

市街地における津波避難先配分の最適化に関する研究 — 沼津市第二地区における検討事例 —

Optimization of Allocation of destinations of Evacuees from a Tsunami in an Urban Area - A Case Study in Daini-chiku in Numazu City -

池田 浩敬¹, 木村 謙², 和田 聖治³, 白井くるみ⁴

Hiroataka IKEDA¹, Takeshi KIMURA², Seiji WADA³ and Kurumi SHIRAI⁴

¹ 常葉大学大学院 環境防災研究科

Graduate School of Environment and Disaster Research, Tokoha University

² エーアンドエー株式会社

A&A Co., Ltd.

³ 有限会社ランダムウォーク

Randomwalk, LLC.

⁴ 昭和株式会社

Showa Co., Ltd

This paper presents a method for optimization of allocation of destinations of evacuees from a tsunami in an urban area. We tried to apply the method for evacuation planning in Daini-chiku in Numazu City. We considered arrangement and capacities of tsunami refuge buildings, evacuees' dwelling places and the amount of time it would take for a Tsunami to reach each refugee in the area. When we calculated for optimization, we modified the conditions of the starting time of evacuation after considering the speed of an earthquake tremor and walking speed of evacuees. We discovered an area that would be difficult for Tsunami evacuation of vulnerable people (walking speed :0.5m/s).

Keywords: Tsunami evacuation, optimization of allocation of destinations of evacuees, Tsunami refuge building

1. はじめに

東日本大震災以降、地震津波による浸水が想定される全国の沿岸部の自治体では、避難地、避難路の整備、津波避難ビルの指定、地区単位での避難計画の策定、避難訓練の実施など津波からの安全な避難の達成を目的とした様々な取り組みがなされて来た。南海トラフの地震による津波被害が想定されている静岡県においては特に、2011年東北地方太平洋沖地震に比べ、地震の震源域が陸地に近く、地震発生から津波が到達するまでの余裕時間が短いという特徴があり、避難時間を考慮した有効な避難計画の立案・評価等が求められている。

特に、静岡県沼津市沿岸部の市街地においては、地震発生から津波が市街地に遡上し始めるのは10分以内であり、浸水開始地点から600~700m内陸の地点でも地震発生から20分程度で浸水深が30cm程度になると想定されている。¹⁾ これは、地震発生から揺れがおさまるまでの時間(3~4分程度)を考慮すると避難にかけられる時間はさらに短いことを意味している。沼津港周辺の第二地区は海岸線を除き平坦な地形が広がっており、避難先としては指定された津波避難ビルが想定されているが、避難ビルの指定は、数少ない公共施設以外は所有者の承諾が得られた民間施設を一軒一軒指定していくという方法で積み上げられており、地区の避難人数と避難ビルの配置、容量等を定量的に考慮し計画化したものではない。この沼津市第二地区をケーススタディの対象地区とした既往研究²⁾において、避難シミュレーションに基づく避難可

能性の検討を行っているが、避難ビルの配置が偏っているため、各避難者が最も近いビルを選択すると避難ビルの容量を超える人が集中し入り切らずに他のビルへ迂回するといった事象が発生し、避難完了までの時間が延び、津波到達前の避難が間に合わなくなることが示されている。また、当該状況を克服するために、予め避難ビルの配置と容量を考慮し、地区ごとに避難先の事前配分をしておくことにより、総避難時間の短縮を図ることを提案している。

こうした背景を踏まえ本研究は、現実の市街地における、1)現状での津波避難ビルの配置、2)各避難ビルの容量、3)各避難ビルまでの津波到達時間、4)市街地における夜間人口分布を前提条件とし、各避難者が津波避難ビルまでの津波到達時間以内に容量に空きが有る避難ビルに避難するか、浸水域の外縁までの津波到達時間内に浸水域外に避難した場合に避難完了と定義し、上記条件で避難が完了しない避難困難者数の最小化及び避難時間の最小化¹⁾を目的関数として、避難者の避難先配分の最適化を行う方法についての考察を行うことを目的とする。

2. 既往研究のレビュー

津波避難計画の検討に関する既往研究としては、村上ら(2015)^{3) 4)}、三木ら(2015)⁵⁾、後藤ら(2015)^{6) 7)}、神原ら(2013)⁸⁾、伊藤ら(2011)⁹⁾等2011年東北地方太平洋沖地震や2014年チリ・イキケ沖地震等実際

の津波災害時の避難行動調査に基づき、津波からの避難行動特性を明らかにしようとするもの、成田ら (2015)¹⁰⁾、藤岡ら (2015)¹¹⁾ 等実際の津波災害時以外の避難訓練時などにおける歩行速度等避難行動調査から避難行動特性を明らかにしようとしたもの、小立ら (2015)¹²⁾、木村ら (2015)¹³⁾、小山ら (2015)¹⁴⁾、山田ら (2015)¹⁵⁾、熊谷ら (2014)¹⁶⁾、源ら (2009)¹⁷⁾、渡辺ら (2006)¹⁸⁾、大畑ら (2005)¹⁹⁾ 等津波避難シミュレーションモデルの構築及びその検証、当該モデルを用いた事例における避難行動の再現、避難計画の評価、地区の避難可能性や避難困難度合いの評価等を行ったもの、さらには、南ら (2015)²⁰⁾、秦ら (2015)²¹⁾、関ら (2014)²²⁾、佐藤 (2014)²³⁾、安藤 (2014)²⁴⁾ 等津波避難ビルの避難容量、避難距離等から避難困難区域の評価や避難計画の検討を行ったもの、同様に津波避難ビルの避難容量、避難距離 (ポロノイ図) 等から津波避難ビル自体の配置の評価や最適配置手法の提案を行ったもの、また、梅本ら (2014)²⁵⁾ 等地区住民へのアンケート調査による避難行動特性把握に基づき地区の津波リスク評価を行ったもの等がある。

