

地域人口分布の津波安全性評価のための メッシュ型数理最適化モデル

Mesh-based optimal model for Tsunami safety evaluation of population distribution

佐藤 千仁*

Kazuto SATO

*地域計画学・レジリエンス計画研究室（指導教員：奥村誠教授）

Evaluating the tsunami safety of population distribution is a critical concern; however, current methods by local authorities do not ensure the feasibility of transport during evacuation. This study introduces a optimization model of Tsunami Evacuation that employs a mesh-based representation to effectively manage population distribution. Through model validation, the proposed model demonstrates its potential for evaluating the tsunami safety of regional population distributions.

Key Words: Safety Evaluation, Tsunami Disaster, Mesh-based Model, Optimization

1. はじめに

(1) 本研究の背景と目的

将来の人口分布のあり方は、都市や地域の将来計画における基本的な検討事項である。高齢化による脆弱性の高まりと、防災投資のための財政力の低下が懸念される中、将来の人口分布の自然災害への安全性を評価することの重要性はますます高まっている。沿岸部の都市では、津波の浸水区域内に漁業や港湾関係などの産業が集積し、人々の滞在を禁止する規制の実施は難しいため、適切な避難を前提に人口分布の評価を行う必要がある。

これまでの自治体における津波避難計画では、歩行者や自動車の避難速度に一定値を設定し、津波浸水予想時刻までに移動できる距離を与えて、その範囲内を安全な地域とみなすことが多かった。しかし、歩行者と自動車が混在して避難速度が低下する危険性が考慮されておらず、物理的に実現不可能な避難行動に基づく安全性の評価になっているという問題がある。

本研究では、物理的な実現可能性を保証しつつ最も効率的な津波避難のあり方を求める数理最適化モデルを構築する。複数の人口分布を直接的に扱うために、汎用性の高いメッシュを単位として人口分布を表現し、避難交通を実現する点に特徴がある。また、青森県八戸市を例にモデルの有効性を確認する。

(2) 津波安全性評価と既往研究

これまで津波避難における自動車の利用は禁止されていたが、2011 年東日本大震災や 2016 年福島県沖地震では多くの地域で自動車避難が行われ、各地で渋滞が多発した。その中で距離的に徒歩避難が不可能な地域も多いことが顕在化した。その後、地震津波想定改訂を受け、自動車避難をとり入れた津波避難計画を作成する自治体も増加しているが、前述したように距離に基づく安全性

の評価にとどまり、交通渋滞や歩車の相互作用などは考慮されていない。

避難交通による道路渋滞の可能性を考慮した研究も徐々に蓄積されてきている。たとえば、エージェントベースのシミュレーションモデルを用いた研究は多く行われており、最近では、小坂ら(2017)¹⁾のように、積雪による道路条件の違いなどを加味した分析も行われている。ただし、人口分布の安全性評価を行うには、人口分布に対応するエージェントを複数生成してシミュレーションを繰り返す必要があり、計算コストが大きくなる。道路ネットワーク上で、渋滞の発生を回避するような効率的な交通パターンを求める数理最適化モデルも開発されている²⁾が、複数の人口分布の計算を行うには、人口をネットワーク上に再配分する作業が必要であり、やはり計算コストが大きい。

これらの人口分布問題を扱うには、ネットワークではなくメッシュをベースとするモデルが望ましいが、研究事例は少なく増田ら(2023)³⁾の洪水避難制御モデルに限られる。このモデルはネットワークベースモデルの計算負荷軽減のためにメッシュベースモデルを採用しているが、その主眼は垂直避難と水平避難の選択率という避難方法の評価にある。本研究は、地域の人口分布の津波安全性評価を主眼とする点で、上述の研究とは目的が異なる。

2. メッシュベース最適津波避難モデルの提案

(1) モデルの基本的な考え方

本研究では、人口集計単位として多く用いられる地域メッシュをベースとするモデルを構築し、津波避難交通をメッシュ間の人口の移動として扱う。交通工学の知見を踏まえ、自動車と歩行者が混在し、互いの移動速度を低下させる相互作用を考慮して、移動の実行可能性を

保障する。また、今後の人口減少や高齢化により地域内の歩行困難者が増加することを鑑みて、1 台の自動車に歩行者を複数回にわたり乗降させるピックアップ行動の可能性を考える。そこで、自動車を運転する運転者、運転者に同乗する同乗者、歩行者の 3 つモードを考え、避難途中の移行を可能とする。メッシュには、自動車と歩行者が移動する道路部分、車両が歩行者を乗降させる道路外部分、防災公園や避難タワーに代表される避難場所部分という、3 つの部分を考える。以上を図 1 に示す。

