

津波避難計画の合目的性と実行可能性の両立方法

—メッシュ最適化モデルと MAS の結合—

Balancing Purposiveness and Feasibility in Tsunami Evacuation Planning - Integrating Mesh Optimization Model and Multi-Agent Simulation -

大橋 駿輔*

Shunsuke OHASHI

*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）

津波避難計画は住民全体の安全性を確保するという避難の合目的性と、その計画に従った避難が実施できるという実行可能性の両方を同時に保証する必要がある。そこでメッシュ最適化モデルで合目的に計画された交通流をマルチエージェントシミュレーションに与えてシミュレートし、計画交通流の実現可能性を確認する。計画交通流が実現できない場合に、メッシュ最適化モデルの容量パラメータを修正して整合化を図るための反復計算方法を提案して、青森県八戸市の 1 メッシュにおいて計算を行った。

Key Words: 津波避難計画、避難最適化、マルチエージェントシミュレーション

1. はじめに

津波避難計画は、安全性を確保するという合目的性と実行可能性を同時に満たす必要がある。危険性を目的関数として最小化する数理最適化モデルにより合目的性は確保できるものの、歩車混在等のミクロな現象を捨象してマクロな制約式で表現する必要があり、実行可能性に疑問が残る。一方マルチエージェントシミュレーション（以下 MAS）は、エージェント間のミクロな相互作用に基づく交通現象を記述できるが、避難の改善といった論理が内包されておらず、合目的性は確保できない。本研究では、メッシュ最適化と MAS を結合させ、合目的性と実行可能性を兼ね備えた避難交通を得る手法を提案する。

2. 合目的性と実行可能性の両立方針

(1) メッシュ最適化モデルの概要

本研究では奥村ら¹⁾が提案した歩車混在を考慮した最適化モデルを用いる。同モデルでは、メッシュを通行空間である道路内、待機やモード変更を行う道路外、避難場所（避難所を持つメッシュのみ）の 3 つの部分に分けて、メッシュ内及びメッシュ間の移動を表現している。**表 1** に目的関数とメッシュ間交通量にかかる容量制約式及びそれらで用いられている集合、変数、パラメータの一覧を示す。式(1)は津波に遭遇する避難者の期待値を目的関数として最小化する。式(2)は歩行者を車換算して加えたメッシュ間の交通量に対する断面交通量制約、式(3)(4)は、メッシュ内道路上の存在換算車両数が流入、流出交通量に与える影響を表現している。以下メッシュ最適化モデルの出力である 1 分ごとの方向別のメッシュ間断面交通量を計画交通量と呼ぶこと

とする。

表 1
目的関数

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

メッシュ間フロー容量制約

$$m_{j,t}^i + e_h^i \bar{m}_{j,t}^i \leq C_j^i \quad \forall i \in A, \forall j \in A_i \quad (2)$$

$$u_t^i + e_h^i \bar{u}_t^i \leq \delta^i \{ H^i - p_t^i - e_h^i \bar{p}_t^i \} \quad \forall i \in A \quad (3)$$

$$v_t^i + e_h^i \bar{v}_t^i \leq \delta^i \{ H^i - p_t^i - e_h^i \bar{p}_t^i \} \quad \forall i \in A \quad (4)$$

集合・変数・パラメータ

T	期(地震発生時刻からの経過分数)の集合
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 波到達官僚までの期(60)
A, A_d	メッシュの集合、浸水区域外のメッシュの集合
R_t^i	時刻 t メッシュ i にいる 1 人が津波に遭遇する確率
$p_t^i, \bar{p}_t^i, \tilde{p}_t^i$	道路内に存在する運転者、同乗者、歩行者
$q_t^i, \bar{q}_t^i, \tilde{q}_t^i$	道路外に存在する運転者、同乗者、歩行者
$u_t^i, \bar{u}_t^i, \tilde{u}_t^i$	メッシュ外から流入する運転者、同乗者、歩行者
$v_t^i, \bar{v}_t^i, \tilde{v}_t^i$	メッシュ外へ流出する運転者、同乗者、歩行者
$m_{j,t}^i, \bar{m}_{j,t}^i, \tilde{m}_{j,t}^i$	メッシュ間移動する運転者、同乗者、歩行者
\tilde{s}_t^i	時刻 t メッシュ i でピックアップされた歩行者
δ^i	渋滞と自由流の密度波速度の比 (0.9)
e_h^i	歩行者と自動車の占有空間の比 (1/6)
C_j^i	メッシュ i, j 間の車のフロー容量
H^i	メッシュ i の収容容量 (車換算)

(2) MAS の概要

本研究では堀合ら²⁾が提案した歩車混在を追従モデルによって考慮した MAS モデルを用いる。追従モデルとは、自身のエージェントの検知領域内における最近接エージェントとの相対距離及び相対速度に基づき、