しかしながら、夜間人口 (居住者) を対象とした避難時間短縮のための避難者の避難先の最適配分手法についての研究はなされていない。

3. 避難先の最適配分方法の提案

(1) 対象地区空間のモデル化

ケーススタディの対象地区である静岡県沼津市の第二地区について、静岡県第4次地震被害想定においてL2津波の想定浸水域を包含する東西約1.5km、南北約2.5kmの市街地を500mm×500mmのグリッドで区切り、各セルを「避難先 [歩行空間] (避難ビル 52箇所と浸水域外の道路上 17箇所)」、「道路・通路等 [歩行空間]」、「避難者の初期配置空間 [歩行空間] (住宅)」、「障害物 [歩行空間以外の空間]」のいずれかに定義した。

(2) 避難者 (居住者) の配置

本ケーススタディでは夜間における避難を対象としているため、住民基本台帳の町丁目別人口に基づき、住宅の建築面積に応じて人を按分し配分した。具体的には第二地区の浸水域内の居住者 5,154 人を沼津市土地利用図で宅地となっている建物 (住宅) 部分のセル内に建築面積に応じて人を配分した。

(3) 避難ポテンシャルの計算

全ての歩行空間のセルについて、各避難先との間の最短経路での歩行距離 (m) (以下「避難ポテンシャル」という) を計算し、歩行空間の各セルは、各々69箇所の目的地に対応した避難ポテンシャルを有している。図1に白い点で示した位置にある避難先を対象とした避難ポテンシャルの値を色分けして表したポテンシャルマップの例を示した。

(4) 避難時間マトリクスTの作成

配置された避難者 p の初期位置から、全ての目的地 d (避難ビル等の避難先) への徒歩での避難時間を前記の避難ポテンシャルを用いて ([避難ポテンシャル (避難距離)] / [歩行速度]) で算出し p×d の避難時間マトリクスを作成した。その際、以下を前提条件とした。

$$T = \begin{bmatrix} t_{1,1} & \cdots & t_{1,69} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{5154,1} & \cdots & t_{5154,69} \end{bmatrix}$$

ここでいう避難時間とは、地震発生時から避難者が避難先へ到達するまでの時間を意味し、当該数値は避難者の歩行速度と地震発生後の避難開始時間によって異なるため、両者は、第4章の「配分計算のケース設定」の「(1)歩行速度と避難開始時間の設定」の項に示すそれぞれ2通りの設定を行った。

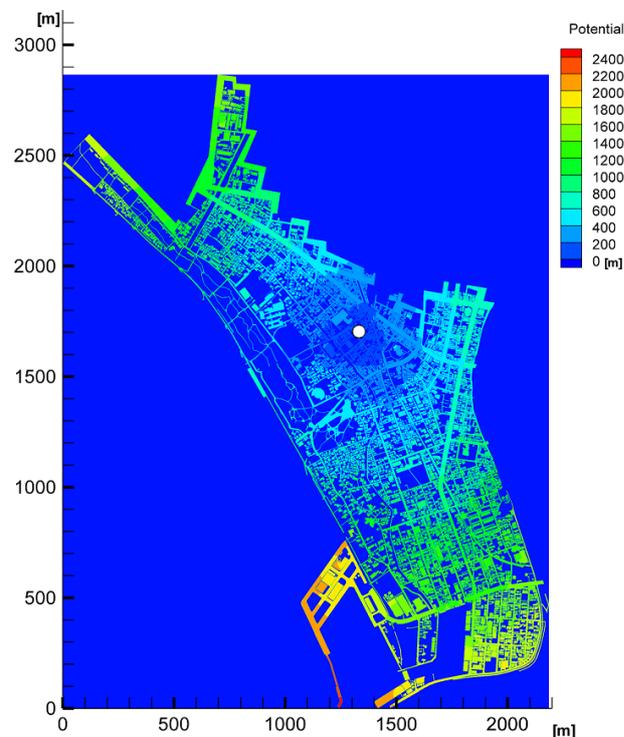


図1 避難ポテンシャルマップの例

(5) 目的地の利用可否の判定

静岡県第4次地震被害想定に基づき、避難行動が取れなくなる (動くことができなくなる) とされる浸水深30cm (南海トラフの巨大地震モデル検討会 (第二次報告) 津波断層モデル編—津波断層モデルと津波高・浸水域等について、2012年より引用) の津波が避難ビルに到達する時間以前に辿り着かない避難者は、当該避難ビルに避難することは出来ないものとした。具体的には、 $[t_{pd} - t_d]$ (目的地 d への津波到達時間) ≤ 0 の場合、避難者 p は目的地 d を利用不可と判定し、避難時間マトリクスの t_{pd} に FALSE のフラグを立てた。

(6) 避難者 p の目的地の決定

(a) 最も避難時間が短くなる避難先に割り振るケース

避難時間マトリクスの中から、避難可能な組合せの中で避難者 p の目的地 d への避難時間 t_{pd} の値が最も小さい組合せから順に、避難者 p と目的地 d の組合せを決めた。