本研究では、時点 t にメッシュ i に存在する 1 人の避難者が津波に遭遇するリスク(以下「津波遭遇リスク」) R_t^i を与え、その時点の滞在者数との積をリスク評価値と考える。津波遭遇リスク R_t^i は、メッシュ i の時点 t までの最大浸水深を用いて、

$$R_t^i = 1 / \left\{ 1 + \exp \left(-30 * \left(\text{時点 } t \text{ 以前の最大浸水深} - 0.3 \right) \right) \right\}$$

と設定する。これは浸水深 0.3m 付近を境に 0 から 1 に数値が急上昇するロジット関数である。ただし津波遡上開始以前の $t \leq 30$ は全メッシュの値を 0 とし、 $t \geq 31$ は浸水区域外メッシュと避難場所部分の値を 0 とおく。

所与の人口分布を固定してその後のリスク評価値を累積し、津波第一波到達開始から終了までの時間で除した値を「静的リスク評価値」と定義する。さらに所与の人口分布から徐々に分布を変化させた場合に变化していくリスク評価値の和をとり、第 1 波到達から終了までの時間で除した値を「動的リスク評価値」と定義する。

(2) モデルの定式化

本研究のモデルで用いる集合・変数・パラメータ、定式化をそれぞれ、表 1、表 2 に示す。

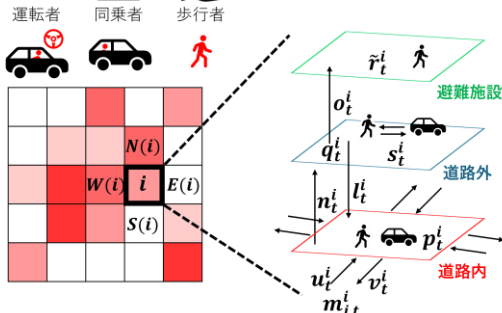


図 1: メッシュおよび変数の考え方

表 1: モデルで用いる集合・変数・パラメータ

集合	
T	期 (地震発生時刻からの経過分数) の集合
A	メッシュの集合
A_a	避難場所を持つメッシュの集合
A_b	避難場所をもたないメッシュの集合
A_c	浸水区域内で避難場所のないメッシュの集合
A_d	浸水区域外のメッシュの集合
A_i	メッシュ i に隣接するメッシュの集合
$N(i), S(i),$	メッシュ i の道路上で
$W(i), E(i)$	北, 南, 西, 東側に隣接するメッシュ

変数

$p_t^i, \bar{p}_t^i, \tilde{p}_t^i$	道路内に存在する運転者, 同乗者, 歩行者数
$q_t^i, \bar{q}_t^i, \tilde{q}_t^i$	道路外に存在する運転者, 同乗者, 歩行者数
r_t^i	避難場所に存在する歩行者数
$u_t^i, \bar{u}_t^i, \tilde{u}_t^i$	道路内に流入する運転者, 同乗者, 歩行者数
$v_t^i, \bar{v}_t^i, \tilde{v}_t^i$	道路内で流出する運転者, 同乗者, 歩行者数
$m_{j,t}^i, \bar{m}_{j,t}^i, \tilde{m}_{j,t}^i$	メッシュ間を移動する運転者, 同乗者, 歩行者数
$l_t^i, \bar{l}_t^i, \tilde{l}_t^i$	道路外から道路内に移動する運転者, 同乗者, 歩行者数
$n_t^i, \bar{n}_t^i, \tilde{n}_t^i$	道路内から道路外に移動する運転者, 同乗者, 歩行者数
o_t^i	道路外から避難場所に移動する歩行者数
$s_t^i, \bar{s}_t^i, \tilde{s}_t^i$	降車する運転者数, 同乗者数, 乗車する歩行者数

