| 目次 | i |
| 図目次 | iv |
| 表目次 | vi |
| 用語の定義 | vii |
| 第 1 章 序論 | 1 |
| 1.1 本研究の位置づけ | 1 |
| 1.2 本研究の目的 | 2 |
| 1.3 本論文の構成 | 2 |
| 第 2 章 避難の実態に関する資料分析および津波避難に関する既往研究の整理 | 4 |
| 2.1 避難行動の実態 | 4 |
| 2.1.1 避難行動の実態に関する文献調査 | 4 |
| 2.1.2 避難行動の実態に対する考察 | 7 |
| 2.2 津波避難に関する行政の対応 | 9 |
| 2.2.1 各種基準の整理 | 9 |
| 2.2.2 津波避難に関する行政の基準に関する考察 | 10 |
| 2.3 数値実験での計算モデルの整理 | 11 |
| 2.3.1 津波避難シミュレーション | 11 |
| a) 群衆流動モデル | 12 |
| b) 個別要素法および磁気モデル | 12 |
| c) ペトリネット法 | 12 |
| d) ポテンシャル法 | 13 |
| e) セルオートマトン | 13 |
| f) マルチエージェントモデル | 13 |
| 2.3.2 オペレーションズリサーチ | 14 |
| 2.3.3 避難シミュレーション・割り当て問題に関する考察 | 16 |
| 2.4 経路選択・経路探索に関する数値計算モデルの整理 | 17 |
| 2.4.1 経路選択モデル | 17 |
| 2.4.2 経路探索モデル | 17 |
| 2.4.3 経路選択モデル・経路探索モデルに関する考察 | 18 |
| 2.5 避難行動の実態、行政の基準および既往研究に関するまとめ | 19 |

| | |
|--|----|
| 第 3 章 津波浸水を避ける避難所および避難経路の割り当てモデル K19 の開発 | 20 |
| 3.1 経路設定と避難困難地域の算出 | 20 |
| 3.1.1 ダイクストラ法 | 21 |
| 3.1.2 提案手法の概要 | 23 |
| 3.1.3 避難経路の設定 | 23 |
| 3.1.4 避難困難地域の算出 | 26 |
| 3.2 複数の避難所での避難所割り当てと被災想定 | 27 |
| 3.2.1 避難所割り当て手法 | 27 |
| 3.2.2 被災想定手法 | 27 |
| 3.3 複数の津波シナリオによる最適化 | 29 |
| 3.4 計算モデル K19 に関するまとめ | 31 |
| 第 4 章 K19 による割り当て避難所および経路の分析 | 32 |
| 4.1 他の計算モデルとの比較 | 32 |
| 4.2 K19 によって得られる避難所と避難経路の特徴 | 33 |
| 4.2.1 最短割り当てとの比較 | 33 |
| 4.2.2 海岸線への津波到達時間や避難開始時間による影響 | 34 |
| 4.2.3 K19 で割り当てられる避難所 | 34 |
| (a) 計算条件設定 | 34 |
| (b) 計算結果および考察 | 37 |
| 4.2.4 K19 で割り当てられる避難経路 | 40 |
| 4.3 K19 により選択される避難所と経路の特徴に関するまとめ | 43 |
| 第 5 章 実在する地域への適用 | 44 |
| 5.1 対象地域の説明 | 44 |
| 5.2 津波シナリオ | 50 |
| 5.2.1 既往の断層モデル | 50 |
| 5.2.2 断層モデルの改変 | 51 |
| (a) 1707 年 宝永東海・南海地震 | 52 |
| (b) 1854 年 安政南海地震 | 53 |
| 5.2.3 設定津波シナリオに関するまとめ | 54 |
| 5.3 計算条件設定 | 55 |
| 5.3.1 浸水計算における計算条件設定 | 55 |
| 5.3.2 避難計算における計算条件設定 | 55 |

| | | |
|-------------------|------------------------|-----------|
| 5.4 | 計算結果 | 56 |
| 5.4.1 | 浸水計算 | 56 |
| 5.4.2 | 最適割り当て | 61 |
| 5.4.3 | 避難所の収容可能人数に関する分析 | 66 |
| 5.4.4 | 避難路の渋滞に関する分析 | 71 |
| 5.4.5 | 被災者数に関する分析 | 74 |
| 5.4.6 | 被災者数に関する分析避難困難地域に関する分析 | 81 |
| 5.4.7 | 割り当て避難所と避難経路に関する分析 | 87 |
| 5.5 | 実在する地域での適用性検討に関するまとめ | 96 |
| 第6章 まとめと展望 | | 99 |
| 6.1 | 本研究の成果 | 99 |
| 6.2 | 本研究の応用 | 101 |
| 6.2.1 | 河川洪水への適用 | 101 |
| 6.2.2 | ハード対策との融合 | 101 |
| a) | 防潮堤整備 | 101 |
| b) | 避難経路の地震対策 | 102 |
| 6.2.3 | エージェントモデルへの組み込み | 102 |
| 6.3 | このモデルの利点と欠点 | 103 |
| 6.4 | 効果的な避難のための提案 | 104 |
| 参考文献 | | 105 |
| 業績一覧 | | 115 |
| 謝辞 | | 116 |

目次

| | | |
|--------|--|----|
| 図 1-1 | 本論文の構成と各章の目的の概要 | 3 |
| 図 2-1 | 避難決断のきっかけと避難開始時間に関するアンケート結果(北海道南西沖地震津波) | 5 |
| 図 2-2 | 避難開始のきっかけと避難開始時間に関するアンケート結果(北海道十勝沖地震津波) | 6 |
| 図 2-3 | 避難開始までの行動と避難開始時間に関するアンケート結果(東北地方太平洋沖地震津波) | 7 |
| 図 3-1 | 津波浸水を迂回する経路概念 | 20 |
| 図 3-2 | ダイクストラ法の計算手順 | 22 |
| 図 3-3 | 最短経路と猶予最大経路の計算手順 | 25 |
| 図 3-4 | 避難困難地域の計算手順 | 26 |
| 図 3-5 | 複数の避難所が存在する場合の、(a)避難所の割り当てと、(b)DEZ 算出の概念図 | 28 |
| 図 3-6 | 複数の津波シナリオから最適経路を算出する際のフローチャート | 30 |
| 図 4-1 | 津波到達時間の違いによる経路選択の違い説明 | 34 |
| 図 4-2 | 選択避難所の分析におけるケース設定 | 36 |
| 図 4-3 | 選択避難所の分析における、(a)避難所の浸水開始時間と、(b) 各避難所へ避難する 場合の猶予時間 | 39 |
| 図 4-4 | 選択避難経路の分析 | 41 |
| 図 4-5 | 選択避難経路の分析 | 42 |
| 図 5-1 | 検討対象地域 | 45 |
| 図 5-2 | A 地域の標高と、道路、建物、避難所の位置 | 46 |
| 図 5-3 | B 地域の標高と、道路、建物、避難所の位置 | 47 |
| 図 5-4 | C 地域の標高と、道路、建物、避難所の位置 | 48 |
| 図 5-5 | 地震の規模と生起頻度の関係 | 57 |
| 図 5-6A | 津波シナリオごとの浸水面積および海岸線での平均津波到達時間(A 地域) | 58 |
| 図 5-7A | 各シナリオ津波の浸水範囲例(A 地域) | 58 |
| 図 5-6B | 津波シナリオごとの浸水面積および海岸線での平均津波到達時間(B 地域) | 59 |
| 図 5-7B | 各シナリオ津波の浸水範囲例(B 地域) | 59 |
| 図 5-6C | 津波シナリオごとの浸水面積および海岸線での平均津波到達時間(C 地域) | 60 |
| 図 5-7C | 各シナリオ津波の浸水範囲例(C 地域) | 60 |
| 図 5-8 | 各津波シナリオによる猶予最大割り当てする場合の避難開始時間ごとの期待被災者数 (A 地域) | 62 |
| 図 5-9A | 各津波シナリオで猶予最大割り当てする場合の期待被災者数(A 地域) | 63 |
| 図 5-9B | 各津波シナリオで猶予最大割り当てする場合の期待被災者数(B 地域) | 64 |
| 図 5-9C | 各津波シナリオで猶予最大割り当てする場合の期待被災者数(C 地域) | 65 |

| | | |
|---------|---------------------------------------|----|
| 図 5-10A | 収容可能人数を超える避難所と超過人数(A 地域) | 66 |
| 図 5-10C | 収容可能人数を超える避難所と超過人数(C 地域) | 68 |
| 図 5-11 | 収容可能人数を超える避難所と超過人数(C 地域) | 68 |
| 図 5-12 | 避難所番号 | 69 |
| 図 5-13 | 割り当ての補正に伴う期待被災者数の変化(C 地域) | 70 |
| 図 5-14A | 避難者のピーク時交通量(A 地域) | 72 |
| 図 5-15A | ピーク時交通量の多い道路の現況(A 地域) | 72 |
| 図 5-14C | 避難者のピーク時交通量(C 地域) | 73 |
| 図 5-15C | ピーク時交通量の多い道路の現況(C 地域) | 73 |
| 図 5-16A | 各津波シナリオ、割り当て方法の違いによる被災者数(A 地域) | 75 |
| 図 5-17A | 割り当て方法の違いによる期待被災者数の経時変化とその差(A 地域) | 75 |
| 図 5-16B | 各津波シナリオ、割り当て方法の違いによる被災者数(B 地域) | 77 |
| 図 5-17B | 割り当て方法の違いによる期待被災者数の経時変化とその差(B 地域) | 77 |
| 図 5-16C | 各津波シナリオ、割り当て方法の違いによる被災者数(C 地域) | 79 |
| 図 5-17C | 割り当て方法の違いによる期待被災者数の経時変化とその差(C 地域) | 80 |
| 図 5-18A | A 地域における各割り当てによる、猶予時間分布と避難困難地域、浸水開始時間 | 82 |
| 図 5-18B | B 地域における各割り当てによる、猶予時間分布と避難困難地域、浸水開始時間 | 84 |
| 図 5-18C | C 地域における各割り当てによる、猶予時間分布と避難困難地域、浸水開始時間 | 86 |
| 図 5-19A | 各割り当て方針における避難所割り当て(A 地域) | 88 |
| 図 5-20A | 各割り当て方針における避難所経路割り当て例(A 地域) | 89 |
| 図 5-19B | 各割り当て方針における避難所割り当て(B 地域) | 91 |
| 図 5-20B | 各割り当て方針における避難所経路割り当て例(B 地域) | 92 |
| 図 5-19C | 各割り当て方針における避難所割り当て(C 地域) | 94 |
| 図 5-20C | 各割り当て方針における避難所経路割り当て例(C 地域) | 95 |

表目次

| | | |
|--------|----------------------------------|----|
| 表 2-1 | シミュレーションモデルごとの地域および避難者、経路選択の取り扱い | 16 |
| 表 4-1 | ケース設定 | 36 |
| 表 5-1 | 検討対象地域の状況 | 49 |
| 表 5-2 | 宝永地震の断層パラメータリスト | 52 |
| 表 5-3 | 宝永地震改変モデルの断層パラメータ(M_w 8.8) | 52 |
| 表 5-4 | 安政南海地震の断層パラメータリスト | 53 |
| 表 5-5 | 宝永地震改変モデルの断層パラメータ(M_w 8.4) | 53 |
| 表 5-6 | 宝永地震改変モデルの断層パラメータ(M_w 8.6) | 53 |
| 表 5-7 | 宝永地震改変モデルの断層パラメータ(M_w 8.8) | 53 |
| 表 5-8 | 津波シナリオの状況 | 54 |
| 表 5-9 | 各割り当てにおける避難所の収容可能人数と割り当て人数 | 69 |
| 表 5-10 | 各避難者の各経路選択での猶予時間および割り当て状況 | 89 |
| 表 5-11 | 各避難者の各経路選択での猶予時間および割り当て状況 | 92 |
| 表 5-12 | 各避難者の各経路選択での猶予時間および割り当て状況 | 95 |

用語の定義

K19: 津波浸水の時空間的広がりを考慮して、津波遭遇しにくい避難所および避難経路を割り当て可能とする数値計算モデル.

猶予時間 (T_L): 避難途中で津波に遭遇しない条件で移動開始すべき、地震発生からの経過時間.

所要時間 (T_R): 避難所までの移動時間.

猶予最大経路: 避難途中で津波に遭遇しない条件で避難移動開始までの猶予時間が最大となる経路.

最短割り当て: 最短経路で最短となる避難所を割り当てる割り当て方法.

猶予最大割り当て: ある想定津波に対して、猶予時間を最大とする避難経路と避難所の割り当て方法.

期待被災者数: 複数の想定津波による被災者数の期待値. グーテンベルク・リヒター則による想定津波の生起頻度を加味した加重平均で算出される.

最適割り当て: 複数の想定津波に対し、期待被災者数を最小化できる避難所および避難経路の割り当て方法. 想定津波ごとの猶予最大割り当てから選ばれる.

T_D : 避難開始時間.

T_I : 浸水開始時間.

Δt : 隣接する領域への移動時間.

k : 避難場所から道路に沿って遠ざかる程度.

N_L : 十分大きい定数.

避難困難地域 (DEZ): 猶予時間が避難開始時間より小さい地域で、避難途中津波に遭遇してしまう地域.

P_i : 想定津波 (i) による猶予最大割り当て.

C_{jP_i} : 想定津波 (i) による割り当てでの、想定津波 (j) 来襲時の被災者数.

C_{P_i} : 想定津波 (i) での割り当てによる期待被災者数.

P^* : 期待被災者数を最小化する割り当て. 最適割り当て.

f_j : 想定津波 (j) を引き起こす地震の生起頻度.

遡上速度: 陸域での津波フロントの伝搬速度.

S_t : シナリオ津波.

第 1 章 序論

1.1 本研究の位置づけ

津波の人的被害の特徴は、無傷か死という言葉で表現できるとされる(小井戸ら, 2011 [1], 阿部ら, 2012 [2]). すなわち, 津波に遭遇すると助からないことを示しており, 津波に遭遇しないよう対策をとることの重要性を示す. この津波に遭遇しないための対策として, 防潮堤等の整備による対策であるハード対策と, 防災教育やハザードマップ整備などによる非構造物対策であるソフト対策が行政主導のもと行われている.

ハード対策の一つである防潮堤整備は, 津波の浸入を物理的に防ぐ, または遅らせることができ, 津波被害軽減に有効である. 防潮堤の減災効果については渡辺ら(2015) [3]や星野ら(2016) [4]など, 多くの研究者によって論じられてきている. しかし, このようなハード対策の持つ問題も理解しておく必要がある. ハード対策は以下に示す3つの問題を持っている. 第1に, ハード対策には時間がかかるということである. 近年, 発生が懸念されている南海トラフ地震津波に代表されるように, 一般に津波により影響を受ける海岸線の延長は長く, ハード対策に要する費用は莫大となる. 加えて, 施設整備には住民との合意も必要となる(藤間ら, 2013 [5]). 一方, 津波は, いつどこで, どの程度の規模のものが発生するか, その詳細を知ることはできない. これは, 仮に町が津波を意識し防潮堤を建設する計画を有していたとしても, その完成を待たずに津波が発生するかもしれないということである. 第2に, ハード対策は, 災害時には効果を発揮するかもしれないが, 通常時は生活の妨げになる可能性があるということである. すなわち, 海の景観により観光業が栄えている街では, 防潮堤ができることによって, 観光業の衰退を生むかもしれない. 山崎ら(2016) [6]や安田ら(2018) [7]は海岸堤防のかさ上げ費用とそれによる減災の便益で費用便益分析を行い, ソフト対策で避難成功率を上げることの重要性を説明している. 最後に, 完成する防潮堤はどんな津波も防ぐというものではないということである. 日本政府は数十年から百数十年に1回程度発生する津波に耐えうるハード対策を行うとの方針で防潮堤の建設を進めている. すなわち, 再現期間を超える津波は防ぐことができない. ハード対策には限界があるということである. 以上のことから, 津波対策をハード対策に限定して行うことは適切ではない.

いついかなる津波が発生した場合にも被災者数を最小化する. そのためには, 適切に避難することが重要である. 適切な避難とは, 現状の避難場所や道路を有効に活用し, 津波に遭遇する前に避難開始することである. 住民に迅速な避難を行わせるためには, 災害に対する適切な知識を持つことが重要である. このような防災教育の重要性を指摘する研究がある(例えば片田ら, 2005 [8]). また, 情報伝達の重要性を指摘する研究もある(例えば牛山ら, 2004 [9]). これらはいずれも, 迅速な避難を促すために, 津波避難の重要性や, いち早く正確な津波情報を避難者に伝えることの重要性を示すものである. しかし, 津波に遭遇しないように避難するために重要なのはこれだけではない. どこの避難所にどの経路を通過して避難するかということもまた重要となる. 最初に述べたように, 津波避難においては, 津波に遭遇しないことが重要なのである. 津波に遭遇しにくい経路選択ができれば, 被災者数を減少できよう. 住民にこのように適切な避難経路選択を促すためには, 行政は, 適切な避難計画をあらかじめ策定する必要

がある。この避難計画の中で、行政が各住民に対して適切な避難所や避難経路を示せば、住民は避難訓練等で避難所等に慣れておくことができる。住民はあらかじめ示される避難所等に慣れておけば、地震発生後、決まった避難所に迅速に避難可能となる。津波の浸水特性を考慮して、津波に遭遇しないように避難経路や避難所を選択することの重要性は、避難所や避難経路の選択に関する既往研究でも述べられている(例えば坂田ら, 2018 [10], 高橋ら, 1989 [11])。しかし、既往研究に、想定される多様な津波に対して、浸水に遭遇しないような経路や避難所を、発災前に定めておくというような研究は見られない。これは、我々が次に発生する津波を正確に予測できないことに関係する。既往研究にある津波浸水を迂回するような方法では、想定する津波や避難開始時間に依存し、その時の状況に応じた避難経路や避難所が算出される。すなわち、津波の浸水特性や避難開始時間によって選択される避難所や避難経路が変わってしまうのである。このことは避難者に混乱をきたす。このようなモデルの課題については第2章で詳細に説明する。

1.2 本研究の目的

この研究の目的は、想定される多くの津波に対し、津波避難中の津波遭遇者を最小化するために、津波浸水に遭遇しにくい避難所や避難経路をあらかじめ割り当てるためのモデルを開発することである。加えて、同モデルの有効性を提示することである。この研究の新規性は、津波遭遇までに最も時間的猶予を与える避難経路等を選択する点と、想定される多くの津波に対して有効な、一意の避難経路等を、災害発生前に割り当てる方法を示している点にある。

1.3 本論文の構成

この論文では、1.2 で示した目的を達成するために、6つの章で構成される検討を行う。

第1章では、この研究の背景と目的を述べた。

第2章では、津波浸水を避ける経路選択の重要性を示すため、近年発生している地震津波に関する避難行動の実態について文献調査を行う。次に、行政による避難所や避難路設定の際に留意すべき内容について、行政の持つ基準等を整理し、被災者軽減のために必要となると考えられる事項をまとめる。次に、津波浸水を避ける経路を算出するための数値計算モデルを構築するため、既往の避難モデルの分析を行う。加えて、既往モデルで採用されている避難経路や避難所の選択方法について分析する。

第3章では、津波浸水の時空間的広がりを考慮して、津波遭遇しにくい避難所および避難経路を割り当て可能とする数値計算モデル(以降、「K19」という)の構築を行う。

第4章では、K19により算出される避難経路や避難所がどのように優れているのか検討するため、他のモデルによる算出避難所や避難経路の特徴の比較と、K19を適用して得られる避難所や避難経路の分析を行う。

第5章では、K19を実地域に適用し、複数の津波を考慮したうえで、最適となる経路と避難

第1章 序章

所を割り当てる方法（以下、「最適割り当て」という。）で、最短経路となる避難所を割り当てる方法（以下、「最短割り当て」という。）と比較してどの程度被災者数を減少できるかを含む、次の6つの検討を行う。1. このモデルを他の地域に適用する際に、計算対象とする津波シナリオ数を減らすことを目的に、最適割り当てがどのような特性の津波シナリオによって与えられるかを検討する。2. 避難所の収容可能人数に見合った割り当てを可能とすることを目的に、計算された避難者数と収容可能人数との比較および超過した場合の修正方法を示す。3. 設定された避難速度で避難が可能であることを確認することを目的に、避難中の渋滞が発生しないかの確認を行う。4. 最適割り当ての効果を示すことを目的に、最適割り当てと最短割り当ての場合の被災者数を比較する。5. 最適割り当ての特徴を示すことを目的に、最適経路と最短経路での猶予時間の分布と避難困難地域となるエリアについて分析を行う。6. 最適割り当ての特徴を示すことを目的に、避難所と避難経路の割り当てが最短割り当てと比べてどのように異なるか示す。

第6章では、この論文全体を通した結論とこのモデルの応用について述べる。

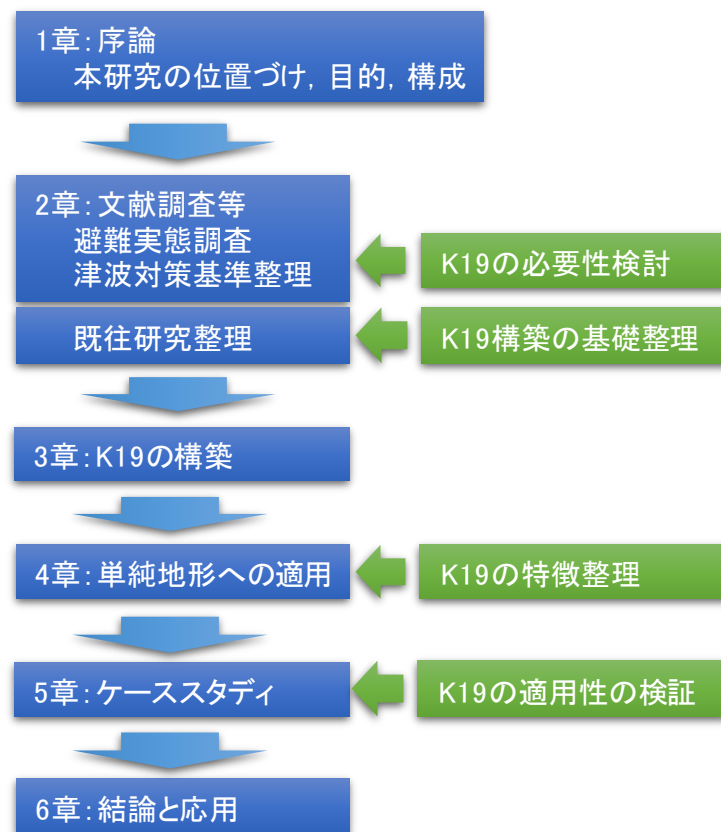


図 1-1 本論文の構成と各章の目的の概要

第2章 避難の実態に関する資料分析および津波避難に関する既往研究の整理

この章では、津波浸水を避ける経路選択の重要性を示すため、近年発生している地震津波に関する避難行動の実態について文献調査を行う。次に、行政の持つ基準等を整理し、被災者軽減のために必要となると考えられる事項をまとめる。最後に、津波浸水を避ける経路を算出するための数値計算モデルを構築するため、既往の避難モデルの分析を行う。加えて、既往モデルで採用されている避難経路や避難所の選択方法について分析する。

2.1 避難行動の実態

近年発生している地震津波に対しては、浸水状況等かなり細かく調査が行われており、避難者の避難行動についても同様である。ここでは、近年発生した、「1993年、北海道南西沖地震津波」、「2003年、十勝沖地震津波」、「2011年、東北地方太平洋沖地震」について、津波避難の実態についてまとめ、被災者軽減の方策として重要となることを検討する。

2.1.1 避難行動の実態に関する文献調査

（北海道南西沖地震）

1993年7月12日、22時17分に北海道南西沖で、M7.8の規模で発生した地震である。震源域が奥尻島や渡島半島西岸に近いことから、地震発生5分程度で津波が来襲し、津波高さとして、奥尻島で最大約30m、渡島半島西岸でも最大8m程度に達したとされる(地震本部 [12])。人的被害は死者・行方不明者230名、負傷者323名とされる(地震本部 [12])。この津波での避難行動は、1993年北海道南西沖地震における住民の対応と災害情報の伝達 [13]にアンケート調査結果がまとめられている。同調査によると、被害が最も大きい青苗地区では、波高10mを記録している。図2-1にアンケート調査による避難決断のきっかけと、避難開始時間をまとめる。奥尻島では住民の77.9%が津波の来る前に避難を開始している。しかし津波は地震発生から5分後に到達したため、逃げ遅れた住民が犠牲となった。同調査によると、犠牲者の出た家は高台からの距離とはほとんど関係がないことから、避難行動の迅速性が生死を分けたということである。

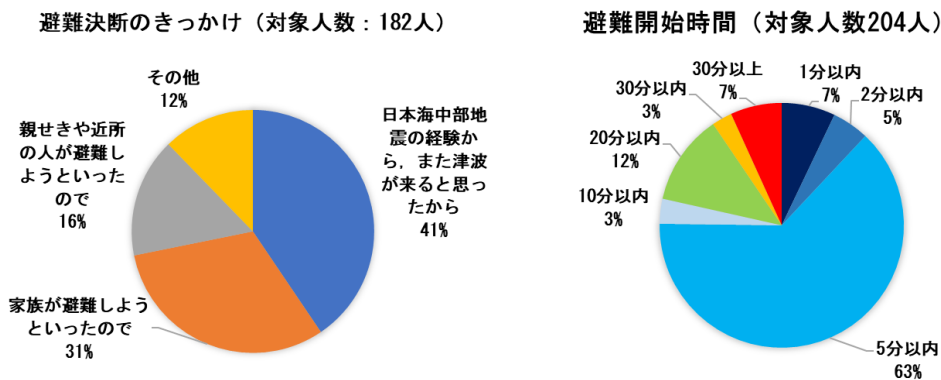


図 2-1 避難決断のきっかけと避難開始時間に関するアンケート結果(北海道南西沖地震津波): 1993 年北海道南西沖地震における住民の対応と災害情報の伝達 [13]を基に作成.

奥尻島では、地震発生から 5 分程度で津波が来襲したことから、警報は間に合わなかった。それでも地震発生 5 分以内に約 75%の者が避難開始している。このように、迅速に避難開始できた者が多かったのは、奥尻島の住民には 1983 年日本海中部沖地震の経験があり、これが教訓となっている。避難決断のきっかけとして、約 4 割の者が日本海中部地震の経験を上げている。ただ、日本海中部沖地震の経験は、津波が来るという観点で避難促進した一方で、到来時間にはもう少し余裕があったと考える人もいた。

中村 [14]は、著書の中で同調査結果をもとに被災事例を 4 つのパターン分けしている。第 1 はそもそも避難しなかった人である。そこには高齢や身体の障害で避難できなかった人、津波を予想しなかったので避難しなかった人などが含まれる。第 2 は避難しようとしたがいろいろの理由から避難が遅れた人である。そこには津波は予想したが、あまりにも早くきたので避難が遅れた人、すでに床についていた人、避難の支度に時間がかかった人、物を探していて逃げ遅れた人、飲酒をしていた人、家族や近所の人を助けようとして避難が遅れた人などがいた。第 3 に歩いて避難したり、遅れて車で避難したりした人がある。そこには、津波のスピードを知らなかった人、車に荷物を積み込もうとした人がある。第 4 にはいったん避難したのに再び戻って被害にあった人がある。そこには高台に近く、10 年前は被害が大きくなかったため、自宅まで津波は来ないだろうと思った人、車を出しに戻った人、犬を放しに戻った人、財布を取りに行った人、船をあげに行った人などがいた。

(北海道十勝沖地震)

2003 年北海道十勝沖地震は、2003 年 9 月 26 日午前 4 時 50 分に十勝沖で、M8.0 で発生した地震である。この地震により、遡上高で最高 4m 程度の津波が発生し(地震本部 [15])、早いところでは地震発生後 16 分程度で海岸に到達している。人的被害は、地震を含めて、行方不明者 2 名、負傷者 849 名発生している(内閣府 [16])。この津波での避難行動は、廣井ら[17]によりアンケート調査結果がまとめられている。同調査によると、アンケート対象の 55.8%の住民が避難を実施したとのことである。図 2-2 にアンケート調査による避難開始のきっかけと、避難開始時間をまとめる。

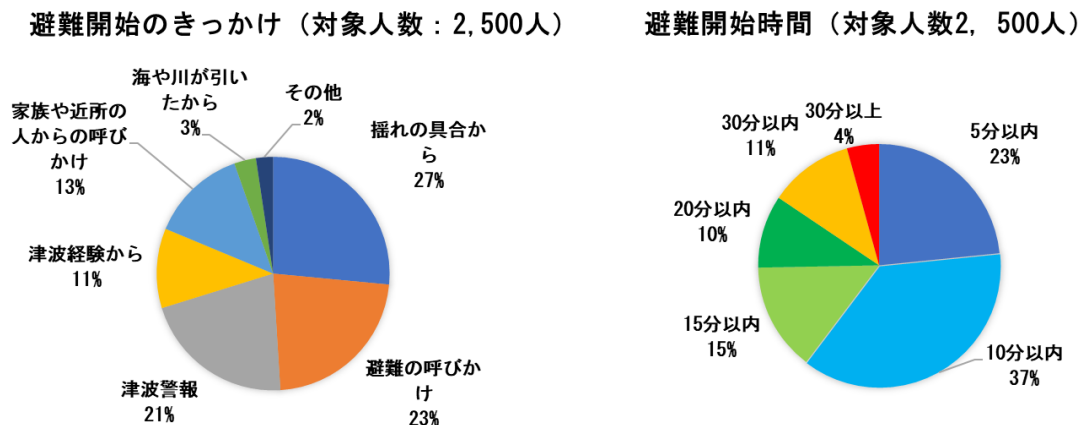


図 2-2 避難開始のきっかけと避難開始時間に関するアンケート結果(北海道十勝沖地震津波): 廣井ら[17]を基に作成。

避難のきっかけは、揺れの具合からが最も多く 27%となっている。次いで、避難の呼びかけや避難警報など、周囲からの情報提供によるものとなっている。このように、避難のきっかけの違いから、避難開始時間も、過半数が地震発生 10 分以内に避難開始する一方、20 分を超えてから避難開始している者も見受けられる。中村 [14]は、著書の中で同調査結果をもとに避難を次のように 4 つにパターン分けしている。第 1 は、地震すなわち津波と考えて、素早く避難した人である。彼らは避難を習慣化させている。避難先を決めており、持ち出し品もすでに準備している。これらの人たちは、持ち出し品を探したり、避難先を思案したりする必要がないために、いざというときに迅速な避難が可能となる。第 2 は、地震直後は津波を考えず、避難勧告や周りの人の行動など他に促される形で第 1 より少し遅れる形で避難した人である。第 3 は、以前は地震から津波が来るまで時間があったとして、沖出しなどをして、避難が遅くなった人である。過去の経験が避難を阻害する経験の逆機能の例である。第 4 に、自宅は大丈夫だと避難しない確信的な非避難者がいる。その理由は立地に対する認識と過去の災害経験にある。今住んでいる場所が過去に津波災害を受けていない場合、今回も津波による被害はないだろうと考え、避難しない。これも経験の逆機能といえる。

以上のように、津波は地震が起こってからかなり時間がたった後に来襲するという固定観念や、津波の前には前回の津波の際に自分の家は大丈夫であったなどの過去の経験が避難遅れや避難しないことを選択する要因となっている。このほかにも、安否確認の電話が避難遅れの原因となっている。

(東北地方太平洋沖地震)

東北地方太平洋沖地震は、2011 年 3 月 11 日午後 14 時 46 分に、M9.0 で発生した地震である(気象庁 [18])。土木学会の調査によると、この地震により発生した津波は岩手県宮古市において遡上高 38.9m を観測している。津波到達時間は、岩手県大船渡市で、地震発生 32 分後に津波が到達している。この地震による人的被害は、死者 15,897 名、行方不明者 2,532 名となっている(平成 23 年

(2011 年)東北地方太平洋沖地震の警察措置と被害状況(令和元年 6 月 10 日, 警察庁緊急災害警備本部)[19]。また, 死者のうち約 9 割が溺死ということである(警察庁 [20])。気象庁による津波警報は, 地震発生 3 分後に発令されたものは岩手県で 3m 程度であった。それが, 地震発生 28 分後には 6m, 一部地域では既に津波が到達した後の, 地震発生 47 分後には 10m と修正されていった(耐津波学 [21])。この津波による避難状況は, 国土交通省が行ったアンケート調査にまとめられている(津波避難を想定した避難路, 避難施設の配置及び避難誘導について(第 3 版) [22])。

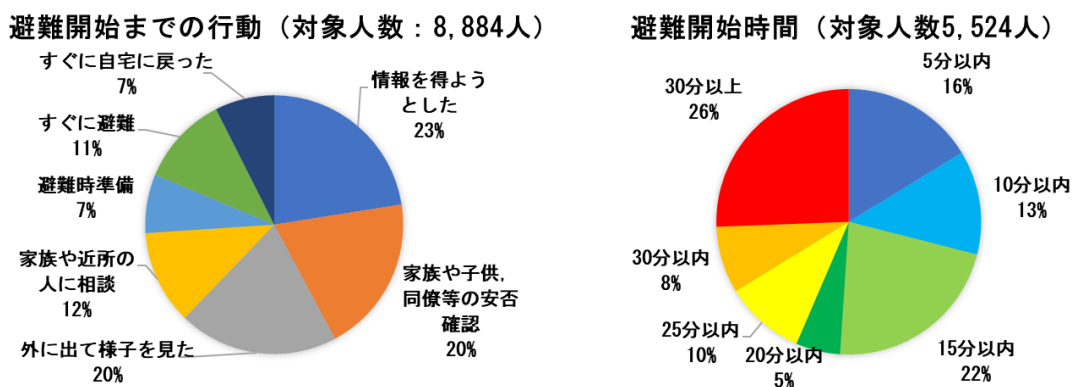


図 2-3 避難開始までの行動と避難開始時間に関するアンケート結果(東北地方太平洋沖地震津波):津波避難を想定した避難路, 避難施設の配置及び避難誘導について(第 3 版) [22]を基に作成。

同調査によると, 過半数の避難者が地震発生 15 分以内に避難開始している一方で, 26%の者が 30 分以上に避難開始している。避難開始までの行動を見ると, 情報を得ようとした人や, 家族等の安否確認を行っていた者, 外の様子を見ていた者で過半数を占め, すぐに避難した者はわずか 11%であった。

2.1.2 避難行動の実態に対する考察

前節 2.1 でまとめた避難行動の実態を踏まえると, 知識不足による避難が遅れた者や, 避難未実施者に対しては, 津波避難に関する教育を行い, 危機意識を持たせることが重要となろう。しかし, 地震発生直後に来襲するような津波が, 就寝中や, 入浴中など, 迅速な避難が困難な状況で発生することも考えられる。次に, 周囲からの情報を待っている者に対しては, 迅速な情報提供が有効かもしれない。しかし, 地震による停電など, 確実に情報を提供できる保証はない。迅速に避難するという観点からは, 従来から「津波てんでんこ」すなわち, 津波が発生したら各自バラバラに逃げるという方策が有効となろう。しかし, 北海道十勝沖地震の状況からうかがえるように, 津波てんでんこの考えに従い, 各自ばらばらに逃げるということは, 高齢者や子供を持つ世帯からしたら難しいといえよう。これは東北地方太平洋沖地震でも 20%の者が避難開始までに家族などの安否確認を行っていることからもうかがえる。以上のことから, 防

第2章 津波避難に関する既往研究および避難の実態に関する資料分析

災教育や、迅速な情報伝達網の整備により、少しでも迅速な避難を促すということは重要であろう。しかし、それだけでは対策は十分ではなく、津波遭遇までの時間を遅らせる対策が必要となろう。これは、津波の浸入を遅らせる防潮堤などの整備や、近い場所への避難タワーの整備などが考えられよう。しかし、これらのハード対策は財源を伴い、例えば南海トラフ沿いの太平洋岸の地域に一体的に整備するには長い期間を要するだろう。従って、少しでも津波遭遇までの時間を稼げる方向への避難、すなわち、津波浸水を迂回するような避難所や経路選択が重要となると考えられる。

2.2 津波避難に関する行政の対応

この節では、現在行政が津波対策として行うべき対策の指針等のうち、避難所や避難路の配置や選択に関するものをまとめ、行政や住民が効果的に避難を行う上で必要な方策を検討する。

2.2.1 各種基準の整理

（津波避難対策推進マニュアル検討会報告書（消防庁） [23]）

同報告書は東日本大震災を契機に、消防庁によりまとめられている。同報告書によると、避難路、避難経路の指定については、「市町村長は、避難路が備える必要のある安全性や機能性が確保されている道路を避難路として指定」、「住民等は、安全性の高い避難経路を設定」する旨記載されている。ここで、同報告の定義として、避難路とは「避難する場合の道路で、市町村が指定に努める」もので、避難経路とは「避難する場合の経路で、自主防災組織、住民等が設定する」ものとされている。すなわち、行政と自主防災組織、住民等が安全性の高い道路を知っておく必要があるということである。この安全な避難経路としては、必ずしも市町村が指定した緊急避難場所への最短経路ではなく、避難対象地域の外に最も安全かつ早く避難できる避難目標地点への最短経路を避難することが重要である旨示されている。また、安全性の高い経路を定めるための留意事項として、(1)避難路、避難経路の幅員はできる限り広く、かつ迂回路等が確保されていること。(2)海岸沿いや河川沿いの道路を指定・設定することはできる限り避けること。(3)津波の進行方向と同方向へ避難する道路を指定・設定する(海岸方向に高台等がある場合であっても、できる限り海岸方向への避難は避けること。(4)気象条件により通行が困難になる避難路、避難経路はできる限り避けることが示されている。

（津波避難ビル等を活用した津波防災対策の推進について（技術的助言） [24]）

同助言は平成 29 年に内閣府によってまとめられている。この助言の中で避難所や避難経路については、建物の立地状況や道路の有無、人口動態等の地域の状況に応じて避難経路や避難場所を検討するなど、地域の状況に応じて設定することとされている。なお、この助言の前身である津波避難ビル等に係るガイドライン(内閣府)(平成 29 年廃止)では、避難所や避難経路の簡易な設定手法として、個々の津波避難ビル等について、当該施設の海側に避難可能距離を半径とする半円として描かれる避難対象地域を設定することとされていた。

（東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告 [25]）

同報告は中央防災会議によってまとめられている。この中で避難場所や避難路について、「海岸地形や湾の形状によって、想定される津波高、浸水深が大きく異なるため、これらを適切に考慮し、地域の実情を踏まえつつ、できるだけ短時間で、津波到達時間が短い地域では概ね 5 分程度で避難が可能となるよう、避難場所・津波避難ビル等や避難路・避難階段を整備すべきである。」旨示されている。避難場

所については、「できるだけ津波による浸水リスクがない場所に整備する必要があり、避難後においても孤立せず、津波の襲来状況によってはさらなる避難が可能となるよう選定することが望ましい。一方で、適切な避難場所がなく津波避難ビル等の建築物を避難場所を選定せざるを得ない場合には、最大クラスの津波の襲来を予測した上で、避難場所で被災することのないよう十分な高さを有する建築物を選定する必要がある。」旨示されている。また、避難路については、「住民等が徒歩で確実に高台等に避難できるように、避難路・避難階段の整備と併せてその安全性を点検するとともに、避難時間短縮のための工夫・改善に努めるべきである。また、避難路については、地震の揺れによる段差の発生、避難車両の増加、停電時の信号滅灯などによる交通渋滞や事故の発生等を十分考慮して整備する必要がある。」旨示されている。

（津波防災地域づくりの推進に関する基本的な指針 [26]）

同指針は国土交通省によって定められている。避難場所について「津波浸水想定や土地利用の現況等地域の状況に応じて、住民等の円滑かつ迅速な避難が確保されるよう、その配置、施設までの避難経路・避難手段等に留意して設定することが適当である。」旨示されている。

（防災基本計画（修正版） [27]）

防災基本計画は中央防災会議が作成するもので、東日本大震災を受けて平成24年9月に修正されている。この中で、避難場所については、「できるだけ短時間で避難が可能となる」ように確保することとされている。避難路については、「住民が徒歩で確実に安全な場所に避難できるよう、避難路・避難階段を整備し、その周知に努めるとともに、その安全性の点検及び避難時間短縮のための工夫・改善に努める」旨示されている。

2.2.2 津波避難に関する行政の基準に関する考察

2.2.1 では、避難経路や避難所に関して、行政や住民が求められる対応をまとめた。これらから、住民や行政はともに安全性の高い避難場所、避難路および避難経路を把握する必要があることが分かる。行政は、住民に対し適切な避難路や避難場所を設定することが望まれるが、全て住民に対し、全ての避難経路の可能性を検討して、個別に適切なものを設定することは不可能と言わざるを得ない。一方で、住民にとっても、得ることができる情報は津波ハザードマップによる浸水範囲、浸水開始時間、浸水深程度であるので、安全な避難経路や避難場所を自ら把握することは困難である。海岸に到達した津波は、一定の速度で陸上遡上するのではなく、地域特性に合わせて広がっていく。すなわち、海岸に到達した津波は次の瞬間に浸水域全域に浸水を及ぼすのではなく、地形の低いところから高いところへ、だんだんと浸水範囲を広げていくのである。このような津波の浸水特性を踏まえて、安全性の高い避難経路や避難所を設定することはハザードマップによる情報だけでは困難で、津波の浸水特性を考慮した上で安全性の高い経路や避難所を設定できるモデルの開発が望まれる。

2.3 数値実験に関する既往研究

この節では、津波浸水を避ける経路や避難所選択を可能とするために、主に災害発生時の避難者の避難行動を分析する事を目的に開発されている避難シミュレーションと、避難計画策定の際の適切な避難所割り当てや、避難者が従うべき避難方法の提示を目的に開発されているオペレーションズリサーチによる避難所等の割り当て最適化手法について整理する。

2.3.1 津波避難シミュレーション

避難シミュレーション手法について、安福(2015) [28], 持尾ら(2016) [29]は、避難者のモデル化に着目して2つに大別している。1つは避難者を流体に見立てて、ある空間範囲の人間の流入出量から、群衆としての避難者の流動を再現したものであり、群衆流動モデルが該当する。もう一つは、個々の人間の動きをモデル化し、人間同士の相互作用によって、避難者の動きを再現するものであり、個別要素法、地場モデル、ペトリネット法、ポテンシャル法、マルチエージェントモデル、セルオートマトン法などがある。また、地域のモデル化について、清野(1998) [30]は3つの分類に大別できるとしている。すなわち、空間をネットワークに抽象化したネットワーク型モデル、地域を格子状に分割したメッシュ型モデル、空間座標を用いる座標型モデルである。

この研究では、各モデルの特徴を整理しつつ、採用される避難経路や避難所の選択方法についてまとめていく。

a) 群衆流動モデル

群衆流動モデルは、地域に道路、交差点、避難場所、避難開始場所を与えることでモデル化し、避難開始場所から、道路を通して避難所に流入する流体として避難移動を扱うモデルである。群衆流動モデルは理想的な物理モデルを使用するため群衆の詳細な挙動を反映することはできないが、逆に計算時間が少ないメリットがある(持尾ら, 2016 [29])とされる。一方、追従避難などの個々の心理的要因に伴う人間行動の表現は困難(清野ら, 1998 [30])とされる。人間相互の関係により発生する渋滞は、渋滞係数等を用いることで間接的に考慮することができる。

次に、具体的このモデルによるシミュレーション事例を見ていく。藤田ら(1976) [31]は、このモデルを用いて、震災火災時の避難計画に従った避難状況を再現し評価している。その際、避難者の流動方向はあらかじめ与えられるものとしている。原(1978) [32]および原(1980) [33]は、大震火災からの群衆避難について、恐怖心を与える火災と、安堵感を与える避難路や避難場所、家財や子供への執着心といった心理作用を数値化した心理度関数を導入することで、避難者の心理を間接的に反映している。しかし原らも一大問題と指摘するように、この関数の与え方に統一の解は得られていない。原は避難方向について、恐怖心が減少する方向とし、火災からの恐怖心と、避難路や避難場所からの距離の差で与えられるとしている。仮に、恐怖心や安ど感といった関数が、火災や避難所等からの距離だけで決まるとす

れば、避難方向を決定する際に発生している火災から遠のきつつ、最寄りの避難所に向かうということになる。これを津波に置き換えるなら、津波が来襲する海から遠のきつつ、最短で到達できる避難所に避難するということになる。地域のモデル化は、藤田ら(1976)および原(1978) [32], 原(1980) [33]では交差点などをノードとするノードリンクモデルによるネットワーク型で行われている。

b) 個別要素法および磁気モデル

個別要素法は、避難者や障害物を要素としてとらえ、要素間の力の伝達をばねとダッシュポットの関係で解くことで、避難者の各時間における位置を決定する手法(清野ら, 1996 [34])である。この手法により、避難者同士の干渉しあいを表現できることから、道路形状のボトルネックや、渋滞といった事象を直接的に表現できる。磁気モデルは、正と負の2種類ある磁極のうち、同じ磁極が反発し、違う磁極が引き合う特徴を利用している。避難者と壁など障害物に正の磁極を、避難所に負の磁極を与えることで、避難所に向かって、避難者がひきつけられ、壁など障害や他の避難者からは反発する状況を表現可能とする。

