

自動車と歩行者の混在を考慮した津波遭遇リスク最小化避難モデル

東北大学 学生会員 ○竹居 広樹
東北大学 正会員 奥村 誠

1. はじめに

東日本大震災の経験を踏まえ、津波避難におけるやむを得ない場合の自動車の利用が認められた。自動車での避難は、速やかに危険なエリアから脱出させて被災リスクを下げられる可能性がある一方、自動車の過剰な利用が歩行者との錯綜や渋滞の発生をもたらし、被災リスクを増大させることが懸念される。本研究では、津波遭遇リスクを最小化する先行研究のモデル¹⁾に、歩車の混在による悪影響を組み込む。その上で、自動車利用の度合いと津波遭遇リスクとの関係を分析する。

2. 最適避難モデルの構築

本研究では、歩車の混在の影響を考慮するため、道路区間における滞留とその延伸を明示的に表現できるセルベースモデルを採用し、片岡ら¹⁾の津波遭遇リスク最小化モデルを拡張する。期 t のセル a の流入、流出、滞留する自動車台数を u_t^a , v_t^a , p_t^a とし、歩行者数を $\widetilde{u}_t^a$, $\widetilde{v}_t^a$, $\widetilde{p}_t^a$ と表わす。海からの距離と経過時間に応じて津波遭遇リスク R_t^a を外生的に与える。全避難者の津波遭遇総リスクを最小化するモデルは、以下のように定式化できる。

$$\text{minimize } \sum_{t=0}^T \sum_{a \in A} R_t^a \{ \eta(p_t^a + v_t^a) + (\widetilde{p}_t^a + \widetilde{v}_t^a) \} \quad (1)$$

$$p_t^a + u_t^a = p_{t+1}^a + v_{t+1}^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (2)$$

$$\widetilde{p}_t^a + \widetilde{u}_t^a = \widetilde{p}_{t+1}^a + \widetilde{v}_{t+1}^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (3)$$

$$\sum_{a \in O(i)} u_t^a = \sum_{a \in I(i)} v_t^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall i \in N \quad (4)$$

$$\sum_{a \in O(i)} \widetilde{u}_t^a = \sum_{a \in I(i)} \widetilde{v}_t^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall i \in N \quad (5)$$

$$u_t^a \leq C^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (6)$$

$$\widetilde{u}_t^a \leq \widetilde{C}^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (7)$$

$$u_t^a + c_1 \cdot \widetilde{u}_t^a \leq \delta^a \{ H^a - (p_t^a + v_t^a) - c_1 \cdot (\widetilde{p}_t^a + \widetilde{v}_t^a) \} \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (8)$$

$$v_t^a + c_2 \cdot \widetilde{v}_t^a \leq C^a \quad \forall t \in T, \forall a \in A \quad (9)$$

$$\widetilde{v}_t^a \leq \begin{cases} 0 & \forall t \in \{0, \dots, s-1\}, \forall a \in A \\ \widetilde{p}_{t-s}^a + \widetilde{u}_{t-s}^a & \forall t \in \{s, \dots, T\}, \forall a \in A \end{cases} \quad (10a)$$

$$\widetilde{v}_t^a \leq \widetilde{p}_{t-s}^a + \widetilde{u}_{t-s}^a \quad \forall t \in \{s, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (10b)$$

$$\eta \cdot p_0^a + \widetilde{p}_0^a = D^a (\text{given}) \quad \forall a \in A_0 \quad (11)$$

$$\eta \cdot p_0^a \geq \varepsilon^a \cdot D^a \quad \forall a \in A_0 \quad (12)$$

$$\sum_{a \in A_D} (\eta \cdot p_T^a + \widetilde{p}_T^a) = \sum_{a \in A_0} D^a \quad (13)$$

$$u_t^a, \widetilde{u}_t^a, v_t^a, \widetilde{v}_t^a, p_t^a, \widetilde{p}_t^a \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall a \in A \quad (14)$$