避難の目的地となっている避難ビルには、有効避難面積から求めた避難容量を超えて避難者が避難することは出来ない。したがって容量が一杯になった時点で目的地 d の列を避難時間マトリクスから削除した。残ったマトリクスの中で、避難時間 t_{pd} の値が最も小さい組合せから順に、避難者 p と目的地 d の組合せを決めるという同じ操作を繰り返した。

避難者全ての目的地が決定済となるか、未決定の全ての避難者に利用可能な目的地が存在しない状況になった時に、この操作を終了する。この割り振り方法を algorithm1 と呼ぶ。

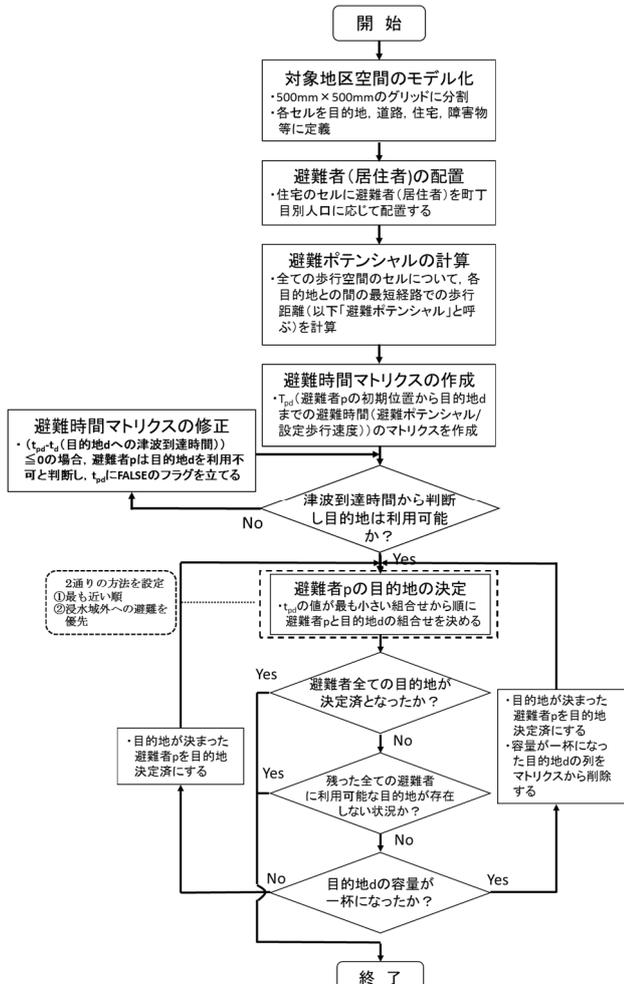


図2 避難者の避難先の割り振り方法 (algorithm1: 最も近い避難先へ配分)

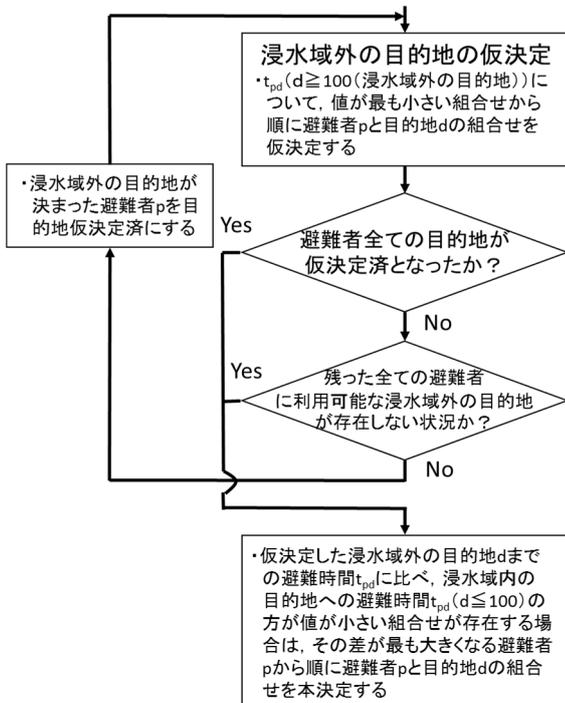


図3 避難者の割り振り方法 (algorithm2: 浸水域外への避難を優先) * 図2内の.....内部分のみ

(b) 浸水域外の目的地を優先して割り振るケース

本ケースは、避難者 p の目的地の決定に当たり、「最も近い目的地ではなく、浸水域外に近い場所では、まず浸水域外を優先させ、逆に津波到達以前に浸水域の縁まで辿り着くことが困難な避難者を浸水域内の避難ビル等へ優先して割り振る」という考え方である。これは、浸水域外へ出る、という目的地設定は目的地が特定の施設ではないため、容量の制約が無い。したがって、容量の制約がある浸水域内の避難ビル等の目的地には、浸水域の縁に津波が到達する前に浸水域外に出ることが出来ない避難者を優先して割り振った方が、避難困難者を減らしたり、避難時間の短縮に効果的ではないか、という仮説に基づく設定である。避難先の配分方法を示した図 2 中の「避難者 p の目的地の決定」の部分のみについて、「浸水域外の目的地を優先して割り振るケース」の割り振り方法を図 3 に示した。この割り振り方法を algorithm2 と呼ぶ。

(7) 各避難者の目的地割り当ての改善 (Refine)