清野(1998) [30]は、地下街からの避難に個別要素法を適用し、避難中の避難者同士のすれ違いや追い抜きといった行動が再現できることを示している。この際、避難者はそれぞれの位置から最短となる避難所に向かって避難することとしている。後藤ら(2004) [35]は、個別要素法を用いて、津波避難階段の踊場部分等の構造による避難効率を評価している。個別要素法では、対象領域に存在する障害物、避難所、時々刻々の避難者の位置を空間座標で表現する座標型モデルである。

岡崎ら(1979) [36]は、磁気モデルにより、歩行者の追い越しやすれ違いを表現している。しかし、著者自身が指摘する通り、追従避難など、誰かについて避難するといった行動は表現できない。岡崎らの検討では、単純な直線道路で対向車を避ける状況の再現しかおこなわれておらず、避難所の選択方法については触れられていない。避難所までの磁力によって引きつけられる力で移動するということは、すべての避難所に同じ磁力が与えられれば、最短経路で、最短避難所に向かうということになる。

c) ペトリネット法

ペトリネット法は、位置を示す「プレース」と、事象を示す「トランジョン」という2つのノードをノードの関係を示す「アーク」で結ぶことによって地域と住民行動の関係をモデル化する手法である。このペトリネット法は、例えば、災害時、高齢者等の要援護者が自宅に取り残されている場合に、支援者が迎えに行き、要援護者を連れて避難を行う状況を表現できる。主に災害時の避難行動について、事前学習を目的にモデルの開発が行われている(例えば二神ら, 2013 [37], 源ら, 2009 [38])。

具体的な適用事例についてみていく。二神ら(2013) [37]では、要援護者の被災時の個別計画の推進を目的として、要援護者と支援者の避難行動をシミュレートできるシナリオシミュレータを開発している。どの経路を通れば避難達成できるか、避難対象者の事前学習を目的としているため、避難経路等の選択は都度自信で設定することとなっている。源ら(2009) [38]でも、事前学習を念頭に、ペトリネットによる避難モデルの開発が行われている。この際、経

路選択は、経路閉塞等、障害を除いたうえでの最短経路で行うこととされている。このように、ペトリネット法では、地域および行動のモデル化をネットワークで行う。

d) ポテンシャル法

ポテンシャル法は、対象地域に存在する各要因の影響をポテンシャルの時間・空間分布として避難者ごとにモデル化し、得られたポテンシャル場から進行方向を決定する手法である(横山ら, 1995 [39])。ポテンシャル法では、対象地域を格子状に分割するメッシュ型の地域モデル化を行う。メッシュ状に分割された対象地域に、避難に影響を与える要因として、「物理的な要因」、「個人特性」、「災害要因」の3つのポテンシャル分布を重ね合わせて異なる個人特性を有する多数の人間の避難行動を扱うモデルである(岡本ら, 2007 [40])。目黒ら(2002) [41]によると、物理的な要因とは、対象空間の物理的な配置に基づくもので、障害物の位置や、出口の位置に該当する。個人特性とは、対象地域をよく知っているか否かによって決まるポテンシャルである。災害要因とは、災害の時間発展を表現するためのポテンシャルである。

具体的な適用事例として、横山ら(1995) [39]、目黒ら(2002) [41]、目黒ら(2007) [40]では、地下街からの避難状況を、ポテンシャルモデルでシミュレートしている。避難経路選択については最短距離を仮定するが、障害物が存在する場合は迂回することとされている。西野ら(2009) [42]では、火災場にポテンシャルモデルを適用している。

e) セルオートマトン

セルオートマトンは、歩行空間を格子状に分割し、各セルの状態を時間発展させることで群衆流動を創発させる方法である(大鑄ら, 2008 [43])。ここでセルの状態とは、歩行者の有無、障害の発生など、通行可否に関する情報などである。隣接格子の考え方により、上下左右の4方向に移動するノイマン近傍や、斜め方向を加えた計8方向のムーア近傍で移動を制御する。

具体的な適用事例として、地震火災発生時の避難完了人数等について、この方法を用いて検討されている(例えば、岡田ら, 1979 [44]、森脇ら, 1984 [45]や小坂ら, 1986 [46])。小坂ら(1986) [46]は避難速度について群衆密度と歩行速度の関係を与えること、隣接格子の収容可能人数を考えて移動を制御することで、混雑時の歩行を簡易的に再現している。選択避難場所については、火災延焼が広がらない安全地帯へ避難することとし、避難地点から最も近い安全地帯に向けて避難移動することとしている。ただし、火災の延焼シミュレーションを避難シミュレーションと同時に進行など、火災の延焼により予定経路が通れなくなる場合は、次に最短となる経路に迂回することとしている。これにより、火災により通れない経路を無視して火災に突っ込むという矛盾を克服している。セルオートマトンでは、地域のモデル化を、地域を格子状に分割するメッシュ型モデルで行っており、時々刻々障害が広がるような災害に対し、避難者の災害への遭遇を直接的に、表現できるモデルとなっている。

f) マルチエージェントモデル

マルチエージェントモデルは、人を粒子に見たてて、粒子間の相互関係を解いている。これにより、道路幅による渋滞の可能性等を評価できる。また、避難開始時間や移動速度など、各個人の特性を粒子ごとに設定できるという特徴を持つ。人を粒子に見立てて、粒子間の釣り合いを解くという意味では、個別要素法の一つととらえることができるが、各粒子に属性を与えることができる点、このマルチエージェントモデルの方が高い自由度を有するといえる。

次に、マルチエージェントモデルを具体的に適用した事例を見ていく。Wang et al. (2015) [47]は避難開始時間や移動手段の違いによる死亡率をエージェント型の避難モデルを用いることで検討している。Mas et al. (2012) [48]やMakinoshima et al. (2018) [49]はエージェント型のモデルを用いて、東日本大震災での避難状況を再現している。すなわち、シミュレーションで得られる避難者数と、実際の避難者数とがほぼ一致することなどを示している。Aguilar et al. (2015) [50]や藤田ら(2015) [51]では、人を居住者と非居住者さらには自動車を混在させて、避難時間等を分析している。Takabatake et al. (2017) [52]では、住民と訪問者を別に設定し、渋滞への影響等を分析している。加藤ら(2009) [53]は、このマルチエージェントモデルに、ポテンシャル法を組み込んだハイブリット型のモデルを構築している。宇野ら(2015) [54]は、このハイブリットモデルを用いて、防潮堤の規模による死亡率の変化を検討している。鈴木ら(2018) [55]は、海水浴客らの避難を分析している。経路選択に着目すると、避難場所までの最短経路による避難(牧野嶋ら(2018) [56])や、渋滞による遅延も加味した最速到達経路による避難(安藤ら(2016) [57])が行われている。他にも特殊な事例として、マルチエージェントモデルを用いて、リアルタイム避難経路探索を行う研究もあるが、詳細は2.3.4で後述する。

2.3.2 オペレーションズリサーチ

この項ではオペレーションズリサーチによる割り当て最適化手法について、避難経路や避難所割り当て方法の現状を把握することを目的に、これまで開発されている計算モデルについてまとめる。オペレーションズリサーチによる割り当て最適化は、避難所割り当てについて、全体の避難距離や避難完了時間などを目的関数として、それを最小化あるいは最大化させるために繰り返し計算を行って最適解を求める手法である。この方法により避難所割り当てを求める研究はこれまでもいくつかある。しかし、津波の浸水を考慮して割り当てるものはほとんどない。津波に関する避難場所の割り当てに関する多くの研究では、地域のモデル化をノードリンクモデルで行っている。地域全体の避難距離の最小化により割り当てを求めた野津田ら(2005) [58]や、避難完了時間の最小化による割り当てを求めた安藤ら(2016) [57]や笹ら(2015) [59]などがある。全体での避難が完了するまで、各時間ステップでの避難完了者を最大化させる割り当てとする滝沢ら(2012) [60]や、小林ら(2016) [61]などもある。竹内ら(2003) [62]は、避難所の収容可能人数を踏まえつつ、最短経路で到達できる避難所に避難する場合と、津波の浸入方向と逆に避難する場合とで検討を行い、収容可能人数を踏まえることの重要性を説明している。

しかしこれらの研究では割り当てに津波の浸水状況が直接的に考慮されていない。例えば「自治体が定める避難目標時間内に避難完了できるか」や「避難場所に津波が到達する時間に間に合うか」というように、間接的に考慮されているのみである。このように、割り当ての最適化問題において津波の浸水状況が直接的に考慮されない理由は、ノードリンクモデル、すなわちネットワークで地域のモデル化が行われるからである。ノードリンクモデルでは、津波の浸水状況を、経路の交差点等で設定されるノード部分でしかとらえることができない。よって津波遭遇を回避するような制御を行うにあたっては、同モデルは適さないと考えられる。

このような中、奥村ら(2017) [63]や Yuan et al. (2010) [64]では、津波の浸水状況を間接的に取り入れて最適割り当てを求める方法を開発している。具体的には、津波遭遇をリスクと見なし、避難者全体の津波遭遇リスクの最小化問題として定式化し、割り当てを求めている。ただし、このモデルのリスクは、リスクの低いルートが常に津波を迂回し、リスクの高いルートが津波に捕捉されることを意味するものではない。避難者の津波遭遇リスクは、避難開始から避難までの各通過点でのリスクの合計で表される。つまり、リスクは距離に応じて蓄積される。例えば、浸水域を横断して最短経路で避難所に向かう場合と、安全を考え大きく山側に迂回して避難所に向かう場合では、後者は迂回して遠回りする分、リスクが蓄積されて、リスクの高い経路と見なされてしまう可能性がある。

2.3.3 避難シミュレーション・割り当て問題に関する考察

2.3.1および2.3.2では避難シミュレーションと避難所割り当て手法について、モデル化手法や、選択される経路についてまとめてきた。その結果、避難シミュレーションは災害時の人の自然な動きを再現することに注力されている、いわば人の特性を表現できるモデルであることが分かる。一方、オペレーションズリサーチは、避難所の割り当て方法といった、人が従うべき指針を示すことに注力されて開発されている、いわば、避難所の位置と避難者の関係といった地域特性を表現できるモデルであることが分かる。

この研究の目的である津波浸水を避ける避難所および経路選択を実現するために、既往モデルの対象地域や避難者等のモデル化手法、経路選択方法をまとめる。表 2-1 に示す通り、津波避難シミュレーションでは、多くが最短経路や、渋滞を加味した最速到達経路、災害による閉塞を踏まえたうえでの最短経路が採用されている。すなわち、いち早く避難所に到達することを念頭に避難経路や避難所が設定されている。津波に遭遇しない経路を求めるためには、災害の時間的広がりを詳細にとらえる必要がある。この場合、地域のモデル化に関し、ネットワーク型のモデルでは、災害による経路閉塞個所にうまくノードがセットされていれば、閉塞を計算にうまく取り入れることができようが、津波のように閉塞個所が面的に広がるような場合は、地域全体にまんべんなくノードを設定する必要が出てくる。よって、メッシュ型のモデルを採用することで、各メッシュの状態変化として面的に広がる津波をとらえることができよう。このことから、この研究では、地域をメッシュ状に分割するセルオートマトン法をベースに、モデルの開発を行うこととする。

表 2-1 シミュレーションモデルごとの地域および避難者、経路選択の取り扱い

| 計算モデル | 地域のモデル化 | 避難者のモデル化 | 経路・避難所選択方法 |
|--------------------|---------|----------|---|
| 群衆流動モデル | ネットワーク型 | 流体 | 災害からの距離と避難所からの距離の差で定義される恐怖心が減少する方向 |
| 個別要素法 | 座標型 | 粒子 | 最短経路 |
| ペトリネット法 | ネットワーク型 | 粒子 | 災害による閉塞個所を除いたうえで最短経路 |
| ポテンシャル法 | メッシュ型 | 粒子 | 災害による閉塞個所を除いたうえで最短経路 |
| セルオートマトン | メッシュ型 | セルに人数を付与 | 災害による閉塞個所を除いたうえで最短経路 |
| マルチエージェント | 座標型 | 粒子 | 災害による閉塞個所を除いたうえで最短経路、最短経路、最速到達経路 |
| オペレーションズリサーチによる最適化 | ネットワーク型 | — | 地域全体の避難距離最小化 地域全体の避難時間最小化 地域全体のリスク最小化 津波来襲方向に向かわない |

2.4 経路選択・経路探索に関する数値計算モデルの整理

この項では、本研究の意義を示すため、経路選択や経路探索に関する数値計算の研究をまとめる。

2.4.1 経路選択モデル

この項では、避難者の避難時の経路選択傾向をモデル化する既往研究をまとめる。今村ら(2001) [65]では、住民の避難行動再現を目的に、経路選択モデルの開発を行っている。具体的には対象地域をネットワークでとらえ、避難者は標高の高いところを目指しつつ、交通密度の高いリンクは避けることとしている。これにより、実際の津波避難時のアンケート調査結果と同じ経路を選択させることができた結論付けている。また鈴木ら(2005) [66]では、これを発展させる形で、橋や川、標識の存在、主要道路の情報を与えることで、アンケート調査と80%以上の者の避難状況を再現できることを示した。このような住民の避難行動を再現するための経路選択モデルは、津波以外の災害に対しても行われている(例えば塚口ら, 2008 [67])。これらのモデルは、経路選択に影響を与えるパラメータをアンケート調査で把握し、経路選択指標に導入することを実現している。山田ら(2015) [68]では、避難者の避難ビルの選択について、選択行動に影響を与えるパラメータについて、アンケートを行うことで推定している。すなわち、避難行動に与える影響するパラメータは、「避難方向」、「移動距離」、「海から津波避難ビルまでの距離」、「階数」、「収容人数」であることを明らかにしている。加えて、避難行動に影響を与える要因は、年代によって異なり、10代から20代は「移動距離」が大きく影響し、60代から70代は「海から避難先までの距離」が大きく影響していることを明らかにしている。

2.4.2 経路探索モデル

この項では、既往研究のうち、津波に遭遇しない経路選択を行うものについてまとめる。災害による避難経路閉塞をリアルタイムに探索して災害に合わないよう経路選択を行う、いわゆるリアルタイム経路探索に着目した研究はいくつか存在する。持尾ら(2016) [29]は火災について、高橋ら(1989) [11]や井上ら(2017) [69]は洪水について、坂田ら(2018) [10]は津波について、災害による経路閉塞を考慮したリアルタイム最短経路予測を行っている。求まる経路は、閉塞箇所を除いたうえでの最短経路である。この経路探索を高速化した方法として、自然界のアリの採餌行動をモデル化したアントコロニー最適化法も開発されている(Forcael et al., 2014 [70], 後藤ら, 2015 [71])。

2.4.3 経路選択モデル・経路探索モデルに関する考察

経路選択モデルでは、不明な人の経路選択傾向をアンケート調査により把握し、パラメータを設定していることが分かった。経路探索モデルは不明な災害の広がりリアルタイムに予測して経路設定していることが分かった。経路探索モデルでリアルタイムで経路を決定する理由は、洪水や火災、津波といった災害は、時間経過に伴い、その範囲が広がり、閉塞箇所が変化していくためであり、災害の発生状況や規模によって変化するためである。このリアルタイム経路探索の実用化には以下のような3つの問題を解決する必要がある。1つ目は、情報の把握と提供に関する問題である。このような、リアルタイムで経路を探索するには、道路の閉塞箇所を正確に把握する必要がある。加えて、避難者に正確に情報を伝達する必要がある。しかし、災害時に正確な情報を、迅速かつ確実に得つつ、伝達できるかは不明である。総務省のまとめ [72]では、2011年3月11日に発生した東日本大震災では回線の断絶や停電等により情報通信機器が使用できなくなっている。加えて、被災を免れた設備等に通信が集中し、設備の能力を超えたことによる通信障害が発生している。これらの調査結果は、災害時にすべての住民に対して、個々に応じた情報を安定して伝えるということが困難であるということを示している。情報伝達に時間を要すれば避難者は避難を待つ必要が出てくる。情報伝達がうまくいかなければ、避難者は避難開始ができないということになる。

2つ目は、避難者に混乱を引き起こさせる可能性があることである。リアルタイム経路探索システムでは、災害の規模や避難開始時間によって選択すべき経路が変わる。これが災害や避難開始時間に応じた経路を算出できるリアルタイム経路探索のメリットであると考えられる。その一方で、避難者は自身が選択すべき避難経路を事前に知ることができないという問題がある。災害発生前の段階で災害や避難開始時間を特定できないためである。避難者は突然、予期せず新たな避難経路を示され混乱するかもしれない。避難は災害の発生により、突如として対応を迫られる。あらかじめ避難場所や避難経路を決め、避難訓練で十分慣れておくことで、スムーズな避難が可能となると考えられる。

3つ目は、十分な避難時間を確保できる経路が示されないということである。リアルタイム経路探索では、まず地震発生の直後に津波の到達時間を予測する。そこから、避難途中での津波遭遇が予測される経路を除いて、最短となるものを求めている。浸水範囲は時間的に広がっていくため、避難開始時間が異なれば、算出される経路が異なる。すなわち、災害発生5分後に避難開始することとして算出された避難経路は、10分後には使えないということである。加えて、避難途中にも仮に避難が遅れてしまうような場合には、災害に遭遇してしまうことも考えられる。この場合、避難開始時時点から最も避難時間に余裕がある経路を選択していれば助かる可能性がある。

これらの問題を解決するためにはあらかじめ経路が一意に定まる必要があるが、現時点でこれを可能とするモデルは開発されていない。

2.5 避難行動の実態、行政の基準および既往研究に関するまとめ

この章では、津波浸水を避ける経路選択の重要性を示すため、近年発生している地震津波に関する避難行動の実態について文献調査を行った。その結果、防災教育や、迅速な情報伝達網の整備により、少しでも迅速な避難を促すということは重要であるが、それだけでは対策は十分ではなく、津波遭遇までの時間を遅らせる対策が必要であることが示唆された。この方策として、津波の浸入を遅らせる防潮堤などの整備や、近い場所への避難タワーの整備などが考えられる。しかし、これらのハード対策は財源を伴い、例えば南海トラフ沿いの太平洋岸の地域に一体的に整備するには長い期間を要する。従って、少しでも津波遭遇までの時間を稼げる方向への避難、すなわち、津波浸水を迂回するような避難所や経路選択が重要となることが示唆された。

次に、行政による避難所や避難経路の設定に関する基準を分析し、被災者軽減のために必要となると考えられる事項を検討した。その結果、住民や行政はともに安全性の高い避難場所、避難路および避難経路を把握の必要があることが分かった。しかし、津波の浸水特性を踏まえて、安全性の高い避難経路や避難所を設定することはハザードマップによる情報だけでは困難で、安全性の高い経路や避難所を設定できるモデルや、複数ある避難所や経路の安全性を比較できる指標の開発が望まれることが示唆された。

次に、津波浸水を避ける経路を算出するための数値計算モデルを構築するため、既往の避難モデルの分析を行った。その結果、避難シミュレーションは災害時の人の自然な動きを再現することに注力されている、いわば人の特性を表現できるモデルであることが分かった。一方、オペレーションズリサーチでは、避難所の割り当て方法といった、人が従うべき指針を示すことに注力され、人的被害を最小化するために開発されている、いわば、避難所の位置と避難者の関係といった地域特性を表現できるモデルであることが分かった。このような数値計算では、多くが最短経路や渋滞を加味した最速到達経路、災害による閉塞を踏まえたうえでの最短経路が採用されていることが分かった。各モデルの検討から、津波に遭遇しない経路を求めるために、地域をメッシュ型に細分するセルオートマトン法をベースに行うこととした。これは、津波浸水に遭遇しない経路探索のためには、災害の時間発展を詳細にとらえる必要があり、地域のモデル化にメッシュ型のモデルを採用することで、各メッシュの状態変化として面的に広がる津波をとらえることができると考えられるためである。

最後に、現在開発されている経路選択手法を分析した結果、経路選択に着目した研究として、リアルタイム経路探索手法があることが分かった。しかし、この方法は、情報通信の問題、事前に経路が定まらないという問題、十分な避難時間を確保できる経路が示されないといった問題を含んでいることが分かった。加えて、津波が発生する前の段階で、いかなる津波が発生する場合にも被災者数を最小化できる避難所および経路の割り当て手法ははまだ確立されていないことが分かった。

第3章 津波浸水を避ける避難所および避難経路の割り当てモデル K19 の開発

この章では、行政が住民に対し、あらかじめ想定される多様な津波に対して、遭遇可能性の低い避難所や避難経路を割り当て可能とすることを目的に、津波浸水の時空間的広がりを考慮して、津波遭遇しにくい避難所および避難経路の割り当てモデル「K19」の構築を行う。

3.1 経路設定と避難困難地域の算出

第2章で述べた通り、シミュレーションを用いた避難に関する多くの研究では、避難経路の設定について避難場所までの最短経路や、渋滞による遅延も加味した最速到達経路、または、それらをベースとした経路が採用されている。このような経路設定は、一刻も早く避難場所に到達することが念頭に置かれている。これは、近地津波の場合は、発生後、比較的早く沿岸域に到達する恐れがあることから、避難が間に合わなくなってしまう可能性があるためである。

しかし、図3-1に示すとおり、最短経路選択(青矢印)では津波に遭遇するが、赤矢印で示すように、浸水域を早く抜け出すことで避難可能となる。このように、津波の浸水開始時間や浸水範囲といった浸水特性を考慮することで避難可能となる場合がある。

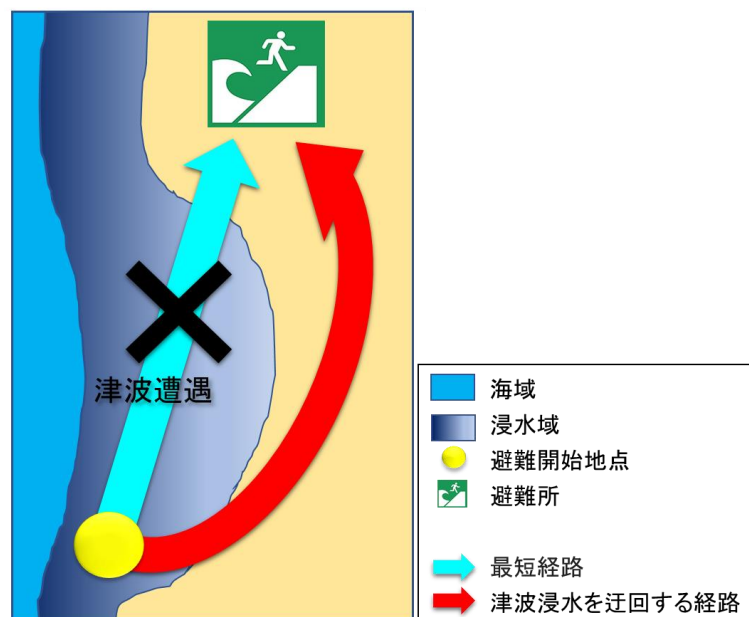





図 3-1 津波浸水を迂回する経路概念：避難者(黄色丸印)は、青矢印の最短経路を選択すれば途中で津波に遭遇する。しかし、赤の迂回経路をとれば、避難所へ到達できることを示す。

津波避難にとって、避難を成功させるポイントは、早く避難場所へ到達することではない。浸水範囲をいち早く抜け出して、安全な経路を通して避難することである。佐藤ら (2017) [73]は陸前高田市を対象に、一次避難所に直接避難するよりも最短距離で到達できる浸水域外に脱出し、そこから一次避難所に避難する方法を検討している。この方法では、より短い距離で浸水域外への脱出が可能となる。その一方で、浸水域脱出後、一次避難所へ到達するために再度浸水域を通過する必要がある地域が存在することなどがデメリットとして挙げられている。津波遭遇をリスクとしてとらえ、リスク最小化問題を解いている奥村ら (2017) [63]では、避難所よりもさらに内陸部の浸水リスクの小さい場所で渋滞が起こることで、避難所に直接続く道路での渋滞が起こる場合に比べて被災者数が減ることなどを示している。これらの研究は、まず浸水の恐れがない場所へできるだけ早く避難すべきことを示唆する。

著者は津波の浸水特性を組み込んだ、津波浸水範囲を迂回する避難経路選択を可能とする。2章で紹介した通り、津波浸水を詳細に把握するために、地域のモデル化をノードリンクモデルではなく、セルオートマトンで行う。すなわち対象地域を等間隔の格子状に仕切り、各セルの浸水開始時間をとらえる。津波浸水を迂回する経路を設定するにあたり、最短経路算出に広く用いられているダイクストラ法を参考とする。次項ではこのダイクストラ法について概要を述べる。

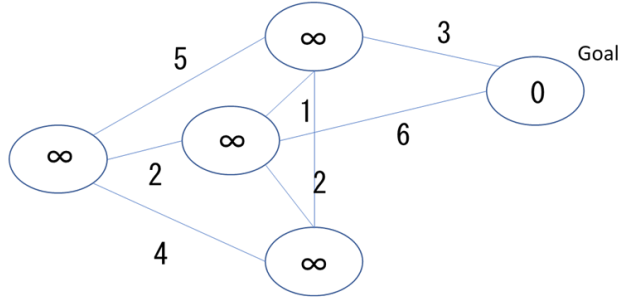
3.1.1 ダイクストラ法

この項では避難場所までの最短経路を算出する際に用いられるダイクストラ法 (Dijkstra, 1959 [74]) について、 を用いて簡単に説明する。対象とする地域の道路網をノード (接点) とエッジ (辺) で表現し、以下の方法でノードに距離を与えていく。この際、エッジで結ばれるノード間の距離は既知となっているものとする。

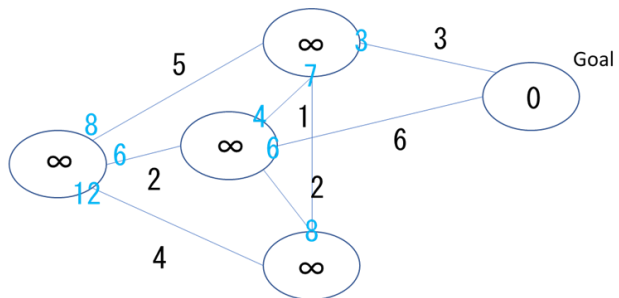
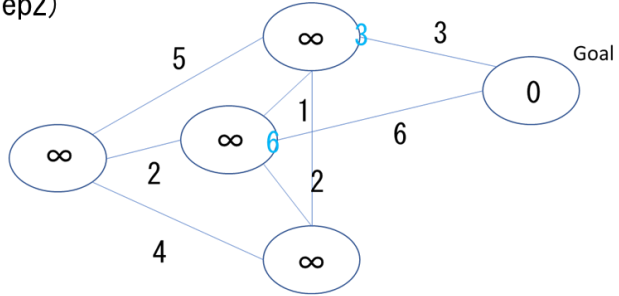
- Step1** ゴールとなる地点に距離 (値) を 0 で与える。加えて、ゴール以外のすべてのノードの値を無限大で与える。
- Step2** 既知点とエッジで結ばれるノードに既知点のエッジの距離を加えた値を候補値 ( 中青字) とする。なお、同じエッジを経由する計算では、計算先の候補値よりも小さくなる場合のみ計算し候補地を更新する。
- Step3** すべての候補地の計算及び更新が終わったら、すべてのノードにおいて最小となる候補値を確定値 ( 中赤字) とする。

全てのノードでの値の計算及び更新が終了するまで **Step2** が繰り返し計算される。そして、スタートする地点に与えられた値からエッジの距離を引いた値があるノードに進むことで、最短経路を得る。ダイクストラ法の特徴は、ゴールから計算が行われ、ゴール以外の全てのノードがスタート地点になりうることである。つまりいったん確定値が求まれば、全てのスタート地点からの最短経路が簡単に求まる。

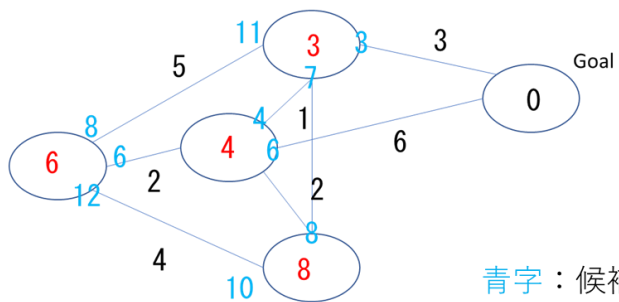
(Step1)



(Step2)



(Step3)



青字：候補値
赤字：確定値

図 3-2 ダイクストラ法の計算手順

3.1.2 提案手法の概要

提案する津波に遭遇する箇所を迂回できる経路は、あらかじめ想定される津波の浸水計算を行い、選択可能な避難経路のうち、津波に遭遇しない条件で避難移動開始までの時間的猶予が最大となる経路(以降、「猶予最大経路」という)を採用することで実現する。猶予最大経路の算出は、ダイクストラ法を参考に各セルに値を与えていく。しかし、値は距離ではなく、猶予時間(T_L)という時間である。猶予時間とは、避難途中に津波に遭遇しない条件で移動開始すべき、地震発生からの経過時間である。この値が負の場合は、地震発生後、直ちに避難を開始したとしても津波に遭遇することを意味する。ここで、距離で与えない理由は、あるセルの浸水開始は時間で与えられるためである。ダイクストラ法を参考とするメリットは、計算時間の短縮にある。本来最短経路を求めるためには、避難開始地点からすべての選択しうる経路での距離を算出し、その中から最短となるものを選択していく必要がある。ある地域を対象にする場合、全ての避難開始地点についてこの操作を行う必要があり、膨大な時間を要することとなる。

ダイクストラ法との比較のために、所要時間(T_R)による最短経路の算出方法も示す。所要時間とは、避難所までの移動時間である。

3.1.3 避難経路の設定

K19における経路選択では、まず対象地域を格子状の小領域に分割する。次に、各格子に T_R と T_L を与えていく。どちらの時間も隣接格子を経由しながら移動する。

この各値の与え方を説明する。このモデルでは、避難場所から各値を与えていく。図3-3の L_{ref} のように、 T_R は避難場所領域を0で与える。ここから、経路を逆進し、前の点に移動時間を加えて求めていく。なお、この例では隣接領域への移動時間(Δt)は1分としている。この関係は式(1)および式(2)で表される。ここで T_{R_0} は避難場所での所要時間を表す。 k は避難場所から道路に沿って遠ざかる程度を示す。すなわち、 k が10とは、避難場所から10マス分だけ経路を遡るということである。よって、 k と $k-1$ は隣接する関係にある。 k が0とは避難場所の属する小領域を意味する。

$$T_{R_0} = 0. \tag{1}$$

$$T_{R_k} = T_{R_{k-1}} + \Delta t. \tag{2}$$

一方、 T_L は避難場所領域を浸水開始時間(T_I)で与える。ただし、避難場所が属する小領域が浸水範囲外の場合は十分大きい定数(N_L)を与える。この例及び以降の計算では $N_L = 100$ 万としている。この関係は式(3)で表される。ここから経路を逆進し、次の値のうち小さい方を与えて求めていく。(a)前の点での猶予時間から1小領域分の移動時間(Δt)を引いた値。(b)浸水開始時間から Δt を引いた値。この関係

は式(4)で表される。 T_{L_0} は避難場所での猶予時間 (T_L) を表す。

$$T_{L_0} = \min(T_{I_0}, N_L). \quad (3)$$

$$T_{L_k} = \min(T_{L_{k-1}} - \Delta t, T_{I_k} - \Delta t). \quad (4)$$

ここで、式(4)において1小領域分の移動時間 (Δt) を減じる理由は、ある小領域が浸水する直前のタイミングで当該小領域を脱出することを加味したものである。すなわち、浸水と同時に隣の小領域に脱出することはできないため、当該小領域を抜け出すための移動時間を減じているものである。

計算合流点では T_R と T_L を以下に示す最短経路と猶予最大経路の各算出方法に従って計算する必要がある。

最短経路による避難では同じ位置 (x, y) に複数の候補となる値 ($Path1, Path2, \dots$) が存在する場合、 T_R が小さくなる方を採用する。具体的には、図3-3の L_{junc} で合流する際、 T_R が小さい方の点を前の点とし、 T_R と T_L を求める。この両時間を求める際、計算が合流する L_{rep} のように、すでに値を取得した点も、 T_R が小さくなる範囲で値を更新する。

$$T_{R(x,y)}^* = \min(T_{R(x,y),Path1}, T_{R(x,y),Path2}, \dots). \quad (5)$$

猶予最大経路による避難では T_L を大きくする方を採用する。具体的には、図3-3の L_{junc} で合流する際、 T_L が大きい方の点を前の点とし、両時間を求める。この両時間を求める際、計算が合流する L_{rep} のように、すでに値を取得した点も、 T_L が大きくなる範囲で値を更新する。

$$T_{L(x,y)}^* = \max(T_{L(x,y),Path1}, T_{L(x,y),Path2}, \dots). \quad (6)$$

以上の流れで各経路選択方法に従った T_R と T_L の分布図が求まる。

最後に各避難開始地点から次に示す方向へ進むことで各方法での経路を得る。最短経路では各点から所要時間が小さい方。最遅遭遇経路では猶予時間が大きい方。

同図中 L_{start} 地点からの避難経路を示す。最短経路では避難場所まで直進することになる。これに対し、猶予最大経路では津波浸水が地震発生4分後に発生するエリアを避けて、より内陸側の浸水が遅い経路を通ることとなる。

猶予最大経路で L_{start} 地点に与えられる猶予時間は1分である。これは津波が発生してから1分以内に避難を開始すれば避難場所にたどり着けることを意味する。また、所要時間17分とは、避難場所までの移動にかかる時間が17分であることを示す。

最短経路で L_{start} 地点に与えられる猶予時間は-4分と、負の値となっている。これは、津波発生後すぐに避難しても、途中で津波に遭遇してしまい、避難場所へ到達できないことを意味している。津波に遭遇しないためにはあと4分早く避難を開始する必要があるということである。

3.2 複数の避難所での避難所割り当てと被災想定

この節では、地域に複数の避難所が存在する際の避難所選択アルゴリズムについて説明する。複数の避難所が選択対象の避難所としてある場合、あらかじめすべての避難所での T_R (最短経路の場合) または T_L (猶予最大経路の場合) を算出しておく。

3.2.1 避難所割り当て手法

最短割り当てでは、 T_R を用いて、避難開始地点に最小の T_R を与える避難所を選択する。一方、猶予最大経路による猶予時間を最大とする避難所への割り当て方法(以下、「猶予最大割り当て」という。)は、避難開始地点に最大の T_L を与える避難所を選択する。猶予最大経路選択の際の避難所選択方法について、式(7)により具体的に説明する。

$$\text{Refuge Allocation: } A_{(x,y)} = R \quad \text{when} \quad \max(T_{L(x,y)}^{r1}, T_{L(x,y)}^{r2}, \dots). \quad (7)$$

式(7)は、小領域 (x,y) の避難場所割り当て $A_{(x,y)}$ は、避難場所 r の (x,y) における猶予時間 $T_{L(x,y)}^r$ を最大とする避難場所 R に決まることを意味する。

図3-5 (a)の避難場所ごとの猶予時間から(b)の避難場所割り当てを行う方法を示す。避難所位置での着色と地域の着色がそれぞれ対応する。★と▲の位置での避難場所割り当て方法を例示する。★と▲の位置での各避難場所AからCまでの猶予時間が最大となる避難場所Aに割り当てられることになる。

ただし、この猶予時間を最大とする避難所を割り当てていく方法では、避難場所の収容可能人数を加味した割り当てができない。そこで、この研究では避難場所の収容可能人数は、避難場所割り当て後にどの程度許容人数を超過するか議論する。

3.2.2 被災想定手法

$T_{L(x,y)}^r$ とは避難場所 r に避難するときの避難を開始する小領域 (x,y) における猶予時間である。この $T_{L(x,y)}^r$ が小領域 (x,y) の避難開始時間($T_{D(x,y)}$)より小さい場所 (X,Y) を特定する。この地点 (X,Y) がその避難場所に到達できない避難困難地域(DEZ)となる。図3-5 (a)の斜線で示す地域は避難開始時間 $T_{D(x,y)}$ が0未満の、地震発生後すぐに避難しても避難できないエリアを示している。図3-5 (c)のように(b)で割り当てられた避難場所割り当て範囲から、この斜線で示す地域を特定する。ここが(b)のように割り当てた際の避難困難地域となる。

この関係を式(8)に示す.

$$DEZ: (X, Y) = DEZ \quad \text{when} \quad \max(T_{L(x,y)}^{r1}, T_{L(x,y)}^{r2}, \dots) < T_{D(x,y)}. \quad (8)$$

この避難困難地域に所在する人口が被災者数となる. 図中★と▲の位置が避難困難地域となるか判断する方法を示す. ★では猶予時間が1分であり, 地震発生後すぐに避難を開始すれば避難所に到達できることを示す. 一方, ▲の猶予時間は-3分であり, 避難開始時間(0分)より小さいため, 避難困難地域となることを示す.

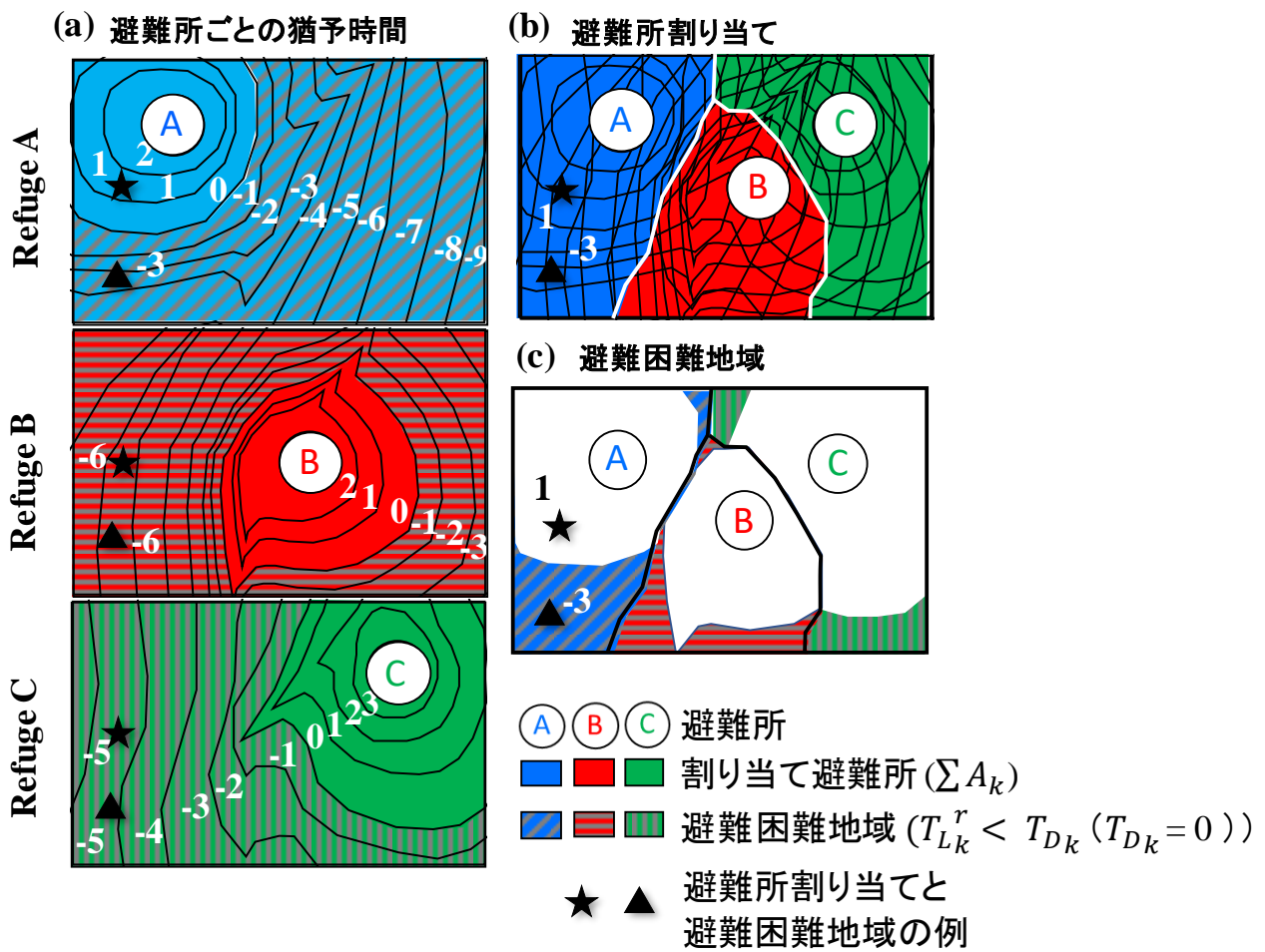


図 3-5 (a) 3 つの避難所における猶予時間分布と, (b) 避難所の割り当てと, (c) 避難困難地域の判定. (b) の避難所の色と地域の色がそれぞれ対応する. 星と三角の位置にいる避難者は, T_L が最大となる避難所 A に割り当てられる. (c) で, 星の位置では, 割り当て避難所の猶予時間が正であることから, 地震発生後すぐに避難開始すれば避難可能である. 一方, 三角の位置では, 猶予時間は-3 であり, 地震発生後すぐに避難開始しても避難所に到達できないことを示す.