パラメータ (本論文での設定値)

t_1	地震発生から津波第 1 波到達開始までの期 (31)
t_2	地震発生から津波第 1 波到達完了までの期 (60)
θ	自動車の平均乗車可能人数 (4)
R_t^i	津波遭遇リスク (0~1, メッシュ・期毎)
H^i	道路の収容容量 (0~1300, メッシュ毎)
δ^i	渋滞流と自由流の密度波速度の比 (0.9)
τ_1, τ_2	自動車・徒歩での避難準備に要する時間 (25, 15)
τ_3, τ_4	自動車の乗降, 避難場所入場に要する最小時間 (3, 2)
ϵ_1, ϵ_2	自由流状態の自動車, 歩行者のメッシュ通過時間 (1, 6)
ξ^i, η^i	運転可能者, 徒歩困難者の割合 (0.35, 0.15~0.23)
e_h^i	歩行者と自動車の占有空間の比 (1/6)
C_j^i	移動のフロー容量
D^i	各メッシュの初期人口 (0~1707, メッシュ毎)
E^i	道路外の駐停車可能な車両台数 (0~2309, メッシュ毎)
\tilde{F}^i	避難場所に収容可能な人数 (59~2309, メッシュ毎)

表 2: モデルの定式化

$$\min \frac{1}{t_2 - t_1} \sum_{t \in T} \sum_{i \in A} R_t^i \left\{ \left(p_t^i + \bar{p}_t^i + \tilde{p}_t^i \right) + \left(q_t^i + \bar{q}_t^i + \tilde{q}_t^i \right) \right\} + \frac{1}{1000} \sum_{t=0}^{t_2-1} \sum_{i \in A_d} \left[\sum_{j \in A_i} \left(m_{j,t}^i + \bar{m}_{j,t}^i + \tilde{m}_{j,t}^i \right) + \tilde{s}_t^i \right] \quad (1)$$

メッシュの保存則 ($\forall t \in \{0, \dots, t_2 - 1\}$)

$p_t^i + u_t^i - v_t^i + l_t^i - n_t^i = p_{t+1}^i,$	$\forall i \in A$	(2)
$\bar{p}_t^i + \bar{u}_t^i - \bar{v}_t^i + \bar{l}_t^i - \bar{n}_t^i = \bar{p}_{t+1}^i,$	$\forall i \in A$	(3)
$\tilde{p}_t^i + \tilde{u}_t^i - \tilde{v}_t^i + \tilde{l}_t^i - \tilde{n}_t^i = \tilde{p}_{t+1}^i,$	$\forall i \in A$	(4)
$q_t^i - l_t^i + n_t^i - s_t^i = q_{t+1}^i,$	$\forall i \in A_a$	(5)
$\bar{q}_t^i - \bar{l}_t^i + \bar{n}_t^i - \bar{s}_t^i = \bar{q}_{t+1}^i,$	$\forall i \in A_a$	(6)
$\tilde{q}_t^i - \tilde{l}_t^i + \tilde{n}_t^i - \tilde{s}_t^i = \tilde{q}_{t+1}^i,$	$\forall i \in A_a$	(7)
$q_t^i - l_t^i + n_t^i = q_{t+1}^i,$	$\forall i \in A_b$	(8)
$\bar{q}_t^i - \bar{l}_t^i + \bar{n}_t^i - \bar{s}_t^i = \bar{q}_{t+1}^i,$	$\forall i \in A_b$	(9)
$\tilde{q}_t^i - \tilde{l}_t^i + \tilde{n}_t^i - \tilde{s}_t^i = \tilde{q}_{t+1}^i,$	$\forall i \in A_b$	(10)
$\tilde{r}_t^i + \tilde{o}_t^i = \tilde{r}_{t+1}^i,$	$\forall i \in A_a$	(11)
$u_t^i = m_{N,t}^{S(i)} + m_{S,t}^{N(i)} + m_{W,t}^{E(i)} + m_{E,t}^{W(i)},$	$\forall i \in A$	(12)
$\bar{u}_t^i = \bar{m}_{N,t}^{S(i)} + \bar{m}_{S,t}^{N(i)} + \bar{m}_{W,t}^{E(i)} + \bar{m}_{E,t}^{W(i)},$	$\forall i \in A$	(13)
$\tilde{u}_t^i = \tilde{m}_{N,t}^{S(i)} + \tilde{m}_{S,t}^{N(i)} + \tilde{m}_{W,t}^{E(i)} + \tilde{m}_{E,t}^{W(i)},$	$\forall i \in A$	(14)
$v_t^i = m_{N,t}^{S(i)} + m_{S,t}^{N(i)} + m_{W,t}^{E(i)} + m_{E,t}^{W(i)},$	$\forall i \in A$	(15)
$\bar{v}_t^i = \bar{m}_{N,t}^{S(i)} + \bar{m}_{S,t}^{N(i)} + \bar{m}_{W,t}^{E(i)} + \bar{m}_{E,t}^{W(i)},$	$\forall i \in A$	(16)
$\tilde{v}_t^i = \tilde{m}_{N,t}^{S(i)} + \tilde{m}_{S,t}^{N(i)} + \tilde{m}_{W,t}^{E(i)} + \tilde{m}_{E,t}^{W(i)},$	$\forall i \in A$	(17)