目的地割り当ての最適化⁽²⁾を図るため、まずは最適化の目的関数を設定する。避難可能な目的地が無い「避難困難者数の最小化」及び「避難時間の最小化⁽¹⁾」を目的関数とする。平均避難時間ではなく RMS の最小化を目的関数とした理由は、避難時間が飛び抜けて長い避難者を減らすことにある。

5, 154 人すべての組合せの避難者ペア (p_1, p_2) で、割当てられた目的地 (それぞれ d_1, d_2 とする) を交換することにより、避難時間の RMS が小さくなるか、避難者ペアの中の避難困難者 (避難可能な目的地が無い者) 数が減少する場合のみ交換を行う。交換した結果、どちらかの避難時間が当該目的地への津波到達時間を上回ってしまう場合 (避難不可) は交換は成立しない。

$$t_{p_1 d_2}^2 + t_{p_2 d_1}^2 < t_{p_1 d_1}^2 + t_{p_2 d_2}^2$$

または避難困難者数の減少

$$\text{かつ } t_{p_1 d_2} - t_{d_2} < 0 \quad \text{かつ } t_{p_2 d_1} - t_{d_1} < 0$$

であるなら、避難者 p_1, p_2 への割り当てをそれぞれ交換する。5, 154 人すべての避難者ペア (p_1, p_2) 間での割当て交換の可否の判断をした結果、割当ての交換が一度も行われなければ終了する。割り当ての交換が 1 回以上あった場合は、再度割当て交換の可否の判断を全ての組合せのペアについて繰り返す。

4. 配分計算のケース設定

本研究では、3章に示した方法に基づき、表 1 及び表 2 に示したケース分けに従って、複数ケースについて避難先の最適配分を行った。

(1) 歩行速度と避難開始時間の設定⁽³⁾

対象とする目的地が避難者 p にとって避難可能か否かの判断をする際に、地震発生から目的地までの津波の到達時間は第 4 次地震被害想定結果を前提条件とすれば一意に求められるが、避難者の到達時間は、避難の歩行速度と地震発生から (正確には揺れ始めてから) 何分後に避難を開始するかという設定によって異なる。

避難開始時間については、本ケーススタディ対象地区が立地する静岡県内の「大規模地震対策『避難計画策定指針』」(2013 年 9 月改定)⁽²⁶⁾ では、避難開始時間の設定を昼夜間とも地震発生 5 分後としている。また、同県の第 4 次地震被害想定では、夜間は 10 分後に避難を開始す

ることを前提としている。そこで本研究では、県の指針に基づく「避難開始すべきタイミング」と被害想定で想定した「現状で想定される避難開始のタイミング」の両者を採用し、5分後と10分後の2ケースを設定した。

歩行速度についても、静岡県の避難計画策定指針によると、健常者は1.0m/s、要配慮者は0.5m/sと設定されているため、ここではこの2ケースの設定を行った。

(2) 避難ビルの容量に基づく避難先としての配分の可否の設定

白井ら(2015)²⁷⁾の研究では、避難者は必ずしも自宅から最寄の避難ビルを避難先と決めていたとは限らず、やや遠くても比較的規模の大きい避難ビル、浸水域外を目的地としている避難者が多いことが指摘されている。

そこで本研究においては、避難先の選択肢として、市が指定している全ての避難ビルを対象とした場合と、避難ビルの容量が20人未満の規模の小さい避難ビルを選択肢から除いた場合の2ケースの設定を行った。

(3) 避難者の目的地決定の方法

避難者毎の目的地の決定方法については、3章の(6)で述べたように、(a) 最も避難時間が短くなる避難先に割り振るケース (algorithm 1) と、(b) 浸水域外の目的地を優先して割り振るケース (algorithm 2) の2ケースの計算を行った。

(4) 各避難者の目的地割り当ての改善 (Refine)

本研究では、3章の(7)において説明した、「避難困難者数の最小化」及び「避難時間の最小化⁽¹⁾」を目的として、避難者の全ペアの間で目的地の交換について判断を行い、目的関数に則した改善が見られる場合は交換を行うという目的地割り当ての改善 (Refine) の手順を行った場合と行わなかった場合の2ケースの設定を行った。

表1 避難先の割り振りのケース毎の条件設定

	避難開始時間	容量20人未満の避難ビルの扱い	歩行速度
CASE 1	5分後	除かない	1m/s
CASE 1s	5分後	除かない	0.5m/s
CASE 2	10分後	除く	1m/s
CASE 2s	10分後	除く	0.5m/s
CASE 3	10分後	除かない	1m/s
CASE 3s	10分後	除かない	0.5m/s
CASE 4	5分後	除く	1m/s
CASE 4s	5分後	除く	0.5m/s

表2 避難先の割り方法によるケース分け

	目的地決定方法	目的地割り当ての改善 (Refine)
algorithm 1	最も近い目的地	なし
algorithm 1r	最も近い目的地	あり
algorithm 2	浸水域外優先	なし
algorithm 2r	浸水域外優先	あり

5. 結果と考察

図4にCASE1・algorithm1rの避難先の配分結果を示した。このケースは、県の避難計画策定指針の通り、地震発生5分後に避難を開始し、歩行速度を1.0m/sに設定したケースで、指定されている全ての避難ビルを利用可とし、避難ビルの容量を超えない制約条件の中で最も近い(避難者-目的地)の組合せを優先して一旦配分した後、