3.3 複数の津波シナリオによる最適化

我々は次に来襲する津波を事前に予測することは不可能と言わざるを得ない。つまり、避難所や経路の割り当てにおいて1つの想定津波への最適化は、想定外の事態を生む可能性がある。そこで、多くのシナリオをカバーできる避難所や経路割り当てを行う必要がある。K19では、規模の異なる複数の津波を対象に、避難場所と避難経路の最適化を行うことで津波の不確実性を考慮する。この操作で求まる避難所と避難経路の割り当てを「最適割り当て」と呼ぶこととする。具体的には、図 3-6 のとおり、以下のステップで行う。

(Step 1) 想定する複数のシナリオ(N) について浸水計算を行う。

(Step 2) 各想定津波(i) により与えられる避難所および避難経路割り当て計画(P_i)ごとに、各想定津波(j) 来襲時の被災想定(C_{jP_i})を行う。ここで被災想定のうち、青で示すマスに行く流れは、図 3-3 および図 3-5 で示した通りである。一方、緑のマスへの流れは、i の津波による割り当てをする。その後、選択経路を維持したまま、別の j という津波を適用して猶予時間を再計算して被災想定を行っている。

(Step 3) 対象地域の地震の生起頻度(f_j) を式(9)で仮定する。

$$\log_{10} f_j = 6.31 - 1.03M_{wj}. \quad (9)$$

(Step 4) 地震の生起頻度を考慮した期待被災者数(C_{P_i}) を式(10)に従い、避難場所等割り当て(P_i) ごとに算出する。

$$C_{P_i} = \frac{\sum_{j=1}^N f_j \cdot C_{jP_i}}{\sum_{j=1}^N f_j}. \quad (10)$$

(Step 5) この期待被災者数の最小値(C_{P_i}) を与える避難場所等割り当て(P_i) を最適割り当て計画(P^*) と定義する。また、同割り当てにおける避難経路を最適経路とする(式(11))。

$$P^* = P_i \quad \text{when} \quad \min(C_{P_i}). \quad (11)$$

ここで、地震の生起頻度(f_j)は、グーテンベルク・リヒター則を南海トラフ地震にあてはめて生起頻度を求めた丸山ら(2017) [75]の方法を援用している。同方法では、地震の規模が大きくなるに従い、生起頻度は小さくなる。期待被災者数(C_{P_i})の定義は、嶋原(2017) [76]の定義を援用している。同方法は、地

震の生起頻度による加重平均で期待値を算出している。なお、同規模の地震を複数想定する場合は、期待被災者数は複数想定での平均値として求める必要がある。

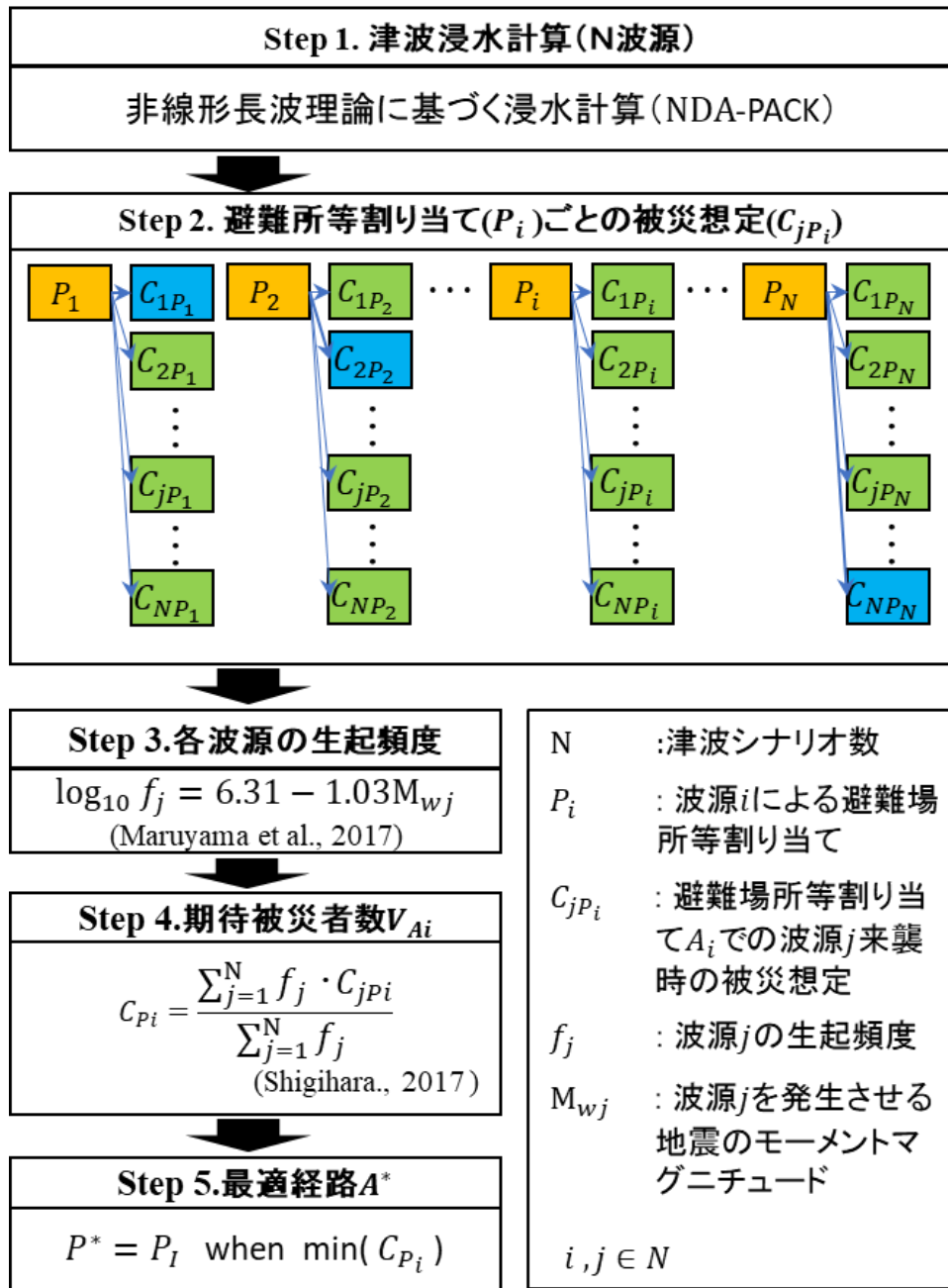


図 3-6 複数の津波シナリオから最適経路を算出する際のフローチャート: Step2 において、オレンジのボックスが割り当てを示し、青または緑のボックスがその割り当て計画に対して、それぞれの津波が来襲する場合の被災想定(被災者数)を示す。青のボックスへのフローは、図 3-3、図 3-5 で示した手順で計算される。緑のボックスへのフローは、想定 i による津波に対する猶予最大割り当てに対して、津波 j が来た時の被災想定が行われる。

3.4 計算モデル K19 に関するまとめ

この章では、行政が住民に対し、あらかじめ津波遭遇可能性の低い避難所や避難経路を割り当て可能とすることを目的に、津波浸水の時空間的広がりを組み込んだ、避難所および避難経路の割り当てモデル「K19」を構築した。このモデルは、あるシナリオ津波に対し、ある避難者が、最も遅い避難開始でも安全に避難所に到達できる経路と避難所を求める。これは、ある避難者が選択し得る全ての避難所までのあらゆる経路選択による、安全な避難のために避難開始すべき時間を計算し、この時間が最大となる経路と避難所を選択することに相当する。これにより、あるシナリオ津波に遭遇するまでに最も時間的猶予のある経路と避難所、すなわち、最もシナリオ津波に遭遇しにくい経路と避難所が割り当てられるというものである。この割り当てを「猶予最大割り当て」という。しかし、この方法では地域全体の避難所及び避難経路の設定に多大な時間を要する。そこで著者は、ダイクストラ法を参考に、避難所の位置から順次、安全に避難するために避難開始が必要となる地震発生からの経過時間、すなわち「猶予時間」を計算していく。この猶予時間の分布を避難開始地点から大きくなる方へ遡ることで、猶予最大割り当てができる方法を開発した。この方法では、一度求めた猶予時間分布のすべての地点が避難開始地点となることから、短時間で地域全体の避難経路と避難所の設定が可能となる。加えて、この避難開始地点の猶予時間と避難開始時間の大小比較で、避難困難地域を簡単に割り出すことができる。

このモデルでは、さらに、規模の異なる複数の津波を想定することで、どの津波が発生する場合にも最短経路選択と比べて被災者数を減少できる「最適割り当て」を求める。この最適割り当ては、想定津波ごとの猶予最大割り当てに対し、ある想定津波が発生する場合の被災者数を算出する。この被災想定をすべての想定津波に対して行うことで、猶予最大割り当てごとの期待被災者数を算出する。この期待被災者数を最小化する猶予最大割り当てを最適割り当てとしている。以上により、全ての避難者に対し、想定される多くの津波に対して、遭遇する可能性を最も低くするただ一つの避難経路と避難所を地震発生前の段階で割り当てることができる。このモデルの検証は、第4章及び第5章で行われる。

第4章 K19による割り当て避難所および経路の分析

この章では、K19により算出される避難経路や避難所が他のモデルに対する優位点を検討するため、他のモデルによる算出避難所や避難経路の特徴の比較と、K19を適用して得られる避難所や避難経路の分析を行う。

4.1 他の計算モデルとの比較

この節では第2章でまとめた避難モデルに対してK19がどのような優れた点を持つか特徴をまとめる。加えて、多くの避難モデルとの相違点を説明する。

K19では、以下に示す通り、既往モデルの3つの制限を克服している。

1つ目は、津波の時空間的広がりを考慮して、津波遭遇を回避できる経路選択を可能としている点である。第2章で紹介したようなノードリンクモデルでは、津波遭遇をノード部分でしかとらえることができず、経路選択に津波の時空間的広がりを直接的に反映できない。同じく第2章で紹介したような、津波遭遇リスクの最小化問題では、以下に示す2つの理由から、必ずしも被災者数を最小化する割り当てを求めることはできない。1つ目は、リスクの与え方が決まっておらず、与え方によって結果が変わってしまう点である。片岡ら(2016) [77]でも津波遭遇リスクはある関数で仮定されている。2つ目は、「高リスク＝津波遭遇」とならないことから、必ずしもリスク最小化＝被災者数最小化にならない点である。これは、ある避難者のリスクが避難経路の延長に応じて累積されるためである。すなわち、リスクが小さい経路を通る場合も遠方にあることで、リスクが大きくなることを示している。また、仮に津波に遭遇する経路が選択されている場合も、津波遭遇時点で計算は終わりではなく、避難開始地点から避難所までのリスクが累積される。これに対しK19では、セルオートマトン法を採用し、地域を格子状の小領域に分割し、小領域ごとに猶予時間を算出することで、津波の時空間的広がりを詳細に考慮可能となっている。加えて、津波の浸水計算により浸水開始時間を算出し、その値を猶予時間の算出に直接用いることから、津波遭遇が明確に反映でき、被災者数の最小化を目的とすることができる。

2つ目は、避難が遅れるような場合にも、最大限津波に遭遇せずに避難所に到達できる避難経路と避難所を割り当てることができる点である。第2章でリアルタイム経路探索手法の中で紹介したような、津波に遭遇しない経路のうちの最短経路では、ギリギリ津波遭遇箇所をかわす経路が算出される。このような経路では、避難中の通行障害や、避難開始時に家族を待つことによる避難の遅れが生じた場合には、津波を回避できなくなってしまう。K19では選択避難所も避難経路も、津波遭遇までに最も時間的猶予が持てるものを採用することから、避難が遅れるような場合も、最後まで安全に避難できる経路として残るただ一つの経路を算出できる。

3つ目は、各避難者に1つの避難経路や避難場所を、発災前の段階で定めることができる点である。2章のリアルタイム経路探索手法で紹介したように、災害の詳細に応じて避難経路や避難場所が変化す

ることとなると、情報通信に関する問題や、避難者の認識に関連する問題が生じる。情報通信に関する問題とは、災害時に即座の情報把握・伝達が困難であるという問題である。K19では、発災前の段階で避難経路を1つ定めることができることから、避難者は指定された避難経路や避難所を十分に確認でき、避難訓練等を通して慣れておくことができる。

K19は、避難者が従うべき避難方法の提示を目指して開発しており、エージェントモデルに代表されるような、避難者の行動特性を表現できるモデルとは目的が異なる。K19は、津波の浸水特性を正確に反映することで、間接的に地形をとらえ、地域に存在する経路や避難所位置を分析したうえで、最大限津波までに余裕を持つことができる避難経路、避難場所を算出する。いわば、地域特性を表現できるモデルである。

K19は、2.3.1b)で示す個別要素法や、2.3.1f)で示すマルチエージェントモデルと異なり、人を離散的に扱わないことから、渋滞の発生や渋滞による避難速度変化を反映することはできない。しかし避難において渋滞の有無は避難可否を左右する重要な要素である。従って、このモデルで割り当てを行った後に、渋滞の有無を確認する。またK19は2.3.2で示すオペレーションズリサーチのように避難所の収容可能人数を考慮した最適化はできない。しかし、どこの避難所にどの程度の者が割り当てられているかを知ることが重要である。従って、割り当て後に避難所の超過人数を確認することとする。K19は2.3.1c)で示すペトリネット法のように避難開始のきっかけを表現できるモデルとなっていない。また2.3.1d)で示すポテンシャル法のように個人特性を考慮できない。さらに、避難経路の傾斜や階段といった経路特性が避難者に与える速度低下といった影響を考慮しない。これらの取り扱いは今後K19と他のモデルのハイブリット化等で可能となるものと考え、この論文では取り扱わない。

4.2 K19によって得られる避難所と避難経路の特徴

この節では、K19を用いることで、どのような避難所や避難経路が選択されるか、最短経路選択との比較や、単純なモデル地域を用いた検討を通して分析する。

4.2.1 最短割り当てとの比較

この項では、K19によって得られる割り当ての最短割り当てとの違いを述べる。K19で割り当てられる猶予最大経路及び避難所は、最短経路によるものと比較して猶予時間が小さくなる、すなわち、最短経路より早く浸水に遭遇するということはない。これは、津波遭遇までの残された時間は猶予時間そのものであり、K19は、全ての避難所と避難経路の組み合わせから、この猶予時間を最大化させる経路を選択するためである。すなわち、K19をどのような地域に適用しても、同じ避難開始時間という条件では、最短経路と比較した場合、被災者数は減らすことができるか最短経路と同程度ということである。

4.2.2 海岸線への津波到達時間や避難開始時間による影響

この項では、海岸線への津波到達時間や避難開始時間の違いが選択経路に影響を与えるか検討する。K19による経路選択及び避難所選択に、避難開始時間や海岸線への津波到達時間は影響を与えない。これを図4-1で説明する。図4-1(a)は図3-3の再掲であり、図4-1(b)は津波到達時間が10分遅れた例である。同図からわかるように海岸線への津波到達が遅れる場合も、遅れる時間分、猶予時間が大きくなるだけで、猶予時間の分布の仕方は変わらない。すなわち、猶予時間を大きくする方向へ進む猶予最大経路に変更はない。次に、避難開始時間も選択経路に影響を与えない。これは、猶予時間分布の与え方は3章で示した通り、避難開始時間に依存しないためである。以上のことから、このモデルでは、海岸線への津波到達時間や、避難開始時間によって選択経路や選択避難所が変わるということはない。

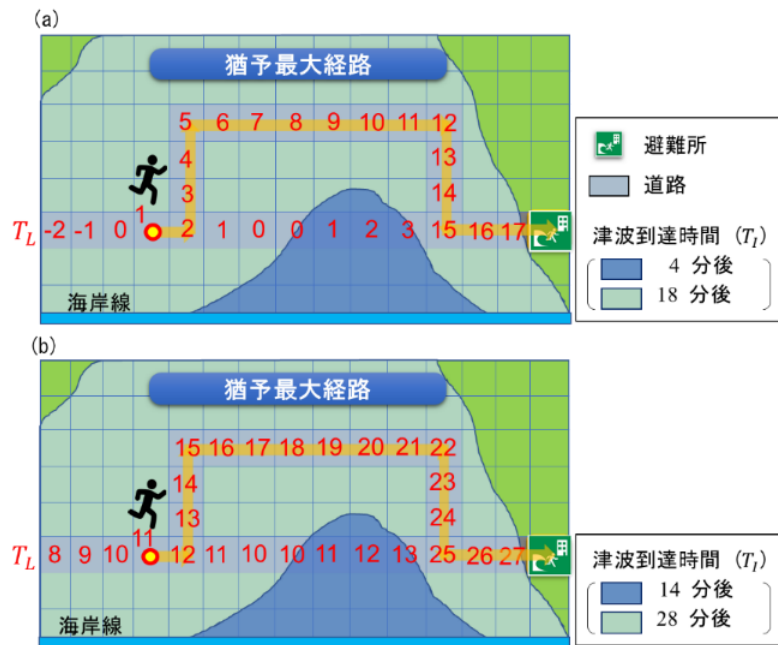


図 4-1 津波到達時間の違いによる経路選択の違い説明：(a)は図 3-3 の猶予最大経路選択を示す。(b)は津波到達が10分遅れた場合を示す。

4.2.3 K19で割り当てられる避難所

(a) 計算条件設定

津波浸水を考慮して選択避難所や避難経路を設定する場合、これらの選択に影響を与える因子は、津波の浸水開始時間や浸水範囲といった浸水特性、地域の道路形状や避難所位置、

第4章 K19による割り当て避難所および経路の分析

地形といった地域特性である。これらの因子は複雑に関連しあって、地域ごとに様々な避難場所を示すと考えられる。ここでは、K19によって選択される避難所がいかなる特徴を持つか、単純なモデル地形を用いて、浸水特性、地域特性を様々変えて検討を行う。ある避難者の避難所選択に影響を与える因子を以下の3つに単純化し、これらをパラメータとして選択避難所の分析を行う。

1. 津波のフロントの伝搬速度（以下、「遡上速度」という）
2. 避難所の海岸までの距離
3. 避難開始地点から浸水範囲外および浸水遅延範囲までの距離

遡上速度は、内陸部に行くほど小さくなると考えられる。これは、太田ら(2013) [78]による東日本大震災の実態調査でも示されている。このため海岸付近と内陸部では浸水開始時間の分布のしかたが異なることから、選択経路に影響を及ぼすと考えられる。

次に、選択される避難所の海までの距離は、避難所の浸水開始時間に影響を与える。すなわち、一般に海に近い避難所は、遠い避難所よりも早く浸水する。この浸水開始時間の違いと、避難者の避難所までの距離には関係があると考えられる。

最後に、浸水範囲外及び浸水遅延範囲までの距離について、浸水が遅い経路や早期に浸水範囲外へ脱出することで猶予時間は多くなり、K19により最短経路とは違う避難経路が選択されると考えられるためである。

この項では、図 4-2 に示す簡単なモデル地形を用いて、K19 を適用することで得られる避難所の特徴を分析する。モデル地域には避難開始地点から同じ距離(500m)の位置に 4 つの避難所を設定する。加えて、海側には 400m, 300m の位置にそれぞれ避難所を設置する。津波は図の下側から遡上することとする。道路は各避難所まで直線で接続される。避難者は以下に示す浸水特性を考慮した上で、猶予時間を最大とする避難所を選択する。表 4-1 に示すように各ケースに応じて浸水特性を設定する。浸水範囲で 3 ケース、遡上速度で 2 ケース設定し、それぞれ組み合わせての計 6 ケース検討を行う。Case1 は水色着色部分の全体が浸水し、Case2 は左側半分だけが浸水する。Case2 は避難開始地点の周辺に高台がある場合など、浸水範囲が限定される地域に相当する。Case3 はモデル地域の右側半分が遅れて浸水する状況であり、第 2 波以降で浸水範囲が拡大することの相当する。この浸水遅延エリアでは、地震発生 30 分後に海岸線に到達した津波が、CaseA または CaseB の遡上速度に応じて遡上することとしている。

津波の遡上速度について、CaseA では遡上速度を 2 m/s, CaseB では 7 m/s とする。CaseA は、津波の遡上速度が減衰する内陸部に相当し、CaseB は、大きい遡上速度を持つ海岸付近に相当する。この津波の遡上速度は、林ら(2012) [79]の津波の実測調査をもとに設定した。同調査報告によると、津波の遡上速度は地域特性、海岸からの距離や土地利用状況に応じて 1 m/s から 10 m/s 程度までであることを示している。今般用いた遡上速度もこの実測されている範囲にある。避難速度は東日本大震災の調査

第4章 K19による割り当て避難所および経路の分析

結果¹⁷⁾をもとに 0.7 m/s とした. なお, Case3 の浸水遅延範囲以外はどのケースも海岸への津波到達時間は地震発生 15 分後とする.

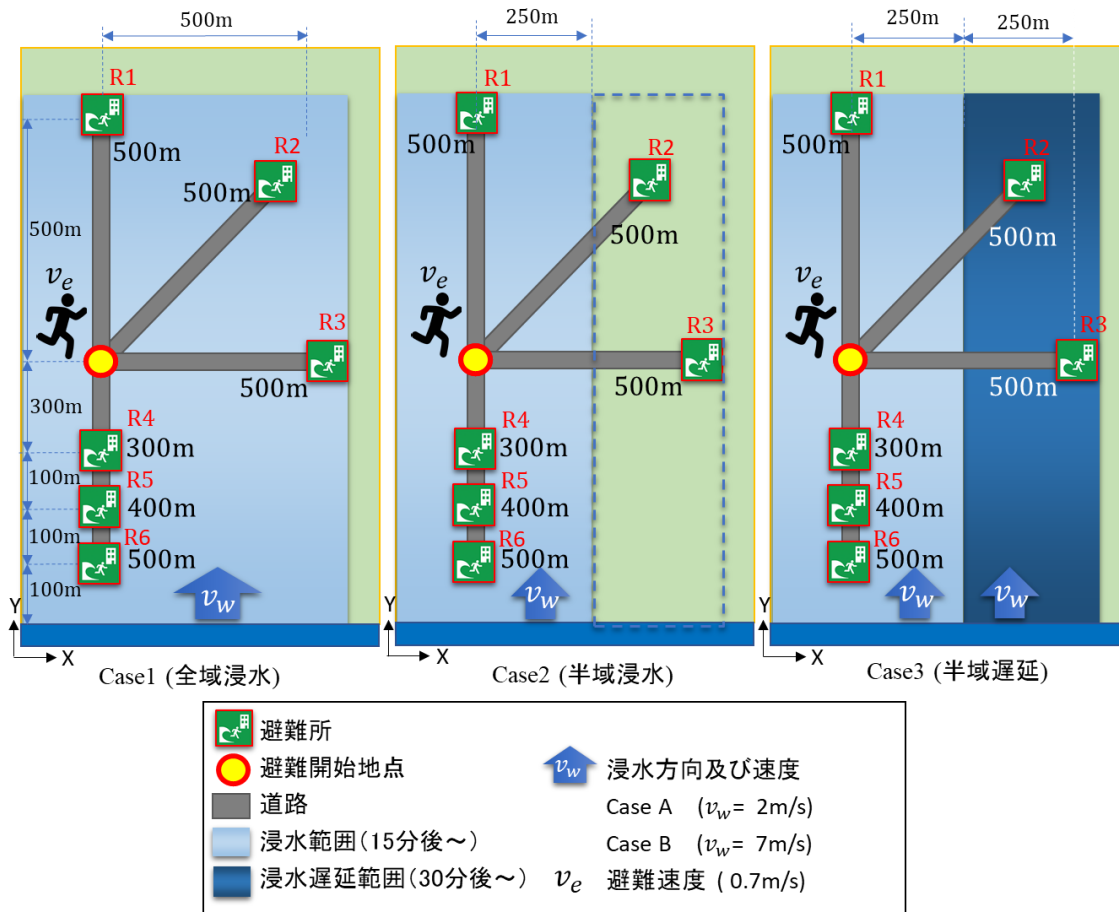


図 4-2 選択避難所の分析におけるケース設定: Case1 は, 全域が浸水する状況を示す. Case2 は, 浸水域が半分になった状況を示す. Case3は浸水域の半分で, 第 2 波以降での浸水が発生する状況を示す. 津波波図の下から v_w の遡上速度をもって浸入する. 避難者は, 黄色丸印から v_e の歩行速度で, 猶予時間を最大とする避難所へ避難する.

表 4-1 ケース設定

| ケース名 | 遡上範囲 | 遡上速度 |
|---------|------|------|
| Case 1A | 全域 | 2m/s |
| Case 1B | 浸水 | 7m/s |
| Case 2A | 半域 | 2m/s |
| Case 2B | 浸水 | 7m/s |
| Case 2A | 半域浸水 | 2m/s |
| Case 2B | 遅延 | 7m/s |

(b) 計算結果および考察

図4-3に各ケース、各避難所の浸水開始時間と同地点の猶予時間を示す。海岸線に地震発生15分後に到達した津波は、遡上速度が遅いCaseAでは最も内陸にある避難所R1に到達するのに8分程度かかっているが、遡上速度が速いCaseBでは3分足らずで到達する。Case1Aでは浸水が遅い避難所R1に向かうことで猶予時間最大となる。次に猶予時間が大きい避難所はR2であり、R1の次に浸水開始が遅い避難所である。一方、遡上速度が速いCase1Bでは、避難距離の最も短い、R4が猶予時間が最も大きく、続いて、次に避難距離が短いR5が次に猶予時間が大きくなっている。すなわち、海側にある避難所のうち、近いところに避難すべきことを示している。この2つのケースの違いは、津波の遡上速度であり、避難者と遡上津波の相対速度が選択避難所に影響を及ぼしていることが分かる。すなわち、Case1Aでは津波の遡上速度は避難速度の3倍程度であり、避難者は津波がどこから浸入してくるか方向を考えて浸水が遅い方向に逃げることで猶予時間を多く稼げる。一方Case1Bでは津波は人避難速度の10倍程度の遡上速度をもつため、浸入方向より避難所までの距離を優先考慮すべきということである。すなわち、津波の遡上速度に比べれば、人の避難速度は比較にならないほど小さく、とにかく近くの避難所に向かうことで猶予時間を多く稼げるということである。従来海側への避難はタブーとされ、消防庁の示す指針[23]では避難所の割り当てについて海側に向かわないことが示されている。この結果は、避難開始地点と避難所の位置関係によっては必ずしも陸側の避難所だけが適当というわけではないことを示す。

次に浸水域が左側半分に限定されるCase2A, Case2Bについて、結果を考察する。これらのケースでは、共に避難所R2又はR3を目指すことで猶予時間最大となる。すなわち、早く浸水範囲を抜けることを可能とする避難所に向かうべきことを示す。

このように浸水域を早く抜け出すことに着目した研究はこれまでも存在する(例えば佐藤ら, 2017[73])。このように浸水域外に早く抜けるための制御は、避難所に加えて、浸水域も避難目標地点として設定し、避難所と避難目標地点のうち、最短で到達できるところに逃げるという制御を行なうことで可能となる。しかしK19が考慮できるのは、浸水の有無というゼロかイチかということだけではない。浸水開始時間をとらえて、浸水が遅い方へ逃げるのが有利な場合は、そちらを選択できる。これを示す例が次のCase3である。Case3はCase2で浸水しないとしたエリアが、遅れて浸水することを想定している。このケースでも、猶予時間を最大とする避難所は、Case2同様R2またはR3となった。

以上の結果を整理すると、K19は、津波の遡上速度や浸水範囲といった、津波の遡上特性を踏まえて、猶予時間を最大とする避難所を選択できるということである。具体的には以下の避難所を選択することができる。

第4章 K19による割り当て避難所および経路の分析

1. 津波の遡上速度が、避難者の移動速度に比べて、オーダーが違うほど大きく、かつ、付近に浸水境界や付近に浸水境界や浸水遅延範囲がない場合は最短で到達できる避難所.
2. 津波の遡上速度が、避難者の移動速度に比べてあまり大きくない場合は、津波の遡上方向を考慮し、浸水範囲から離れる方向にある避難所.
3. 津波がどのような遡上速度をとる場合も、浸水が大きく遅延する箇所、または、浸水範囲外となる地域が付近に存在する場合は、浸水遅延箇所や浸水範囲外を通過して、その先にある避難所.

この項の目的は、この結果をもって、ハザードマップから浸水状況を読み解いて、自ら避難所選択を可能とすることではない。現実の地域では、地形に起因する浸水特性の違いや、避難所位置などに加え、道路の分布状況など、猶予時間に影響を与える因子が他にもある。加えて定性的な指標では、どちらの避難所がどの程度良いのか比較することができない。この項の目的は、猶予最大割り当てにより選択される避難所が如何なるものか分析し、K19を用いることですべての因子による影響を踏まえたうえで、定量的に避難所を決めることができることを示すことにある。次項では、道路の分布状況に伴う、選択経路の違いを分析する。

第4章 K19による割り当て避難所および経路の分析

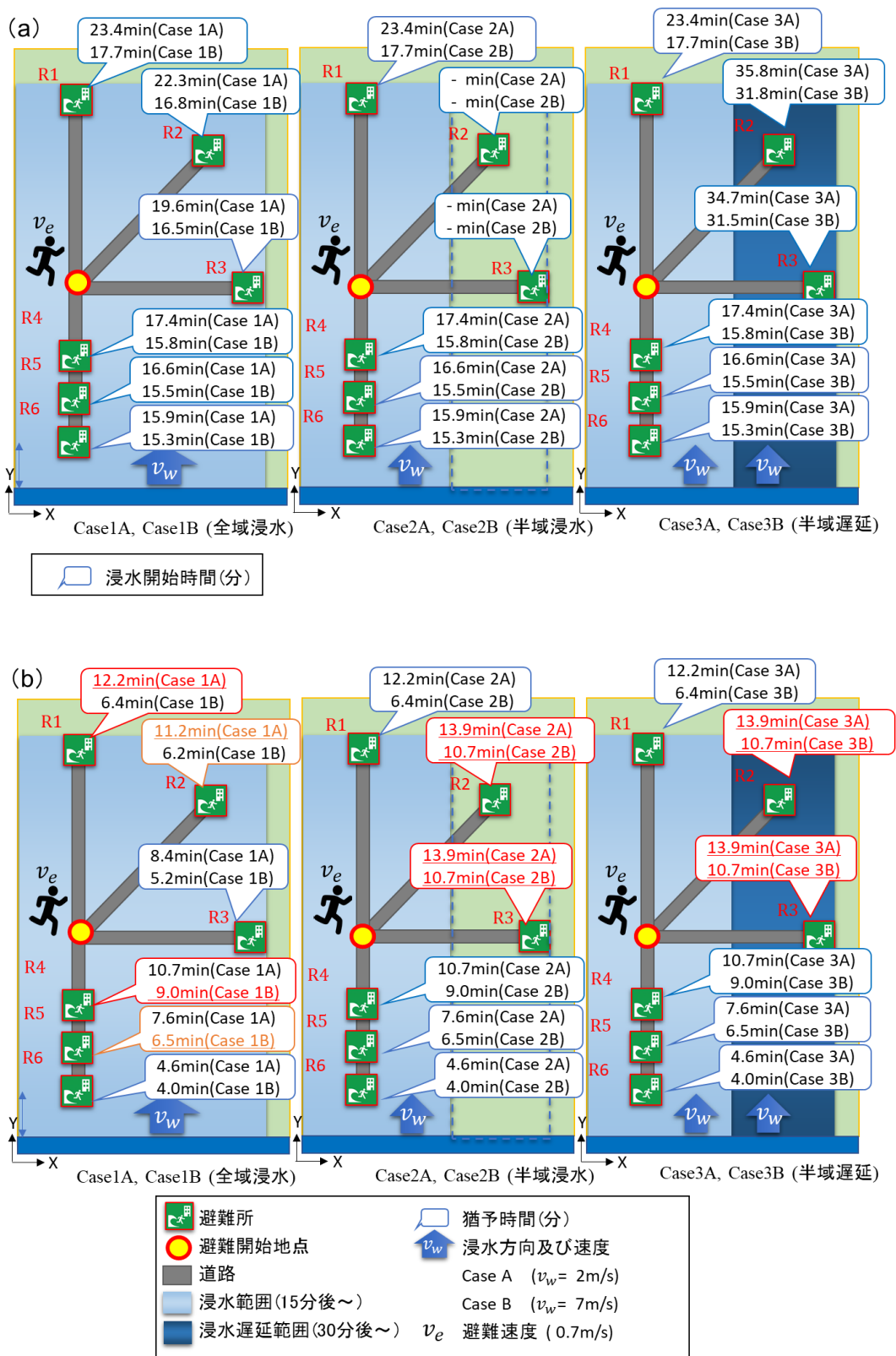


図 4-3 選択避難所の分析における、(a)避難所の浸水開始時間と、(b) 各避難所へ避難する場合の猶予時間：(b)において、猶予時間が最も大きい避難所の猶予時間を赤字で、次に大きいものをオレンジ字で示す。

4.2.4 K19で割り当てられる避難経路

この項では、猶予最大経路では津波浸水との関係でどのような特徴を持つ経路が選択されるか分析を行う。第3章で説明したように、K19では避難開始時間や避難移動時間に最も余裕を持てる避難経路が割り当てられる。これにより、避難が遅れた場合も最後まで避難を達成できる経路を算出可能となっている。

図4-4はモデル地域に図の下部から津波が遡上してくる状況を示す。浸水は3回にわたって範囲を拡大させ、第1波は5分後に、第2波は20分後、第3波は50分後に到達する。この場合、図中左下に示す避難者はこのモデルによってどのような経路選択をするか、以下の3つの場合分けをして明らかにする。

最初に浸水が遅延する範囲が存在する場合である。Ra, Rb, Rcの3つの経路だけが存在する場合について考える。この場合、猶予最大経路は、浸水が最も遅く到達するRcとなる。Rbも地震発生後2分以内に避難を開始すれば津波遭遇することはないが、時間的余裕はRcより少ない。仮に地震による影響で避難開始や避難中に遅れが生じた場合には津波に遭遇する可能性がある。4.1で示した通り、津波に遭遇しない中での最短経路を検索すると、このRbの経路が選択されることとなる。最短経路はRaとなるが、浸水が5分以内に発生する箇所を通過することから、地震発生後すぐに避難開始しても途中で津波に遭遇する。避難所に到達するためには地震発生8分前にすでに避難開始しておく必要があり、現実的ではない。このように、猶予最大経路では、早期浸水範囲に入らずに避難できる経路が存在する場合は、その経路を選択することとなる。

次にRcとRdの経路だけが存在する場合について考える。Rdの経路はほぼRcと同じ経路をとるが、図中左端で遠回りをしていることが分かる。猶予時間を比較すると、RdはRcに比べて猶予時間が6分短くなっている。すなわち、無駄に遠回りをするため、避難所付近で再度浸水範囲を通過するのが遅くなってしまうことから、猶予時間が短くなっているものである。このように、K19では、遠回りをして猶予時間を無駄に消費するような経路は選択されない。

最後に、経路ReとRfだけが存在する場合を考える。2つの経路の違いは、避難所付近で浸水範囲を通過するか否かである。猶予時間は、Reが15分であるのに対し、Rfは7分であることから猶予最大経路はReとなる。このように、K19では、避難中、一度浸水範囲を抜けた後に、そのまま浸水範囲に戻らず避難所に到達できる経路が存在する場合はその経路を選択することとなる。これと同様に、このモデルを用いれば、もともと浸水範囲外にいる避難者は、浸水域に入らず避難できる経路がある場合は、遠回りになろうとも、浸水範囲に入らず、浸水範囲外の経路を選択することとなる。

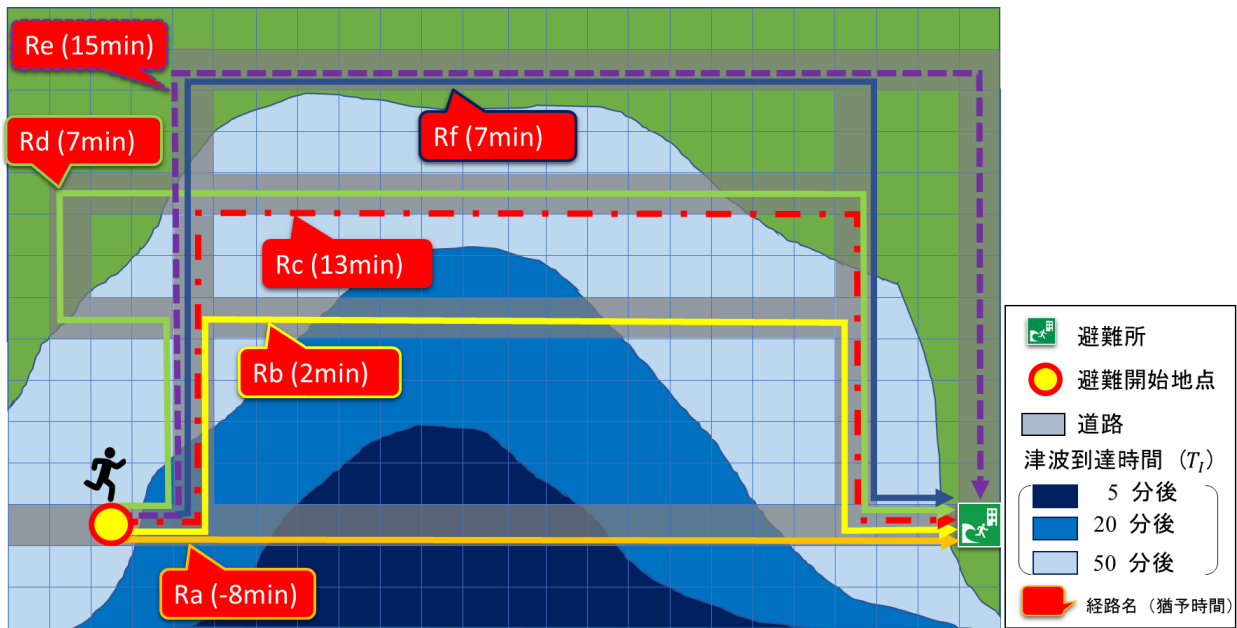


図 4-4 選択避難経路の分析：各矢印が選択経路を示し、吹き出しがその経路名と経路選択時の猶予時間を示す。

K19 では、浸水範囲以外では最短経路を通るように設計されている。これを示す事例として、図 4-5(a)を示す。図 4-5(a)は、3 章に示す図 3-3 と同じ地域モデルで、津波が遡上しない条件である。ただし、この例では説明を簡単にするため、 $N_L=100$ とする。図 4-5(a)で示す通り、各小領域の猶予時間は、式(4)の左側 ($T_{L_{k-1}} - \Delta t$) により与えられ、隣接する小領域の猶予時間から移動時間 ($\Delta t=1$) を加味するだけで、式(4)の右側 ($T_{I_k} - \Delta t$)、すなわち津波の浸水開始時間による値からは与えられない。その結果、猶予最大経路と最短経路が一致することとなる。加えて、図 4-5 (b)のように、浸水範囲を超えた先に複数の避難所がある場合で、避難開始地点に同じ猶予時間を与える場合は、猶予時間と同時に計算する所要時間から、近い方の避難所を選択することとしている。

選択経路の特徴についてとめると、以下の通りとなる。

1. 浸水が大きく遅延する箇所が存在する場合は、浸水遅延箇所を通過して、その先にある避難所が選択されること。加えて、早期浸水範囲に入らずに、迂回して避難できる場合は、その経路が選択されること。
2. 選択経路について、猶予時間を多く確保できる場合は、最短経路より遠回りをして避難所へ向かうが、遠回りをして猶予時間を無駄に消費するようなことはないこと。
3. 選択経路について、一度浸水域を抜けた後、その先に避難所がある場合は再び浸水域に入ることはなく、浸水域外を通過して避難所に向かう経路が選択されること。
4. 経路選択について、浸水域外では猶予最大経路は最短経路に一致すること。

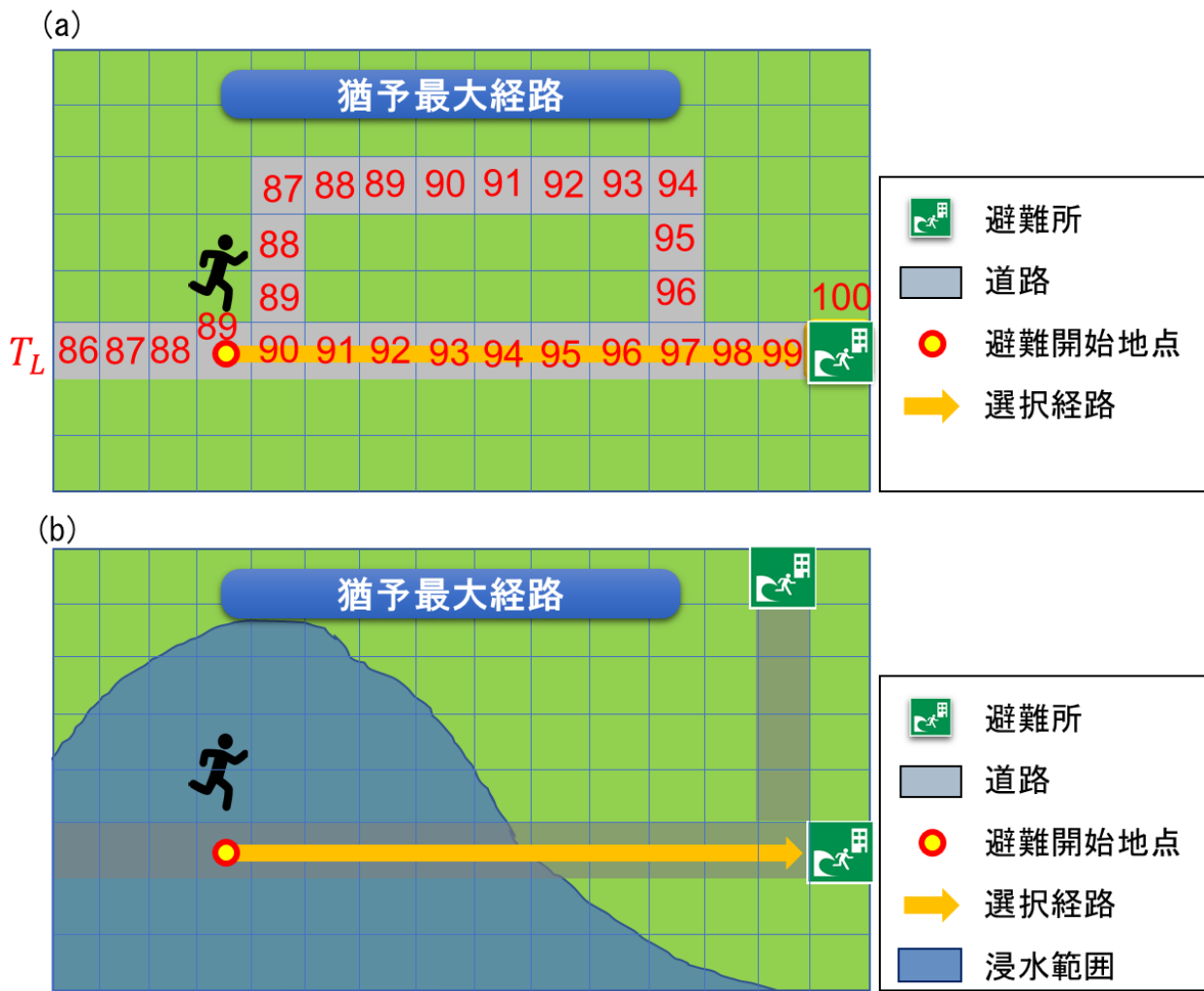


図 4-5 選択避難経路の分析：各矢印が選択経路を示す。(a)は図 3-3 と同じ地域で、浸水が起こらない場合は最短経路が選択されることを示す。(b)は浸水範囲外に複数の避難所がある際に最短となる避難所が選択されることを示す。

4.3 K19により選択される避難所と経路の特徴に関するまとめ

この章では、K19により算出される避難経路や避難所がどう優れているのか検討するため、他のモデルによる算出避難所や避難経路の特徴の比較と、K19を適用して得られる避難所や避難経路の分析を行った。

既往モデルと比較した結果、以下の3点の既往モデルから進展を示した。

1. 津波の時空間的広がりを考慮して、津波遭遇を回避できる経路選択を可能とした点。
2. 避難が遅れるような場合にも、最大限津波に遭遇せずに避難所に到達できる避難経路と避難所を割り当て可能とした点。
3. 各避難者に1つの避難経路や避難場所を、発災前の段階で定めることを可能とした点。

また、K19を適用して得られる避難所や避難経路の分析を行った結果、K19による避難経路や避難所の割り当てが以下の特徴を持つことを示した。

1. 猶予最大割り当てによる被災者数は、最短割り当てより減るか、効果が少なくても最短割り当てと同程度であり、被災者数が増えることはないこと。
2. K19による経路や避難所の割り当てに、避難開始時間や海岸線への津波到達時間は影響を与えないこと。
3. 避難所選択について、津波の遡上速度が、避難者の移動速度に比べて、オーダーが違うほど大きく、かつ、付近に浸水境界や付近に浸水境界や浸水遅延範囲がない場合は最短で到達できる避難所が選択されること。
4. 避難所選択について、津波の遡上速度が、避難者の移動速度に比べてあまり大きくない場合は、津波の遡上方向を考慮し、浸水範囲から離れる方向にある避難所が選択されること。
5. 避難所および経路選択について、津波がどのような遡上速度をとる場合も、浸水が大きく遅延する箇所が付近に存在する場合は、浸水遅延箇所を通過して、その先にある避難所が選択されること。
6. 避難所および経路選択について、津波がどのような遡上速度をとる場合も、浸水範囲外となる地域が付近に存在する場合は、浸水範囲外を通過して、その先にある避難所が選択されること。
7. 経路選択について、猶予時間を多く確保できる場合に限り避難所までの迂回経路が選択され、遠回りをして猶予時間を無駄に消費するようなことはないこと。
8. 経路選択について、一度浸水域を抜けた後、その先に避難所がある場合は再び浸水域に入ることはなく、浸水域外を通過して避難所に向かう経路が選択されること。k
9. 経路選択について、浸水域外では猶予最大経路は最短経路に一致すること。

第 5 章 実在する地域への適用

この章では、K19 を地域に適用し、最適割り当てを行うことで、最短割り当てを行う場合と比較してどの程度被災者数を減少できるか適用性を検討する。

5.1 対象地域の説明

4.1 節で示した通り、この割り当てモデルに避難者の避難速度の変化や、避難開始のタイミング、個人特性の反映は行わない。よって、地域の人口構成は検討対象地域の選定要件に入れない。一方、津波の浸水特性は、4.2 節で示された通り、選択避難所に影響を与える。よって、津波の浸水特性に着目し、浸水特性が異なる地域で提案するモデルの適用性を検証する。ここで浸水特性には、海岸線の複雑性や後背地の平坦性が関係する。海岸線が複雑であれば、様々な方向から津波が浸入し、単純な海岸線であれば一方から浸入してくることになる。後背地が平坦であれば浸水はより内陸まで及び、海岸付近まで山際が迫る地域であれば山際でとどまることが考えられる。ただし、割り当ての妥当性検討のため、割り当て後に避難経路の混雑の可能性や避難所収容可能人数の超過を検討する。よって、対象地域の避難対象人数や避難所との関係についても整理する。

今回構築した K19 を図 5-1 に示す高知県の一部地域に適用する。主に地形の異なる 3 つの地域とした。詳細は後述するが、A 地域が東西に 2 つの海岸線を持つなど、複雑な海岸線を有している。一方、B 地域と C 地域は比較的単純な海岸線を有している。

次に対象とする津波断層との位置関係を整理する。A 地域及び B 地域は四国南西端に位置する。このため南海トラフ地震発生後早期の津波到達が予想される。C 地域も南海トラフ地震津波による浸水が想定される地域であるが、高知県の海岸線のほぼ中央、土佐湾の奥まった地域に位置している。高知県のハザードマップによると、A 地域では L1 クラス、L2 クラス共に地震発生から 10 分程度で海岸に近い地域で浸水が開始するとされている。B 地域では、L1 クラスの津波が、地震発生およそ 20 分後、L2 クラスの津波では、およそ 10 分後から海岸に近い地域で浸水が開始するとされる。これに対し、C 地域は、地理的要因から L1 クラス、L2 クラス共に地震発生からおよそ 20 分後から海岸に近い地域で浸水が開始するなど、他の地域より若干津波到達が遅れることが予想されている。

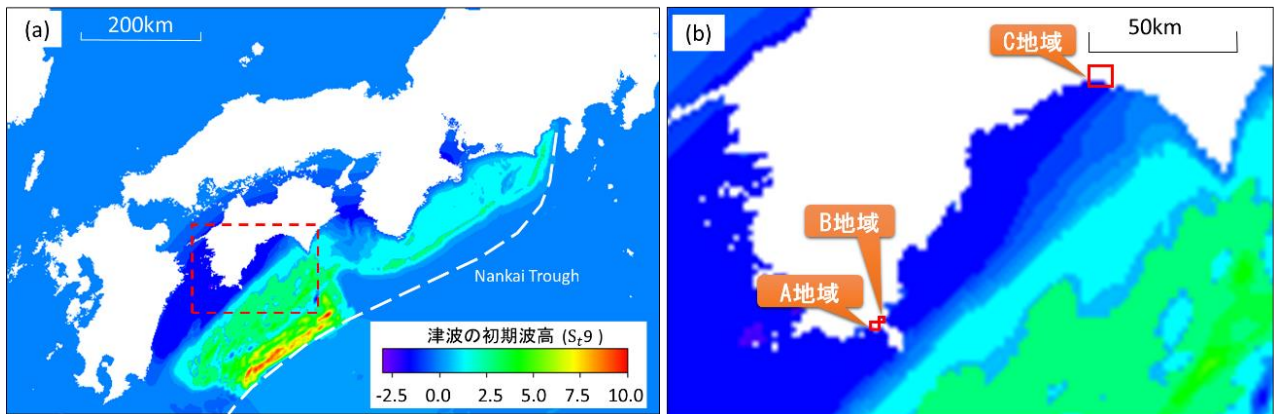


図 5-1 検討対象地域: (b)は, (a)に示す破線部に該当する. (a)に示す津波の初期波高は, シナリオ津波 S_{t9} によるものである. シナリオ津波については 5.2 を参照されたい.