ここで、 T は期、 A はセル、 A_0 は起点セル、 A_D は避難場所セル、 N はノードの集合であり、 $O(i)$, $I(i)$ はそれぞれノード i の下流側、上流側で繋がるセルの集合である。式(1)で、 η は自動車の平均乗車人数、 $(p_t^a + v_t^a)$ は期 t にセル a に存在する車両台数で、 $\{\cdot\}$ は歩行者を含む人数となる。これに外生的に与えた期ごとの津波遭遇リスクを乗じ、全時刻 T での和をとった総リスクを最小化する。

式(2)~(5)は交通量保存則であり、式(6),(7)はセルへの流入制約である。 C^a , $\widetilde{C}^a$ は自動車および歩行者のフロー容量である。式(8)はセルの収容能力の制約で、収容容量 H^a のうちの空きに比例して流入できることを意味する。 c_1 は歩行者と自動車の占有空間の比を表し、 δ^a は渋滞流と自由流の密度波速度の比である。式(9)はセルからの流出制約で、歩行者の増加により c_2 の割合で自動車の流量が低下することを表わす。式(10)は歩行者の速度制約で、 s は歩行者が1つのセルを通過する最小所要時間である。式(11)と式(12)は初期条件で、 D^a は起点セルの避難者人数、 ε^a はセル a の徒歩困難者率である。式(13)は最終的に全ての避難者がどこかの避難場所へ収容される条件を表わす。式(14)は内生変数の非負制約である。

3. 実ネットワークでの計算結果

宮城県亘理町を対象に、外生値には既存研究¹⁾で用いられている値を使用し、 $s=5$ として計算を行った。計算結果の一例として、 $\eta=2.0$, $\varepsilon^a=0$ の場合の、各セルを通過した累積自動車台数・歩行者人数を図1に示す。自動車と歩行者を比較すると、歩行者が移動距離の短い経路を集中して利用するのに対し、自動車は遠回りを含め様々な経路を分散的に利用している。これは、歩車が同じセルを同時に使

キーワード 津波避難, セルベースモデル, 最適化, 歩車の混在

連絡先 〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 東北大学 災害科学国際研究所 S-502 TEL 022-217-6369

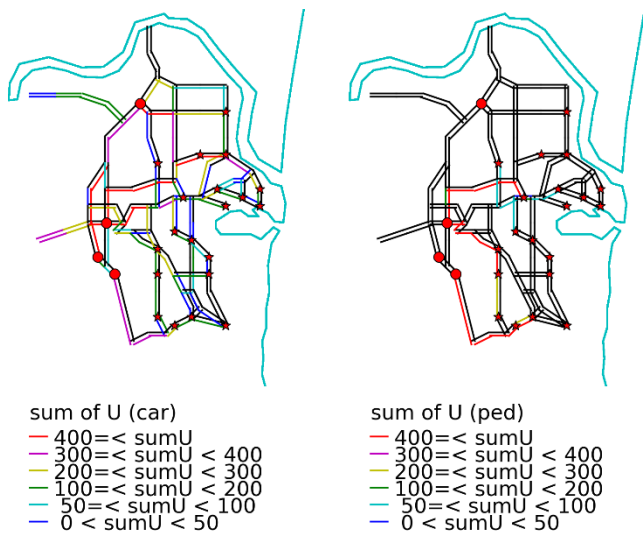


図 1 セルを通過した累積自動車台数（左）と歩行者人数（右）

用すると互いの流量が制限されるため、最短経路を歩行者に優先的に使用させた結果だと考えられる。道路の利用状況としては、自動車は町内陸部を縦断する国道を多く利用し、中央部を東西に結ぶ県道は歩車ともに多く利用されている。また、自動車の一部は一度避難場所セルを乗り越して、遠方のセルへ向かっている。これにより後続の歩行者が自動車の影響を受けずに、速やかに避難場所へ入ることが可能となる。