全ての避難者のペア毎に目的地割り当ての改善 (Refine) を行ったケースである。避難先毎に色分けされた線で結ばれた避難者が当該避難先へ割り振られた避難者であることを表している。避難開始時間が地震発生後5分で、歩行速度が1.0m/sであれば、全ての避難者が避難先への津波到達以前に避難先へ到達可能という結果となっている。

ケース毎の避難時間のRMSと避難困難者数を表3に示した。避難困難者は歩行速度を0.5m/sに設定したケース (CASE1s, CASE2s, CASE3s, CASE4s) のみ発生している。逆に歩行速度を1.0m/sに設定した場合では避難開始時間を10分後とした場合 (CASE2, CASE3) でも、この第二地区のケースでは避難困難者は発生していない。

第二地区の場合、容量20人未満の避難ビルを避難先から除いた場合でも、歩行速度1.0m/sのケース (CASE2, CASE4) では避難時間のRMSの値は、0.7~2.4%程度の増加に止まっており、また、歩行速度0.5m/sのケース (CASE2s, CASE4s) でも避難困難者数に変化は無く、影響は少ないと考えられる。

避難時間のRMS⁽¹⁾が最も小さい値となるのは、避難開始時間5分、歩行速度1.0m/s、全ての避難ビルを活用し、容量の許容する範囲で最も近い避難ビルに配分し、その後、全ての「避難者-避難先」のペア間での割り当ての改

表3 ケース毎の避難時間のRMS⁽¹⁾と避難困難者数及び最寄の避難先以外への避難者数

配分計算のケース設定		避難時間のRMS ⁽¹⁾ (s)	避難困難者(人)	最寄の避難先以外への避難者(人)
CASE 1	algorithm 1	197.1	0	1,740
	algorithm 1r	168.2	0	2,261
	algorithm 2	186.7	0	1,988
	algorithm 2r	172.4	0	2,408
CASE 1s	algorithm 1	511.4	195	1,787
	algorithm 1r	483.6	162	2,335
	algorithm 2	511.7	174	1,956
	algorithm 2r	495.1	174	2,300
CASE 2	algorithm 1	345.7	0	2,088
	algorithm 1r	317.2	0	2,585
	algorithm 2	330.0	0	2,449
	algorithm 2r	319.0	0	2,620
CASE 2s	algorithm 1	903.6	575	2,461
	algorithm 1r	882.8	575	2,774
	algorithm 2	888.1	575	2,528
	algorithm 2r	884.0	575	2,774
CASE 3	algorithm 1	344.9	0	1,940
	algorithm 1r	316.4	0	2,508
	algorithm 2	328.7	0	2,131
	algorithm 2r	318.1	0	2,538
CASE 3s	algorithm 1	902.2	575	2,313
	algorithm 1r	880.9	575	2,704
	algorithm 2	886.9	575	2,410
	algorithm 2r	882.1	575	2,704
CASE 4	algorithm 1	201.9	0	1,888
	algorithm 1r	170.4	0	2,399
	algorithm 2	188.1	0	2,106
	algorithm 2r	174.0	0	2,493
CASE 4s	algorithm 1	553.4	195	1,935
	algorithm 1r	485.9	162	2,408
	algorithm 2	513.7	174	2,074
	algorithm 2r	497.1	174	2,394