A 地域の地形と地域形成について分析する。同地域の地形は、豊後水道東沿岸のリアス式海岸が続く地域に位置する(高知県海岸資料 [80])ことから、海岸線は複雑で、山や絶壁が海岸線に迫る地域となっている。東西に異なる海岸線を持つため、津波の来襲方向が複雑となる。これより、津波避難において、避難者はどこの避難所を選択すれば津波浸水に遭遇せずに避難できるか判断に迷うことが予想される。一方、平地から高台までの距離が近い場合、津波浸水が及ばない高台にいち早く避難ができれば、浸水を免れることができるかもしれない。しかし、このような地域では、必ずしも付近の高台に続く道路が整備されているとは限らず、単純に地形条件のみをとって避難開始後すぐに避難所にたどり着けるとは限らない。宇野ら(2015) [54]は、道路形状を考える場合とそうでない場合とで、浸水範囲外に抜け出すことで被災を免れる人数が変わることを示している。すなわち、近くに高台が存在していても、そこに続く道路がなければ、道路に沿って迂回して高台や避難所に避難するしかないということである。次に A 地域の形成について検討する。同地域は市役所が置かれるなど、市の中心部となっている。図 5-2 から、多くの建物が標高 5m 以下の低地に密集していることが分かる。つまり、多くの住民は、いったん津波が発生すると、避難する必要がある。A 地域では、行政が指定する避難所(高知県ハザードマップ) [81]に加え、避難目標地点を独自に設定した。



図 5-2 A 地域の標高と、道路、建物、避難所の位置：行政が指定する避難所に加え、避難目標地点を独自に設定。

B 地域の地形と地域形成について分析する。同地域は、A 地域の北東方向に隣接する地域であるが、高知県御示海岸区分では、豊後水道東沿岸ではなく、土佐湾沿岸に属する。周辺地域はリアス式海岸に囲まれているが、同地域は比較的単純な海岸線を有している。具体的に、図 5-3 によると、B 地域では集落の東側に、ほぼ直線の海岸線を有し、標高 10 m 以下の地域が広がっている。海岸から内陸方向に約 500 m で標高 20 m 以上の高台を有する比較的単純な地形となっている。周囲を険しい山に囲われることから、この山間部を通る道路は比較的少ない。次に、同地域の地域形成について分析する。同地域は住居がいくつかの集落が離散的に存在する農村地域となっている。避難所は集落近辺に設けられている。標高 5 m までの低地のほぼ中央に避難タワーが設置される以外は、山側に避難所が設定されている。



図 5-3 B 地域の標高と、道路、建物、避難所の位置

C 地域の地形と地域形成について分析する。C 地域も B 地域同様比較的単純な地形を有する地域である。同地域は土佐湾沿岸のほぼ中央に位置する。図 5-4 から、地域の南側にほぼ直線の海岸を有することが分かる。高知平野に位置していることから、海岸から 4 km 内陸までゆるやかに標高が上がっている。対象地域の西端に比較的大きい河川を有している。内陸まで平野が広がることから、B 地域と異なり、内陸部まで道路網が密に構築されている。C 地域の地域形成について分析する。B 地区とは対照的に広い平地を持つ C 地域は、市街化が進み、多くの住宅等建物が存在する。特に鉄道沿線の臨海部と山沿いに建物が密集しており、避難所もこれらの地域に多く設けられていることが分かる。

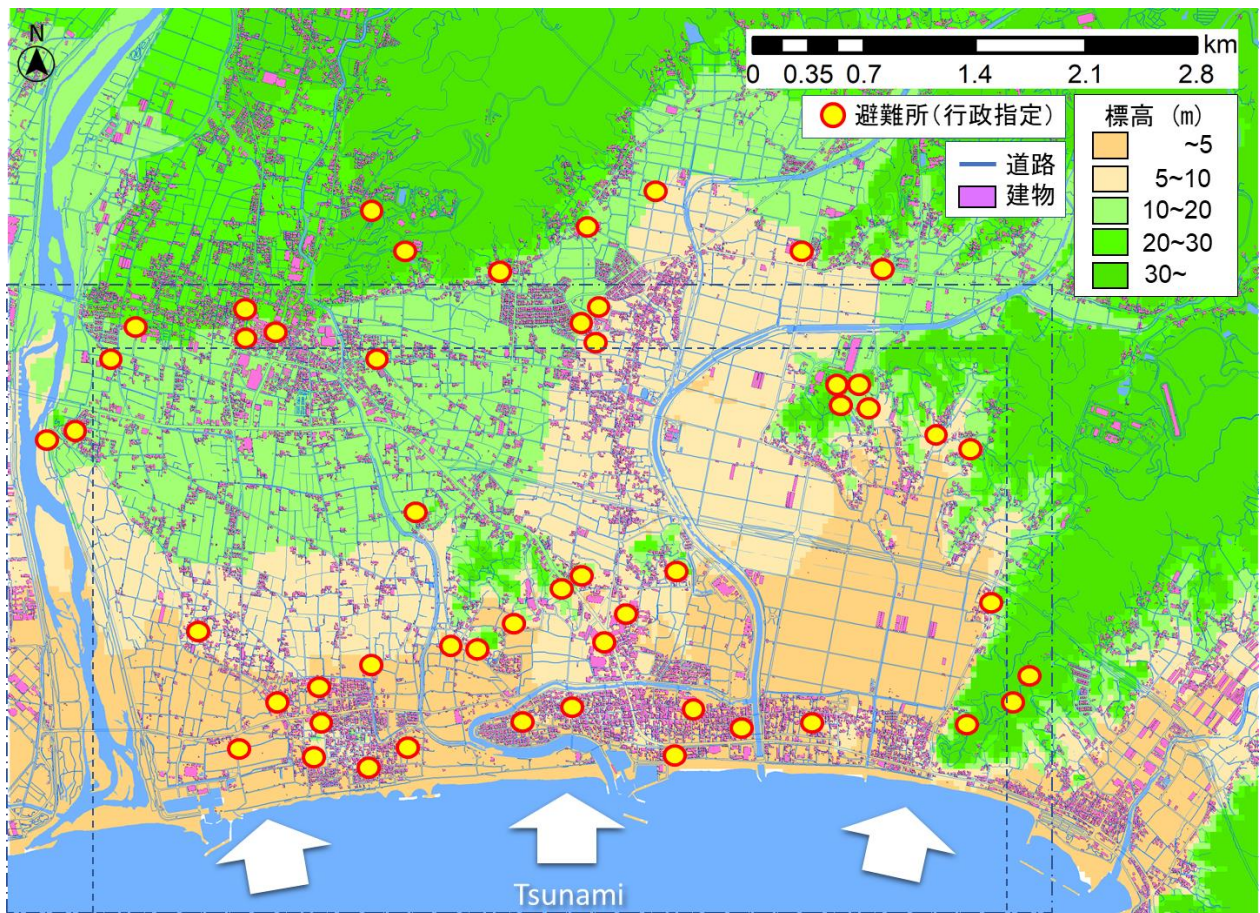


図 5-4 C 地域の標高と、道路、建物、避難所の位置。

破線は図 5-18C の範囲を示す。一点鎖線は図 5-20C の範囲を示す。

第5章 実在する地域への適用

避難対象者数は、次節で説明する複数のシナリオ津波による浸水域を重ね合わせて、その重ね合わせた地域に属するすべての人とした。具体的には、平成 27 年度に実施された国勢調査 [82]により求まる地域ごとの人口を、その地域に占める建物の投影面積の和で除すことで、建物 1m²当たりの人口を求める。その人口を各セルに占める建物面積に応じて配分することで、人口分布を仮定する。この人口分布のうち、浸水範囲となる地域に属する人口を避難対象者とした。この方法で、A 地域の避難対象人口は 4,050 人、B 地域で 340 人、C 地域で 6,700 人となった。

これらの 3 つの地域の特徴を表 5-1 にまとめる。A 地域は避難目標地点を設定していることから、対象面積 1km²当たり避難所数は、他の地域より多くなっている。B 地域は対象面積および住民は 3 地域の中で最も少なくなっている。C 地域は 3 地域の中では対象面積および住民が最も多い地域となる。

これらの 3 地域では、地形や地域形成はそれぞれ異なるが、比較的標高の低い土地に建物が集中して立っていることが共通している。これは、いったん津波が発生すると多くの人が避難対象者となるということである。

表 5-1 検討対象地域の状況

| | A 地域 | B 地域 | C 地域 |
|-------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 地域面積 | 11km ² | 4km ² | 45km ² |
| 避難所数 | 59 箇所 | 7 箇所 | 52 箇所 |
| 避難者数 | 4,050 人 | 340 人 | 6,700 人 |
| 対象面積 1km ² 当たり避難所数 | 5.4 箇所 | 1.8 箇所 | 1.2 箇所 |
| 避難所 1 か所当たり避難者数 | 69 人 | 52 人 | 129 人 |

5.2 津波シナリオ

この節では、この研究で用いる津波シナリオの設定について説明する。この研究では、既往の断層モデルに加えて、任意の地震規模に応じて断層モデルを改変する方法を採用している。これにより、さまざまな規模の断層モデルの設定を可能としている。

5.2.1 既往の断層モデル

わが国では、2011年の東北地方太平洋沖地震以降、中央防災会議により、2つのレベルの津波を設定することで、対策をとるという方針が打ち立てられた(東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告 [25])。すなわち、発生頻度は極めて低いものの、発生すれば甚大な被害をもたらす、1000年に1度程度発生する津波(レベル2津波)および、最大クラスの津波に比べて発生頻度は高く、津波高さは低いものの大きな被害をもたらす津波(レベル1津波)である。レベル2津波に対しては、住民等の避難を軸として、土地利用、避難施設、防災施設などを組み合わせて取りうる手段を尽くした総合的な津波対策を行うこととされている。レベル1津波に対しては、人命保護に加え、住民財産の保護、地域の経済活動の安定化、効率的な生産拠点の確保の観点から、海岸保全施設の整備を行うこととされている。

今回ケーススタディとして対象とする地域は高知県の一部地域である。高知県では、ハザードマップの作成を目的に、レベル2クラスの津波を引き起こす津波断層モデルを、中央防災会議公表モデル [83]の11ケースのうち、高知県の海岸線で最大の津波高を発生させる6つのケースを選定している(高知県の津波設定 [84])。すなわち、Case3「紀伊半島から四国沖に大すべり領域と超大すべり域を設定」、Case4「四国沖に大すべり領域と超大すべり域を設定」、Case5「四国沖から九州沖に大すべり領域と超大すべり域を設定」、Case9「愛知県沖から三重県沖と、室戸岬沖に大すべり域と超大すべり域を2か所設定」、Case10「三重県南部隠岐から徳島県沖と足摺岬沖に大すべり域と超大すべり域を2か所設定」、Case11「室戸岬沖と日向灘に大すべり域と超大すべり域を2か所設定」の6つである。このことからこの研究でもこの6つのケースを対象に見当を行う。この6ケースの地震の規模は $M_w 9.1$ と算定されている。

この研究では、地震の規模に依存しない避難経路及び避難所割り当てを算出することを目的の一つとしている。よって、さまざまな規模の地震に対して、従来の最短割り当てよりも被災者数を減少できる割り当てを求める必要がある。したがって、中央防災会議 [85]によって想定された東南海・南海地震モデルおよび東海・東南海・南海地震モデルの2つの津波についても検討対象とする。これらの地震の規模は $M_w 8.7$ と算定されている。

これらの既往の断層モデルに加えて、さらにこのモデルの適用性検証を目的として、任意の地震の規模に応じた断層モデルを設定する。次項ではこの方法について示す。

5.2.2 断層モデルの改変

本報では、最適経路を算出することと、様々な条件下で最適経路選択の効果を示すことを目的に、規模の異なる様々な津波シナリオを想定する。避難の際の経路や避難所選択による被災者数の違いを検討するためには、海岸堤防等を超えて浸水が発生する津波を想定する必要がある。しかし、既往の断層モデルだけでは、都合よく浸水を引き起こす津波想定の数に不足が生じる。よって本報では、目的とする規模に応じて、既往の断層モデルの断層パラメータを修正する方法をとった。この断層パラメータの修正には加藤ら(2015) [86]の用いた方法を援用する。断層長(L)、断層幅(W)、すべり量(U)といった断層パラメータと地震の規模を示すモーメントマグニチュード(M_w)には以下の関係が成り立つことが知られている。

$$\log M_0 = 1.5M_w + 9.1 \quad (12)$$

$$M_0 = \mu LWU \quad (13)$$

これらの関係から M_w は以下の式からえられることがわかる。

$$M_w = (\log \mu LWU - 9.1)/1.5 \quad (14)$$

ここで、 M_0 は地震モーメントを示す。 μ は対象とする断層の剛性率を示す。また、入倉ら(2001) [87]は以下の式を提案している。

$$LW = 4.24 \times 10^{-11} (\mu LWU)^{1/2} \quad (15)$$

ここで、断層の位置及び断層長 L が固定されるとすると、式(15)は断層幅 W とすべり量 U に比例関係が成立することを示す。加藤ら(2015) [86]は、福井県沖の津波の発生頻度を考慮して漁港の設計津波を設定するために、これらの関係、すなわち、断層長 L が固定されると仮定し、断層幅 W とすべり量 U に比例関係が成立するとして、式(14)により求める M_w にあった断層パラメータを、既往断層モデルを改変することで求めている。

この研究では、以下に示す、既往地震を再現した断層パラメータおよびその改変モデルと、多くの自治体がハザードマップ作成の際に用いる中央防災会議の想定する断層モデルを採用する。

(a) 1707年 宝永東海・南海地震

相田は、宝永東海・南海地震について、相田(1981) [88] [89]で、残っている津波高さの記録に整合するように表 5-2 の断層モデルを求めている。この地震の規模は、断層モデルから M_w 8.7と算定される。この断層モデルを元に、 M_w 8.8 に修正すると、表 5-3 のようになる。

表 5-2 宝永地震の断層パラメータリスト(日本の断層パラメータ・ハンドブック [80]より)

| N(°N) | E(°E) | d(km) | θ (°) | δ (°) | λ (°) | L(km) | W(km) | U(km) |
|-------|--------|-------|--------------|--------------|---------------|-------|-------|-------|
| 35.14 | 138.73 | 2 | 198 | 34 | 71 | 115 | 70 | 400 |
| 33.90 | 138.13 | 3 | 245 | 24 | 113 | 150 | 100 | 400 |
| 33.41 | 136.15 | 10 | 250 | 10 | 124 | 150 | 70 | 560 |
| 33.40 | 134.57 | 1 | 220 | 20 | 90 | 140 | 80 | 700 |
| 32.33 | 133.57 | 1 | 240 | 20 | 90 | 60 | 80 | 1390 |

表 5-3 宝永地震改変モデルの断層パラメータ(M_w 8.8) ※改変箇所は赤色着色箇所

| N(°N) | E(°E) | d(km) | θ (°) | δ (°) | λ (°) | L(km) | W(km) | U(km) |
|-------|--------|-------|--------------|--------------|---------------|-------|-------|-------|
| 35.14 | 138.73 | 2 | 198 | 34 | 71 | 115 | 81 | 460 |
| 33.90 | 138.13 | 3 | 245 | 24 | 113 | 150 | 116 | 460 |
| 33.41 | 136.15 | 10 | 250 | 10 | 124 | 150 | 81 | 650 |
| 33.40 | 134.57 | 1 | 220 | 20 | 90 | 140 | 93 | 810 |
| 32.33 | 133.57 | 1 | 240 | 20 | 90 | 60 | 93 | 1610 |

(b) 1854年 安政南海地震

相田は、安政南海地震についても、相田(1981) [88]で、表 5-4 の断層モデルを求めている。この地震の規模は、断層モデルから $M_w8.5$ と算定される。この断層モデルを元に、 $M_w8.4$, $M_w8.6$, $M_w8.8$ に修正すると、表 5-5 から表 5-7 のようになる。

表 5-4 安政南海地震の断層パラメータリスト(日本の断層パラメーター・ハンドブック [80]より)

| N(°N) | E(°E) | d(km) | θ (°) | δ (°) | λ (°) | L(km) | W(km) | U(km) |
|-------|--------|-------|--------------|--------------|---------------|-------|-------|-------|
| 32.7 | 134.74 | 1000 | 250 | 20 | 117 | 150 | 120 | 630 |
| 33.41 | 136.15 | 10000 | 250 | 10 | 127 | 150 | 70 | 470 |

表 5-5 宝永地震改変モデルの断層パラメータ($M_w8.4$) ※改変箇所は赤色着色箇所

| N(°N) | E(°E) | d(km) | θ (°) | δ (°) | λ (°) | L(km) | W(km) | U(km) |
|-------|--------|-------|--------------|--------------|---------------|-------|-------|-------|
| 32.7 | 134.74 | 1000 | 250 | 20 | 117 | 150 | 94 | 490 |
| 33.41 | 136.15 | 10000 | 250 | 10 | 127 | 150 | 55 | 37 |

表 5-6 宝永地震改変モデルの断層パラメータ($M_w8.6$) ※改変箇所は赤色着色箇所

| N(°N) | E(°E) | d(km) | θ (°) | δ (°) | λ (°) | L(km) | W(km) | U(km) |
|-------|--------|-------|--------------|--------------|---------------|-------|-------|-------|
| 32.7 | 134.74 | 1000 | 250 | 20 | 117 | 150 | 133 | 700 |
| 33.41 | 136.15 | 10000 | 250 | 10 | 127 | 150 | 78 | 520 |

表 5-7 宝永地震改変モデルの断層パラメータ($M_w8.8$) ※改変箇所は赤色着色箇所

| N(°N) | E(°E) | d(km) | θ (°) | δ (°) | λ (°) | L(km) | W(km) | U(km) |
|-------|--------|-------|--------------|--------------|---------------|-------|-------|-------|
| 32.7 | 134.74 | 1000 | 250 | 20 | 117 | 150 | 188 | 990 |
| 33.41 | 136.15 | 10000 | 250 | 10 | 127 | 150 | 110 | 740 |

5.2.3 設定津波シナリオに関するまとめ

設定シナリオをまとめると表 5-8 の通りとなる。

表 5-8 津波シナリオの状況

| シナリオ名 | 地震の規模 | 元となるモデル |
|-------------------|--------------------|--|
| S _t 1 | M _w 8.4 | 安政東南海地震相田モデル(M _w 8.5) |
| S _t 2 | M _w 8.6 | 安政東南海地震相田モデル(M _w 8.5) |
| S _t 3 | M _w 8.7 | 中央防災会議(2003)case2 東南海・南海地震モデル |
| S _t 4 | | 中央防災会議(2003)case3 東海・東南海・南海地震モデル |
| S _t 5 | M _w 8.8 | 安政東南海地震相田モデル(M _w 8.5) |
| S _t 6 | | 宝永地震相田モデル(M _w 8.7) |
| S _t 7 | M _w 9.1 | 中央防災会議(2012)Case3 紀伊半島から四国沖に大すべり領域と超大すべり域を設定 |
| S _t 8 | | 中央防災会議(2012)Case4 四国沖に大すべり領域と超大すべり域を設定 |
| S _t 9 | | 中央防災会議(2012)Case5 四国沖から九州沖に大すべり領域と超大すべり域を設定 |
| S _t 10 | | 中央防災会議(2012)Case9 愛知県沖から三重県沖と、室戸岬沖に大すべり域と超大すべり域を2か所設定 |
| S _t 11 | | 中央防災会議(2012)Case10 三重県南部隠岐から徳島県沖と足摺岬沖に大すべり域と超大すべり域を2か所設定 |
| S _t 12 | | 中央防災会議(2012)Case11 室戸岬沖と日向灘に大すべり域と超大すべり域を2か所設定 |

5.3 計算条件設定

5.3.1 浸水計算における計算条件設定

想定津波の浸水開始時間分布は津波浸水計算により取得している。この津波浸水計算には、非線形長波モデルを用いる計算方法を援用する(嶋原ら(2016) [91], 北村ら(2012) [92])。計算格子間隔は10mとする。防潮堤は中央防災会議(2012)の公表資料 [83]から取得し、津波が防潮堤を越流した時点で破壊することとした。潮位については、潮汐などによる潮位偏差は考慮せず、付近の検潮所の平均潮位で設定した。

5.3.2 避難計算における計算条件設定

避難場所は行政の指定避難場所を参考に設定した。なお、A 地域では、想定するすべての津波の浸水区域外に避難目標地点を独自に設定した。これは同地域が複雑な地形を持つことから、行政指定の避難場所だけをゴールとする場合、津波シナリオによっては、浸水範囲外に設定された避難開始地点から、浸水範囲に戻るしか避難所にたどり着く経路がなく、あえて浸水範囲に入る必要がある地域が複数見られたためである。現実には、このような地域の者は、避難所に向かうよりも、さらに高台へ向かうことで津波の浸水から逃れることができる可能性がある。標高、道路網及び住宅位置は国土地理院 [93]が公表する情報を元に設定した。

避難速度は、東日本大震災の調査結果(津波避難を想定した避難路、避難施設の配置及び避難誘導について(第3版) [22])に基づき、2.65 km/h とした。加えて、目標とする避難開始時間は、同調査で地震発生(14:46)から14分後の15:00が最も多く、全体の半分が同時刻までに避難を開始しているとの結果から、地震発生14分後とした。つまりこの研究では昼間の地震発生を想定している。計算格子間隔は10mとしている。

5.4 計算結果

この節では、提案する最適割り当ての効果を実在する地域に適用して、その適用性を検討することを目的に、前節までの計算条件に基づいて以下の6項目の検討を行う。

1. このモデルを他の地域に適用する際に、想定すべき津波シナリオを限定することを目的に、最適割り当てがどのような津波シナリオによって与えられるか検討する(5.4.2).
2. 避難所の収容可能人数に見合った割り当てを目的に、収容可能人数との比較および超過した場合の修正方法を示す(5.4.3).
3. 避難速度が適切に設定されているか確認することを目的に、避難中の渋滞が発生しないか確認を行う(5.4.4).
4. 最適割り当てによる効果を示すことを目的に、最適割り当てと最短割り当ての場合の被災者数を比較する(5.4.5).
5. 最適割り当ての特徴を示すことを目的に、最適経路と最短経路での猶予時間の分布と避難困難地域となるエリアについて分析を行う(5.4.6).
6. 最適割り当ての特徴を示すことを目的に、避難所と避難経路の割り当てがどのように異なるか示す(5.4.7).

5.4.1 浸水計算

地震の規模ごとの生起頻度を示すグラフが図 5-5 である。同図はグーテンベルク・リヒター則を日本近海の地震に当てはめた丸山ら(2017) [75]を援用している。これに、今回想定する地震を当てはめている。同図からわかるように、地震の規模が上がれば、生起頻度は指数的に小さくなる。地震の規模が増えるにつれ、指数的に生起頻度が小さくなるのが分かる。ここで、 S_t3 と S_t4 および、 S_t7 から S_t12 は同じ M_w であることから生起頻度は同じ値となる。しかし、期待被災者数の算出にそのままこの値を用いると、想定数が多い M_w での生起頻度が、想定数分だけ大きくなってしまう。よって、同規模の地震を複数想定しているシナリオでの期待被災者数は、同規模の地震による平均値で表すこととする。

各津波シナリオによる地域ごとの浸水状況を分析する。各シナリオ津波が、対象地域に及ぼす浸水面積と海岸線での平均津波到達時間を地域ごとに図 5-6A から図 5-6C に示す。これらのグラフから、地震のモーメントマグニチュード(M_w)大きくなるにつれて、浸水範囲が拡大していることが分かる。すべての地域で $M_w9.1$ となる S_t9 で最も広範囲に浸水が及ぶことが分かる。ここで S_t9 のシナリオは、中央防災会議(2011)における「四国沖～九州沖に大すべり域」を設定したケースと同一である。

A 地域と C 地域では、 $M_w8.4$ である S_t1 ではあまり浸水が起こらず、地震の規模が大きくなるにつれて、浸水範囲が大きくなっていくことが分かる。一方、B 地域では、 S_t1 の段階でも比較的大きく浸水し、

$M_w 8.7$ の $S_t 3$ 及び $S_t 4$ ですすでに地域の平地全域に浸水が及ぶことが分かる。これは同地域が平坦であること、対象としている地域の面積が他の地域に比べて小さいことから、浸水の割合が大きくなるためであると考えられる。次に海岸線への平均津波到達時間を見ると、断層破壊位置や大すべり域の設定位置により、浸水開始時間は様々であるが、どの地域も比較的 $S_t 7$ から $S_t 12$ の $M_w 9.1$ の地震で早い到達がみられる。しかし、地域間では到達時間に違いがみられ、A 地域や B 地域は足摺岬付近に位置し、断層に近いことから比較的早い 10 分から 15 分程度で津波が到達する。一方、土佐湾奥に位置する C 地域は 30 分程度で津波が到達している。

次に、浸水が発生しやすい地域について分析をする。各シナリオ津波の浸水範囲を図 5-7A から図 5-7C に示す。同図から A 地域は地域の中心となる図の中央付近では $M_w 8.7$ 程度の地震で大きく浸水してくる。B 地域は、 $M_w 8.4$ の段階から地域の北部、及び南部の海岸付近で浸水が発生している。C 地域では、 $M_w 8.6$ 程度で主に河川沿いの地域となる地域西側、中央付近、東側で浸水が発生している。河川を介して浸水を引き起こす河川津波によるものである。

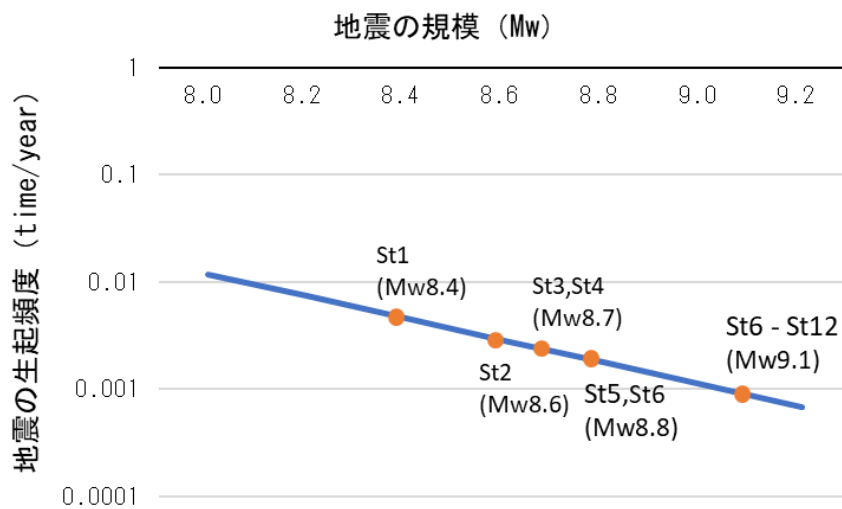


図 5-5 地震の規模と生起頻度の関係:丸山ら(2017)の式を元に作成.

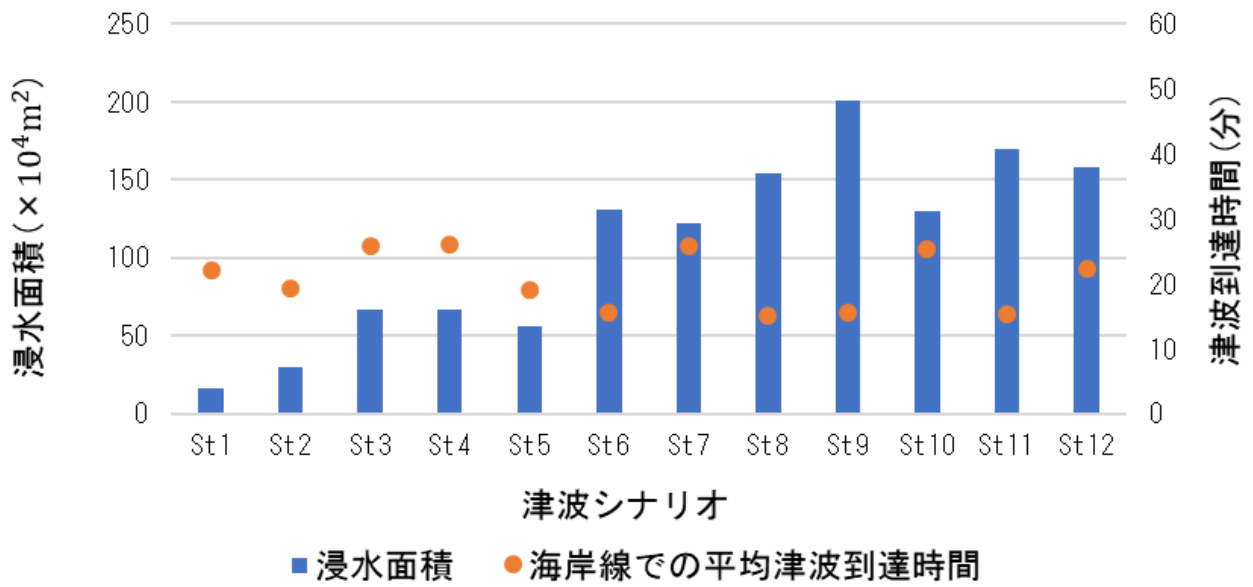


図 5-6A 津波シナリオごとの浸水面積および海岸線での平均津波到達時間(A 地域):海岸線での平均津波到達時間は浸水が及ぶ海岸線の浸水開始時間の平均値で算出.

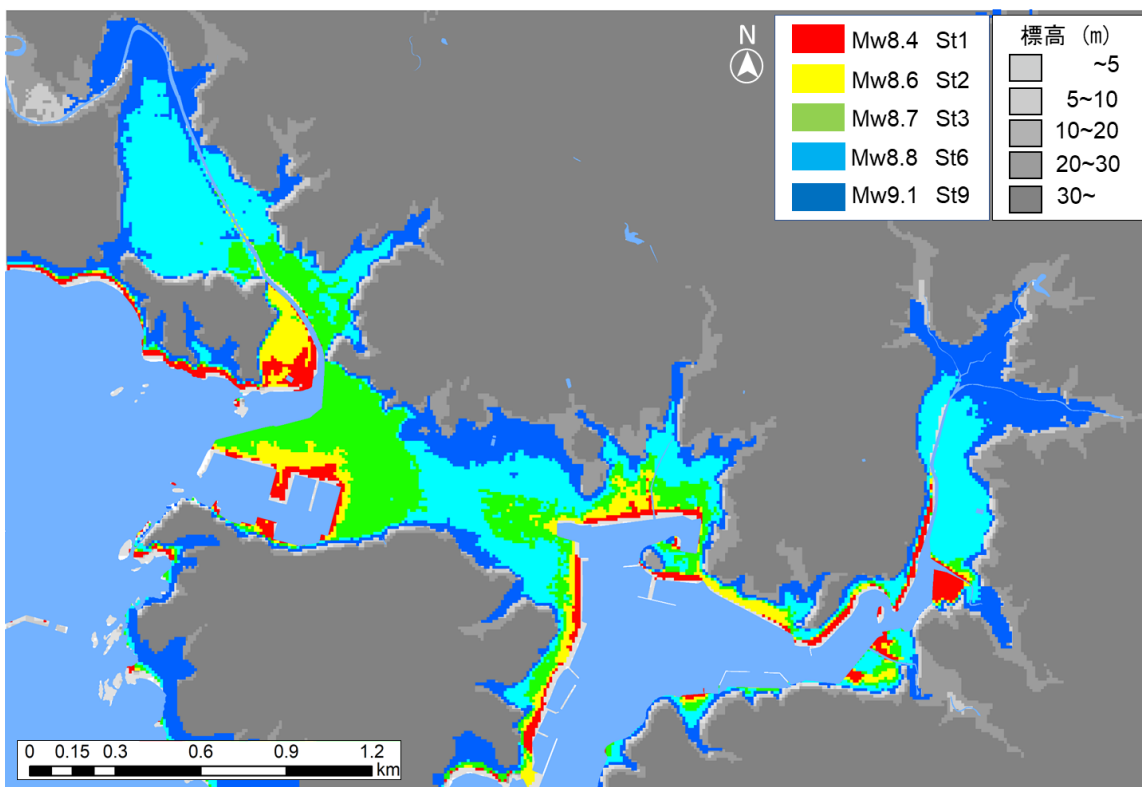


図 5-7A 各シナリオ津波の浸水範囲例(A 地域)

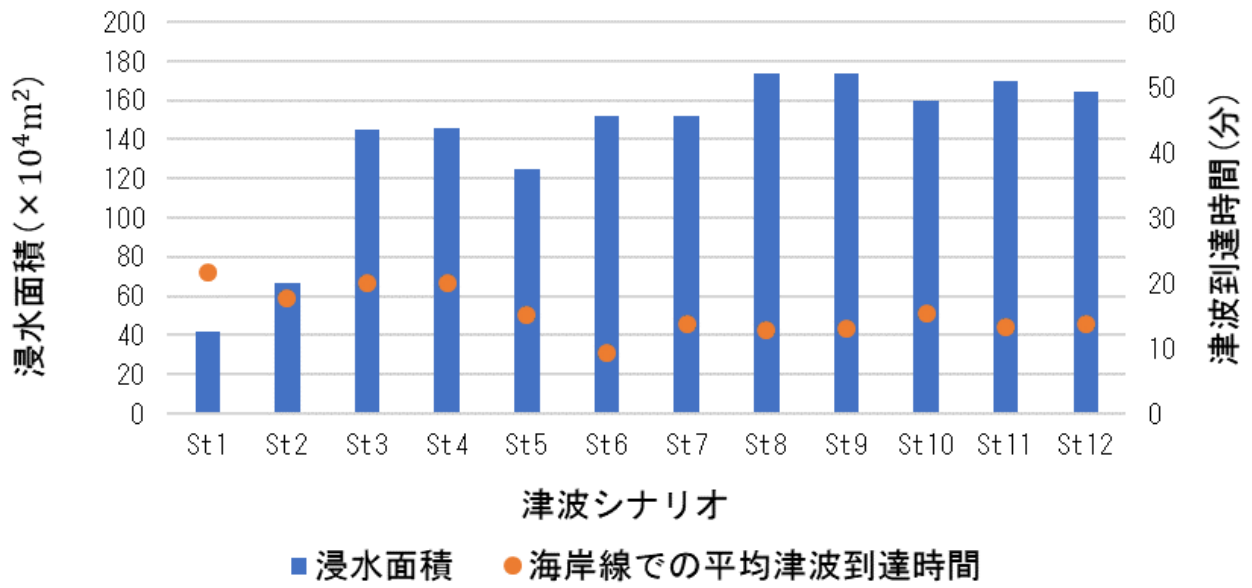


図 5-6B 津波シナリオごとの浸水面積および海岸線での平均津波到達時間 (B 地域) : 海岸線での平均津波到達時間は浸水が及ぶ海岸線の浸水開始時間の平均値で算出。

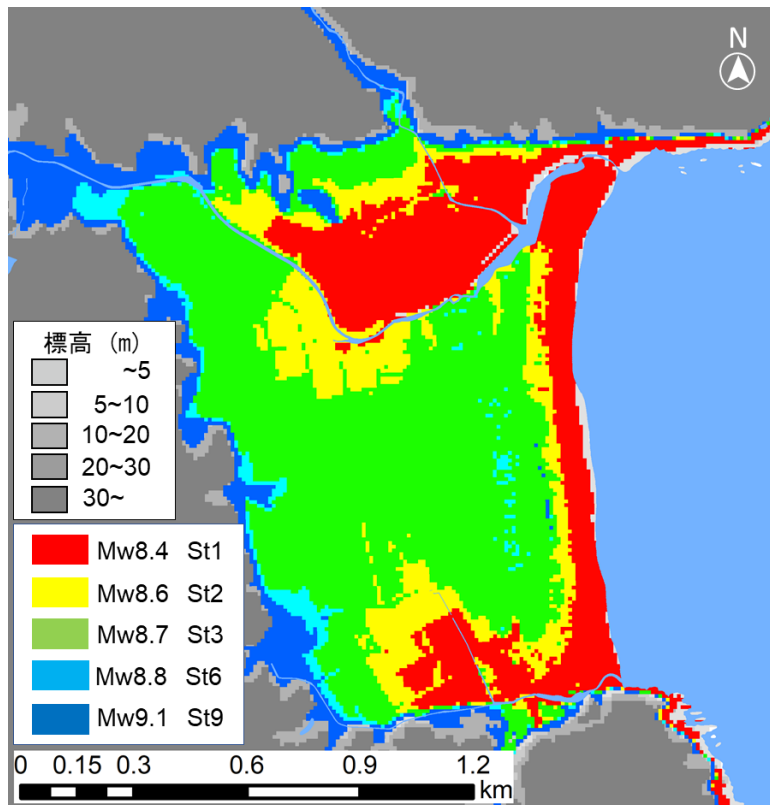


図 5-7B 各シナリオ津波の浸水範囲例 (B 地域)

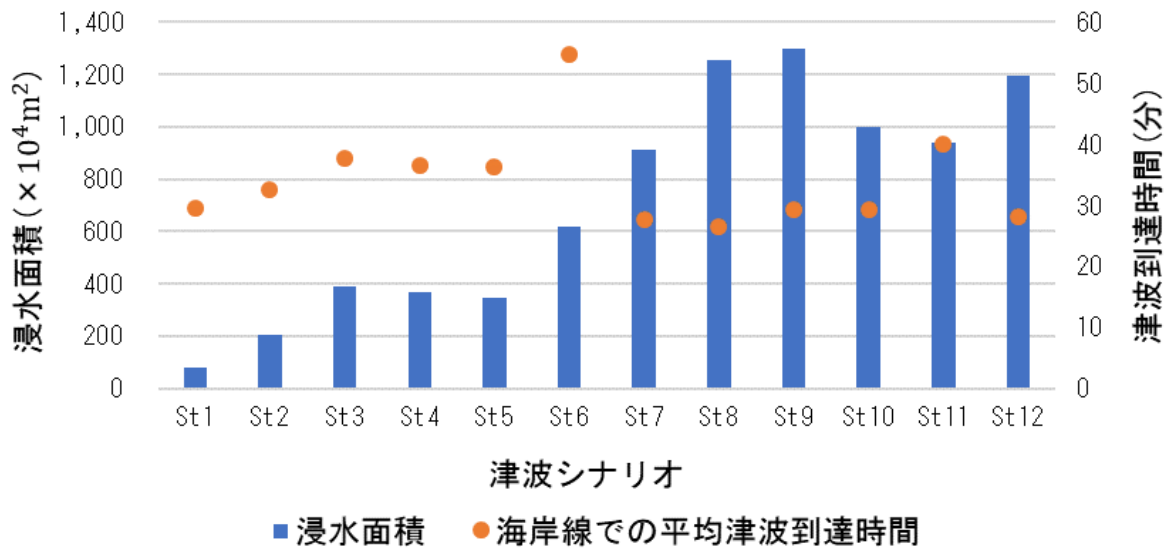


図 5-6C 津波シナリオごとの浸水面積および海岸線での平均津波到達時間(C 地域):海岸線での平均津波到達時間は浸水が及ぶ海岸線の浸水開始時間の平均値で算出。

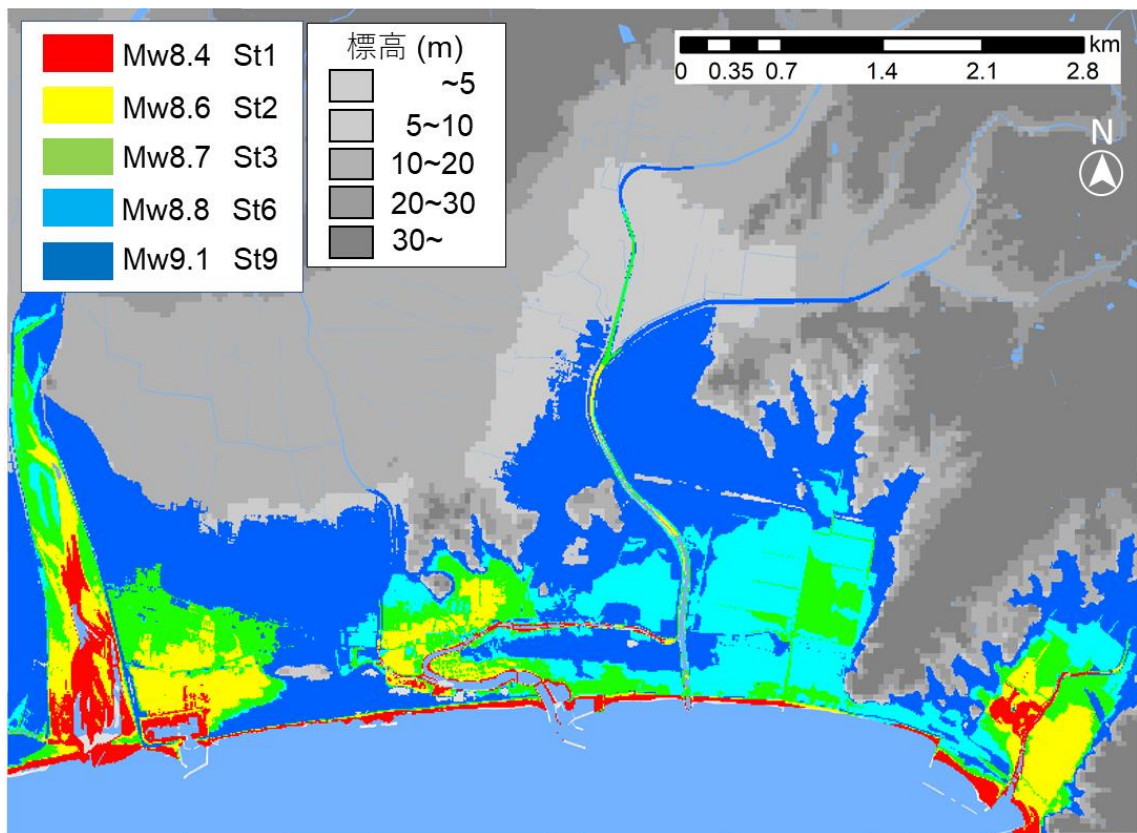


図 5-7C 各シナリオ津波の浸水範囲例(C 地域)