同乗者数の上限制約

$m_{j,t}^i \leq l_{j,t}^i (\theta - 1),$	$\forall t \in \{0, \dots, t_2 - 1\}, \forall i \in A, \forall j \in A_i$	(18)
$\bar{l}_t^i \leq l_t^i (\theta - 1),$	$\forall t \in \{0, \dots, t_2 - 1\}, \forall i \in A$	(19)
$\bar{n}_t^i \leq n_t^i (\theta - 1),$	$\forall t \in \{0, \dots, t_2 - 1\}, \forall i \in A$	(20)
$\bar{p}_t^i \leq p_t^i (\theta - 1),$	$\forall t \in T, \forall i \in A$	(21)

$\bar{q}_t^i \leq q_t^i(\theta - 1),$	$\forall t \in T, \forall i \in A$	(22)
道路内のメッシュ間フロー容量制約 ($\forall t \in \{0, \dots, t_2 - 1\}$)		
$m_{j,t}^i \leq C_j^i,$	$\forall i \in A, \forall j \in A_i$	(23)
$\bar{m}_{j,t}^i \leq \bar{C}_j^i,$	$\forall i \in A, \forall j \in A_i$	(24)
$u_t^i + e_h^i \bar{u}_t^i \leq \delta^i \{H^i - p_t^i - e_h^i \bar{p}_t^i\},$	$\forall i \in A$	(25)
$v_t^i + e_h^i \bar{v}_t^i \leq \delta^i \{H^i - p_t^i - e_h^i \bar{p}_t^i\},$	$\forall i \in A$	(26)
道路外の収容容量制約		
$q_t^i - q_0^i + \sum_{s=0}^{t-1} s_s^i \leq E^i,$	$\forall t \in T, \forall i \in A_a$	(27)
$q_t^i - q_0^i \leq E^i,$	$\forall t \in T, \forall i \in A_b$	(28)
避難場所入場のフロー容量制約		
$n_t^i \leq C_n^i,$	$\forall t \in \{0, \dots, t_2 - 1\}, \forall i \in A_a$	(29)
$\bar{n}_t^i \leq \bar{C}_n^i,$	$\forall t \in \{0, \dots, t_2 - 1\}, \forall i \in A_a$	(30)
$\bar{o}_t^i \leq \bar{C}_o^i,$	$\forall t \in \{0, \dots, t_2 - 1\}, \forall i \in A_a$	(31)
避難場所の収容容量制約		
$\bar{r}_t^i \leq \bar{F}^i,$	$\forall t \in T, \forall i \in A_a$	(32)
避難前の出発準備制約		
$l_t^i = 0,$	$\forall t \in \{0, \dots, \tau_1 - 1\}, \forall i \in A$	(33)
$\bar{l}_t^i = 0,$	$\forall t \in \{0, \dots, \tau_2 - 1\}, \forall i \in A$	(34)
$\bar{o}_t^i = 0,$	$\forall t \in \{0, \dots, \tau_2 + 1\}, \forall i \in A_a$	(35)
$\bar{s}_t^i = 0,$	$\forall t \in \{0, \dots, \tau_1 - 2\}, \forall i \in A$	(36)
$\bar{s}_t^i = 0,$	$\forall t \in \{0, \dots, \tau_1 + 1\}, \forall i \in A$	(37)
メッシュ移動量の上限制約(メッシュ存在量以下)		
$v_t^i + n_t^i \leq p_t^i,$	$\forall t \in T, \forall i \in A$	(38)
$l_t^i + s_t^i \leq q_t^i,$	$\forall t \in T, \forall i \in A_a$	(39)
$\bar{l}_t^i \leq \bar{q}_t^i,$	$\forall t \in T, \forall i \in A_b$	(40)
$\bar{v}_t^i + \bar{n}_t^i \leq \bar{p}_t^i,$	$\forall t \in T, \forall i \in A$	(41)