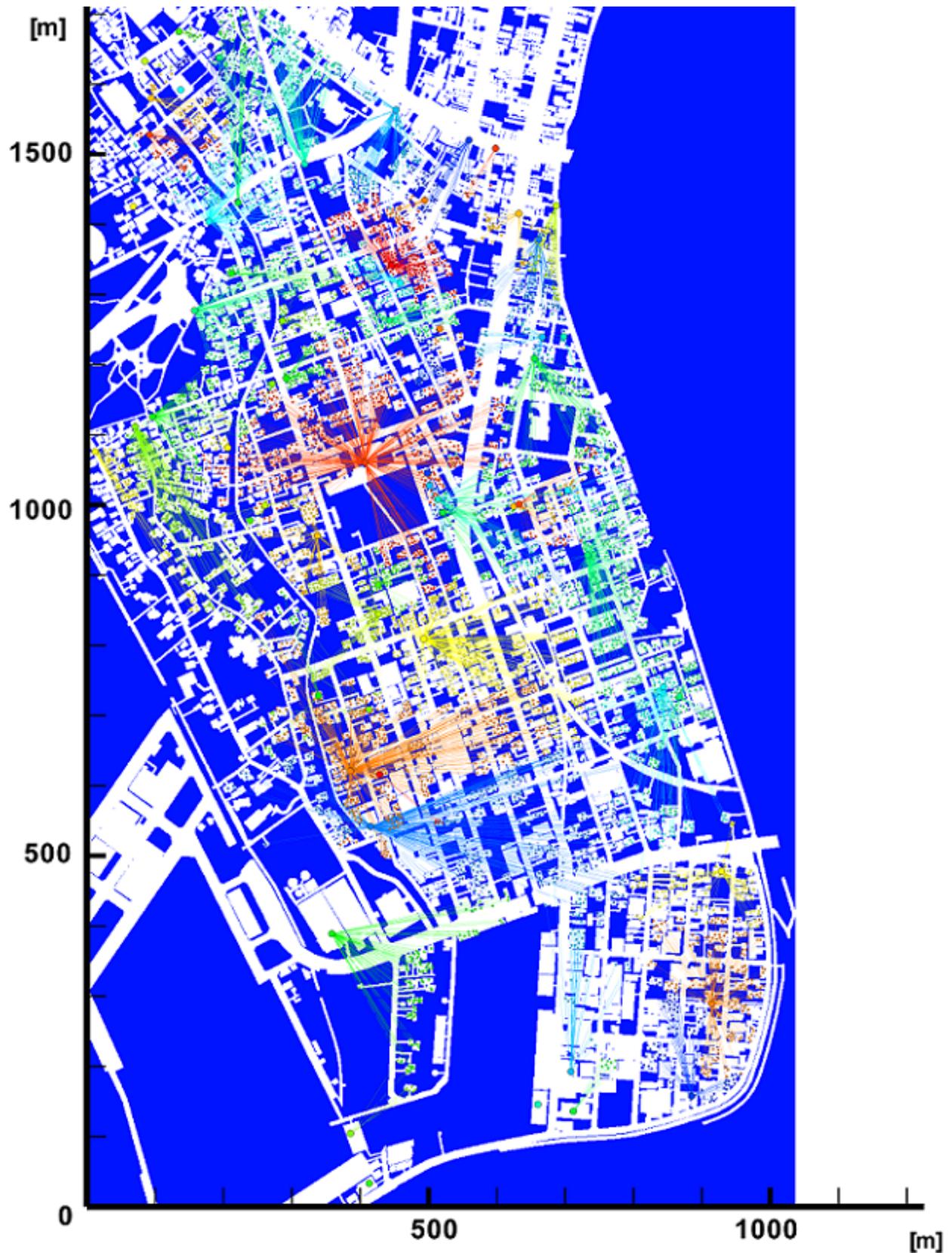


図4 避難先の配分結果 (CASE1・algorithm1r)

善 (Refine) を行ったケース (CASE1・algorithm1r) であった。

表3にはこの他、各ケースにおける「最寄の避難先以外への避難者数」を示した。配分計算においては、避難困難者の最小化、避難時間のRMSの最小化を目的関数と

しているため、避難者は最も近い避難先に配分されるとは限らない。例えば、避難開始時間5分、歩行速度0.5m/s、全ての避難ビルを用い、容量の許容する範囲で最も近い避難ビルに配分したCASE1sを見ると、algorithm1, algorithm2のどちらのケースでも、目的地

割り当ての改善 (Refine) を行ったケース (CASE1s・algorithm1r, algorithm2r) の方が行わなかったケースに比べ、最寄の避難先以外への避難者数は増えているが、避難時間の RMS は小さくなっており、避難困難者数も維持又は減少している。避難先の容量に制約がある以上、最寄の避難先以外への避難者の配分は必要不可欠であり、当該避難者の増加は必ずしも避難時間の増大を意味しない。

避難開始時間 5 分、歩行速度 0.5m/s、全ての避難ビルを用い、浸水域外に出る避難を優先させ、目的地割り当ての改善 (Refine) を行ったケース (CASE1s・algorithm2r) での避難困難者の発生状況を図 5 に示した。赤い点は、避難困難者の初期位置 (居住場所) を表している。図 6 は、他の条件は図 5 と同様で、目的地の決定の際に最も近い避難先を優先したケース (CASE1s・algorithm1r) である。両者を比べると図 6 のケースの方が避難困難者数が 12 人少ないが、両者の分布にはほとんど違いが見られない。図 7 は図 6 のケース設定のうち避難開始時間の条件のみを 5 分から 10 分に変更したケース (CASE3s・algorithm1r) である。避難困難者数が約 3.5 倍の 575 人に増え、その分布も大きく広がっている。避難困難地域が拡大していることが分かる。

一方、「容量の制約がある浸水域内の避難ビル等の目的地には、浸水域の縁に津波が到達する前に浸水域外に出ることが出来ない避難者を優先して割り振った方が避難困難者を減らしたり、避難時間の短縮に効果的ではないか」という仮説については明確な検証結果が得られていない。目的地割り当ての改善 (Refine) を行わないケースでは、避難時間の RMS にほぼ変化が無かった CASE1s を除く他のすべてのケースで、浸水域外に出る避難を優先させたケース (algorithm2) の方が、容量の許容する範囲で最も近い避難ビルに配分したケース (algorithm1) に比べ避難時間の RMS⁽¹⁾ が小さくなり、CASE1s と CASE4s で



図 5 避難困難者の分布 (CASE1s・algorithm2r)



図 6 避難困難者の分布 (CASE1s・algorithm1r)

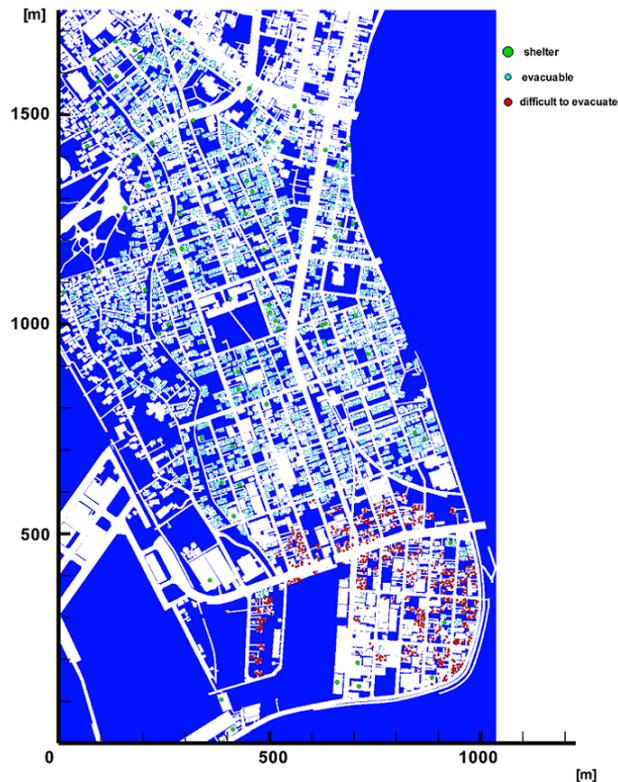


図 7 避難困難者の分布 (CASE3s・algorithm1r)