5.4.2 最適割り当て

この項では、このモデルの手法に基づいて最適割り当てを求めていく。猶予最大割り当ては第 4 章で述べた通り、避難開始時間には依存せず経路及び避難所が決まる。しかし、猶予最大割り当ての中から被災者数期待値を最小とするものとして選ばれる最適割り当ては、避難開始時間によって、選ばれるものが変わってくる。これを示す例が図 5-8 である。同図は、各シナリオで猶予最大割り当てする場合の避難開始時間ごとの期待被災者数を A 地域について示したものである。どのシナリオによる猶予最大割り当てでも最短割り当てより期待被災者数を減らすことがわかるが、その程度は様々である。また、最適割り当てとなる期待被災者数を最も減らす割り当ては、避難開始時間 20 分では S_t9 となるが、避難開始時間 40 分では、わずかながら S_t7 の方が期待被災者数を減らしていることが分かる。すなわち、最適割り当ては、対象とする避難開始時間によって変わるということである。しかし、この研究では、避難開始時間やシナリオに依存しない割り当てを求めることを目的としている。よって、避難目標時間を定めておき、その時間までの避難開始で被災者数期待値を最小化する割り当て最適割り当てとして求めることとする。5.3.2 で述べた通り、東日本大震災では地震発生から約 14 分経過時点で半数以上の人々が避難を開始したということである。よってこの研究では、避難目標時間を地震発生後 14 分とする。すなわち、地震発生 14 分での被災者数を最小化する割り当てを最適割り当てとする。

最適割り当てを与えるシナリオを選定する。各検討対象地域における猶予最大割り当てごとの期待被災者数を図 5-9A から図 5-9C に示す。また、どのような特性を示すシナリオ津波が最適割り当てを与えるかわかりやすくするため、津波シナリオごとの浸水面積および海岸線での平均津波到達時間を再掲する。A 地域および B 地域では S_t9 による猶予最大割り当てが、地域 C では S_t10 による猶予最大割り当てが、期待被災者数を最も減らす最適割り当てとなった。

次に、この最適割り当てを与える津波が定性的にいかなる特徴を持つのか検討していく。これがわかれば、別の地域にこのモデルを適用する際に、どのような津波を想定対象とすれば最適割り当てが求められるか、想定しやすくなると考えられる。今後の検討の際に対象とすべき津波シナリオの数を減らすことができるかもしれない。

ここで、猶予最大割り当て時の期待被災者数が、最短割り当て時とあまり変わらないもの（例えば、A 地域の S_t1 , S_t2 や B 地域の S_t5 , S_t7 , C 地域の S_t1 ）や、最短割り当て時より期待被災者数が増えているもの（例えば、C 地域の S_t3 から S_t5 および S_t11 , S_t12 ）が存在する。このようになる原因は、割り当てに用いる津波の浸水範囲が限られている点にある。すなわち、割り当てに用いる津波よりも浸水範囲が広範囲に及ぶ場合は、津波を迂回できず、最短割り当てに対する被災者数の減少量が少なかったり、逆に増やしてしまうこともあるということである。

期待被災者数は A 地域では S_t8 , S_t9 , S_t11 で、B 地域では S_t9 , S_t11 で、C 地域では S_t7 , S_t8 , S_t10 で比較的少なくなっていることが分かる。図 5-2-2 より、これらの想定津波は比較的浸水範囲が広いことが分かる。つまり、期待被災者数を減らす想定津波は浸水範囲が広い津波によって与えられることが分かる。これらの津波は津波到達が早いという特徴も併せ持つが、津波到達時間は第 4 章で述べた

通り、経路選択に影響を及ぼさない。すなわち、浸水開始時間が遅い想定津波で経路等の割り当てをしようが、浸水範囲が広がれば最適割り当て等のなりうる。

以上の結果より、広範囲に浸水を及ぼすシナリオで、最適割り当てがあたえられることが分かった。これにより、シナリオ数を無尽蔵に増やす必要はなくなるだろう。ただし、前述した通り、津波の浸水面積を過小評価したシナリオで割り当ててしまうと、最短割り当て時より被災者数を増やしてしまう結果にもなりうるので、広範囲に浸水を及ぼす恐れのある津波について、幅広く想定すべきである。

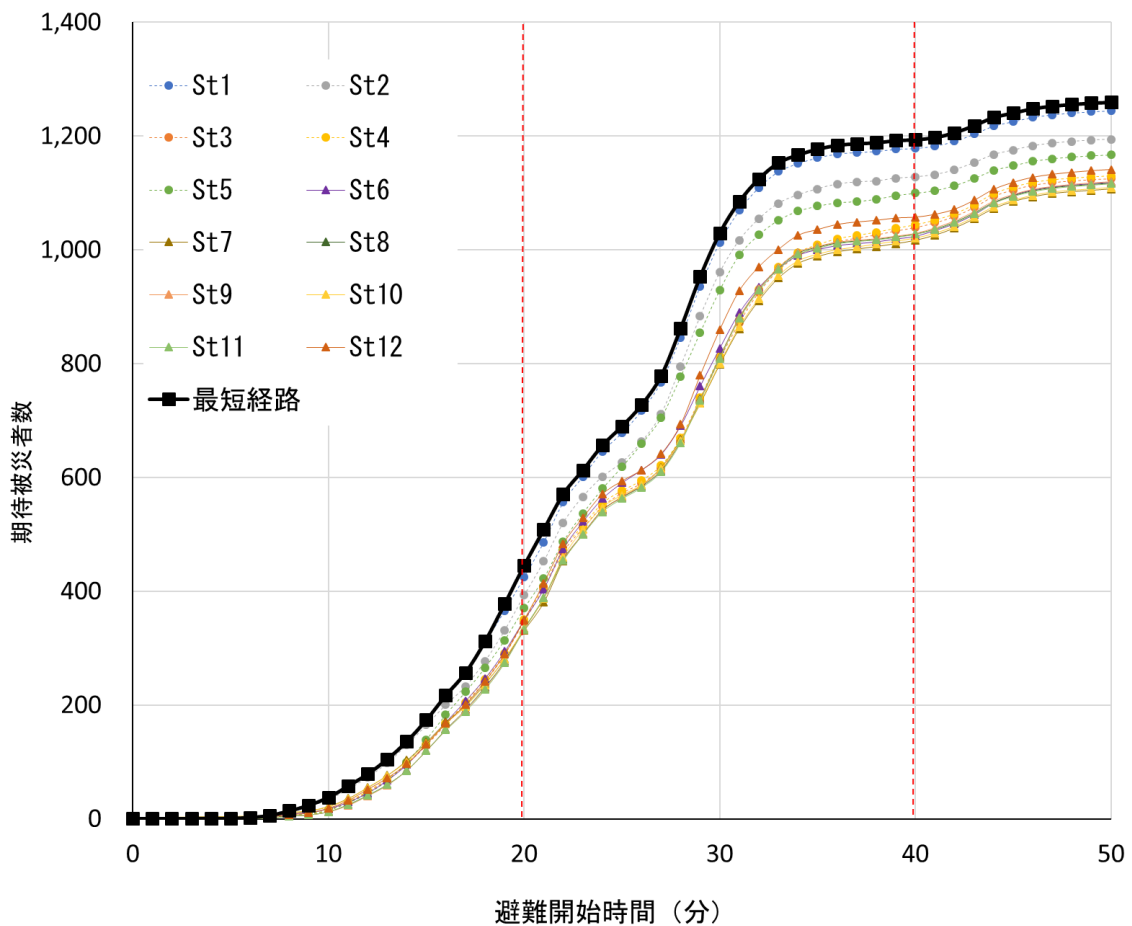


図 5-8 各津波シナリオによる猶予最大割り当てする場合の避難開始時間ごとの期待被災者数(A 地域)

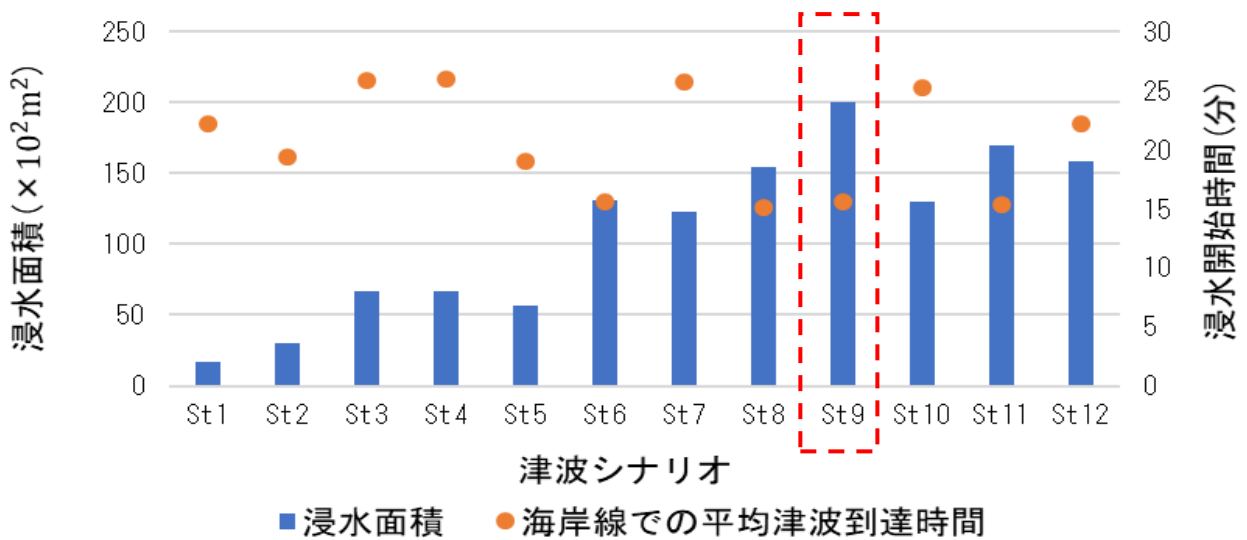


図 5-6A 津波シナリオごとの浸水面積および海岸線での平均津波到達時間(A 地域)(再掲): 図 5-9A で最適割り当てを与えるシナリオと判断されるシナリオを赤破線で囲む。

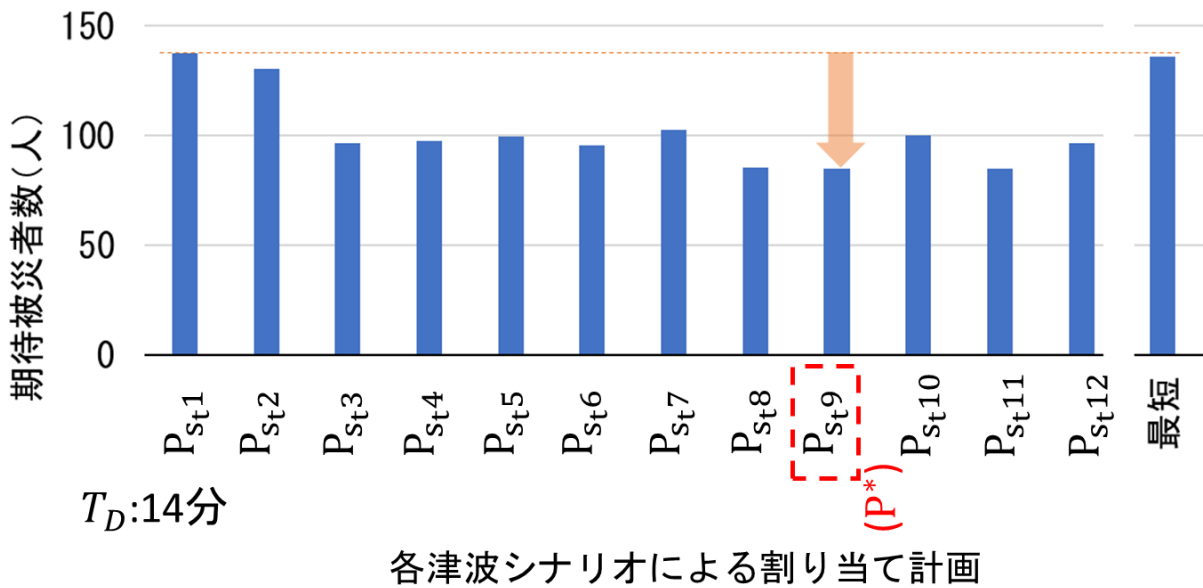


図 5-9A 各津波シナリオで猶予最大割り当てする場合の期待被災者数(A 地域): S_t9 による猶予最大割り当て P_{S_t9} での期待被災者数が最小となることから、最適割り当て P^* は S_t9 により得られることとなる。避難開始時間は 14 分としている。比較のために最短割り当て時の期待被災者数を示す。

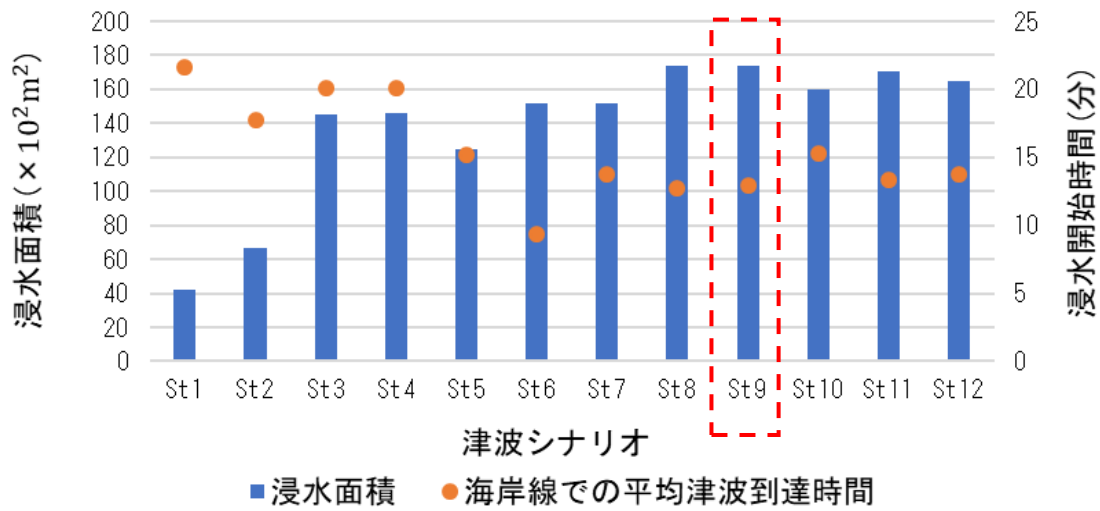


図 5-6B 津波シナリオごとの浸水面積および海岸線での平均津波到達時間(B 地域)(再掲):図 5-9B で最適割り当てを与えるシナリオと判断されるシナリオを赤破線で囲む。

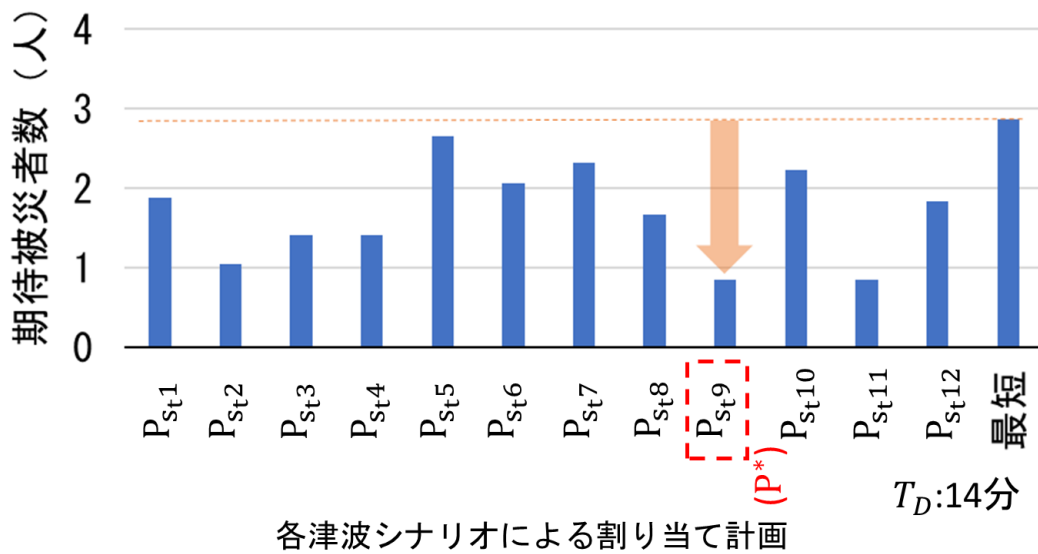


図 5-9B 各津波シナリオで猶予最大割り当てする場合の期待被災者数(B 地域):S_t9 による猶予最大割り当てP_{S_t9}での期待被災者数が最小となることから、最適割り当てP*はS_t9 により得られることとなる。避難開始時間は 14 分としている。比較のために最短割り当て時の期待被災者数を示す。

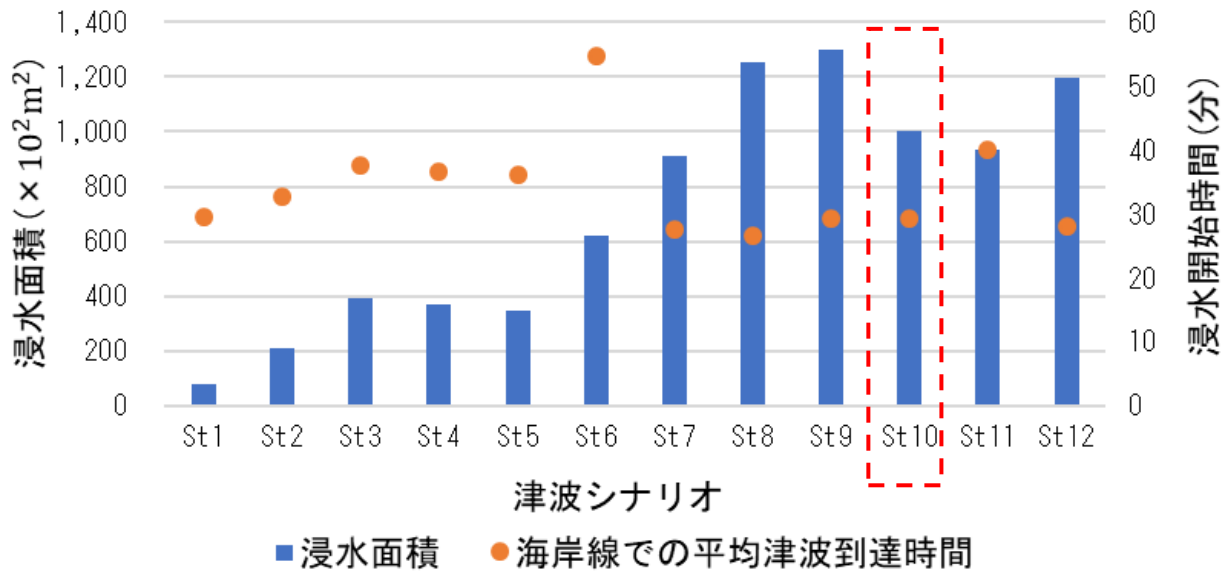


図 5-6C 津波シナリオごとの浸水面積および海岸線での平均津波到達時間(C 地域)(再掲):図 5-9C で最適割り当てを与えるシナリオと判断されるシナリオを赤破線で囲む。

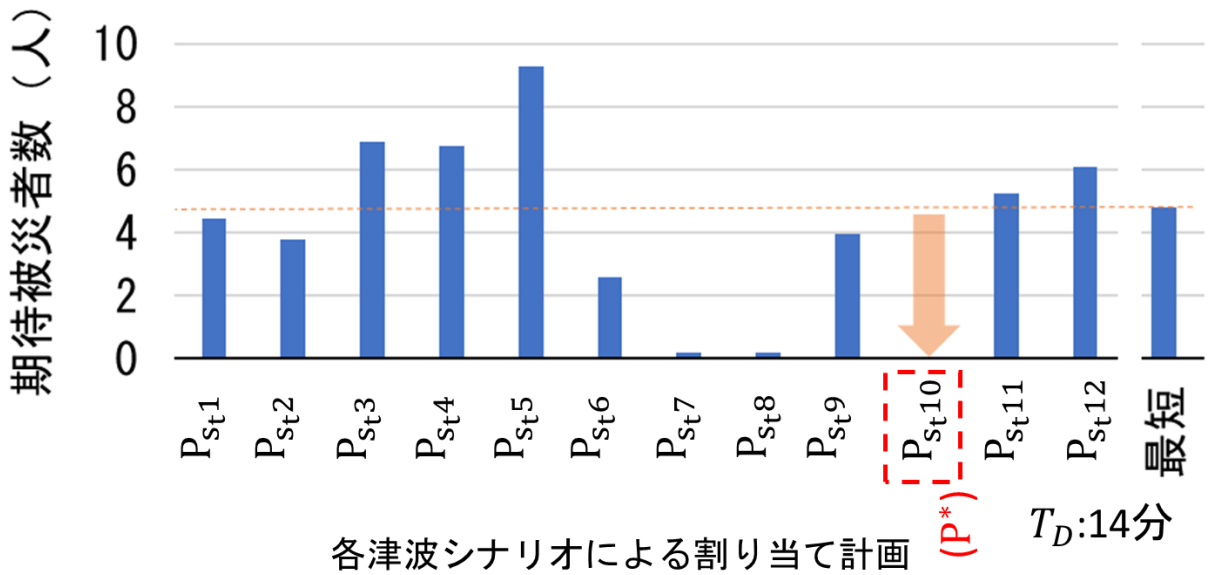


図 5-9C 各津波シナリオで猶予最大割り当てする場合の期待被災者数(C 地域): S_t10 による猶予最大割り当て P_{St10} での期待被災者数が最小となることから、最適割り当て P^* は S_t10 により得られることとなる。避難開始時間は 14 分としている。比較のために最短割り当て時の期待被災者数を示す。

5.4.3 避難所の収容可能人数に関する分析

この項では、避難者数の多いA地域とC地域を対象に、避難所の収容可能人数に対する割り当て避難者数を確認し、割り当て人数に見合う避難所規模となっているか評価を行う。加えて、超過率が大きい避難所に対して、割り当てを補正する。

図5-10Aは、A地域における避難所割り当てと、収容可能人数を超える避難所について、収容可能人数と、割り当て人数を示したものである。同図から一部避難所で超過していることがわかる。しかし、超過率は、多いところでも概ね120%程度である。ここで、避難所の収容可能人数は、避難所1m²当たり2名収容可能などの仮定に基づき、独自に見積もった値である。今回検討している避難所は、津波から避難するための緊急避難場所としての位置付けである。よって一時的に津波から逃れることができればよいと考えれば、1m²に3名の避難者が割り当てられることに、大きな問題はないと考える。従って、収容可能人数を大幅に超過することで問題となる避難所はないと結論付けられる。

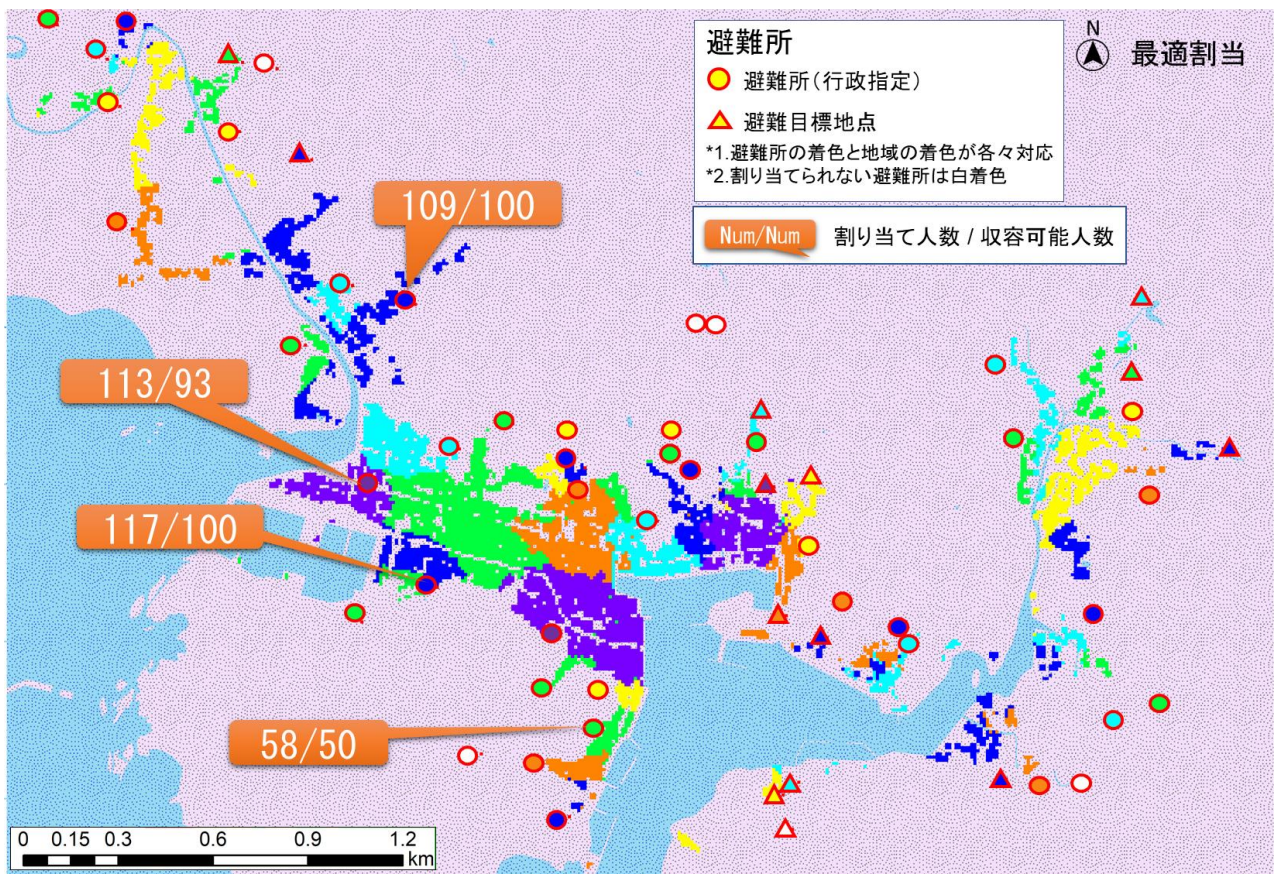


図5-10A 収容可能人数を超える避難所と超過人数(A地域):避難所中心の着色と地域の着色がそれぞれ対応する避難対象地域と避難所を示す。吹き出しが、避難所の収容可能人数と、超過人数を示す。収容可能人数を超過する避難所について表示。

次に、**図 5-10C** は、C 地域における収容可能人数を超える避難所について、収容可能人数と割り当て人数を示したものである。同図から避難所 A と避難所 B 共に、収容可能人数の 2 倍以上の避難者が割り当てられることとなっている。よって、この C 地域については、避難所の拡張または、避難所の割り当て直しが必要と考えられる。ここでは、避難所の割り当てなおし方を示し、実際に割り当てなおした場合の被災者数がどのようになるか検討する。

まず、避難所の収容可能人数が超過する場合の避難所割り当ての補正方法を示す。**図 5-10C** に示す最適割り当ては、シナリオ津波 S_t10 の猶予最大割り当てにより求まっている。従って、猶予時間を最大とする避難所に空きがないのであれば、そのエリアの避難者は次に猶予時間を最大とする避難所へ避難することで、避難所の収容可能人数を考慮しつつ、できるだけ猶予時間を大きくする避難所へ避難することができよう。佐藤ら(2015) [94]は、避難所の収容可能人数を考慮しつつ、避難可能範囲を最大化する方法を考案している。具体的には、避難者 1 人ずつ、最短となる避難所を割り当てていく。避難所の収容可能人数いっぱいになった場合は、すでに割り当てた避難者を、次に近い避難所へ割り当てる。この玉突き移動を繰り返すことで、地域全体の移動距離が最小となるようにしている。この佐藤らの方法を応用し、収容可能人数が大幅に超過する避難所に割り当てられる避難者について、最も猶予時間を多く与える避難所と、次に猶予時間を多く与える避難所とで猶予時間の差をとり、猶予時間差が小さい者から順次ついに近い避難所へ移動させていくこととした。ここで、割り当ての補正により、最適割り当てを与える津波シナリオは変わる可能性がある。従って、**図 5-9C** に示す、期待被災者数が比較的少ない S_t7 , S_t8 , S_t10 について、それぞれ割り当て補正を行う。補正前の避難所の収容可能人数と割り当て人数を**表 5-9**に、避難所番号を**図 5-12**示す。収容可能人数を超過する避難所のうち、収容可能人数の 2 倍以上が割り当てられている避難所に対し、補正を行い、収容可能人数の 2 倍を超えないように調整する。なお、割当先についても収容可能人数が 2 倍を超えないように調整する。この収容可能人数の 2 倍という値に根拠はない。あくまで目安として定めている。

この方法で避難所割り当てを補正し、避難開始時間 14 分での 12 シナリオでの期待被災者数を求めたところ、**図 5-13** のようになった。同図から、期待被災者数を最小化する最適割り当ては、 S_t8 から得られることが分かる。なお最短割り当ても、最適割り当て同様に避難所の収容可能人数に合わせて、次に近い避難所までの距離の増加が小さい者から順次避難所を変更することとして割り当てを補正した。この際の避難所割り当てを**図 5-11**に示す。また、補正後の収容人数を**表 5-9**に示す。

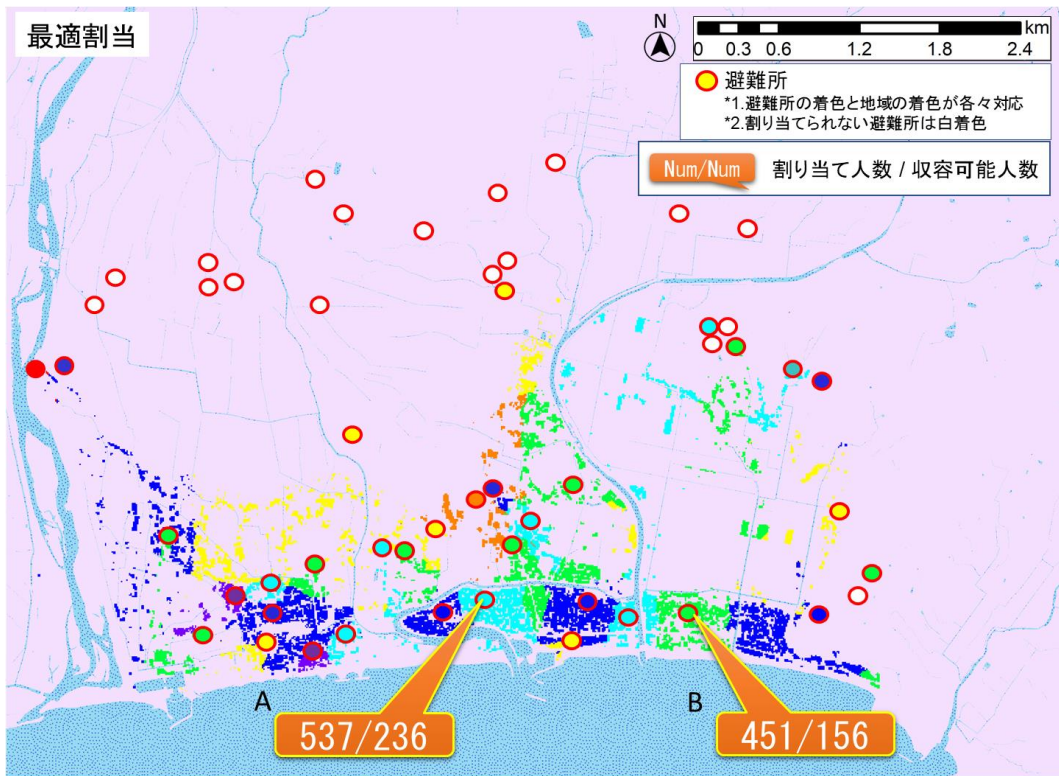


図 5-10C 収容可能人数を超える避難所と超過人数(C 地域): 避難所中心の着色と地域の着色がそれぞれ対応する避難対象地域と避難所を示す. 吹き出しが, 避難所の収容可能人数と, 超過人数を示す. 収容可能人数の 2 倍を超過する避難所について表示.

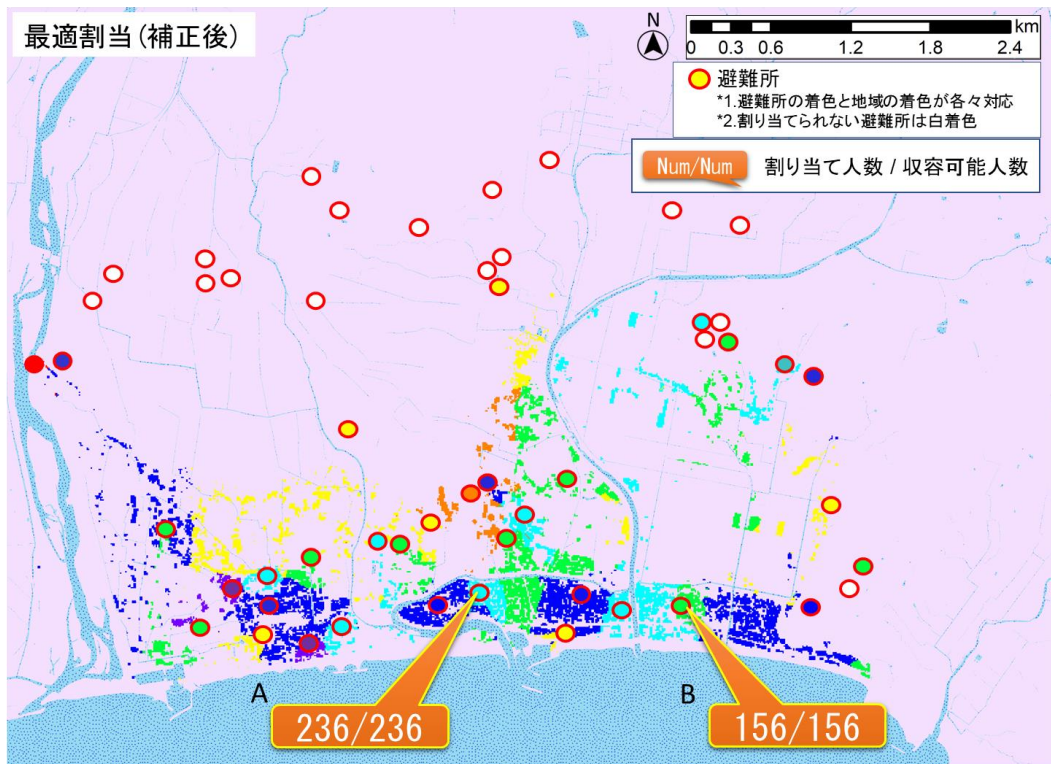


図 5-11 収容可能人数を超える避難所と超過人数(C 地域)

第 5 章 実在する地域への適用

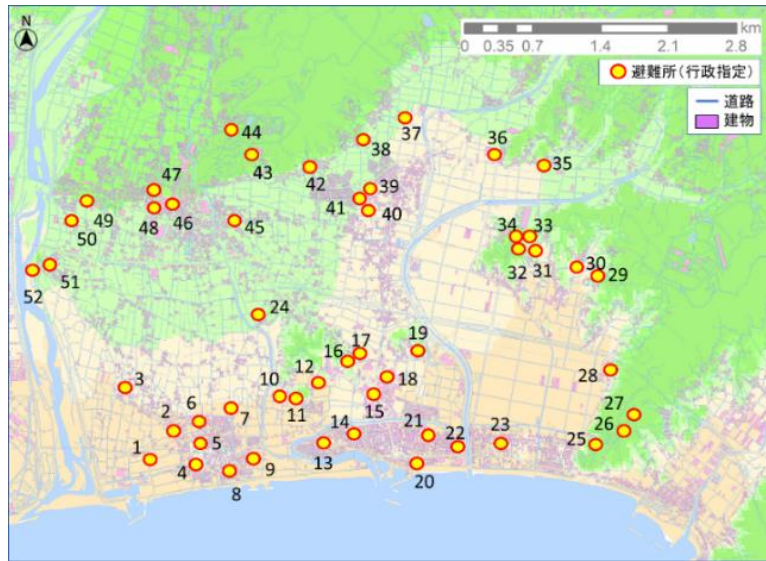


図 5-12 避難所番号

表 5-9 各割り当てにおける避難所の収容可能人数と割り当て人数： 図 5-12 の避難所番号と対応する。黄色着色箇所が収容可能人数の 2 倍を超える避難所の割り当て人数。緑着色箇所が補正箇所。補正後とは、 S_t8 による割り当て人数を収容可能人数の 2 倍を超えないように補正した際の割り当て人数を示す。

| 避難所No | 収容可能人数 | 割り当て人数 | | | | | 避難所No | 収容可能人数 | 割り当て人数 | | | | | 避難所No | 収容可能人数 | 割り当て人数 | | | | |
|-------|--------|--------|-----|------|-----|-----|-------|--------|--------|-----|------|-----|-----|-------|--------|--------|---------|------|----|-----|
| | | St7 | St8 | St10 | 最短 | 補正後 | | | St7 | St8 | St10 | 最短 | 補正後 | | | St7 | St8 | St10 | 最短 | 補正後 |
| 1 | 128 | 74 | 79 | 81 | 148 | 79 | 21 | 500 | 13 | 721 | 27 | 787 | 726 | 41 | 制限なし | 0 | 23 | 0 | 0 | 23 |
| 2 | 201 | 74 | 85 | 84 | 227 | 85 | 22 | 263 | 464 | 269 | 572 | 343 | 368 | 42 | 制限なし | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 169 | 517 | 107 | 34 | 333 | 107 | 23 | 156 | 311 | 459 | 451 | 626 | 312 | 43 | 制限なし | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 122 | 49 | 97 | 50 | 131 | 97 | 24 | 800 | 270 | 471 | 511 | 51 | 471 | 44 | 制限なし | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 550 | 355 | 392 | 452 | 107 | 392 | 25 | 制限なし | 564 | 564 | 558 | 431 | 612 | 45 | 制限なし | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 421 | 63 | 90 | 68 | 188 | 90 | 26 | 制限なし | 0 | 41 | 0 | 0 | 41 | 46 | 制限なし | 0 | 5 | 0 | 0 | 5 |
| 7 | 180 | 145 | 72 | 68 | 199 | 72 | 27 | 制限なし | 41 | 27 | 29 | 0 | 27 | 47 | 制限なし | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 309 | 22 | 73 | 46 | 145 | 73 | 28 | 制限なし | 77 | 43 | 102 | 141 | 43 | 48 | 制限なし | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 |
| 9 | 77 | 161 | 59 | 55 | 122 | 59 | 29 | 制限なし | 6 | 38 | 1 | 7 | 38 | 49 | 制限なし | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 制限なし | 14 | 40 | 31 | 51 | 40 | 30 | 制限なし | 128 | 8 | 77 | 75 | 8 | 50 | 制限なし | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 制限なし | 35 | 74 | 53 | 55 | 74 | 31 | 制限なし | 88 | 155 | 139 | 0 | 155 | 51 | 制限なし | 43 | 16 9 | 283 | 18 | 169 |
| 12 | 制限なし | 3 | 4 | 7 | 71 | 4 | 32 | 制限なし | 0 | 93 | 0 | 0 | 93 | 52 | 制限なし | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 |
| 13 | 487 | 316 | 354 | 343 | 378 | 406 | 33 | 制限なし | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 14 | 236 | 814 | 563 | 537 | 565 | 471 | 34 | 制限なし | 231 | 167 | 228 | 140 | 167 | | | | | | | |
| 15 | 1600 | 149 | 97 | 244 | 216 | 130 | 35 | 制限なし | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 16 | 500 | 193 | 194 | 220 | 140 | 194 | 36 | 制限なし | 0 | 15 | 49 | 0 | 15 | | | | | | | |
| 17 | 500 | 8 | 8 | 8 | 9 | 8 | 37 | 制限なし | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 18 | 制限なし | 272 | 345 | 164 | 143 | 345 | 38 | 制限なし | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 19 | 制限なし | 594 | 302 | 646 | 329 | 302 | 39 | 制限なし | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 20 | 207 | 13 | 20 | 27 | 222 | 20 | 40 | 制限なし | 153 | 365 | 154 | 207 | 365 | | | | | | | |

※収容可能人数は、「平成 29 年 11 月 四国防災共同教育センター資料[95]」に示される箇所については同資料を参照。それ以外の避難所については、1 m²当たり 2 名収容可能などの仮定に基づき独自に算出。

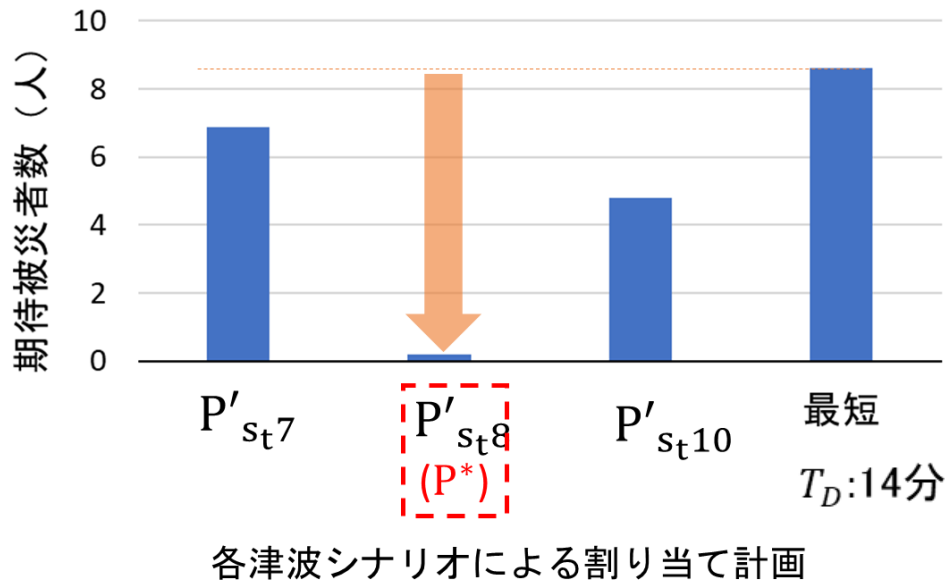


図 5-13 割り当ての補正に伴う期待被災者数の変化(C 地域): S_t8 による猶予最大割り当て P_{S_t8} を収容可能人数により補正した P'_{S_t8} での期待被災者数が最小となることから、最適割り当て P^* は P'_{S_t8} により得られることとなる。避難開始時間は14分としている。比較のために最短割り当て時の期待被災者数を示す。

5.4.4 避難路の渋滞に関する分析

この項では、避難者数の多い A 地域と C 地域を対象に、避難中の混雑による避難遅延の有無を確認する。

このシミュレーションでは、避難者の移動速度は一定としている。しかし、渋滞が発生すれば、避難者の移動速度は想定より遅くなり、被災者数もこの想定結果より多くなる恐れがある。この研究では、経路閉塞がない場合について簡易的に渋滞の把握を行う。このために道路 1 m²当たりの避難者数すなわち混雑度を算出する。具体的には K19 は対象地域を格子状に小領域に分割し、この小領域に猶予時間を与えることで経路設定する。渋滞の把握はこの小領域に単位時間当たり何人の避難者がいるかカウントする。この操作を避難時間全体を通して行い、最大値を算出することでピーク時交通量を求める。このピーク時交通量を小領域に占める道路面積で除すことで混雑度が求まる。この混雑度について、中央防災会議の首都直下地震避難対策等専門調査会 [96]では 1.5 人/m²以下の場合には一般に自由歩行が可能であると設定している。よってこの研究でも同値を援用する。

図 5-14A に A 地域のピーク時交通量を示す。同図破線部が他の箇所比べて突出してピーク時交通量が多いことが分かる。図 5-15A にこの地点の状況写真を示す。同地点は道路幅員が 4 m 程度の狭隘な道路である。同箇所の混雑度を算出する。10 m 格子で区切られた小領域のおよそ 40 m²が道路の占める面積であり、ピーク時交通量はおよそ 40 人である。よって混雑度は 1.0 人/m²と算出され、1.5 人/m²に満たないことから自由歩行は可能、すなわち渋滞は発生しないと判断できる。同様に C 地域も計算する。図 5-14C に C 地域のピーク時交通量を、図 5-15C に図 5-2-9C 破線部の状況写真を示す。すると、4m(A 地点)または 5m(B 地点)道路に対し、ピーク時交通量はおよそ 10 人程度であり、混雑度は 0.25 人/m²(A 地点)または 0.2 人/m²(B 地点)となり、渋滞は起こらないことが分かる。しかし仮にこれらの道路で自動車による避難が行われると、歩行者の通行可能面積が減ることから、歩行速度への影響も出てくる。よって、この道路では避難時の自動車侵入は制限されるべきであろう。

今回対象とした地域では混雑は発生しない結果となった。仮に、渋滞が発生するような場合は、渋滞箇所にあたる道路が避難経路として割り当てられている避難者を別の道路に割り当てる必要が発生する。このような場合は、前項で示した避難所の割り当て変更と同様に、対象避難者の猶予時間に注目して、猶予時間減少量が小さい者から順次割り当て変更していくことで割り当て修正ができる。このように、ある道路を通らせたくないような場合は、その避難者に対しては当該道路が存在しないこととして経路割り当てを行うことである道路を通らない割り当てが可能となる。

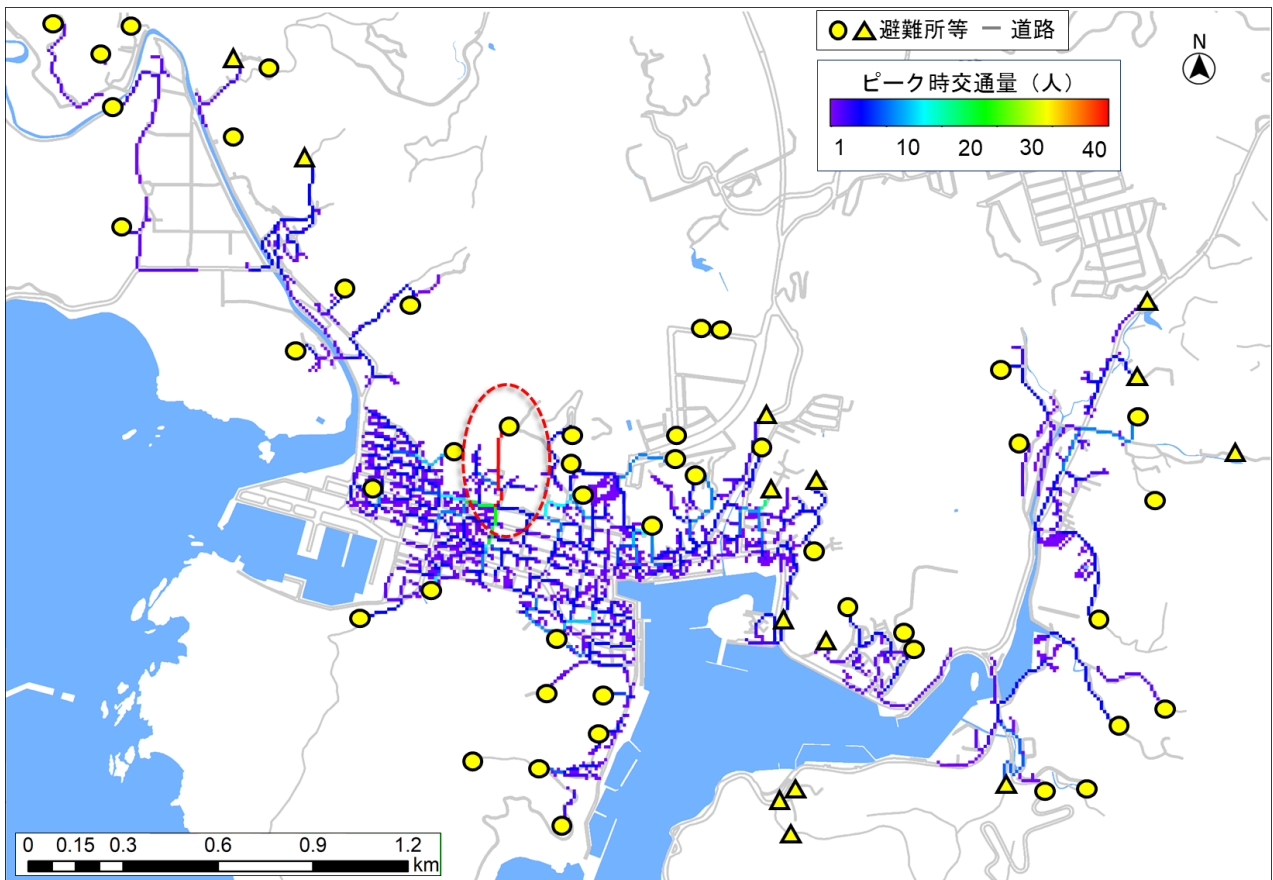


図 5-14A 避難者のピーク時交通量(A 地域):破線部分にピーク時交通量が多い個所を示す.