速度と加速度を動的に制御するモデルで、歩車間、歩行者間、車両間の相互作用を表現し、急接近に伴う減速、渋滞形成や、追い越しといったミクロな交通現象を再現できる。この MAS で得られる交通量を実現交通量と呼ぶことにする。MAS ではメッシュ境界から流入する計画交通量に合わせて、モード、発生地、発生時刻ごとにエージェントを発生させ、各エージェントに移動経路を与える必要がある。

(3) メッシュ最適化と MAS の結合

メッシュ最適化で計算された計画交通量が実行可能であるか確認するために、メッシュ最適化と MAS を結合させる。手法の流れとして①メッシュ最適化モデルを用いて計画交通量を求める。②計画交通量に基づいて、MAS のエージェントを発生させ、目的地までの経路を与えてシミュレートし、実現交通量を計測する。③実現交通量が計画交通量と同等以上になるようにメッシュ最適化モデルの容量パラメータを修正する。④修正した制約で再度最適化計算を行う。②～④を反復させ、最終的に実現交通量が計画交通量を上回るようにして、合目的性と実行可能性を両立させる。

3. メッシュ最適化と MAS の結合方法

(1) エージェントの発生と経路の推定

メッシュ最適化の計画交通量に基づき MAS のエージェントとその経路を(i), (ii)によって与える。

(i) エージェントの発生

方向別的一分毎の時刻別計画流入交通量に従い、当時間間にメッシュ境界上の道路接続点にエージェントを発生させる。次に、発生させたエージェントの流出方向を方向別計画流出交通量に合わせて推定する。すなわちメッシュ領域を分割し、それぞれの部分領域内のエージェント数比と方向別計画流出量比が同じになるように分割線の角度を調整して、各部分領域内のエージェントの流出方向を指定する。(図-1)

(ii) 流出方向と移動経路の設定

次に、エージェントの経路を設定する。まず一定時間ごとに各リンクの換算密度を用いて式(5)によりリンクコストを求め、現在地から流出方向のメッシュ境界上の道路接続点の中でコストが最小となる接続点への経路をダイクストラ法により求める。

また車両と歩行者では、混雑への感度や経路更新の頻度が異なると考え、パラメータを表 2 のように設定した。

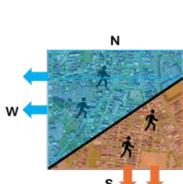


図-1 分割領域と
流出方向の例



図-2 混雑を考慮
した経路選択の例

$$\text{リンクコスト} = (\text{リンク長}) \times \left(1 + \alpha \left(\frac{\text{換算密度}}{0.1}\right)^{\beta}\right) \quad (5)$$

表 2 自動車と歩行者のリンクコスト関数のパラメータ

	α	β	経路更新頻度(秒)
自動車	0.15	4	30
歩行者	0.15	2	60

(2) 実現交通量に基づく最適化モデルのパラメータ修正

MAS による実現交通量得られた実現流に基づき最適化モデルの容量パラメータを修正する。具体的にはメッシュ間のフロー容量 C_j^i とメッシュ内収容容量 H^i を以下の式(6),(7)を用いて修正する。振動を防ぐため学習係数 0.5 で更新し、誤差 5% 以下に収束するまで反復を続ける。

$$C_{j,new}^i = C_{j,old}^i + 0.5 \left(\frac{\text{実行流量の最大値}}{j} - C_{j,old}^i \right) \quad (6)$$

$$H_{new}^i = H_{old}^i + 0.5 \left(\frac{\text{メッシュ内換算台数の最大値}}{H_{old}^i} - H_{old}^i \right) \quad (7)$$

3. 八戸市の対象メッシュでの計算結果

本研究では、青森県八戸市を対象とするメッシュ最適化モデルの結果を用いて最も通過交通量が多いメッシュを選び対象メッシュとした。収束時の計画交通量実現交通量をモード別、流出方向別に比較した結果を図-3 に示す、時刻によっては計画交通量よりも実現交通量が下回る時間帯が残っており、完全に整合する結果にはならなかった。



図-3 方向別・歩車別の計画交通量と実現交通量の比較

4. おわりに

本研究では、メッシュ最適化と MAS を結合させ、合目的性と実現可能性のある避難交通を得る方法を提案した。青森県八戸市の 1 メッシュを対象とする計算例では、実現交通量が計画交通量を下回る時間帯が残り、完全な整合性は得られなかった。今後の課題として、エージェントに対する経路選択のロジックを改良することや、歩車別にフロー容量を考え、モード別での整合性を高めることが考えられる。

参考文献

- 奥村誠、堀合紳弥、佐藤千仁：メッシュベース最適歩車混合津波避難モデルによる避難方向誘導の効果分析、第 72 回土木計画学研究発表会・講演集、15-08, 2025
- 堀合紳弥、奥村誠：追従モデルに基づく歩車混在による津波避難交通への影響分析、第 72 回土木計画学研究発表会・講演集、11-16, 2025,

(2026 年 2 月 4 日提出)