は避難困難者数も減少している。しかし、避難時間⁽¹⁾と避難困難者数の最小化を目的として目的地割り当ての改善 (Refine) を行った場合は結果が逆転した。個々の避難者の目的地決定の方法に比べ、2 名の避難者間の目的地交換という方法を用いた目的地割り当ての改善 (Refine) の方が解の探索範囲が広く効果が大きいため、

より改善の余地が残されていた algorithm1 の方が結果として避難時間の RMS⁽¹⁾ が小さくなったのではないかと推測されるが、原因は明らかになってはいない。

ではない。

6. おわりに

本稿では、実際の市街地における夜間人口を前提とした避難において、避難ビル等の容量や避難開始時間、避難先への津波到達時間等を考慮した上で、避難者の避難完了までの時間を出来る限り短縮させるための避難先の配分方法についての提案を行ったものである。本稿で提案した方法は計算機の能力に依存せず通常のパソコンでも計算できるという要素を考慮し、近似最適化による配分方法を提案した。本方法を用いることにより、津波浸水が想定される他の地区においても本手法を適用して、より有効な避難先配分の検討を行うことが可能であると考えられる。一方で、本研究では「容量の制約がある浸水域内の避難ビル等の目的地には、浸水域の縁に津波が到達する前に浸水域外に出ることが出来ない避難者を優先して割り振った方が、避難困難者を減らしたり、避難時間の短縮に効果的ではないか」という仮説に対し十分な検証結果が得られておらず、今後さらに検証を行っていくことが課題として残されている。

また、本研究の成果は、本年度に実施される第二地区における自治会単位での津波避難計画検討住民ワークショップにおいて用いる予定である。しかし、本研究では避難者 1 人 1 人を配分しており、自治会及びそれをさらに分割した“組”単位での配分とはなっていない。したがって、計算結果通りの避難先の配分は運用上困難である。実際には、本結果を参考とした上で、住民の方々の話し合いの中で、自治会・組などのエリア区分に合わせて避難先を割り振るといった検討が必要となる。

謝辞

本研究は、平成 28 年度科学研究費助成事業（基盤研究 C）「安全目標レベルの住民合意に基づく地区実態に即した津波避難計画策定手法に関する研究（課題番号：15K01264）」（研究代表者：池田浩敬 常葉大学）によるものである。

また、本研究の構想段階において、故吉田克之氏に貴重な助言を頂いた。記して感謝の意を表す。

補注

- (1) 避難時間の最小化については、具体的には、避難時間の 2 乗平均平方根 (RMS) (Root Mean Square) の最小化を行った。その理由は、避難時間が飛び抜けて長い避難者を減らすことにある。また、最長避難時間の最小化を用いなかった理由は、単に最長避難時間者 1 人の避難時間を短くするだけでなく最も避難時間が長いグループの避難者数を減らすことも考慮したからである。
- (2) 本稿で提案した方法は計算機の能力に依存せず通常のパソコンでも計算できるという要素を考慮し、近似最適化による配分方法を提案した。
- (3) ここではあくまで避難計画における避難者の避難先配分の最適化を行う方法についての考察を行うことを目的としており、歩行速度と避難開始時間の設定については、現状の静岡県の避難計画査定指針に基づき設定したものであり、具体的な避難者 1 人 1 人の避難可能性を検証しているもの