図 5-15A ピーク時交通量の多い道路の現況(A 地域):図 5-14A でピーク時交通量が多い破線部の現況を示す.
Google Earth で取得.

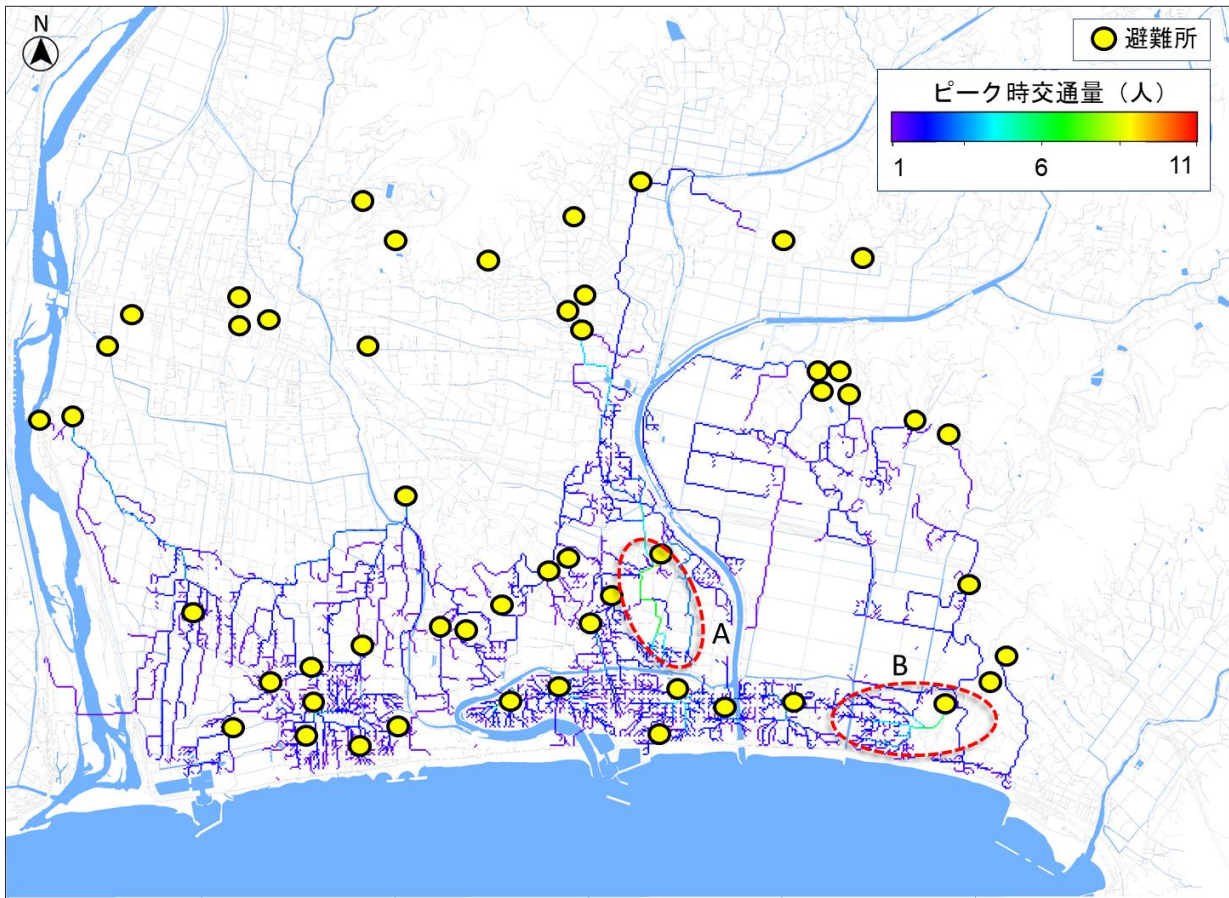


図 5-14C 避難者のピーク時交通量(C 地域):破線部分にピーク時交通量が多い個所を示す.



図 5-15C ピーク時交通量の多い道路の現況(C 地域):図 5-14C でピーク時交通量が多い破線部の現況を示す.
Google Earth で取得.

5.4.5 被災者数に関する分析

この項では、最適割り当てによる被災者数が最短割り当てとどの程度異なるか比較検討する。

(A 地域)

A 地域について検討を行う。図 5-16A は、各津波シナリオが発生した際の被災者数を、最短割り当て、最適割り当ておよび、各津波シナリオによる猶予最大割り当てを行った場合を示したものである。避難開始時間(T_D)14 分での最短割り当て(青)と最適割り当て(朱)およびリアルタイムで来襲津波が予測できた場合に相当する、各津波シナリオによる猶予最大割り当て(灰)での被災者数を示す。各シナリオの浸水特性を示す図 5-6A と合わせて考えると、浸水範囲が大きい津波や津波到達時間が比較的早い津波では被災者が発生する。これに対し、浸水範囲が小さい S_t1 から S_t4 までの $M_w8.7$ 以下のシナリオでは被災者が発生しないことがわかる。

被災者が発生する津波について、被災者数を比べる。最適割り当てを行うことで、最短割り当てに比べて被災者数を半分程度に減少している。特に被災者数が多い S_t6 , S_t8 , S_t9 , S_t11 では、被災者数を 200 名から 300 名程度減少させることが分かる。また、 S_t9 により割り当てられた最適経路での避難は、同津波以外でも被災者数を減少させている。すべてのシナリオの平均値でも、約 4 割を超える被災者数を減少させている。これは、割り当てに用いる想定津波以外の津波にも効果的に被災者数を減少できるということである。同図に示す期待被災者数によると、避難開始時間 14 分で最適割り当てにより、最短割り当てに比べて 50 名程度の期待被災者数の減少が見込めることがわかる。次に来襲津波による猶予最大割り当てと最適割り当てによる被災者数を比べる。リアルタイム津波予測が可能となれば、来襲予定の津波による猶予最大割り当ての選択も可能である。どのシナリオでも来襲津波による猶予最大割り当てで被災者数をさらに減少させているが、ほぼすべてのシナリオでその程度はわずかである。すなわち、このモデルによる最適割り当てで、第 2 章で述べたリアルタイム経路探索の問題を解決しつつ、同程度の効果を得ることができると分かる。

次に、避難開始時間によって、どの程度、最適割り当ての効果が得られるか検討する。図 5-17A(a) は、最短割り当てと最適割り当てで得られる期待被災者数を避難開始時間ごとに求めたものである。図 5-16A の期待被災者数は、図 5-17(a)の経過時間 14 分後に一致する。図 5-17A(b)はその差を、全避難者数に示す割合で表現したものである。図 5-17A(a)からどの避難経路を選択しても地震発生から 10 分程度以内の避難開始で被災者はほとんど出ないことがわかる。図 5-17A(b)から、すべての避難開始時間で、最適割り当てにより、最短割り当てに比べて被災者数が減少していることがわかる。期待被災者数の差が、避難開始時間 30 分程度まで順調に伸びる。そして同時刻を境に縮小に転じている。これは、避難開始時間 30 分までは、避難開始が遅れて、切迫する状況下ほど最適割り当ての効果が大きくなることを示している。その一方で、避難開始時間 30 分以降では、津波が浸入してきて避難を開始しないことで、経路を選択する以前に被災してしまうためである。

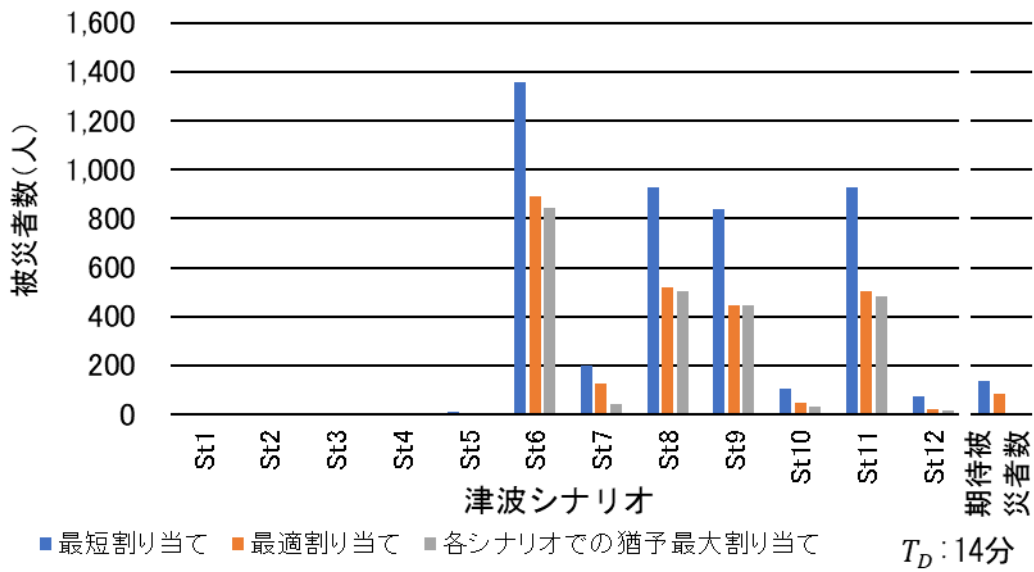


図 5-16A 各津波シナリオ，割り当て方法の違いによる被災者数(A 地域)：各シナリオでの被災者数の違いを，最短割り当て，最適割り当て(P*)，各シナリオで猶予最大割り当てした場合について表示．避難開始時間は14分．期待被災者数を参考に示す．この期待被災者数は，図 5-17A の矢印部に一致する．

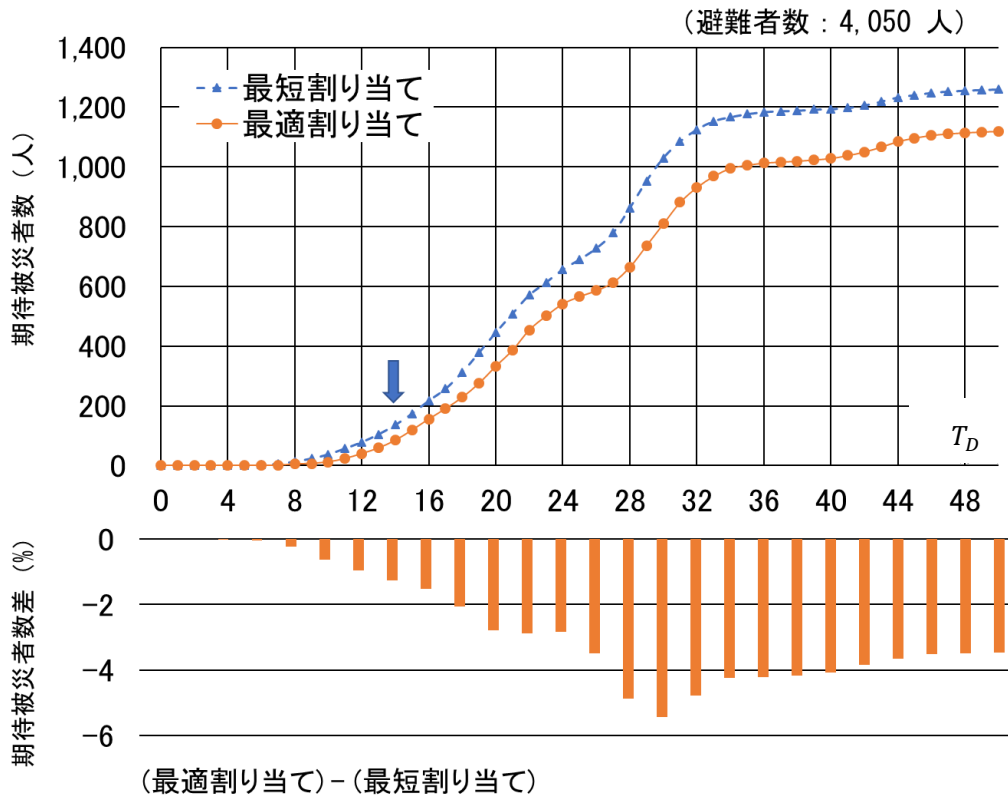


図 5-17A 割り当て方法の違いによる期待被災者数の経時変化とその差(A 地域)：上段が最短割り当てと最適割り当てをそれぞれ示す．下段にその差を避難者数全体での比で示す．

(B 地域)

B 地域について検討を行う。図 5-16B は、避難開始時間 (T_D) 14 分における、各津波シナリオが発生した際の被災者数を、最短割り当て、最適割り当ての別で示したものである。A 地域同様に、浸水が早い S_t6 や、広範囲に浸水を及ぼす S_t8 や S_t9 のシナリオ津波で被災者数が多くなっていることがわかる。次に、各割り当て方法による被災者数を比べる。特に被災者数が多い S_t6 , S_t8 , S_t9 , S_t11 では、被災者を 1/3 程度に減少させることが分かる。また、A 地域同様に、 S_t9 による最適割り当てに従った避難は、同津波以外でも被災者数を減少させている。すなわち、割り当てに用いる想定津波以外の津波に対しても効果的に被災者数を減少できるということである。

次に、避難開始時間によって、どの程度、最適割り当ての効果が得られるか検討する。図 5-17B(a) は、最短割り当てと最適割り当てで得られる期待被災者数を避難開始時間ごとに求めたものである。図 5-16B に示す期待被災者数は、図 5-17B(a)の経過時間 14 分後に一致する。図 5-17B (b)はその差を、全避難者数に占める割合で表現したものである。図 5-17B(a)からどの避難経路を選択しても地震発生からおよそ 10 分程度以内の避難開始で被災者はほとんど出ないことがわかる。図 5-17B (b)から、すべての避難開始時間で、最適割り当てにより、最短割り当てに比べて被災者数が減少していることがわかる。

期待被災者数の差が、避難開始時間 16 分程度まで順調に伸びる。そして同時刻を境に多少歪ではあるが縮小に転じている。これは、A 地域同様、避難開始時間 16 分までは、避難開始が遅れて、津波に遭遇する可能性が大きくなるほど最適割り当ての選択効果が大きくなることを示している。その一方で、避難開始時間 16 分以降では、津波が浸入してきても避難を開始しないことで、経路を選択する以前に被災してしまうためである。グラフが歪になる要因は、この値算出にかかわる人数が数名程度と小さいためであると考えられる。ここで、A 地域と異なり、期待被災者数の全避難者数に対する減少割合は、多いところでも避難開始時間 16 分での 1%程度である。このようになる理由は、B 地域は農村地域で、複数の集落が離散的に存在し、各集落の山側に 1 つの避難所がある。このことから、選択肢となる避難所が限られる状況であり、最短割り当てでほぼ最適な割り当てとなるためであると考えられる。

図 5-17B(a)には、陸側の避難所に限定した最短割り当てによる期待被災者数も算出した。これは、B 地域は A 地域と異なり、比較的単純な海岸線を有している。また、従来津波避難については、海側など、水辺に向かった避難はタブーとされる(例えば、消防庁指針 [23])。よって、単純に海側にある避難所には向かわないと制御すれば、このモデルによらなくても簡単に被災者数を最短割り当てに比べて減少できるかもしれないとの疑問に基づくものである。結果は、図 5-17B(a)のとおりで、陸側の避難所に限定した最短割り当てでは両地域とも被災者数を増やす結果となった。これは海側にある避難所に避難しないこととしていることから、避難開始地点に対し、少しでも海側にある避難所を機械的に排除してしまい、その結果、遠方の避難所に向かうことになるためである。割り当て状況は図 5-19B で後述する。海側への避難を排除することで、被災者数が増えるという結果は、避難開始場所によっては、海側に避難する方が避難成功する可能性が高いことを示す。よって、従来の方針では海側への避難はタブーとされるが、必ずしもすべて否定されるべきではないということである。

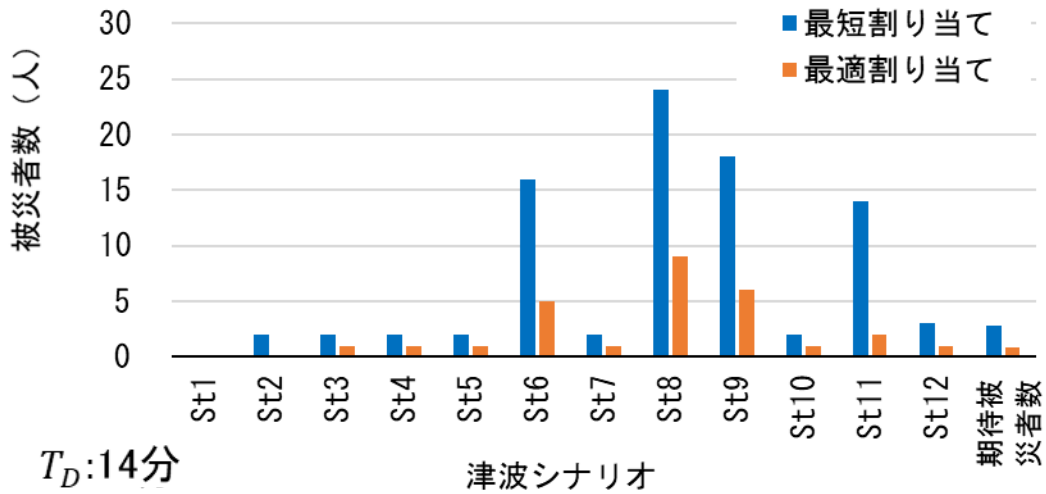


図 5-16B 各津波シナリオ, 割り当て方法の違いによる被災者数(B 地域):各シナリオでの被災者数の違いを, 最短割り当て, 最適割り当て(P*)について表示. 避難開始時間は 14 分. 期待被災者数を参考に示す.

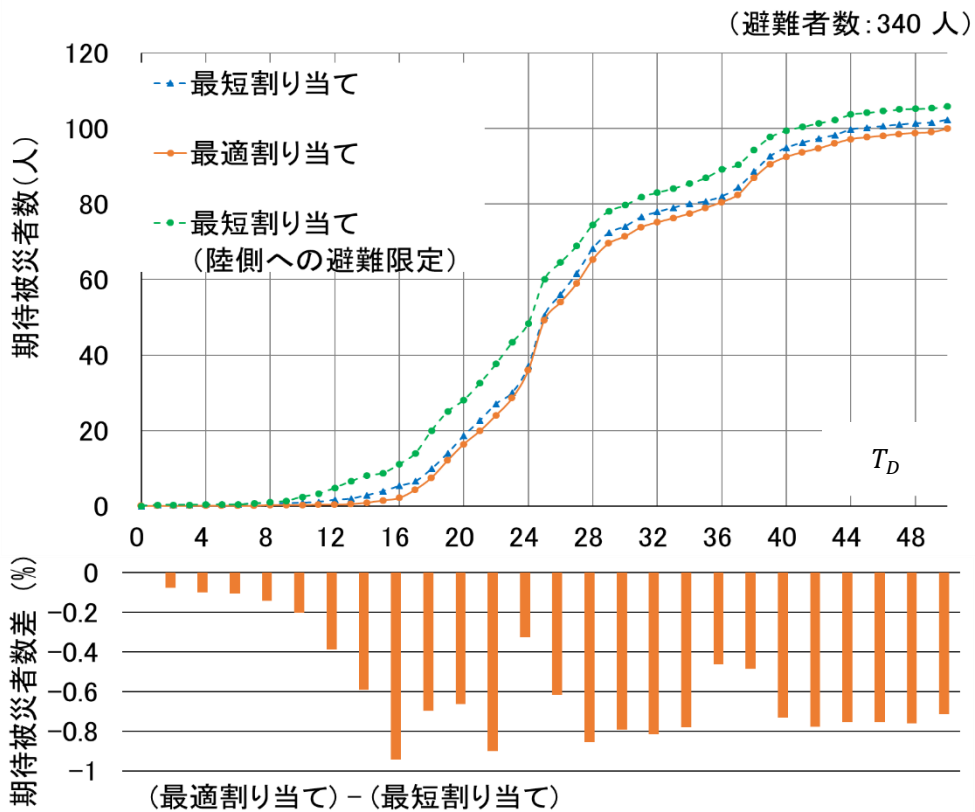


図 5-17B 割り当て方法の違いによる期待被災者数の経時変化とその差(B 地域):上段が最短割り当てと最適割り当て, 海側に避難しないこととする最短割り当てをそれぞれ示す. 下段に最短と最適の差を避難者数全体での比で示す.

(C 地域)

C 地域について検討を行う。図 5-16C(a)は、避難開始時間(T_D) 14 分の、図 5-16C (b)は 25 分における、各津波シナリオが発生した際の被災者数を、最短割り当て、最適割り当てを行った場合を示したものである。避難開始時間 14 分では、最短割り当てでは最大 30 名程度の被災者が発生するが、最適割り当てでは数名程度まで減らすことができる。期待被災者数を比べると、10 人程度いる被災者数がほぼゼロになっていることが分かる。6,700 名という全体の避難者規模に比べて、被災者が少ない理由は、当該地域への津波到達が遅いためである。そこで、避難開始時間 25 分での被災者数を示す図 5-16C(b)についても確認する。同図から、最短割り当てに比べて、最適割り当てで、被災者数が比較的多い S_t7 以降のシナリオで 200 人から 700 人程度減少していることが分かる。図 5-16C(a)および(b) から、C 地域でも他の地域同様に、 S_t8 による最適割り当てに従った避難は、同津波以外でも被災者数を減少させている。すなわち、割り当てに用いる想定津波以外の津波にも効果的に被災者数を減少できることが確認できる。

次に、避難開始時間によって、どの程度、最適割り当ての効果が得られるか検討する。図 5-17C(a)は、最短割り当てと最適割り当てで得られる期待被災者数を避難開始時間ごとに求めたものである。避難所の収容可能人数による割り当ての補正前後での期待被災者数も示す。図 5-16C(a)に示す補正後の期待被災者数は、図 5-17C(a)の経過時間 14 分後に一致する。図 5-17C (b)はその差を、全避難者数に示す割合で表現したものである。図 5-17C (a)からどの避難経路を選択しても地震発生からおおよそ 15 分程度以内の避難開始で被災者はほとんど出ないことがわかる。図 5-17C (b)から、すべての避難開始時間で、最適割り当てにより、最短割り当てに比べて被災者数が減少していることがわかる。

C 地域では、収容可能人数を大幅に超える避難所が存在したことから、収容可能できる人数となるよう、割り当ての補正を行った。これにより、一部の避難者は猶予時間が最大となる避難所に割り当てることができなくなった。このことについて、収容可能人数を受け入れ可能となるように避難所を改修すべきかどうかということについて検討する。最適割り当てについて、割り当て補正前後の期待被災者数は、地震発生 36 分後まではほぼ一致する状況である。当該地域の避難目標時間は 14 分と仮定した。これは、避難所の割り当て変更によって、被害を受ける避難者はあまりいないことを意味する。よって、当該地域では、避難所の収容可能人数を増やすための改修は不要であると考えられる。

期待被災者数の差が、避難開始時間 40 分程度まで順調に伸びる。そして同時刻を境に平行に推移する。これは、他の地域同様、避難開始時間 40 分までは、避難開始が遅れて、津波に遭遇する可能性が大きくなるほど最適割り当ての選択効果が大きくなることを示している。その一方で、避難開始時間 40 分以降では、津波が侵入してきても避難を開始しないことで、経路を選択する以前に被災してしまう人が出始めるためである。C 地域では、期待被災者数の全避難者数に対する減少割合は、4%程度となった。期待被災者数が全体の 4%しか減らないことに効果が少ないと思われるかもしれない。しかし、シナリオによっては 1,000 名を超える被災者数の軽減効果があることに留意されたい。図 5-16C(b)は地震発生 25 分後の避難開始時の場合の被災者数であるが、期待値の減少量は 1%程度であるが、 S_t8 では 700 人程度減少させている。

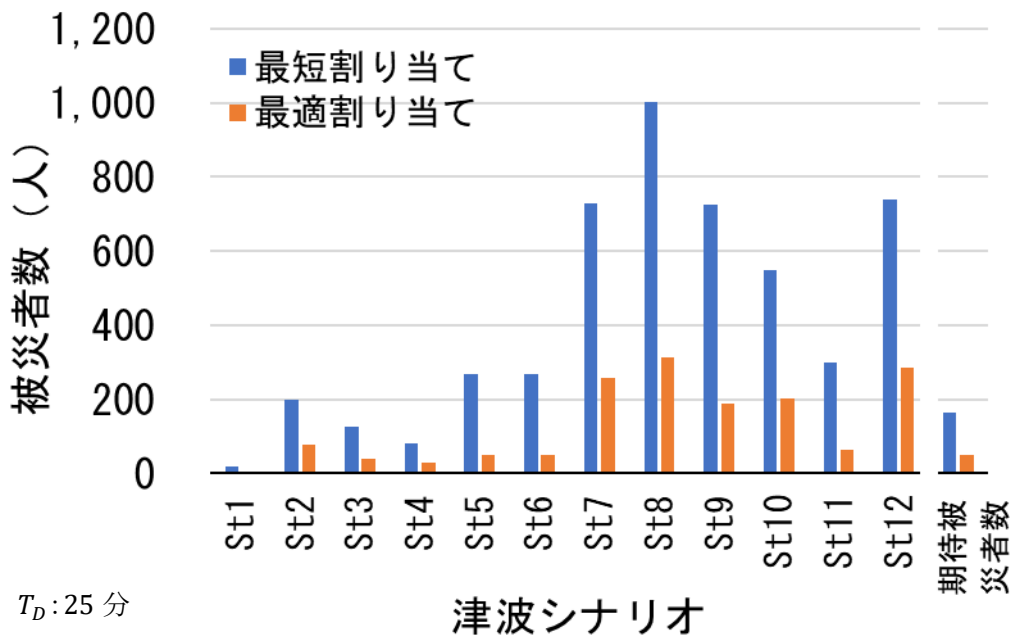
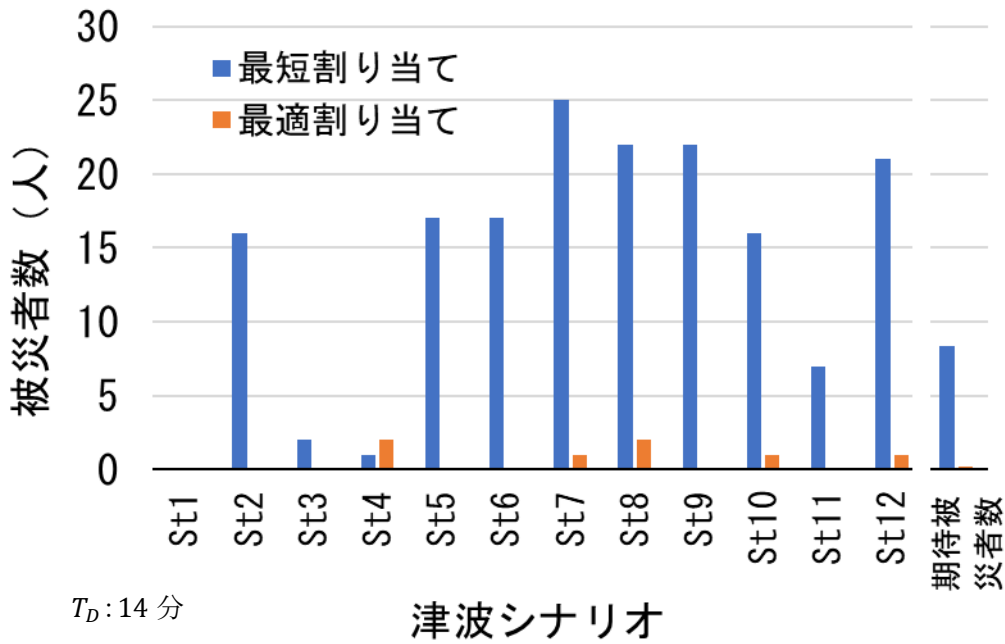


図 5-16C 各津波シナリオ、割り当て方法の違いによる被災者数(C 地域):各シナリオでの被災者数の違いを、最短割り当て、最適割り当て(P*)について表示. 避難開始時間は 14 分(上段)と 25 分(下段). 期待被災者数を参考に示す.

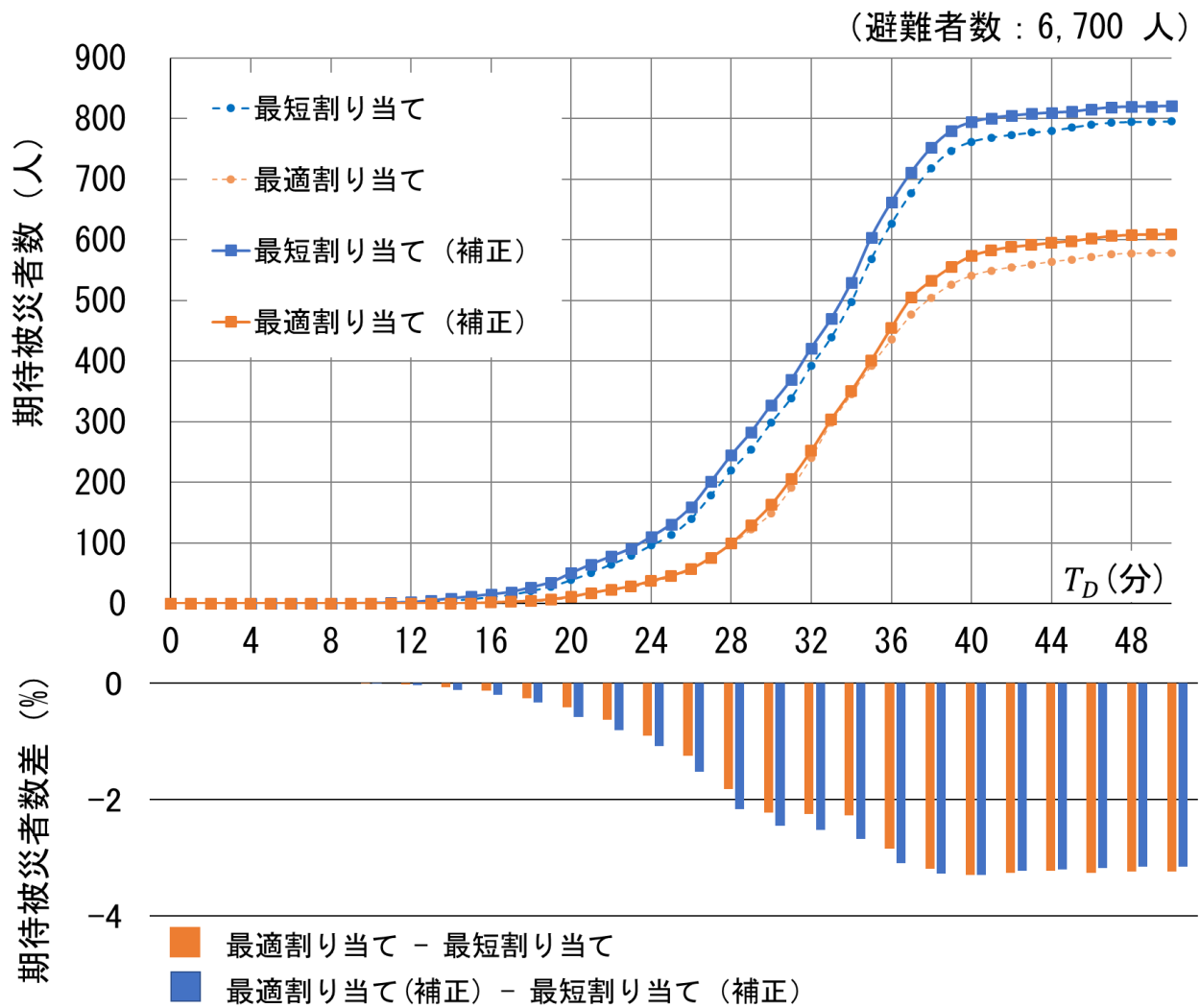


図 5-17C 割り当て方法の違いによる期待被災者数の経時変化とその差(C 地域): 上段が最短割り当てと最適割り当てについて、人数補正前と後でそれぞれ示す。下段に最短と最適の差を避難者数全体での比で示す。

5.4.6 避難困難地域に関する分析

この項では、最短経路選択と最適経路選択による猶予時間がどの程度あるか、避難困難地域がどの程度出現するか確認する。複数のシナリオ津波を考えたとうえで、どの津波にも遭遇しないための避難開始時間は、式(16)に示すように、複数のシナリオ津波毎に得られる猶予時間の最小値（以降、「最小猶予時間」という。）を取得することで得られる。

$$T_{L(x,y)}^* = \min(T_{L(x,y),S_{t1}}, T_{L(x,y),S_{t2}}, \dots). \quad (16)$$

最小猶予時間分布のうち、避難目標時間として仮定する14分以下となる地域は、シナリオ津波によっては避難困難地域となる恐れのある地域（以下、単に「避難困難地域」という。）と解することができる。最適割り当てを行ってもなお避難が間に合わない可能性がある地域では、避難準備のための猶予時間を確保する目的でのハード対策や高台移転など、避難以外の対策を優先して行う必要があるだろう。このハード対策述べた通り、優先順位は、避難困難地域の広さや、その地域にどの程度の猶予時間が与えられるかを比較することで検討できよう。

図 5-18A(a)は A 地域における最短割り当てと最適割り当てを行った場合の最小猶予時間を示す。図 5-18A(b)はそれぞれの割り当ての際の避難開始時間 14 分における避難困難地域を示す。破線で示す部分では、最短割り当てで避難困難地域となるが、最適割り当てでは避難困難地域が解消されているのが分かる。図 5-18A(b)から、最適割り当てを行ってもなお、海岸付近では猶予時間が 14 分より小さく、避難困難地域となっている状況が分かる。これらの地域では、具体的に猶予時間より早く避難を行う必要がある地域として指定するか、早期のハード対策の必要があるだろう。図 5-18A(c)は最短割り当てと最適割り当てによる最小猶予時間の差を示す。同図によると、最適割り当てによる猶予時間が増える範囲は主に内陸部であることが分かる。図 5-18A(d)に最適割り当てを与えるシナリオ津波の浸水開始時間を示す。同図によると、図 5-18A(c)で猶予時間が大きくなる範囲が浸水開始時間に大きい遅延が発生する範囲に近接していることが分かる（同図破線部分）。第4章で分析した通り、このような地域では浸水開始が遅い範囲を通過して避難することで、猶予時間が多く確保できるということである。一方で、海岸付近ではほとんど猶予時間が増加していない。これは道路分布や避難所の位置を踏まえても、最寄りの避難所までの最短経路以外に有効な避難所や避難経路が存在しないことを示す。特に図 5-18A(d)の一点鎖線で示したような地域は 3 方を海に囲まれ、陸につながる方に近接して 1 つだけ避難所があることから、猶予時間を考えたうえではほかに有効な避難所や避難経路が存在しないということである。先に述べたようにこのような地域では津波による浸水開始を遅らせるハード対策等が必要となるだろう。

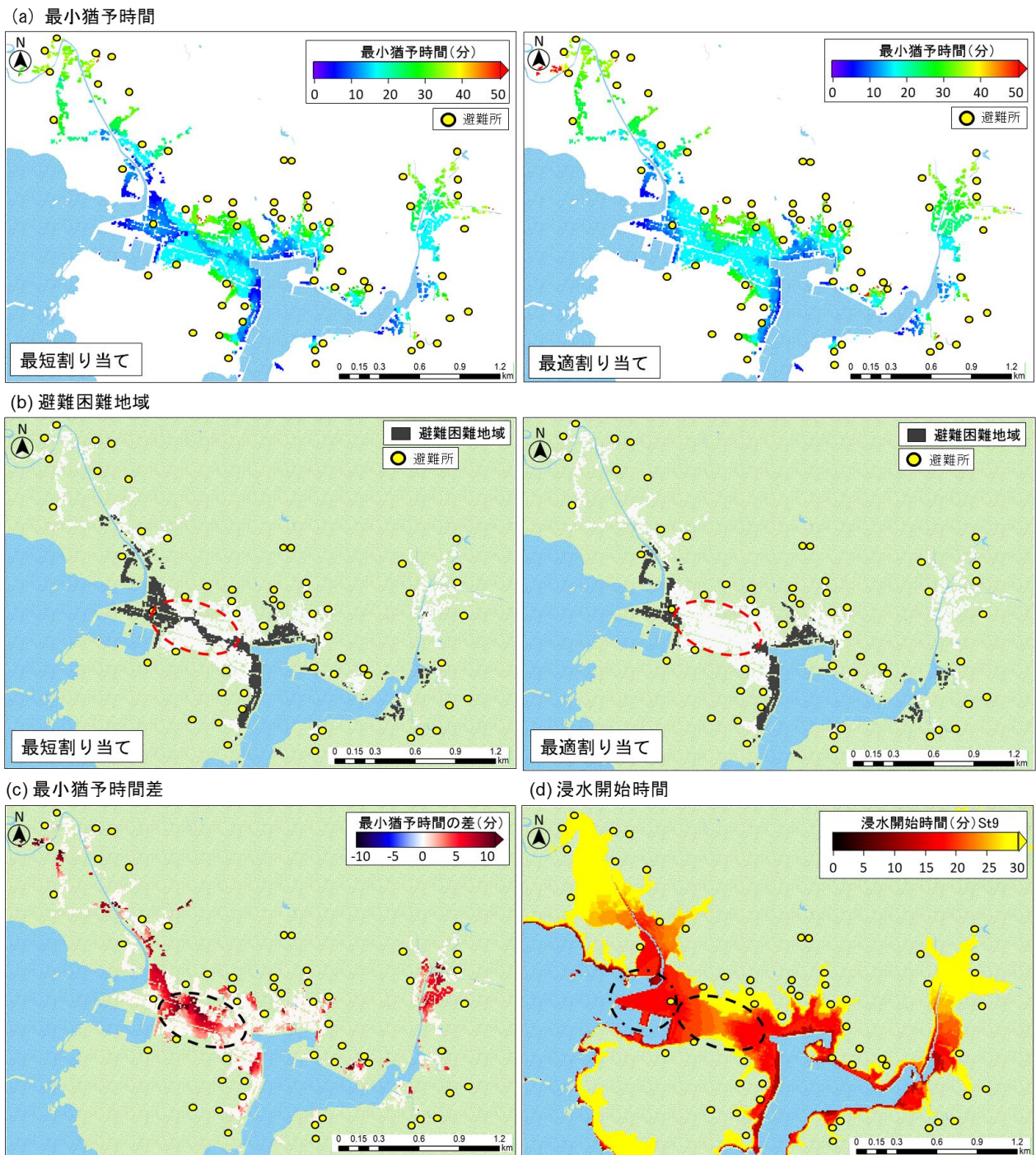


図 5-18A A 地域における各割り当てによる、猶予時間分布と避難困難地域、浸水開始時間。(a)最小猶予時間分布。(b) 避難困難地域。(c) 最適割り当てによる最小猶予時間の最短割り当てとの差。(d) 最適割り当てを与えるシナリオ津波の浸水開始時間分布。(b)の避難開始時間は地震発生 14 分後としている。

図 5-18B(a)および図 5-18B (b)に、B 地域における最適割り当ておよび最短割り当てを行った場合の最小猶予時間と、避難開始時間 14 分における避難困難地域を示す。A 地域と異なり、避難開始間 14 分では、避難困難地域はほとんどないことが分かる。北側に発生している避難困難地域も、猶予時間は 14 分に近く、特に早急な避難開始を行うことができれば、浸水開始時間を遅くする目的でのハード対策を急ぐ必要ないように思われる。図 5-18B (c)に猶予時間差を示す。同図から、最短割り当てに比べて最適割り当てにより猶予時間が増加する地域はあまりないことが分かる。これは、前項 5.4.5 で説明した通り、当該地域の避難所と道路網の分布状況から、最短経路が最適経路に一致するためである。