$\bar{l}_t^i + \bar{s}_t^i \leq \bar{q}_t^i,$	$\forall t \in T, \forall i \in A$	(42)
$500/80 \bar{v}_t^i + \bar{n}_t^i \leq \bar{p}_t^i,$	$\forall t \in T, \forall i \in A$	(43)
$\bar{l}_t^i + \bar{o}_t^i + \bar{s}_t^i \leq \bar{q}_t^i,$	$\forall t \in T, \forall i \in A_a$	(44)
$\bar{l}_t^i + \bar{s}_t^i \leq \bar{q}_t^i,$	$\forall t \in T, \forall i \in A_b$	(45)
$p_t^i \geq \sum_{s=1}^{\epsilon_1} u_{t-s}^i,$	$\forall t \in \{\epsilon_1, \dots, t_2\}, \forall i \in A$	(46)
$\bar{p}_t^i \geq \sum_{s=1}^{\epsilon_2} \bar{u}_{t-s}^i,$	$\forall t \in \{\epsilon_2, \dots, t_2\}, \forall i \in A$	(47)
$q_t^i \geq \sum_{s=1}^{\tau_3} n_{t-s}^i,$	$\forall t \in \{\tau_3, \dots, t_2\}, \forall i \in A$	(48)
$\bar{q}_t^i \geq \sum_{s=1}^{\tau_3-1} \bar{n}_{t-s}^i,$	$\forall t \in \{\tau_3 - 1, \dots, t_2\}, \forall i \in A_c$	(49)
$\bar{q}_t^i \geq \sum_{s=1}^{\tau_4} \bar{n}_{t-s}^i,$	$\forall t \in \{\tau_4, \dots, t_2\}, \forall i \in A_a \cup A_d$	(50)
同乗者の避難場所なしメッシュでの降車禁止制約		
$\bar{s}_t^i \leq 0,$	$\forall t \in T, \forall i \in A_c$	(51)
$q_0^i \leq \xi^i D^i,$	$\forall i \in A$	(52)
$\sum_{t=0}^{t_2} l_t^i \leq q_0^i,$	$\forall i \in A$	(53)
$q_0^i + \sum_{t=0}^{t_2} \bar{l}_t^i \leq (1 - \eta^i) D^i,$	$\forall i \in A$	(54)
初期条件		
$q_0^i + \bar{q}_0^i = D^i (given),$	$\forall i \in A$	(55)
操作変数の非負制約 ($\forall t \in T, \forall i \in A, \forall j \in A_i, \forall h \in A_a$)		
$p_t^i, q_t^i, u_t^i, v_t^i, m_{j,t}^i, \bar{l}_t^i, n_t^i \geq 0,$		(56)
$\bar{p}_t^i, \bar{q}_t^i, \bar{u}_t^i, \bar{v}_t^i, \bar{m}_{j,t}^i, \bar{l}_t^i, \bar{n}_t^i \geq 0,$		
$\bar{p}_t^i, \bar{q}_t^i, \bar{r}_t^i, \bar{u}_t^i, \bar{v}_t^i, \bar{m}_{j,t}^i, \bar{l}_t^i, \bar{n}_t^i, \bar{o}_t^i \geq 0,$		

以下特徴的な部分に説明を加える。式(1)は目的関数であり、動的リスク評価値(第 1 項)のほかに、浸水区域外の無駄な移動(第 2 項)と、無駄な乗車(第 3 項)に対するペナルティを加えて最小化する。式(25)(26)は自動車(運転者)と歩行者の混在を表現した収容制約であり、各モードの存在量が多いほど、互いのモードの道路内への流入と流出が小さくなる。式(46)(47)は運転者、歩行者それぞれのメッシュ通過に要する時間制約を表現するため

東北大学工学研究科土木工学専攻に、メッシュ流入後一定時間メッシュに滞在させる制約である。式(48)(49)は自動車への乗降に要する時間を、一定時間道路外に滞在することで表現する。式(50)は避難場所への入場に時間を要することを表す。式(52)(53)は、運転者数の上限、式(54)は同乗者数の下限を示し、降車は徒歩困難者数に対応する。