参考文献

- 1) 静岡県：第 4 次地震被害想定，2013.
- 2) 池田浩敬，柳原幸子，馬場拓矢：マルチエージェントモデルを用いた市街地における有効な津波避難計画の検討，地域安全学会梗概集 No. 32, pp. 15-18, 2013.
- 3) 村上ひとみ：2014 年チリ・イキケ沖地震の津波避難に関する研究：その 3 免税特区 ZOFRI のアンケート結果，学術講演梗概集 2015(都市計画)，一般社団法人日本建築学会，pp. 443-444, 2015.
- 4) 村上ひとみ，長瀬裕也，高橋征仁，朝位孝二，池田誠，佐瀬浩市：2014 年チリ・イキケ地震の津波避難に関する研究：その 2 住民アンケート結果にみる移動手段と所要時間，日本建築学会中国支部研究報告集 38, pp. 1025-1028, 2015.
- 5) 三木彩恵子，高橋沙織，小貫陽平，森山修治，長谷見雄二：東日本大震災における地域住民の津波避難行動の実態把握：災害時要援護者を含めた避難者の分析，日本建築学会関東支部研究報告集 85(I), pp. 709-712, 2015.
- 6) 後藤洋三，池田浩敬，市古太郎，小川雄二郎，北浦勝，佐藤誠一，鈴木光，田中努，仲村成貴，三上卓，村上ひとみ，柳原純夫，山本一敏：東日本大震災津波避難合同調査団の形成と山田町・石巻市担当チームによる調査結果 一調査概要一，日本地震工学会論文集 15(5), 5_97-5_117, 2015.
- 7) 後藤洋三，池田浩敬，市古太郎，小川雄二郎，北浦勝，佐藤誠一，鈴木光，田中努，仲村成貴，三上卓，村上ひとみ，柳原純夫，山本一敏：東日本大震災津波避難合同調査団の形成と山田町・石巻市担当チームによる調査結果 一データ特性分析一，日本地震工学会論文集 15(5), 5_118-5_143, 2015.
- 8) 神原康介，萩原拓也，田中暁子，黒瀬武史，窪田亜矢：東日本大震災時における岩手県大槌町赤浜地区住民の避難行動調査，学術講演梗概集 2013(都市計画)，pp. 655-656, 2013.
- 9) 伊藤沙知，生田英輔，土井正，北本裕之，川勝悠介，高橋隆宜，大道美佳，紙田和代，宮野道雄：東日本大震災における津波避難行動調査一岩手県宮古市での調査報告一，地域安全学会梗概集 No. 29, pp. 119-120, 2011.
- 10) 成田健吾，村石一明，呂志倫，池田一晃，上川慎也，永野康行：個別避難支援に基づく津波防災：2014 年度南あわじ市阿方中西地区における避難訓練時の歩行速度，学術講演梗概集 2015(都市計画)，一般社団法人日本建築学会，pp. 223-224, 2015.
- 11) 藤岡里香，生田英輔：住民意識を考慮した津波避難施設への避難リスク評価：大阪市住之江区を事例として，学術講演梗概集 2015(都市計画)，一般社団法人日本建築学会，pp. 221-222, 2015.
- 12) 小立雄大，池田聡志，池部仁哉，小林祐司：地震津波を想定した住民意識の把握と避難行動のシミュレーションによる検証(その 2)：MAS を用いた津波避難シミュレーションによる避難行動分析，日本建築学会研究報告 九州支部. 3, 計画系 (54), pp. 453-456, 2015.
- 13) 木村圭佑，小林健一郎：マルチエージェントシミュレーションによる西宮広域津波避難訓練の再現と考察，土木学会論文集 B1 (水工学) 71(4), I_1375-I_1380, 2015.
- 14) 小山真紀，湯浅亮，奥村与志弘，土肥裕史，清野純史：要援護者を考慮した DEM による避難シミュレーションプログ

- ラムの開発と南あわじ市阿万塩屋町中西地区におけるケーススタディ, 日本地震工学会論文集 15(5), 5_41-5_59, 2015.
- 15) 山田崇史, 岸本達也: 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), pp.125-133, 2015.
- 16) 熊谷兼太郎: 2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動の津波避難シミュレーションによる再現性の検証, 土木学会論文集D3(土木計画学) 70(5), I_187-I_196, 2014.
- 17) 源貴志, 成行義文, 藤原康寛, 三神厚: 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), pp.757-767, 2009.
- 18) 渡辺公次郎, 近藤光男, 野澤征司: マルチエージェントシステムを用いた津波避難シミュレーションモデルの開発, 日本建築学会四国支部研究報告集(6), pp.97-98, 2006.
- 19) 大畑大志郎, 鏡味洋史, 高井伸雄: 津波からの避難シミュレーションへのマルチエージェントシステムの適用: その2 釧路市をモデルとして, 学術講演梗概集. F-1, 一般社団法人日本建築学会, pp.837-838, 2005.
- 20) 南燿太, 稲垣景子, 志村真紀, 佐土原聡: 津波浸水予測に基づく被害の空間分析: 逗子市における津波避難を対象としたケーススタディ, 学術講演梗概集 2015(都市計画), 一般社団法人日本建築学会, pp.225-226, 2015.
- 21) 秦吉弥, 湊文博, 常田賢一, 小山真紀, 楢田泰子, 山田雅行: 強震動予測および歩行実験に基づく津波避難困難地域の評価—和歌山県串本町を例として—, 土木学会論文集 B3(海洋開発) 71(2), I_671-I_676, 2015.
- 22) 関脩大, 村尾修, 杉安和也: 藤沢市片瀬西浜・鶴沼地区における津波避難ビル収容能力を考慮した津波避難計画, 地域安全学会論文集(22-24), pp.123-132, 2014.
- 23) 佐藤憲一郎: 津波避難施設の最適分散配置手法の検討, 学術講演梗概集 2014(情報システム技術), 一般社団法人日本建築学会, pp.73-74, 2014.
- 24) 安藤和敏: 浜松市南部における津波避難ビル配置のボロノイ図を用いた分析, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学 59(6), 公益社団法人日本オペレーションズ・リサーチ学会, pp.330-335, 2014.
- 25) 梅本通孝, 糸井川栄一, 太田尚孝: 住民アンケートに基づく避難行動特性を考慮した津波避難リスク評価の試み: 茨城県神栖市におけるL2津波想定を対象として, 都市計画論文集 49(3), pp.327-332, 2014.
- 26) 静岡県: 大規模地震対策「避難計画策定指針」, 2013.10改訂
- 27) 白井くるみ, 中村友紀, 池田浩敬: 想定浸水域居住者の津波避難行動に関する基礎的調査, 地域安全学会梗概集No.36, pp.141-144, 2015

(原稿受付 2016.9.10)

(登載決定 2017.1.21)