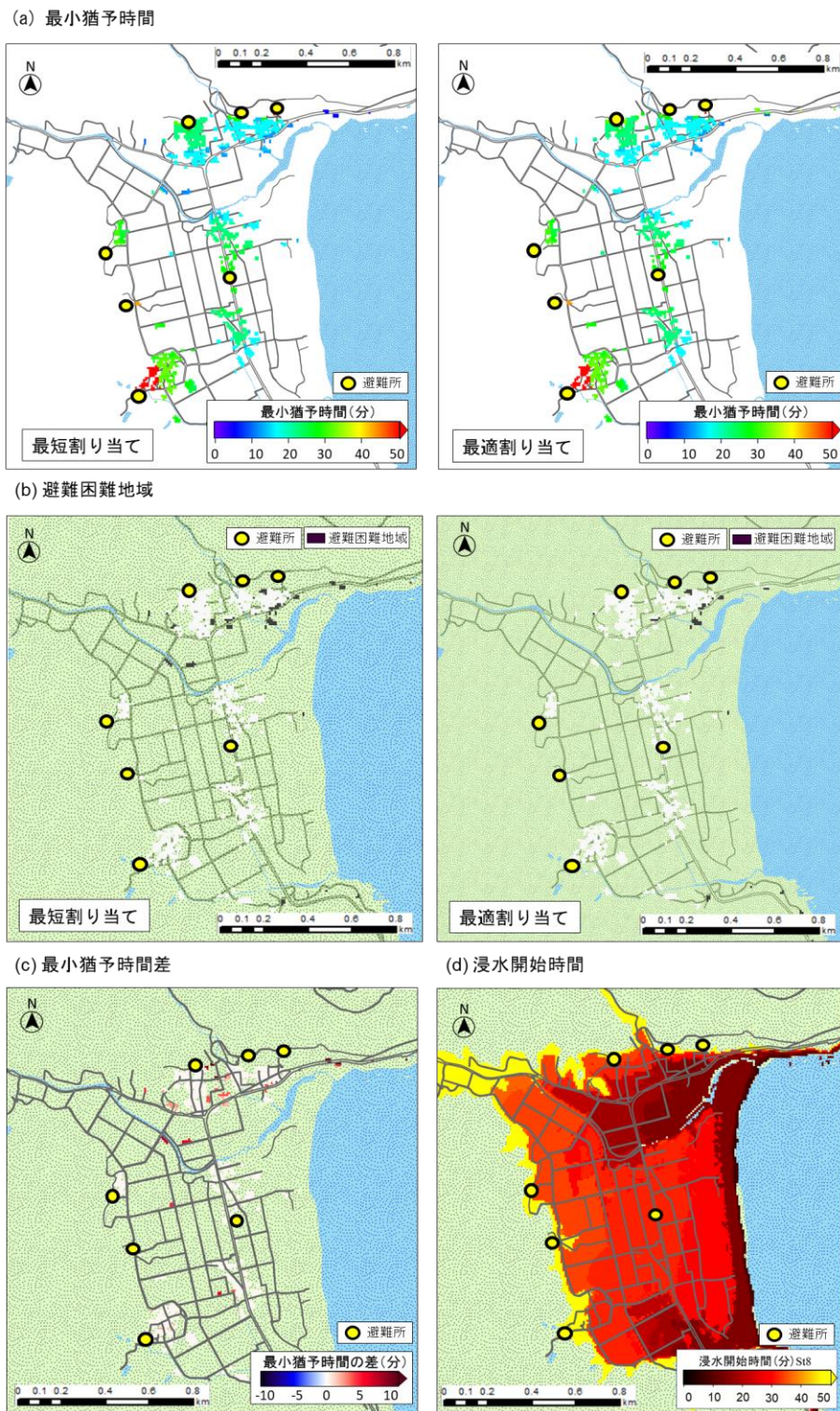
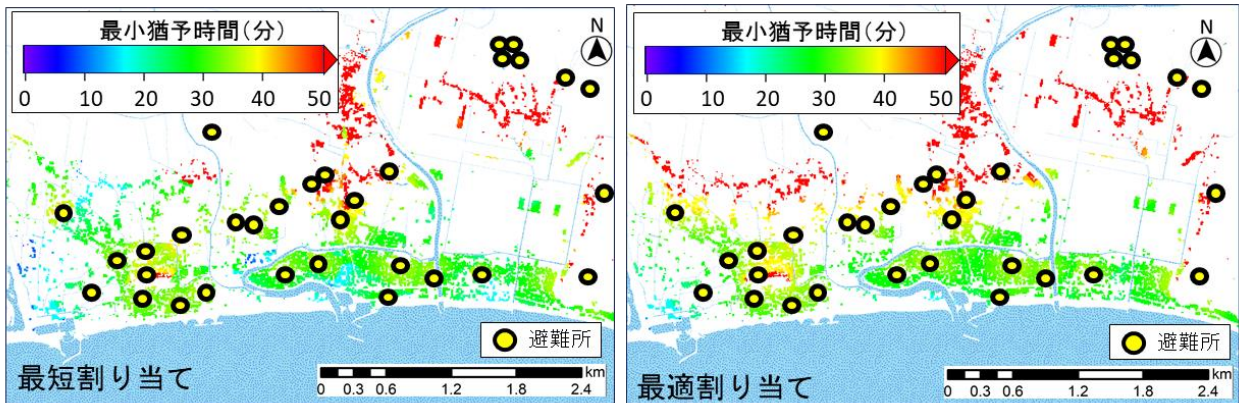


図 5-18B B 地域における各割り当てによる、猶予時間分布と避難困難地域、浸水開始時間。(a)最小猶予時間分布。(b) 避難困難地域。(c) 最適割り当てによる最小猶予時間の最短割り当てとの差。(d) 最適割り当てを与えるシナリオ津波の浸水開始時間分布。(b)の避難開始時間は地震発生14分後としている。

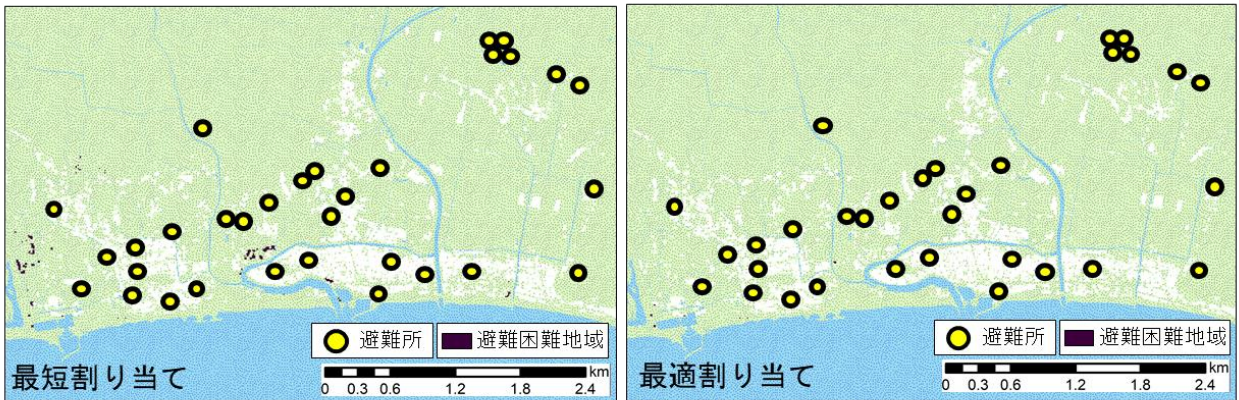
図 5-18C(a)および図 5-18C (b)に、C 地域における最適割り当ておよび最短割り当てを行った場合の最小猶予時間と避難開始時間を 14 分での避難困難地域を示す。B 地域同様に、避難開始間 14 分では、避難困難地域はほとんどないことが分かる。前章の表 5-1 に示す避難対象人口だけを考えれば、他も地域に比べて当該地域の方が避難対象人口が多いことから人的被害軽減を目的としたハード対策が急がれるべきと考えられよう。しかし、避難を行うという前提に立てば、当該地域で避難困難地域となる箇所はほとんどなく、A 地域のハード対策が急がれるべきであるということが分かる。

図 5-18C (c)に猶予時間差を示す。同図から、B 地域と異なり、内陸部で猶予時間が多く確保できることが分かる。これは、B 地域では浸水範囲外に抜け出して避難を可能とする山間部の道路がないのに対し、内陸部まで平野が続き、道路網が存在する C 地域では、いち早く浸水範囲外に抜け出して浸水しない道路を通る避難を可能とするためである。

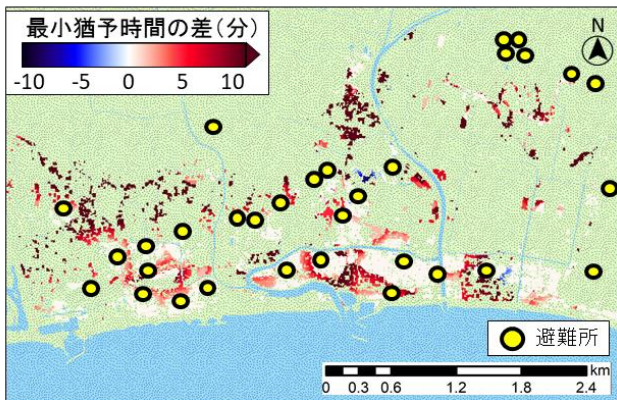
(a) 最小猶予時間



(b) 避難困難地域



(c) 最小猶予時間差



(d) 浸水開始時間

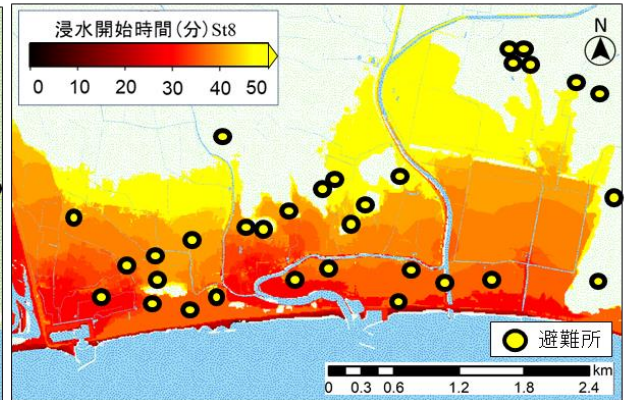


図 5-18C C 地域における各割り当てによる、猶予時間分布と避難困難地域、浸水開始時間。(a)最小猶予時間分布。(b) 避難困難地域。(c) 最適割り当てによる最小猶予時間の最短割り当てとの差。(d) 最適割り当てを与えるシナリオ津波の浸水開始時間分布。(b)の避難開始時間は地震発生14分後としている。

5.4.7 割り当て避難所と避難経路に関する分析

(A 地域)

図 5-19A は、A 地域における避難所割り当てを示したものである。最短割り当てを示す図 5-19A (a) は、避難所までの最短経路を通して最短距離にある避難所を選択することとした割り当てで、最適割り当てを示す図 5-19A (b) は、前項までに求めた最適経路及び避難所を割り当てたものである。避難所を示す凡例の着色と、避難範囲を示す地域の着色が各々対応する。これらの図から、避難所割り当ては離散的でなく、避難所周辺にまとまっていることがわかる。最短割り当てによる、割り当て境界が、避難所間を結ぶ直線を 2 等分する法線とほぼ一致するのに対し、最適割り当てでは、主に避難所から海側にある地域がその避難所の割り当て地域となっていることが分かる。図 5-19A (c) は最適割り当てのうち、避難する方向によって、海側に向かう場合と陸側に向かう場合を別に示した図であり、図(b)の一点鎖線の範囲を描画している。同図からわかるように一部地域の避難者は海側に避難することが分かる。これは 4.2.3 に示す事象に一致する。このように海側に避難する避難者は全体の一割程度である。

次に、避難経路割り当ての例を図 5-20A に示す。同図は(a)および(b)の赤破線の範囲について描画したものである。最短経路で避難する場合と、最適経路で避難する場合の経路割り当て例である。被災想定に用いる想定津波は、最適経路を与える想定津波同様の S_t9 である。表 5-10 には、各経路選択の際の猶予時間と、割り当て状況を示す。避難開始地点 2, 5, 7 では、最短経路と最適経路で、向かう避難所は同じだが、選択経路だけを変更することで、最短経路で津波に遭遇する場合も、最適経路とすることで避難所まで到達できることが分かる。それ以外の避難開始地点では、最適経路で向かう避難所も変更することで、津波に遭遇せずに避難できることを示している。同図には、想定津波の浸水開始時間分布を示すが、最適割り当てでは、浸水開始が遅い、より内陸部の道路を通っていることが分かる。表 5-10 から、この例では、最適経路を通ることで、最短経路に比べ、3 分から 10 分程度の猶予時間の増加がある。

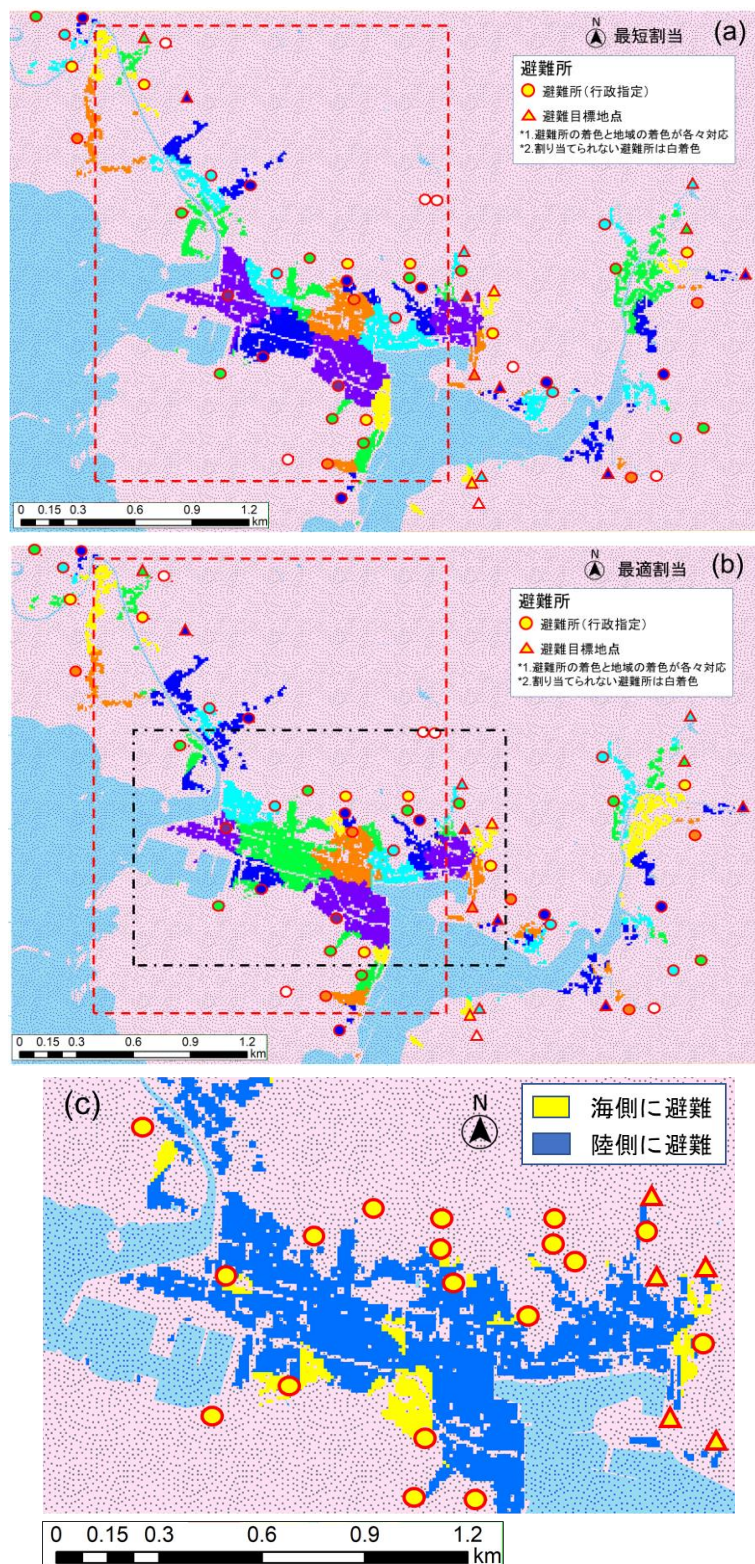


図 5-19A 各割り当て方針における避難所割り当て(A 地域): (a)および(b)は最短割り当てと最適割り当てを示す. (c)は海側に避難することとなる地域を示す. (a)(b)の赤破線は、図 5-20A の範囲を示し、黒破線は(c)の範囲を示す.

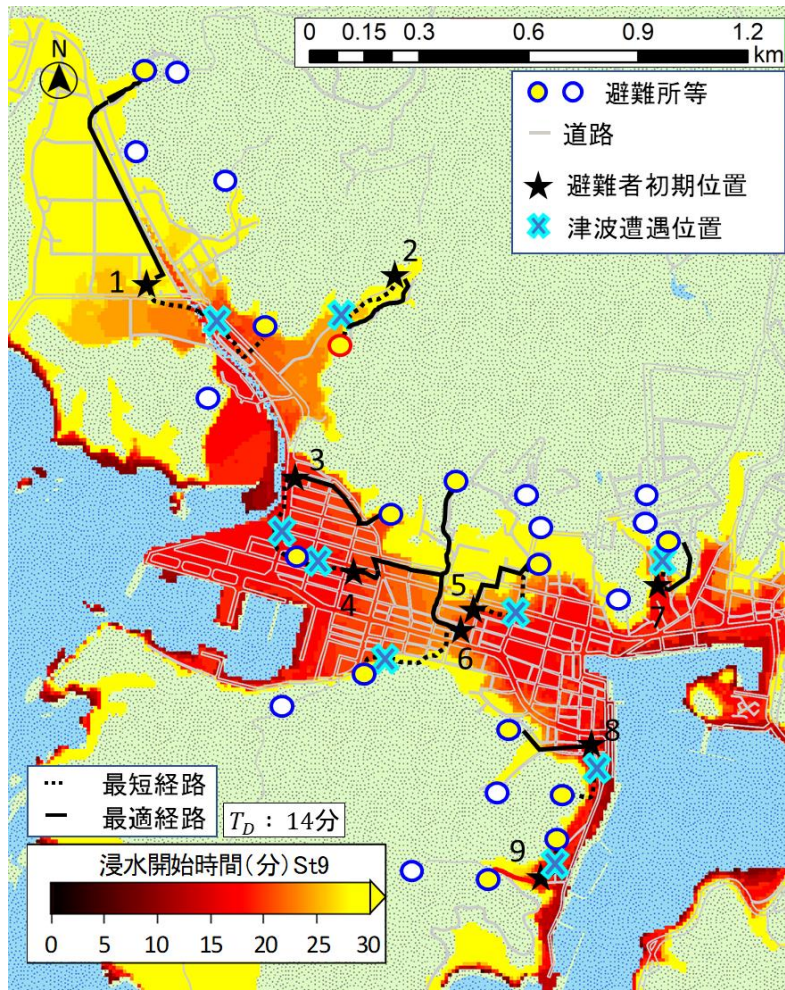


図 5-20A 各割り当て方針における避難所経路割り当て例(A 地域): 星印にいる避難者が, 最短(黒線)又は最適(赤線)を通過して黄色丸の避難所へ向かう状況を示す. 地震発生 14 分後の避難開始では X 印で津波に遭遇する.

表 5-10 各避難者の各経路選択での猶予時間および割り当て状況

| 避難開始地点 | 猶予時間 (分) | | 割り当て状況 |
|--------|----------|------|--------|
| | 最短経路 | 最適経路 | |
| 1 | 11.5 | 20.5 | 避難所が変更 |
| 2 | 20.0 | 32.2 | 経路のみ変更 |
| 3 | 11.0 | 14.1 | 避難所が変更 |
| 4 | 13.9 | 18.5 | 避難所が変更 |
| 5 | 19.3 | 23.1 | 経路のみ変更 |
| 6 | 13.6 | 20.3 | 避難所が変更 |
| 7 | 17.3 | 20.7 | 経路のみ変更 |
| 8 | 10.3 | 14.3 | 避難所が変更 |
| 9 | 12.4 | 16.9 | 避難所が変更 |

(B 地域)

図 5-19B は、B 地域における(a)最短割り当て、(b)最適割り当て、(c)陸側にある避難所に対して最短割り当てを示したものである。最短割り当てと、最適割り当てでは、主に地域の北側で割り当ての違いがみられる。ここで、割り当てに大きな違いがみられない理由は、5.4.5 で述べた通り、B 地域の避難所の立地と集落形成に要因があると考えられる。すなわち、離散的に存在する集落に対し、主に集落の山側に避難所がある状況であり、選択肢が限られ、最短割り当てと最適割り当てが一致するためである。5.4.5 の結果で、陸側にある避難所に限定する場合は、被災者数が増えることを示したが、これは、(c)に示す通り、割り当て範囲を避難所より海側か、陸側化で機械的に割り当ての境界を設定するため、すぐ海側に避難所がある場合も、海側という理由で排除されてしまうためである。当該地域で最適割り当てにより海側に避難することとなる避難者数は全体の 2 割程度であった。

次に、避難経路割り当ての例を最短経路による避難と、最適経路による避難を別に図 5-20B に示す。被災想定に用いる想定津波は、最適経路を与える想定津波同様の S_t9 である。表 5-11 には、各経路選択の際の猶予時間と、割り当て状況を示す。避難開始地点 2 では、最短経路と最適経路で、向かう避難所は同じだが、選択経路だけを変更することで、最短経路で津波に遭遇する場合も、最適経路とすることで避難所まで到達できることが分かる。避難開始地点 2 以外の避難開始地点では、最適経路で向かう避難所も変更することで、津波に遭遇せずに避難できることを示している。特に避難開始地点 3 や 5 では、最短で進むよりも、山側の浸水境界となる道路を通ることで、津波に遭遇することなく避難所へ到達できている。この B 地域は図 5-20B からわかる通り、ほとんどの道路が浸水範囲内にあることが分かる。仮に、浸水範囲外に、避難所に続く道路があれば、避難開始地点 3 で示すようにいち早く浸水範囲外に抜け出すことで猶予時間を多く確保できよう。表 5-11 から、この例では、最適経路を通ることで、最短経路に比べ、3 分から 10 分程度の猶予時間の増加があることがわかる。

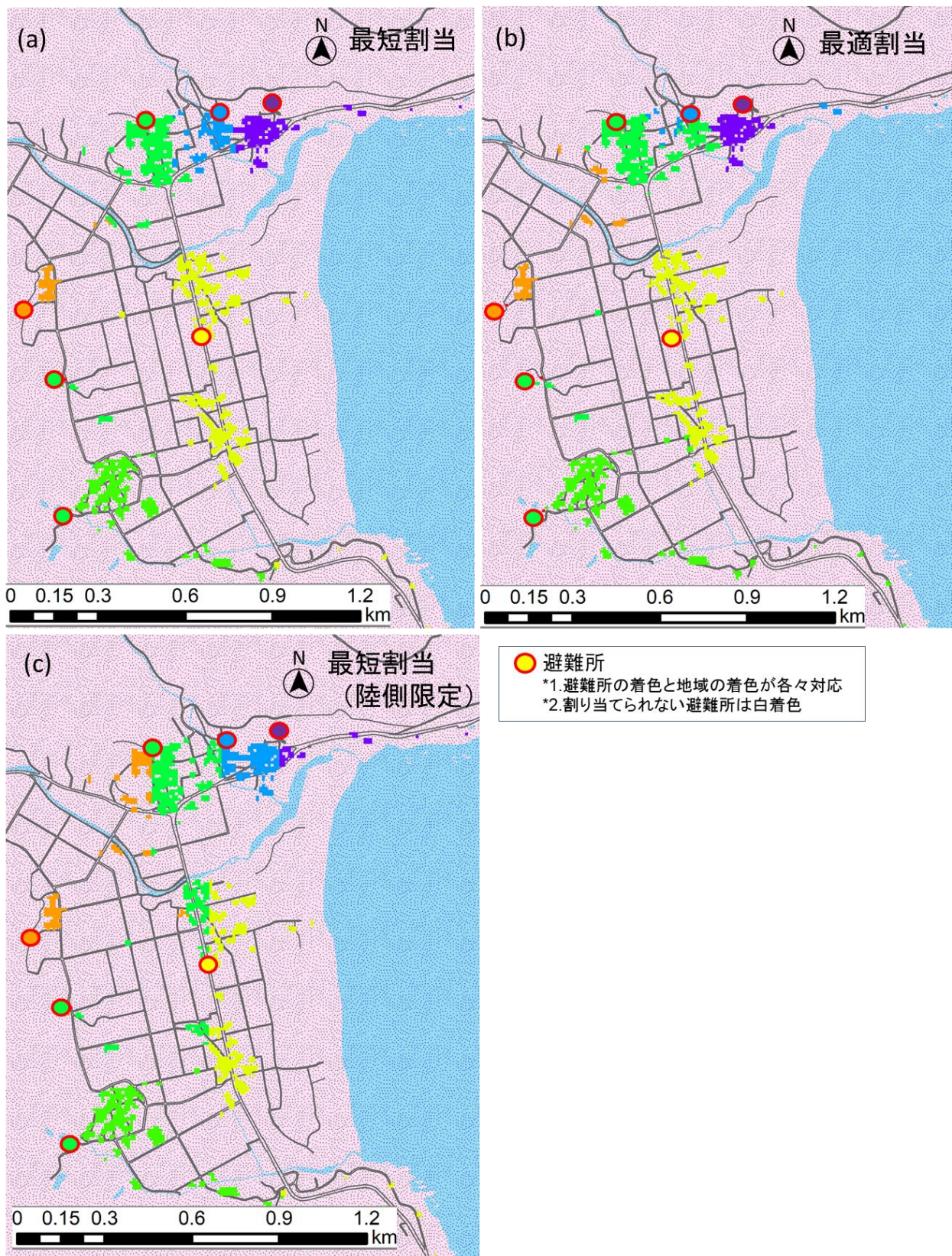


図 5-19B 各割り当て方針における避難所割り当て(B 地域):(a)は最短割り当て,(b)は最適割り当て,(c)は海側には向かわずに,最短となる避難所を割り当てる場合を示す.

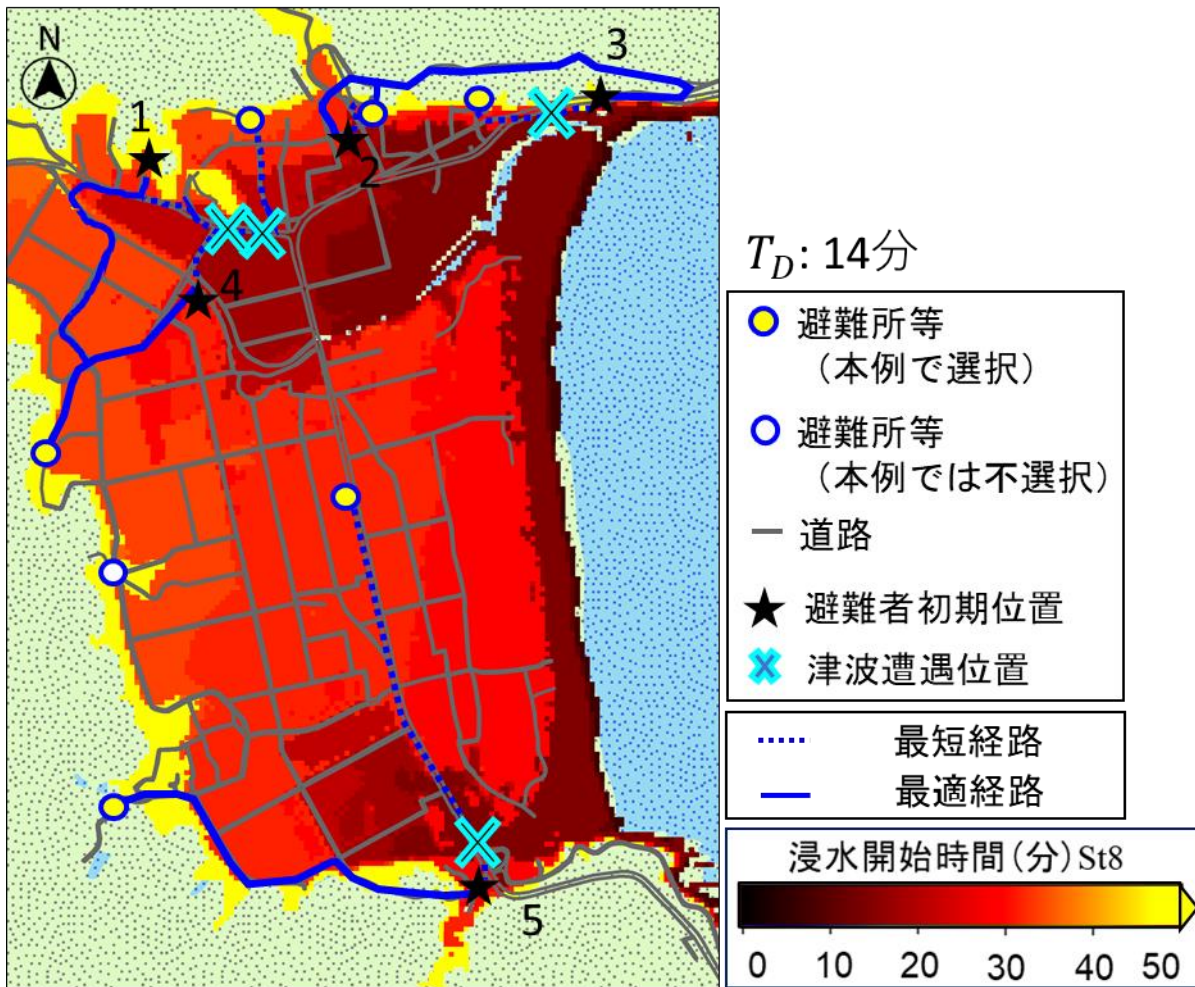


図 5-20B 各割り当て方針における避難所経路割り当て例(B 地域):星印にいる避難者が, 最短(破線)又は最適(実線)を通して避難所へ向かう状況を示す. 地震発生 14 分後の避難開始では X 印で津波に遭遇する.

表 5-11 各避難者の各経路選択での猶予時間および割り当て状況

| 避難開始地点 | 猶予時間 (分) | | 割り当て状況 |
|--------|----------|------|--------|
| | 最短経路 | 最適経路 | |
| 1 | 11.1 | 16.4 | 避難所が変更 |
| 2 | 18.4 | 28.4 | 経路のみ変更 |
| 3 | 11.2 | 33.5 | 避難所が変更 |
| 4 | 12.9 | 219 | 避難所が変更 |
| 5 | 11.8 | 15.2 | 避難所が変更 |

(C 地域)

図 5-19C は、C 地域における(a)最短割り当て、(b)収容可能人数による補正後の最適割り当て、(c)陸側にある避難所に対して最短割り当てを示したものである。A 地域同様、最短割り当てによる、割り当て境界が、避難所間を結ぶ直線を 2 等分する法線とほぼ一致するのに対し、最適割り当てでは、主に避難所から海側にある地域がその避難所の割り当て地域となっていることが分かる。C 地域では、破線で示す浸水境界付近の避難者は、浸水範囲外の避難所が割り当てられていることが分かる。このように浸水境界付近にいる避難者は、いち早く浸水範囲を抜け出し、浸水しない安全な経路を通って避難所に向かうことで猶予時間を多く確保できる。浸水範囲外に経路が存在しない B 地域とは異なる状況である。

最短割り当て、最適割り当て共に同図上部すなわち、内陸の離れた位置にある避難所には割り当てがされていないことが分かる。これは、最短割り当てでは当然最短距離にある避難所が割り当てられ、最適割り当てでも、猶予時間が大きくなる避難所を選択するが、浸水範囲を超えた後は、そこから最短距離にある避難所が選択されるように設定しているためである。猶予時間を稼ぐ目的なく、あえて遠くの避難所は選択されない。では、このような、割り当てがされない避難所は不要かという、そうではない。現実には、このシナリオで想定していない要因で、現在割り当てがされている避難所が使用不能となるかもしれない。また、この割り当ての通り避難がなされた後に、中長期的な避難場所として、専有スペースの広い避難所を求めた移動、すなわち、2 次避難が行われるだろう。このような目的で、割り当てが行われていない避難所も、必要である。前項の結果で、陸側にある避難所に限定する場合は、被災者数が増えることを示したが、これは、(c)に示す通り、割り当て範囲を避難所より海側か、陸側化で機械的に割り当ての境界を設定するため、すぐ海側に避難所がある場合も、海側という理由で排除されてしまうためである。当該地域で最適割り当てにより海側に避難することとなる避難者数は全体の 3 割程度であった。

次に、避難経路割り当ての例を最短経路による避難と、最適経路による避難を別に図 5-20C に示す。被災想定に用いる想定津波は、最適経路を与える想定津波同様の S_t8 である。表 5-12 には、各経路選択の際の猶予時間と、割り当て状況を示す。同図より避難開始時間 14 分では津波遭遇する避難者はいない。しかし、表 5-12 から、最適割り当てにより猶予時間を多く持つことができることが分かる。これは、仮に避難が遅れた場合も助かる可能性が高くなることを示す。具体的に選択経路を分析する。地点 1 から地点 3 及び地点 5 では最適割り当てではいち早く浸水範囲を抜ける経路を選択していることが分かる。これは 5.4.6 で示す通り、浸水域外に抜け出すことができる経路が存在すれば、このモデルを適用することで浸水に遭遇しにくい経路選択が可能となることを示すものである。

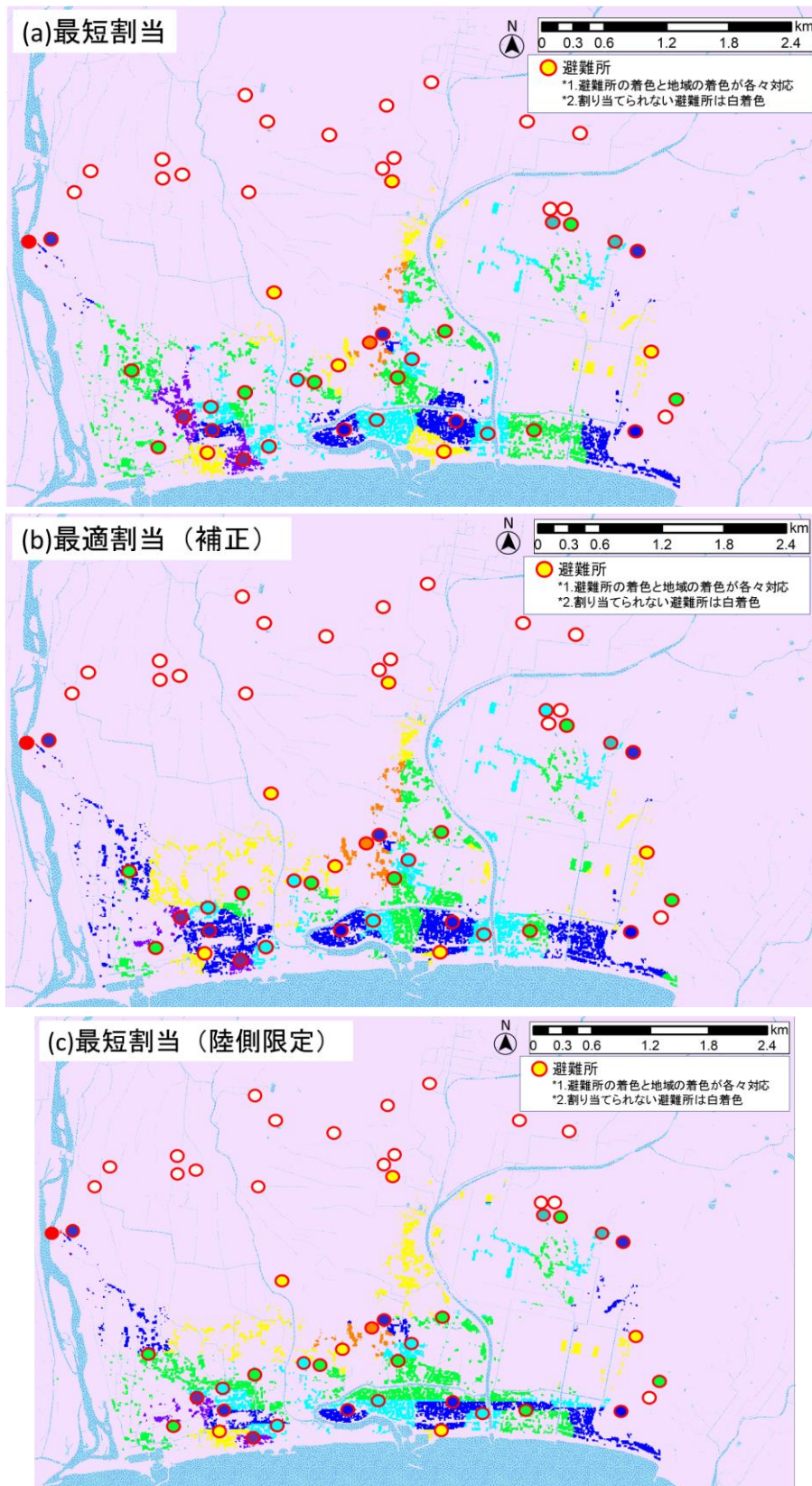


図 5-19C 各割り当て方針における避難所割り当て(C 地域):(a)は最短経路での割り当てを示す。(b)は人数制限による補正後の最適割り当てを示す。図 5-11 に示す割り当てと同じ。

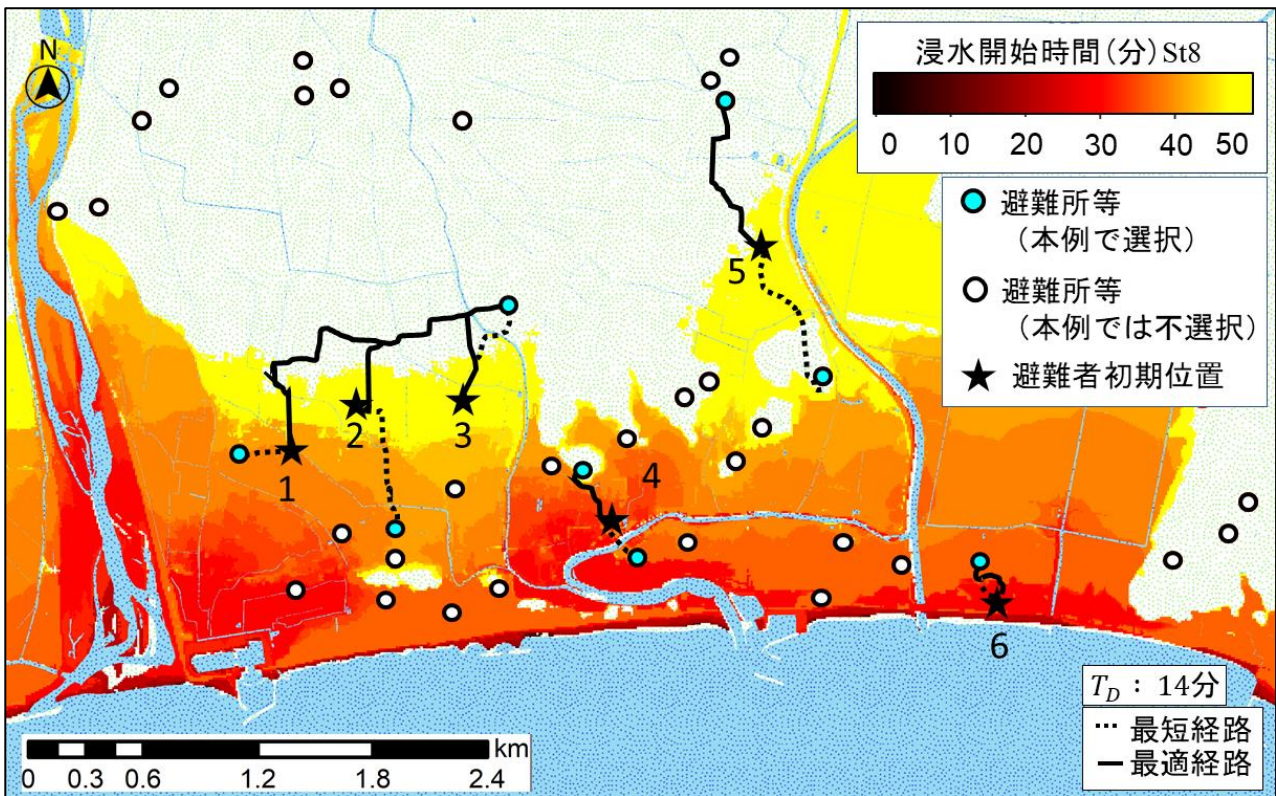


図 5-20C 各割り当て方針における避難所経路割り当て例(C 地域):星印にいる避難者が、最短(黒線)又は最適(青線)を通して黄色丸の避難所へ向かう状況を示す。避難開始時間は地震発生 14 分後。対象地域のうち、図 5-4 に示す範囲を表示する。

表 5-12 各避難者の各経路選択での猶予時間および割り当て状況

| 避難開始地点 | 猶予時間 (分) | | 割り当て状況 |
|--------|----------|-------|--------|
| | 最短経路 | 最適経路 | |
| 1 | 21.6 | 37.3 | 避難所が変更 |
| 2 | 21.3 | 107.1 | 避難所が変更 |
| 3 | 104.6 | 107.0 | 経路のみ変更 |
| 4 | 17.2 | 29.8 | 避難所が変更 |
| 5 | 100.2 | 118.2 | 避難所が変更 |
| 6 | 19.2 | 28.1 | 経路のみ変更 |

5.5 実在する地域での適用性検討に関するまとめ

5.1 から 5.3 では適用地域の分析と津波シナリオ設定を行った。検討対象とする地域は主に海岸地形の異なる 3 地域で、それぞれ次の特徴を持つ。A 地域はリアス式海岸を有する、海岸線が複雑な地域である。市の中心機能を有する地域である。避難目標地点を設定していることから、対象面積 1km^2 当たり避難所数は、他の地域より多くなっている。B 地域は、周囲を山に囲まれ、比較的単純な海岸線を有する地域である。農村地域を形成し、住宅は離散的に存在する。対象面積および住民は 3 地域の中で最も少ない。C 地域も比較的単純な海岸線を有する地域である。広大な平野を有し、市の中心機能を有している。3 地域の中では対象面積および住民が最も多い地域となる。これらの 3 地域では、地形や地域形成はそれぞれ異なるが、比較的標高の低い土地に建物が集中して立っていることが共通している。これは、いったん津波が発生すると多くの人が避難対象者となるということである。津波シナリオは、 $M_w8.4$ から $M_w9.1$ までの 12 断層モデルとした。 $M_w8.7$ および $M_w9.1$ の断層モデルは、それぞれ中央防災会議で想定されているモデルを用いる。それ以外の断層モデルは、既往の断層モデルを改変させることで求めた。

5.4 では、まず検討対象地域のシナリオ津波による浸水計算を行った。浸水計算の結果、A 地域と C 地域では、 $M_w8.4$ である S_t1 ではあまり浸水が起こらず、地震の規模が大きくなるにつれて、浸水範囲が大きくなっていくことが分かった。一方、B 地域では、 S_t1 の段階でも比較的大きく浸水し、 $M_w8.7$ の S_t3 及び S_t4 ですでに地域の平地全域に浸水が及ぶことが分かった。この B 地域が浸水範囲外に続く道路がほとんどないのに対し、C 地域は広大な平野を持つことから、浸水範囲外に続く道路やさらに内陸側に避難所が設定されている。浸水開始時間について、A 地域や B 地域は足摺岬付近に位置し、断層に近いことから比較的早い 10 分から 15 分程度で津波が到達する。一方、土佐湾奥に位置する C 地域は 30 分程度で津波が到達することが分かった。

次に、避難計算を行い、提案する最適合割り当ての効果を実在する地域に適用して、その適用性を検討することを目的に、以下の 6 項目の検討を行った。

1. このモデルを他の地域に適用する際に、想定すべき津波シナリオを限定することを目的に、最適割り当てがどのような津波シナリオによって与えられるか検討した。その結果、広範囲に浸水を及ぼす津波シナリオで、最適経路があたえられることが分かった。これにより、シナリオ数を限定できる。ただし、津波の浸水面積を過小評価したシナリオで経路設定してしまうと、最短経路選択時より被災者数を増やしてしまう結果にもなりうるので、広範囲に浸水を及ぼすような津波について、幅広く想定すべきであることが分かった。
2. 避難所の収容可能人数に見合った割り当てを目的に、収容可能人数の超過確認と割り当ての補正方法を示した。収容可能人数の超過確認を行った結果、C 地域で収容可能人数を大きく超える割り当てが行われることが分かった。この C 地域について収容可能人数に見合うように避難所割り当ての補正を行った。
3. 避難速度が適切に設定されているか確認することを目的に、避難中の渋滞が発生しないか確認を

行った。その結果、すべての地域において、徒歩避難による渋滞は発生しないことが分かった。しかし、一部の避難者が集中する道路では、車両の進入禁止など、避難者の移動を阻害しないような措置をとることが推奨される箇所が存在することが分かった。

4. 最適割り当てによる効果を示すことを目的に、最適割り当てと最短割り当てでの被災者数を比較した。その結果、すべての地域、すべての避難開始時間で、最適割り当てによる被災者数が最短割り当てによる被災者数よりも少なくなることが分かった。この被災者数の減少効果は、避難開始が遅れて切迫する状況下ほど大きくなることが分かった。

A 地域の分析からは、リアルタイム分析が仮にできる場合を想定した被災者数と、今回提案する最適割り当てでの被災者数に大きな差がないことが分かった。すなわち、あらかじめ決まった経路選択で、リアルタイムで来襲津波に合わせた経路設定する場合と同じ被災者数の減少効果が得られるということである。

B 地域の分析では、従来取られる、海側にある避難所には向かわないという制御で被災者数を算出した。この場合、最短経路選択より被災者数が増える結果となった。これは、海側の最寄りの避難所を機械的に排除してしまうためである。すなわち、従来タブーとされている海側への避難は、必ずしも否定されるものではないことが分かった。

C 地域の分析では、避難所の収容可能人数に見合う避難所割り当てとなるよう、割り当ての補正を行った。補正前後での期待被災者数は地震発生 36 分程度までは差がないことが分かった。従って、C 地域では、避難所の収容者数増大を目的とした避難所の改修の必要性は高くないことが示唆された。