本研究のモデルの各変数は非負の連続変数であり、目的関数、制約式が全て一次式のため、線形計画モデルとして一般的な数値計画ソルバーで求解できる。

3. モデルの挙動と有効性の確認

(1) 青森県八戸市での計算条件の設定

2. で説明したモデルの挙動の確認を、2 つの河川に囲まれた、八戸市中心市街地の浸水区域内を例に行う。この地域には、44,050 人(国勢調査)が図 2 の分布で居住している。日本海溝地震モデルによる津波を対象とし、尾崎ら(2024)⁹⁾が日本工営株式会社の津波解析コードにより実施した浸水深の数値計算結果を使用する。第 1 波の浸水は地震発生後 30 分から 60 分の間に広がる。浸水深が 0.3m を超える期の等高線を図 2 に示す。道路の収容容量、メッシュ間のフロー容量を得るための道路データは、オープンデータソースの Open Street Map から取得する。道路の収容容量を図 3 に示す。この他、車の定員を一般的な乗用車の定員から 4 人とし、自由流状態の運転者、歩行者の移動速度をそれぞれ 30km/h, 5km/h とする。運転者、歩行者の出発準備時間は、東日本大震災の実績値を基にそれぞれ 25 分、15 分とする。各メッシュの運転可能者の割合は、自家用車数と人口の比率から 0.35 とし、徒歩困難者の割合は、年齢別の要介護率、未就学児の割合等を考慮してメッシュ毎約 0.15-0.23 の値を与える。

(2) 最適避難の比較対象

以下、最適化モデルの解を「最適避難」と呼ぶ。一方、現在自治体が提供しているハザードマップなどの情報を頼りに避難者各自が最寄りの浸水区域外や避難場所に移動する場合を「最寄避難」と呼び、両者を比較する。

最寄避難は、第一波到達完了までに避難者全員が津波遭遇リスク 0 の場所に移動する制約のもとで道路上の移動量の和を最小化する。ついでその移動量を制約として動的リスク評価値を最小化することで計算できる。

(3) モデルの挙動確認

最適避難と最寄避難の計算結果を示す。

初期人口分布の静的リスク評価値 2.1×10^4 から、最寄避難では動的リスク評価値が 2.1 になったのに対し、最適避難では 0.18 と、12 分の 1 に抑えられた。最適避難と最寄避難の静的リスク評価値の推移を図 4 に示す。いずれも歩行者が避難開始する t=16 でリスク評価値が減少し始め、運転者が避難開始する t=26 から減少率が大きくなっているが、時間経過に伴い、最寄避難に比べて最適避難の値が大きく低下している。次にメッシュ毎の道路内延べ移動者数を比較すると、図 6 の最寄避難では一部の