次に、自動車の平均乗車人数 η を変化させた場合の津波遭遇リスクの値と自動車利用率を図 2 に示した。平均乗車人数が大きいほど、自動車の利用率は増すが台数は少なくなるため、混雑が緩和されリスクの値は小さくなる。平均乗車人数 3.5 人以上の場合、100% 自動車が利用されても、自動車台数が避難場所の駐車容量の総和を越えない。また、徒歩困難者率の津波遭遇リスクへの影響はそれほど大きくないことがわかった。

次に、最終的に避難場所に収容するという制約(13)を外したうえで、式(12)を以下のような全域における自動車利用率に関する等式制約に変更し、平均自動車利用率 ε^{ave} に対する津波遭遇リスクの変化を確認した。

$$\sum_{a \in A_0} \eta \cdot p_0^a = \varepsilon^{ave} \sum_{a \in A_0} D^a \quad (12)'$$

$\eta = 1.0, 1.5, 2.0$ における津波遭遇リスク値を図 3 に示す。まず、全員が徒歩で避難した場合 ($\varepsilon^{ave} = 0$)、海に近く避難場所までの距離が長い地域の住民が、津波に巻き込まれる可能性が高いため、リスク値が大きくなる。逆に、全員が自動車で避難した場合 ($\varepsilon^{ave} = 1$)、混雑の発生や、

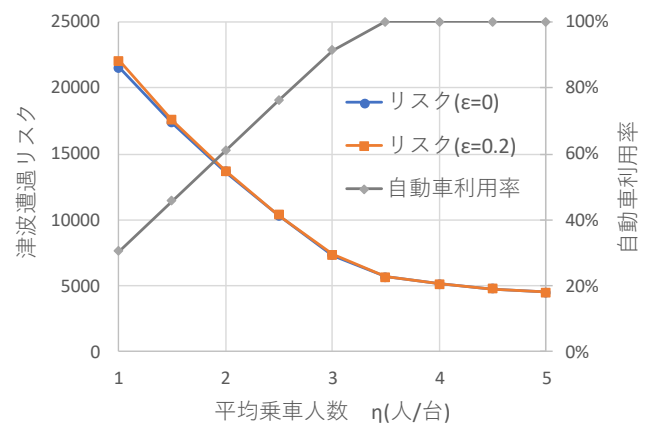


図 2 津波遭遇リスクと自動車利用率

避難場所の駐車容量を超過して全ての車両が避難場所に収容できないためにリスク値は大きくなるが、平均乗車人数が大きければ混雑が少なくなるため、リスク値の上昇は抑えられる。総リスクが最小になる平均自動車利用率は、 η が増えるほど大きくなる。

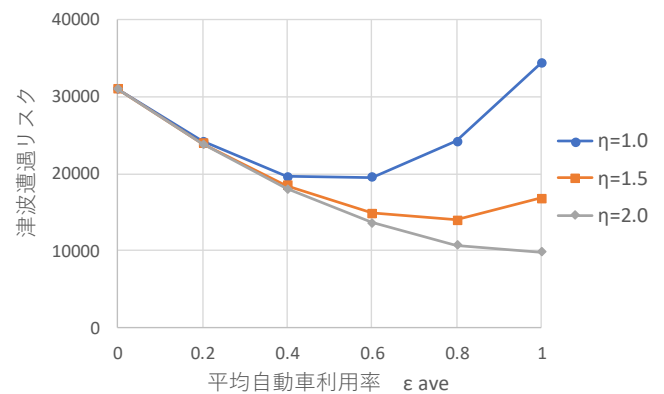


図 3 平均自動車利用率と津波遭遇リスクの関係

4. おわりに

本研究では、自動車と歩行者の 2 つのモードが混在する状況において、津波遭遇リスクを最小化する交通量を求めるモデルを示した。自動車の利用率や平均乗車人数を変化させた場合のリスクの値を比較し、徒歩避難可能な住民が不適切に自動車を利用することが危険性を増大させることを示した。

今後は、津波避難計画を住民とともに作成するプロセスで使えるように、本モデルのインターフェイスなどを改善していくことが望まれる。

参考文献

- 1) 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，vol.53，CD-ROM，2016