5. 最適割り当ての特徴を示すことを目的に、最適経路と最短経路での猶予時間の分布と避難困難地域となるエリアについて分析を行った。その結果、A 地域では最適割り当てで浸水遅延箇所を通ることにより猶予時間が増加する地域が存在することが確認された。B 地域および C 地域からは浸水範囲外に道路網や避難所が存在することで、浸水境界付近の避難者の猶予時間が増加することが確認された。これによりハード対策の優先順位付けの際、津波への暴露人口ではなく、猶予時間により行うことで、人的被害を効果的に減少できることが示唆された。

6. 最適割り当ての特徴を示すことを目的に、避難所と避難経路の割り当てが最短割り当てと最適割り当てとでどのように異なるか示した。避難所割り当てについて、最短割り当てによる、割り当て境界が、避難所間を結ぶ直線を 2 等分する法線とほぼ一致するのに対し、最適割り当てでは、主に避難所から海側にある地域がその避難所の割り当て地域となっていることが分かった。しかし、一部地域では海側の避難所に向かうように割り当てられていることが分かった。この海側に逃げる避難者の割合は A 地域で避難者数全体の 1 割程度、B 地域で 2 割程度、C 地域で 3 割程度となった。避難経路割り当てについて、最適割り当てでは津波の浸水開始が遅い方または、浸水しない方へ向かうことで、避難所まで到達できることが分かった。B 地域の事例からは、まず一時的に海側へ向かい、山側にある道路を進むことで、避難所に到達できる地域があることが分かった。このモデルを用いることで、最短経路と最適経路では、向かう避難所は同じでも経路を変えることで避難所へ到達できる場合と、避難

第5章 実在する地域への適用

所も変えることで避難所まで到達できる場合が確認された。C 地域の事例からは、このモデルを用いると、避難対象範囲から特に遠くにある避難所は選択されないことが分かった。これは、4.3 の結果 7 で示す通り、津波遭遇を回避する目的で遠回りすることはあるが、無駄に遠くの避難所が選択されているわけではないことを示す。これらの選択されない避難所は、緊急避難場所としてではなく、長期化する避難生活の中で、2 次避難場所として使用されることが考えられる。B 地域および C 地域の事例から、浸水範囲外に続く道路と、その先に避難所があれば、浸水境界付近の避難者はその避難所および経路を選択することで猶予時間を多く確保できることが分かった。

第6章 まとめと展望

この章では、この研究により得られた成果と、このモデルの応用について記述する。

6.1 本研究の成果

本研究では、避難中の津波遭遇者を最小化するために、想定される多くの津波に遭遇しにくい避難経路および避難所を災害発生前に割り当てることのできる数値計算モデルを開発し、その効果を検証した。

第1章では、本研究の背景や、目的、本論文の構成を示した。

第2章では、本研究の意義を示すため、地震津波に関する避難行動の実態について文献調査を行った。その結果、防災教育や迅速な避難開始だけでなく、少しでも津波遭遇までの時間を稼ぐための津波浸水を迂回するような避難所や経路選択が重要となることが示唆された。次に、行政による避難所や避難経路の設定に関する基準を整理した。その結果、住民や行政はともに安全性の高い避難場所、避難路および避難経路を把握する必要がある、安全性の高い経路や避難所を設定できるツールの開発が望まれることが示唆された。既往の避難モデルの分析を行った結果、多くの場合最短経路等が採用されており、この研究で開発する割り当て手法ははまだ確立されていないことが分かった。

第3章では、想定津波浸水の時空間的広がりを組み込んだ、避難所および避難経路の割り当てモデル「K19」を構築した。このモデルは、想定される様々な津波に対して高い確率で総被災者数を減少させる避難所と避難所への到達経路とを、避難者毎に求める。具体的には、ある特定の想定津波に対して、避難所の位置から順次、安全に避難するために避難開始が必要となる地震発生からの経過時間、すなわち猶予時間を計算していく。この与えられた猶予時間分布を避難開始地点から大きくなる方へ遡ることで、猶予時間を最大とする避難所と避難経路が設定できる。このとき求めた猶予時間分布上のすべての地点が避難開始地点となることから、短時間で地域全体の避難経路と避難所の設定が可能となる。この方法により、対象津波において、すべての避難者に対して実行地域全体の避難所および経路割り当てを行う。さらに、この操作を想定される複数の津波について実行し得られた割り当て群の中から、各想定津波の発生確率を考慮して、地域全体の被災者数の期待値を最小化する割り当てを求める。これを最適割り当てとし、この割り当ては、想定される様々な津波に対して高い確率で被災者数を減少させることを示した。

第4章では、モデル地形を用いて、本方法により求まる避難所や避難経路の特徴を分析した。その結果、(1)津波の時空間的広がりを考慮して、津波遭遇を回避できること。(2)避難が遅れるような場合にも、最大限津波に遭遇せずに避難所に到達できる避難経路と避難所を割り当てできること。

(3)各避難者に1つの避難経路や避難場所を発災前の段階で定めることができることを示した。

次に、K19を適用して得られる避難所や避難経路の分析を行った結果、(1)猶予最大割り当てによる被災者数は、最短割り当てより減るか、効果が少なくとも同程度であり、被災者数が増えることはないこと。(2) K19による経路や避難所の割り当てに、避難開始時間や海岸線への津波到達時間は影響を与えないこと。(3)津波の遡上速度が、避難者の移動速度に比べてオーダーが違うほど大きく、かつ、付近に浸水境界や付近に浸水境界や浸水遅延範囲がない場合は最短で到達できる避難所が選択されるのに対し、津波の遡上速度が、避難者の移動速度に比べてあまり大きくない場合は、津波の遡上方向を考慮し、浸水範囲から離れる方向にある避難所が選択されること。(4)津波がどのような遡上速度をとる場合も、浸水が大きく遅延する箇所や浸水範囲外が付近に存在する場合は、浸水遅延箇所を通過し、その先にある避難所が選択されること。(5)選択経路について、一度浸水域を抜けた後、その先に避難所がある場合は再び浸水域に入ることはなく、浸水域外を通過して避難所に向かう経路が選択されること、などを示した。

第5章では、主に海岸地形の異なる3つの地域を対象に複数の津波を適用することで、K19による最適割り当ての適用性を検討した。その結果、次の主要な結論を得た。(1)最適経路は広範囲に浸水を及ぼす津波シナリオであたえられることが分かった。これにより、想定すべきシナリオ数を限定できる。(2)最適割り当てによる被災者数を最短割り当てと比較した結果、すべての地域、すべての避難開始時間で、最適割り当てによる被災者数が最短割り当てによる被災者数よりも少なくなることが分かった。この被災者数の減少効果は、避難開始が遅れて切迫する状況下ほど大きくなることが分かった。この被災者減少効果は、仮にリアルタイム経路探索ができる場合を想定した被災者数と大きな差がないことが分かった。すなわち、あらかじめ決まった経路選択で、リアルタイムで来襲津波に最適化した経路設定する場合と同じ被災者数の減少効果が得られるということである。(3)津波避難の原則である、海側にある避難所には向かわないという制御で被災者数を算出した。その結果、最適経路選択や最短経路選択より被災者数が増える結果となった。これは、海側の最寄りの避難所を機械的に排除してしまうためである。すなわち、従来タブーとされている海側への避難は、必ずしも否定されるものではないことが分かった。(4)最適割り当ての被災者減少効果を示すことを目的に、最適経路と最短経路での猶予時間の分布について分析した。その結果、A地域では最適割り当てで浸水遅延箇所を通過することにより猶予時間が増加する地域が存在することが確認された。B地域およびC地域からは浸水範囲外につながる道路や避難所が存在することで、浸水境界付近の避難者の猶予時間が増加することが確認された。

以上の結果から、検討対象地域において対象津波や避難開始時間に依存せずに従来の最短経路に比べて被災者数を減少できる一意の避難経路および避難所をあらかじめ避難者に割り当てることができた。今後、このモデルをあらゆる地域に適用し、被災者を減らす割り当てができることが期待される。

6.2 本研究の応用

ここでは、この研究を応用した事例や今後の展望について述べる。

6.2.1 河川洪水への適用

この研究では K19 を津波に適用したが、このモデルは危険な範囲が時間発展的に広がる災害に適用することで効果を発揮すると考えられる。すなわち、河川洪水にも適用可能である。河川洪水に遭遇しないためには早期の避難開始が重要である一方、現実には避難勧告等に従って避難する者は少ない現状がある。また堤防の決壊位置や時刻は予測できない。すなわち避難中の洪水発生もあり得るということである。よってあらかじめ洪水に遭遇しにくい避難経路を定めておくことも重要である。井上ら(2017) [69]は豪雨時にリアルタイム避難経路探索を行う手法を提案している。しかしリアルタイム経路探索の問題は第2章で述べた通りである。北村ら(2019) [97]は K19 を河川洪水に適用して被災者数が減少できることを示している。河川洪水に適用する際に注意すべきこととして、津波は常に海側から侵入するのに対し、河川洪水は破堤箇所から浸水が発生するということがある。すなわち、破堤箇所によって浸水の広がる方向が全く異なり、ある一つの洪水を避ける経路では、別の箇所で破堤が起こった際には避けるどころか、洪水に向かって避難するようなことも起こりうる。よって、北村ら(2019) [97]で示す様に、適切に経路設定のための浸水分布を設定する必要がある。

6.2.2 ハード対策との融合

a) 防潮堤整備

津波対策はハード対策とソフト対策が適切に融合することが重要である。これは、内閣府中央防災会議の「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」が6月26日に公表した「中間とりまとめ～今後の津波防災対策の基本的考え方について～」および「中間とりまとめに伴う提言」でも示されている。

ハード対策とソフト対策を適切に融合させている事例として、和歌山県串本町の取り組みがある。串本町では、南海トラフ地震津波が発生した場合に、数分で津波が到達することから、避難困難地域を解消すべく対策をとっている。具体的には、避難経路設定を津波到達時間を考慮して行っている。そして、避難可能となる経路がない地域に対して、優先的に防潮堤整備を行うこととしている(稲田, 2015 [99])。ここでは、アナログ的に経路探索を行っているが、このモデルを用いれば、機械的に、すべての者に最適経路を割り当てることができる。加えて、このモデルを用いれば、5.4.6で示した通り、猶予時間分布を表示することで、どこを優先してハード対策を講じるべきか、検討を容易にする。ソフト

対策の効果を適切に評価して、ハード対策の優先順位を決めることは重要である。

b) 避難経路の地震対策

この研究で示した方法で、適切に避難所等の割り当てを定めていても、避難経路が津波に先立ち発生する地震により被災していれば、速やかな避難はできなくなる。そこで、避難経路の地震対策が重要となる。しかし、地域の道路すべての地震対策を施すには時間を要する。そこで北村ら(2019) [98]では、経路閉塞の影響を定量的に評価し、影響が大きい個所を優先的に対策する効果を示している。ここで、このモデルを用いる利点は2つある。1つは、このモデルでは事前に避難経路を割り当てることから、事前に通行者が多い避難経路を把握でき、閉塞の影響が大きい道路を把握できる点である。2つ目は、津波浸水の遅い方に避難者を誘導することから、そのような道路に避難者は集中する。従って、多くの避難者が通る経路が集約されることから、地震対策を優先すべき経路がある程度限られてくる点である。

6.2.3 エージェントモデルへの組み込み

このモデルは、津波の時間的広がりをとらえて、津波浸水を迂回する経路選択が可能である。一方、人の避難時の振る舞いは反映していない。ここでは、このモデルに、渋滞による避難速度の低下といった人の避難時の振る舞いを反映する方法を示す。人の行動特性を直接的に反映できるモデルは第2章で述べた通り、エージェントモデルである。加藤ら(2009) [53]は、このエージェントモデルに、横山ら(1995) [39]の開発したポテンシャルモデルを反映する方法を示している。この方法を援用して、ポテンシャルモデルによるポテンシャルマップを、このモデルの猶予時間分布に置き換え、その分布に従ってエージェントを動かすということにすれば、津波の浸水特性に加えて、避難者の行動特性を踏まえた避難モデルの構築が可能となるだろう。

6.3 このモデルの利点と欠点

最後に、このモデルの利点と欠点をまとめていく。

(利点)

- 1.被災者数を減少できる点.
- 2.避難経路や避難所があらかじめ一意に定まる点.
- 3.避難経路や避難所が避難開始時間に依存しない点.
- 4.いったん猶予時間分布を作成すれば、避難開始地点がどこであろうと、簡単に割り当てを表示できる点. 加えて、避難困難地域も、避難開始時間との大小比較で簡単に表示できる点.
- 5.このモデルで算出された避難所や避難経路は、多くの津波に有効である点.
- 6.猶予最大割り当ては最短割り当てより猶予時間が小さくなることはなく、避難開始が遅れても安全に避難できる割り当てが算出できる点.
- 7.このモデルで求まる避難経路は、浸水開始が遅い経路や、浸水しない経路に避難者を誘導でき、通行経路が集約されることから、地震対策を優先すべき箇所が特定しやすい点.
- 8.猶予時間分布を簡単に表示でき、ハード対策を優先的に講じるべき地域を簡単に検討できる点.

(欠点)

- 1.最適割り当ては被災者数期待値で算出しているため、来襲津波によっては部分的に最短割り当てより猶予時間が小さくなる恐れがある点.
- 2.経路が長くなり、津波以外の災害への被災リスクが高まる点.
- 3.これまでの最短経路選択で行っていた避難計画から変更の必要があり、避難所の収容可能人数から、改築が必要になる可能性がある点.

この欠点1については、避難経路や避難所をあらかじめ1つに定めるということから、このように被災者数を増やしてしまうようなケースもわずかながら生じる。欠点2については、同時に利点7で示すように、通行経路が明確になることから、リスクに対する対策が取りやすくなるものと考えられる。欠点3については、このモデルにより算出される割り当てが既往の割り当てと異なることから、避難所の設定人数等にギャップが生じよう。しかし、緊急避難場所としての所要を満たすことを考えると、多少の収容可能人数の超過は大きい問題としないと考えられる。加えて、対策が進む現時点で計画変更することで、不必要な投資を避けることができると考える。

6.4 効果的な避難のための提案

このモデルによる被災者減少効果は、十分な教育と避難訓練なしでは実現できないと考える。このモデルの重要な特徴の1つは、津波が発生する前に避難経路と避難所を割り当てることができることである。このモデルを使用する場合、4.2.3(b)や5.4.5のB地域で説明した海側への避難など、避難者が本来選択したくない経路が表示される場合がある。そのような経路が示された場合も、住民は十分な時間をかけた教育によって事前に経路を理解し、この経路で避難訓練を繰り返すことで習慣化すれば、効果的に避難することができるだろう。

迅速な避難は、津波避難を成功させるための重要なポイントである(Suppasri et al., 2013 [100], Kong et al., 2015 [101])。このモデルを使用すれば、図5-18に示すように、安全に避難を開始する必要がある猶予時間を知ることができる。このモデルで割り当てられたルートで、猶予時間を意識して迅速な避難を行うことで、効果的な避難が可能になるだろう。

参考文献

- [1] 小井土雄一, 近藤久禎, 市原正行, 小早川義貴, 辺見弘. (2011). 東日本大震災における DMAT 活動と今後の研究の方向性, 保健医療科学, Vol.60, No.6, p.495-501. <https://www.niph.go.jp/journal/data/60-6/201160060007.pdf#search=%27Research+on+the+DMAT+response+to+the+2011+East+Japan+Earthquake%27>
- [2] 阿部康二. (2012). 日本神経学会災害支援プログラムの策定に向けて, シンポジウム (3)-12-6 東日本大震災:あれから一年, vol52, p1348-1350. https://www.neurology-jp.org/Journal/public_pdf/052111348.pdf
- [3] 渡辺国広, 姫野一樹, 榊原弘, 有村盾一, 八木裕子, 越智達郎, 諏訪義雄. (2015). 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol71, No.72, p.I_1597-I_1602. https://doi.org/10.2208/kaigan.71.I_1597
- [4] 星野智史, 増田光一, 居駒知樹, 惠藤浩朗, 相田康洋. (2016). 防波堤および防潮堤の人的被害に対する低減効果の評価に関する基礎的研究. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 72(2), I_1555-I_1560. https://doi.org/10.2208/kaigan.72.I_1555
- [5] 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. 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 69.4, I_345-I_357. https://doi.org/10.2208/jscejsee.69.I_345
- [6] 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), 72(1), 71-82. <https://doi.org/10.2208/kaigan.72.71>
- [7] 安田誠宏, 朝比奈朋美, 宇野喜之, 河野達仁, 岡安章夫. (2018). 海岸を観光資源とするまちにおける費用便益分析を用いた最適海岸堤防高さの設定方法の検討. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74(2), I_475-I_480. https://doi.org/10.2208/kaigan.74.I_475
- [8] 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. 土木学会論文集, 2005(789), 789_93-789_104. https://doi.org/10.2208/jscej.2005.789_93
- [9] 牛山素行, 金田資子, 今村文彦. (2004). 防災情報による津波災害の人的被害軽減に関する実証的研究. 自然災害科学, 23(3), 433-442. <http://disaster-i.net/notes/2004JSNDS-tsunami.pdf>
- [10] 坂田祐介, 平野弘晃, 有川太郎. (2018). 津波レベルに基づいた避難経路選択手法の構築. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74(2), I_397-I_402. https://doi.org/10.2208/kaigan.74.I_397

参考文献

- [11]高橋保, 中川一, 東山基. (1989). 洪水氾濫解析とリンクした避難のシミュレーション. 水理講演会論文集, 33, 355-360. <https://doi.org/10.2208/prohe1975.33.355>
- [12]北海道南西沖, 地震本部. https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_kaiko/k14_hokkaidonanseioki/ (2019.10.1 閲覧)
- [13]1993年北海道南西沖地震における住民の対応と災害情報の伝達-巨大津波と避難行動-, 東京大学社会情報研究所「災害と情報」研究会. <http://www.hiroi.iii.u-tokyo.ac.jp/index-houkokusho-rist-hokkaido-nanseioki.pdf> (2019.10.1 閲覧)
- [14]田中淳, 吉井博明, 災害情報論入門 2009, 弘文堂, pp.95-107
- [15]十勝沖地震, 地震本部. https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_kaiko/rs_tokachioki/
- [16]平成15年(2003年)十勝沖地震について(第33報), 内閣府. <http://www.bousai.go.jp/updates/pdf/040401tokachi1700.pdf#search=%27%E6%B6%88%E9%98%B2%E5%BA%81+%E5%8D%81%E5%8B%9D%E6%B2%96%27> (2019.10.1 閲覧)
- [17]廣井脩, 中村功, 福田充, 中森広道, 関谷直也, 三上俊治, 松尾一郎, 宇田川真之. 2003年十勝沖地震における津波避難行動-住民聞き取り調査を中心に-. <http://www.hiroi.iii.u-tokyo.ac.jp/index-houkokusho-rist-2003-tokachi.pdf> (2019.10.1 閲覧)
- [18]東北地方沖太平洋地震, 気象庁. https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2011_03_11_tohoku/index.html (2019.10.1 閲覧)
- [19]平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の警察措置と被害状況, 令和元年9月10日, 警察庁緊急災害警備本部. <https://www.npa.go.jp/news/other/earthquake2011/pdf/higaijokyo.pdf#search=%27%E8%AD%A6%E5%AF%9F%E5%BA%81%E7%B7%8A%E6%80%A5%E7%81%BD%E5%AE%B3%E8%AD%A6%E5%82%99%E6%9C%AC%E9%83%A8%E3%81%AE%E5%B9%B3%E6%88%9023%E5%B9%B4%E6%9D%B1%E5%8C%97%E5%9C%B0%E6%96%B9%E5%A4%AA%E5%B9%B3%E6%B4%8B%E6%B2%96%E5%9C%B0+%E9%9C%87%E7%AD%89%E3%81%AB%E3%82%88%E3%82%8B%E8%A2%AB%E5%AE%B3%E7%8A%B6%E6%B3%81%E3%81%A8%E8%AD%A6%E5%AF%9F%E6%8E%AA%27> (2019.10.1 閲覧)
- [20]東日本大震災と警察, 平成24年3月警察庁. <https://www.npa.go.jp/archive/keibi/syouten/syouten281/pdf/p02.pdf#search=%27%E6%9D%B1%E6%97%A5%E6%9C%AC%E5%A4%A7%E9%9C%87%E7%81%BD+%E6%B4%A5%E6%B3%A2%E5%88%B0%E9%81%94%E6%99%82%E9%96%93%27> (2019.10.1 閲覧)
- [21]濱田政則, 耐津波学, p19, 森北出版株式会社, 2015

参考文献

- [22]津波避難を想定した避難路，避難施設の配置及び避難誘導について（第3版），平成25年4月国土交通省都市局街路交通施設課，p30,p33,p98．
<http://www.mlit.go.jp/common/000233464.pdf>（2019.10.1閲覧）
- [23]津波避難対策推進マニュアル検討会報告書，平成25年3月消防庁国民保護・防災部防災課，pp21-31.
https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/kento106_01_p00.pdf
(2019.10.1閲覧)
- [24]津波避難ビル等を活用した津波防災対策の推進について（技術的助言）.
<http://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/pdf/shushi.pdf#search=%27%E6%B4%A5%E6%B3%A2%E9%81%BF%E9%9B%A3%E3%83%93%E3%83%AB%E7%AD%89%E3%82%92%E6%B4%BB%E7%94%A8%E3%81%97%E3%81%9F%E6%B4%A5%E6%B3%A2%E9%98%B2%E7%81%BD%E5%AF%BE%E7%AD%96%E3%81%AE%E6%8E%A8%E9%80%B2%E3%81%AB%E3%81%A4%E3%81%84%E3%81%A6%27>
(2019.10.1閲覧)
- [25]東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告，平成28年9月28日中央防災会議，pp.20-22．
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/pdf/houkoku.pdf>
(2019.10.1閲覧)
- [26]津波防災地域づくりの推進に関する基本的な指針，pp18-19．
<https://www.mlit.go.jp/common/000188287.pdf#search=%27%E6%B4%A5%E6%B3%A2%E9%98%B2%E7%81%BD%E5%9C%B0%E5%9F%9F%E3%81%A5%E3%81%8F%E3%82%8A%E3%81%AE%E6%8E%A8%E9%80%B2%E3%81%AB%E9%96%A2%E3%81%99%E3%82%8B%E5%9F%BA%E6%9C%AC%E7%9A%84%E3%81%AA%E6%8C%87%E9%87%9D%27>（2019.10.1閲覧）
- [27]防災基本計画（修正版），令和元年5月中央防災会議，pp113-116．
http://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/pdf/kihon_basic_plan190531.pdf
(2019.10.1閲覧)
- [28]安福健祐．(2015)．自己駆動粒子による群集流動モデルの特性と建物避難安全性評価．混相流，29(1)，27-34．<https://doi.org/10.3811/jjmf.29.27>
- [29]持尾隆士，北原至博．(2016)．メタヒューリスティクス手法によるリアルタイム最適避難経路の探索．日本地震工学会論文集，16(5)，5_93-5_110.
https://doi.org/10.5610/jaee.16.5_93
- [30]清清野純史，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，(591)，365-378.
https://doi.org/10.2208/jscej.1998.591_365
- [31]藤田隆史．(1976)．大震火災時における住民避難の最適化．計測自動制御学会論文集，12(4)，424-431．<https://doi.org/10.9746/sicetr1965.12.424>

- [32]原文雄. (1978). 群集流動のモデル. バイオメカニズム学会誌, 2(2), 3-11.
https://doi.org/10.3951/sobim.2.3_2
- [33]原文雄. (1980). 大震火災からの群集避難のダイナミックモデル. 計測と制御, 19(7), 708-712. <https://doi.org/10.11499/sicejl1962.19.708>
- [34]清野純史, 三浦房紀, 瀧本浩一. (1996). 被災時の群集避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について. 土木学会論文集, (537), 233-244.
https://doi.org/10.2208/jscej.1996.537_233
- [35]後藤仁志, 原田英治, 久保有希, 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, 51, 1261-1265.
<https://doi.org/10.2208/proce1989.51.1261>
- [36]岡崎甚幸. (1979). 建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究: その1 磁気モデルの応用による歩行モデル. 日本建築学会論文報告集, 283, 111-119.
https://doi.org/10.3130/aijsaxx.283.0_111
- [37]二神透, 秋月恵一, 松山優貴, 國方祐希. (2013). 津波避難地域を対象とした要援護者支援システムの開発. 土木学会論文集 F6 (安全問題), 69(2), I_1-I_6.
https://doi.org/10.2208/jscejsp.69.I_1
- [38]源貴志, 成行義文, 藤原康寛, 三神厚. (2009). 津波避難シミュレーションシステムの開発と地区の避難安全性評価への適用. 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 65(1), 757-767. <https://doi.org/10.2208/jscejsee.65.757>
- [39]横山秀史, 目黒公郎, 片山恒雄. (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, (513), 225-232. https://doi.org/10.2208/jscej.1995.513_225
- [40]岡本睦, 目黒公郎. (2007). 避難行動シミュレーションに基づく津波避難困難度マッピングシステムの開発. 生産研究, 59(3), 295-298.
<https://doi.org/10.11188/seisankenkyu.59.295>
- [41]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, 54(6), 401-404.
<https://doi.org/10.11188/seisankenkyu.54.401>
- [42]西野智研, 円谷信一, 樋本圭佑, 田中哮義. (2009). 関東大震災における東京市住民避難性状の推定に関する研究. 日本建築学会環境系論文集, 74(636), 105-114.
<https://doi.org/10.3130/aije.74.105>
- [43]大鏑史男, 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ズ・リサーチ学会和文論文誌, 51, 94-111.
<https://doi.org/10.15807/torsj.5194>
- [44]岡田光正, 吉田勝行, 柏原士郎, 辻正矩. (1979). 大震火災による人的被害の推定と都市の安全化に関する研究:(1) 延焼過程を組み込んだ避難シミュレーションシステムの

- 設計 . 日本建築学会論文報告集 , 275, 141-148.
https://doi.org/10.3130/aijsaxx.275.0_141
- [45] 森脇哲男, 松本博文, 江田敏男. (1984). 大震火災時の避難シミュレーション. 日本建築学会論文報告集, 341, 142-149. https://doi.org/10.3130/aijsaxx.341.0_142
- [46] 小坂俊吉, 堀口孝男. (1986). 広域避難シミュレーション手法による大震火災時の群集行動解析. 土木学会論文集, (365), 51-59. <https://doi.org/10.2208/jscej.1986.51>
- [47] Wang, H., Mostafizi, A., Cramer, L. A., Cox, D., Park, H. (2016). An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: Decision-making and life safety. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 64, 86-100. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.11.010>
- [48] Mas, E., Suppasri, A., Imamura, F., Koshimura, S. (2012). Agent-based simulation of the 2011 great east japan earthquake/tsunami evacuation: An integrated model of tsunami inundation and evacuation. *Journal of Natural Disaster Science*, 34(1), 41-57. <https://doi.org/10.2328/jnds.34.41>
- [49] Makinoshima, F., Imamura, F., Abe, Y. (2016). Behavior from Tsunami Recorded in the Multimedia Sources at Kesenuma City in the 2011 Tohoku Tsunami and Its Simulation by Using the Evacuation Model with Pedestrian-Car Interaction. *Coastal Engineering Journal*, 58(4), 1640023-1. <https://doi.org/10.1142/S0578563416400234>
- [50] Aguilar, L., Wijerathne, L., Ichimura, T., Hori, M., Tanaka, S. (2015). Mixed mode large urban area tsunami evacuation considering car-pedestrian interactions. 土木学会論文集 A2 (応用力学), 71(2), I_633-I_641. https://doi.org/10.2208/jscejam.71.I_633
- [51] 藤田零, 吉田秀典, 堀宗朗. (2015). 地震による建物被害を考慮した避難行動シミュレーション. 土木学会論文集 A2 (応用力学), 71(2), I_643-I_654. https://doi.org/10.2208/jscejam.71.I_643
- [52] Takabatake, T., Shibayama, T., Esteban, M., Ishii, H., Hamano, G. (2017). Simulated tsunami evacuation behavior of local residents and visitors in Kamakura, Japan. *International journal of disaster risk reduction*, 23, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.04.003>
- [53] 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), 65(1), 1316-1320. <https://doi.org/10.2208/kaigan.65.1316>

- [54]宇野喜之, 嶋原康子, 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(2), I_1615-I_1620. https://doi.org/10.2208/kaigan.71.I_1615
- [55]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), 74(2), I_385-I_390. https://doi.org/10.2208/kaigan.74.I_385
- [56]牧野嶋文泰, 大石裕介, 今村文彦, 古村孝志. (2018). 大規模避難シミュレーションによる臨海都市部の津波避難リスク分析と低減方策の検討. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74(2), I_409-I_414. https://doi.org/10.2208/kaigan.74.I_409
- [57]安藤宏恵, 倉内文孝, 杉浦聡志. (2016). 時空間拡張ネットワークを用いたリンクベース最適避難計画モデルの構築. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 72(5), I_683-I_694. https://doi.org/10.2208/jscejpm.72.I_683
- [58]野津田宗聡, 岸本達也. (2005). 地域避難施設の最適割当てと最適配置手法に関する研究: 地域避難施設の配置計画手法に関する研究 その 1. 日本建築学会計画系論文集, 70(589), 115-122. https://doi.org/10.3130/aija.70.115_1
- [59]笹圭樹, 鈴木勉. (2014). 道路容量制約下での避難場所割当の変更による津波避難時間短縮効果. 都市計画論文集, 49(3), 543-548. <https://doi.org/10.11361/journalcpj.49.543>
- [60]Takizawa, A., Inoue, M., Katoh, N. (2012). An emergency evacuation planning model using the universally quickest flow. *The Review of Socionetwork Strategies*, 6(1), 15-28. <https://doi.org/10.1007/s12626-0120024-y>
- [61]小林和博, 成澤龍人, 安井雄一郎, 藤澤克樹. (2016). 辞書式最速流による避難計画作成モデルの実験的解析. 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, 59, 86-105. <https://doi.org/10.15807/torsj.59.86>
- [62]竹内光生, 近藤光男, 山口満, 濱田洋平. (2003). 容量を考慮した津波避難場所の評価に関する実証分析. 土木計画学研究・論文集, 20, 345-354. <https://doi.org/10.2208/journalip.20.345>
- [63]奥村誠, 片岡侑美子, 金進英. (2017). 津波遭遇リスクを最小化する自動車避難最適化モデル. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 73(5), I_1083-I_1092. https://doi.org/10.2208/jscejpm.73.I_1083
- [64]Yuan, F., Han, L. D. (2010). A multi-objective optimization approach for evacuation planning. *Procedia Engineering*, 3, 217-227. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.07.020>
- [65]今村文彦, 鈴木介, 谷口将彦 (2001) 津波避難数値シミュレーション法の開発と北海道奥尻島青苗地区への適用, 自然災害科学 J. JSNDS, 20-2, 183-195.

参考文献

- http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_10751518_po_ART0003300319.pdf?contentNo=1&alternativeNo=
- [66] 鈴木介, 今村文彦 (2005) 住民意識・行動を考慮した津波避難シミュレーション, 自然災害科学 J. JSNDS, 23-4, 521-538.
http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_10751910_po_ART0003304432.pdf?contentNo=1&alternativeNo=
- [67] 塚口博司, 大橋祐貴. (2008). 大規模地下街における歩行者の経路選択行動分析. 土木計画学研究・論文集, 25, 615-621. <https://doi.org/10.2208/journalip.25.615>
- [68] 山田崇史, 岸本達也. (2015). 沿岸地域における津波避難ビルの選択行動モデル化. 日本建築学会計画系論文集, 80(707), 125-133. <https://doi.org/10.3130/aija.80.125>
- [69] 井上卓也, 中谷剛, 矢部浩規. (2017). 時々刻々と変化する浸水域を考慮した避難経路探索手法の開発, 第 61 回 (平成 29 年度) 北海道開発技術研究発表会.
<https://thesis.ceri.go.jp/db/files/14081870595b3b137db5df1.pdf>
- [70] Forcael, E., Gonzalez, V., Orozco, F., Vargas, S., Pantoja, A., Moscoso, P. (2014). Ant colony optimization model for tsunamis evacuation routes. *Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29(10), 723-737. <https://doi.org/10.1111/mice.12113>
- [71] 後藤大貴, 太田飛鳥, 松澤智史, 滝本宗宏, 神林靖, 武田正之. (2015) 被災時避難誘導に向けたフェロモン調節による改良 ACO アルゴリズムの提案, 情報科学技術フォーラム講演論文集, 14(4), 65-70.
http://cache.yahoofs.jp/search/cache?c=0cNdFyRZhMEJ&p=Improvement+ACO+algorithm+by+pheromone+control+for+disaster+evacuation+guidance%2C+Forum+on+Information+Technology&u=https%3A%2F%2Fipsj.ixsq.nii.ac.jp%2Ffej%2Findex.php%3Faction%3Dpages_view_main%26active_action%3Drepository_action_common_download%26item_id%3D154000%26item_no%3D1%26attribute_id%3D1%26file_no%3D1%26page_id%3D13%26block_id%3D8
- [72] 平成 23 年版 情報通信白書, 総務省, pp2-9.
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h23/pdf/n0010000.pdf>
- [73] 佐藤史弥, 南正昭, 谷本真佑. (2017). 津波浸水域の脱出に着目した津波避難に関する研究. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 73(5), I_241-I_251.
https://doi.org/10.2208/jscejipm.73.I_241
- [74] Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1), 269-271.
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FBF01386390.pdf>

- [75]丸山拓真, 安田誠宏, 森信人. (2017). 地震のスケーリング則を考慮した津波水位の確率評価に関する研究-南海トラフ地震を対象とした静岡県沿岸のケーススタディ. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 73(2), I_421-I_426. https://doi.org/10.2208/kaigan.73.I_421
- [76]嶋原良典. (2017). 津波対策計画策定のための人的被害評価手法-横須賀市におけるケーススタディ. 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 73(4), I_236-I_242. https://doi.org/10.2208/jscejseee.73.I_236
- [77]片岡侑美子, 奥村誠, 金進英. 自動車避難計画のための津波遭遇リスク最小化モデル. 土木計画学研究・講演集, 53. <http://strep.main.jp/uploads/mokmrp3/KOK1605IP59-02.pdf#search=%27%E5%A5%A5%E6%9D%91%E8%AA%A0+%E3%83%AA%E3%82%B9%E3%82%AF%E6%9C%80%E5%B0%8F%E5%8C%96%27>
- [78]太田外氣晴, 山中浩明. (2013). 東日本大震災における津波の伝播特性の評価と避難の問題点. 日本地震工学会論文集, 13(5), 5_1-5_17. https://doi.org/10.5610/jaee.13.5_1
- [79]林里美, 越村俊一. (2012). 映像解析による 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の流速測定. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 68(2), I_366-I_370. https://doi.org/10.2208/kaigan.68.I_366
- [80]高知県の海岸 HP. <https://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/175001/gyoumu-kaigan.html> (2019.10.1 閲覧)
- [81]高知県防災マップ. <http://bousaimap.pref.kochi.lg.jp/kochi/top/select.asp?dtp=1&pl=3> (2019.10.1 閲覧)
- [82]地図で見る統計(統計 GIS). <https://www.e-stat.go.jp/gis> (2019.10.1 閲覧)
- [83]中央防災会議: 南海トラフの巨大地震モデル検討会. <http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/index.html> (2019.10.1 閲覧)
- [84]高知県南海トラフ地震対策課 HP. http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/010201/files/2012121000171/2012121000171_www_pref_kochi_lg_jp_uploaded_attachment_83435.pdf (2019.10.1 閲覧)
- [85]中央防災会議: 東南海・南海地震等に関する専門調査会. http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai_nankaijishin/index_nankai.html (2019.10.1 閲覧)
- [86]加藤広之, 横山大地, 品川円宏, 中村克彦, 五十嵐雄介, 佐藤勝弘. (2015). 福井県沿岸における津波の発生頻度を考慮した漁港の設計津波設定について. 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 71(2), I_551-I_556. https://doi.org/10.2208/jscejoe.71.I_551

参考文献

- [87]入倉 孝次郎, 三宅 弘恵 (2001). シナリオ地震の強震動予測. *Journal of Geography* 110(6), 849-875. www.jstage.jst.go.jp/article/jgeography1889/.../_pdf
- [88]相田勇. (1981). 南海道沖の津波の数値実, *東京大学地震研究所彙報*, 56(4), p713-730.
- [89]相田勇. (1981). 東海道沖におこった歴史津波の数値実験, *東京大学地震研究所彙報*, 56(4), p367-390.
- [80]佐藤良輔:日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, P.126, P.133., 鹿島出版会, 1989.
- [91]嶋原良典, 許松, 多田毅. (2016). 津波漂流物モデルの現地スケール問題への適用に関する考察. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 72(2), I_427-I_432. https://doi.org/10.2208/kaigan.72.I_427
- [92]北村福太郎, 嶋原良典, 藤間功司. (2012). 津波防災計画策定における数値計算利用の効果. *土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)*, 68(4), I_1151-I_1158. https://doi.org/10.2208/jscejseee.68.I_1151
- [93]国土地理院:基盤地図情報サイト. <https://www.gsi.go.jp/kiban/> (2019.10.1閲覧)
- [94]佐藤龍治, 平岡透, 高見徹, 安高尚毅. (2016). 避難所の収容人数を考慮した津波時の避難可能範囲の検証法. *写真測量とリモートセンシング*, 54(6), 300-308. <https://doi.org/10.4287/jsprs.54.300>
- [95]「現地探訪用」四国の津波避難タワー等写真集, 平成 29 年 11 月四国防災共同教育センター. https://www.kagawa-u.ac.jp/files/7115/5262/8194/tiikiwoshiru_tower3.pdf#search=%27E9%AB%98%E7%9FA5%E7%9C%8C+%E9%81%BF%E9%9B%A3%E3%82%BF%E3%83%AF%E3%83%BC+%E5%8F%8E%E5%AE%B9%E5%8F%AF%E8%83%BD%E4%BA%BA%E6%95%B0%27 (2019.10.1閲覧)
- [96]内閣府中央防災会議:「首都直下地震避難対策等専門調査会」(第9回)帰宅行動シミュレーション手法について(案), 平成19年12月4日. <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutohinan/9/index.html> (2019.10.1閲覧)
- [97]北村福太郎, 稲津大祐, 池谷毅, 岡安章夫. (2019). 複数の破堤シナリオを考慮した河川洪水からの最適避難経路の算出. *土木学会論文集 B1(水工学)*, 75(2), I_1333-I_1338.
- [98]北村福太郎, 稲津大祐, 池谷毅, 岡安章夫. (2019). 津波避難計算を用いた避難経路の効果的な地震対策. *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, 75(2), I_1375-I_1380.
- [99]稲田健二. (2015). 和歌山県の津波避難困難地域と津波対策について. 平成 27 年度近畿地方整備局研究発表会論文集, 防災・保全部門, (11). <https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/happyou/theses/2015/pdf04/11.pdf>

参考文献

- [100] Suppasri, A., Shuto, N., Imamura, F., Koshimura, S., Mas, E., Yalciner, A. C. (2013) Lessons learned from the 2011 Great East Japan tsunami: Performance of tsunami countermeasures, coastal buildings, and tsunami evacuation in Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 170(6-8), 993-1018. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00024-0120511-7>.
- [101] Kong, Laura, S. L., Paula, K., Dunbar, Nicolas, Arcos. (2015) Pacific Tsunami Warning System: A Half-Century of Protecting the Pacific 1965-2015, Honolulu: International Tsunami Information Center, 120_135.

業績一覧

(査読論文)

1. 北村福太郎, 稲津大祐, 池谷毅, 岡安章夫. (2018). 津波浸水を考慮した避難経路および避難所選定ツールの開発. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74(2), I_391-I_396.
2. 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), 75(2), I_785-I_790.
3. 北村福太郎, 稲津大祐, 池谷毅, 岡安章夫. (2019). 津波避難計算を用いた避難経路の効果的な地震対策. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 75(2), I_1375-I_1380.
4. 北村福太郎, 稲津大祐, 池谷毅, 岡安章夫.(2019). 複数の破堤シナリオを考慮した河川洪水からの最適避難経路の算出. 土木学会論文集 B1(水工学), 75(2), I_1333-I_1338.
5. Kitamura, F., Inazu, D., Ikeya, T., Okayasu, A., An Allocating Method of Tsunami Evacuation Routes and Refuges for Minimizing Expected Casualties, International Journal of Disaster Risk Reduction (2020.2.3 Accept).

(講演)

1. 北村福太郎. 津波浸水を考慮した避難経路と避難場所の割り当て及び地震対策優先道路の抽出, 第 8 回巨大津波に関する合同研究集会.
2. Kitamura, F., Inazu, D., Ikeya, T., Okayasu, A., Optimal Allocation of Evacuation Routes and Refuge Considering the Temporal Spread of Inundation, AOGS 16th Annual Meeting.
3. 北村福太郎. 避難開始までの猶予時間を用いた津波避難計画, 第 9 回巨大津波に関する合同研究集会.

謝辞

この論文を提出するにあたり、懇切丁寧にご指導をいただきました東京海洋大学教授・岡安章夫先生，同教授・池谷毅先生，同准教授・稲津大祐先生に深甚なる謝意を表します。大学卒業以降，防衛省職員として，研究の世界から長く離れていた私を研究室に受け入れていただき，多く御議論をさせていただき，いろいろな機会を与えていただいた先生方のおかげでこの論文をまとめることができました。

岡安先生には検討会を通して研究の方向性に関し，多くの示唆に富んだご意見をいただき，夢中で研究に取り組むことができました。加えて，研究に没頭できる時間と環境を与えていただき，満足のいくまで研究を行うことができました。入学当時，博士号を取得することは自身の行う研究に精通するだけではなく，工学全般について，考えることができる者となることとの教えをいただきました。先生にいただく多面的なご意見は，多くの知識やご経験に基づく先見性から生まれるものと感じました。これから先，少しでも先生のような考え方ができるように，引き続き探求し，与えられる機会を生かしてさらに学んでいきたいと思いません。

池谷先生には，特に人に伝わる言い方をするということを教えていただきました。パソコンを前に毎日自分の研究を進めていくうちに，何とか自分が作ったアルゴリズムを全部余すところなく説明しようとし，初めて聞く人にとっては難解な説明になっていることになかなか気づくことができませんでした。研究は結果が出て終わりではなく，それをどう伝えるかということがいかに重要かを丁寧にお教えいただきました。

稲津先生には，研究を開始した当初の研究の進め方の相談から，英文の確認まで，多くの貴重な時間を割いてご指導をいただきました。そして研究の面白さを発表の場から飲み会の場まで，多くの場を通して教えていただきました。頭で考えるだけでなく，とにかく手を動かして何か結果を出しなさいという先生の教えで，いち早く研究を悩ましいものから楽しいものに変えることができました。

東京海洋大学教授・谷和夫先生には，検討会のたびに鋭い指摘をいただき，新たな課題を多くいただきました。先生にいただいた課題を解決するために試行錯誤することが，研究を進めるモチベーションにつながりました。

防衛大学校准教授・嶋原良典先生には，防衛省研修で津波に関する多くのことをお教えいただきました。そのおかげでもっと津波について勉強したいとの思いが芽生え，博士課程進学の意味が生まれました。ご紹介いただいた東京海洋大学に入学した後も，学会をはじめ，いろいろな場で声をかけていただき，研究の進め方など相談させていただきましたこと，心より感謝申し上げます。

研究室の仲間にも研究を行っていくうえで多く支えをいただきました。私と同じく社会人ドクターとして研究室におられた宇野喜之さんには，同じく避難シミュレーションを行うラ

謝辞

イバルと感じて研究を進めてまいりましたが、いつもご議論をさせていただく度に知識の多さに圧倒されました。宇野さんの存在が自信の研究の励みとなり、研究を進めることができました。研究員としておられた嶋原康子さんには入学当時、Fortran の実行し方から丁寧にお教えいただきました。そのおかげで、早期に自身のプログラム構築ができるようになりました。研究室の仲間には、熱心に研究を行う姿から、多くの刺激をもらいました。また、研究室内で議論をさせていただくことで自分の考えをまとめていくことができました。研究生活を送るうえで、少々年齢が離れていることに関係なく、ざっくばらんな話もできた環境はととても居心地がよく、研究のモチベーションにもつながりました。

3年もの間、博士課程の学生として私を送り出してくださった防衛省の皆様には感謝の念に堪えません。自由に研究できる時間を確保いただいたおかげで、3年で研究成果をまとめることができました。この論文以外にも3年で津波に関する知識や考え方を得ることができました。防衛省に戻ってからは、得た知識を生かして防衛施設の津波対策について進めていきたいと思います。

最後に、土日も趣味のように没頭して行った研究に不満を言うこともなく、気のすむまで好きにさせてくれた妻・未貴と娘・環奈に心から感謝します。