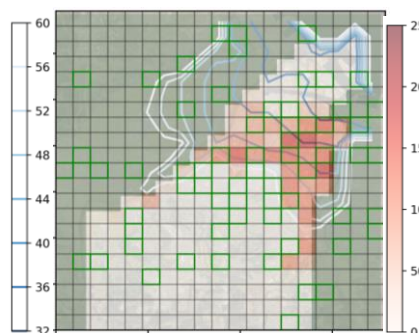


図 2: 基準人口分布と津波遡上時刻

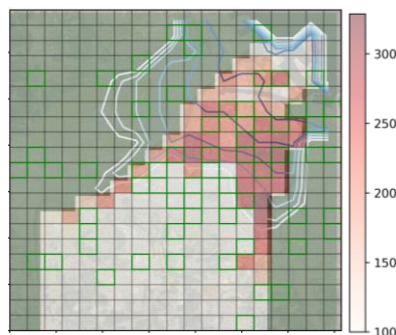


図 3: 道路の収容容量の設定値

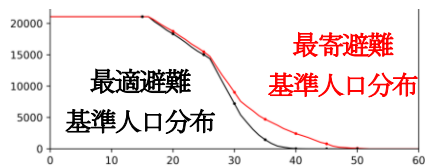


図 4: 静的リスク評価値の推移

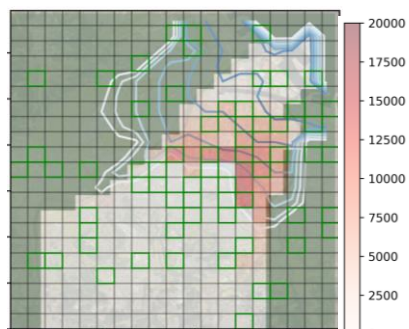


図 5: 最適避難の道路内延べ移動者数

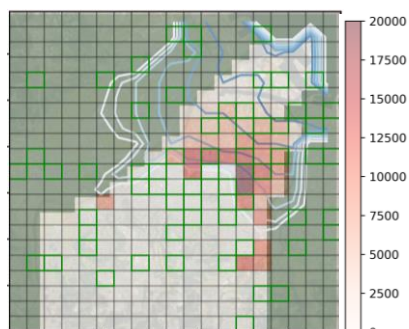


図 6: 最寄避難の道路内延べ移動者数

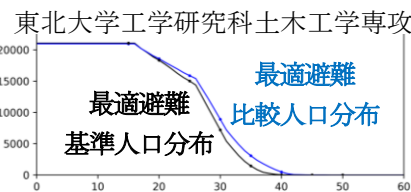


図 8: 静的リスク評価値の推移

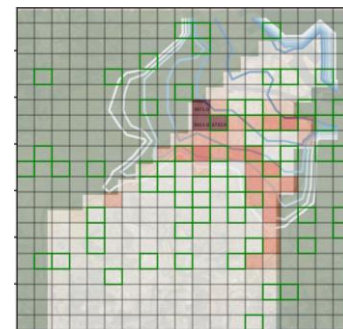


図 7: 比較人口分布

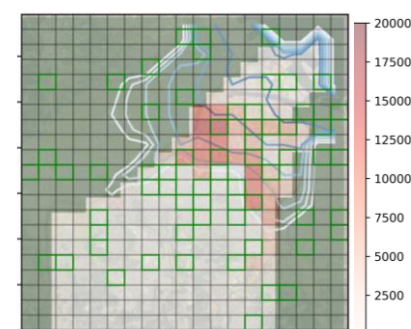


図 9: 比較人口分布の最適避難による延べ道路内移動者数

メッシュに避難者が集中しているが、図 5 の最適避難では浸水区域内外の境界に広く分散している。

このように最適避難では後の時間の渋滞を防ぎ静的リスク評価値を抑えるように交通を分散させていることが分かる。以上から本モデルでは、歩車混合の影響を踏まえ、安全な人口分布に素早く変化させるような理想的な避難を計算できていることが確認できた。

(3) 異なる人口分布の安全性の違いの検出

図 7 のような「比較人口分布」を考え、図 2 の人口分布との比較を行う。これらの分布は、浸水のタイミングの点では差がないため、静的リスク評価値は同等で、従来の距離に基づく評価方法でも安全性は同等となるが、本モデルによる最適避難の動的リスク評価値は、0.18 と 0.26 のように異なる。図 8 に静的リスク評価値の推移を比較している。両者とも時間経過に伴いリスクは低下するが、比較人口分布に比べて、基準人口分布の低下速度は大きい。図 9 に示した比較人口分布の道路内延べ移動者数の分布を図 5 の基準人口分布の場合と比べると、図 3 に示した道路の収容容量が小さい左側のメッシュなどに移動者が集中している。これが移動速度の低下をもたらし、リスク値の低下を鈍化させたと考えられる。

以上のように、通行能力や避難場所の分布により安全性が異なる人口分布に対して、従来の評価方法では差異

が検出できない場合があるが、本モデルを用いれば安全性の差異を検出できることが確認できた。

5. おわりに

本研究では、避難交通の実行可能性を考慮し、人口分布による安全性の違いを評価する最適津波避難モデルを提案し、その有効性を確認した。今後の展望には、避難者や交通条件の変更による感度分析、時点や季節などの条件の異なる人口分布間での解の比較があげられる。

参考文献

- 1) 小坂陽介, 野村尚樹, 大藤愛子, 宮島昌克: マルチエージェントシステムを用いた津波避難に関する解析—輪島市臨海地域を対象とした事例研究—, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.73, No.4(地震工学論文集第 36 巻), pp. I_1010-I_1017, 2017.
- 2) 竹居広樹, 奥村誠: 津波避難における自動車利用率設定のための基礎的分析手法, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 74, No.5, pp. 181-189, 2018.
- 3) 増田慧樹, 羽藤英二: MFD-RL 配分モデルを用いた豪雨災害における垂直・水平避難の予測制御, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 67, CD-ROM, 2023.
- 4) 尾崎壮一, 古里春花, 堀合神弥, 野島和也, 田中聖三, 高瀬慎介: 構造物を考慮した八戸市における津波遡上解析, 計算工学講演会論文集, Vol. 29, pp. 728-730, 2024.