

# 津波避難時における 歩行者専用化区間設定の効果

竹居 広樹<sup>1</sup>・奥村 誠<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-04)

E-mail:hiroki.takei.p4@dc.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

E-mail:okumura@irides.tohoku.ac.jp

東日本大震災以降、多くの自治体で歩車の混合モードによる津波避難計画の策定が検討されている。歩車混合流の特性は殆ど明らかにされていないが、混合の悪影響の存在は明らかであり、混合を避ける避難方法の検討が必要だと考えられる。本研究では、特定の道路区間を歩行者専用化することにより歩行者の収容容量を増大させ、津波遭遇リスクを減少させるとともに、歩車の錯綜を避ける避難方法を検討する。自治体規模のネットワークで歩行者専用区間を指定する最適化計算を行い、人口が集中している避難場所付近の道路区間を歩行者専用化することが津波遭遇リスクを抑制する上で有効であることを示した。加えて、歩行者専用区間設定の有無による交通事故リスクの空間分布、時間分布を比較し、歩行者専用化による交通事故リスクの抑制効果を確認した。

**Key Words :** *tsunami evacuation, optimization, pedestrianization, tsunami encounter risk, traffic accident risk*

## 1. はじめに

東日本大震災での津波被害を受け、浸水が想定される自治体では津波避難計画の策定が求められることとなった。避難計画の策定指針では、自動車の利用は円滑な避難ができないおそれが高いため、避難方法は原則として徒歩によるものとしている。一方で、避難場所や目標地点まで避難するには相当な距離がある、あるいは災害時要援護者等の円滑な避難が困難であるなどのやむを得ない場合には、地域の実情に応じた避難方法をあらかじめ検討しておく必要があるとしている。その際、自動車等を使用を認める場合であっても、渋滞や交通事故の発生、徒歩避難者の円滑な避難を妨げることは避けなければならない。

歩車混合モードによる避難計画の策定への寄与が期待できる数理モデルとして、シミュレーションによるもの<sup>23)</sup>や最適化によるもの<sup>45)6)</sup>が蓄積されてきた。これらのモデルの多くは、自動車、歩行者それぞれの交通特性を表現しているが、歩車の混合による影響（速度や流量の低下、交通事故リスクの発生など）を明示的に表現しているものは未だ少ない。混合交通流に関しては途上国における観測結果の報告<sup>7)</sup>が存在するものの、その特性は

殆ど明らかにされておらず、不確実性が大きいのも事実である。しかし、混合の悪影響が存在することは明らかであり、混合交通流の発生を避ける避難方法の検討が必要であると思われる。

筆者らは先行研究で、自動車と歩行者の混合モードによる最適津波避難モデルを構築し、避難者全体の津波遭遇総リスクと歩車の錯綜により発生する交通事故リスクを定量的に評価した<sup>8)</sup>。先行研究の結果として、津波遭遇リスクを小さく抑える道路ネットワークの利用形態では歩車の錯綜が多く発生し、交通事故リスクが高くなることを示したが、実際に自治体が津波避難計画を策定する上では、津波遭遇リスクを抑えつつ、歩車の錯綜も抑制できる計画とするのが望ましい。

本研究では、道路区間を歩行者専用化することにより歩行者の収容容量を増大させ、津波遭遇リスクを減少させるとともに、歩車の錯綜を避けることを考える。道路区間の歩行者専用化の有無をbinary変数により与え、歩行者専用区間では混合区間より多く歩行者が収容できるものとする。市町村規模のネットワークによる計算の結果、歩行者専用化される区間を明らかにし、津波遭遇リスクの低減効果に加え、歩車の錯綜回数の減少を確認した。

## 2. 先行モデルの概説と歩行者専用区間の定式化

### (1) 先行モデルの概説

本研究で用いるモデルは、先行研究で開発した歩車混合型の最適津波避難モデル<sup>8)</sup>に歩行者専用区間を指定するbinary変数を追加したものである。まず、先行モデルの定式化について概説する。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<sup>9)</sup>を採用し、自動車と歩行者に異なるセル通過時間の値を与えることで両者の速度の違いを表現した。期 $t$ のセル $a$ の流入, 流出, 滞留する自動車台数を $u_t^a, v_t^a, p_t^a$ とする。同様に, 期 $t$ のセル $a$ の流入, 流出, 滞留する歩行者数を $\tilde{u}_t^a, \tilde{v}_t^a, \tilde{p}_t^a$ と表す。時刻 $t \sim t+1$ までを期 $t$ とすると, 時刻 $t$ にセル $a$ に存在する自動車台数は $(p_t^a + v_t^a)$ , 歩行者人数は $(\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a)$ として表される。また, 集合の記号として以下を用いる。  $T$ は期,  $N$ はノード,  $A$ はセルの集合である。セルの集合 $A$ は起点セル $A_0$ , 道路区間セル $A_R$ , 避難場所セル $A_D$ から構成される。なお,  $O(i)$ ,  $I(i)$ 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。モデルの定式化は以下のとおりである。

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

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

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

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

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

$$u_t^a \leq C^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in \{A_R \cup A_D\} \quad (6)$$

$$\tilde{u}_t^a \leq \tilde{C}^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in \{A_R \cup A_D\} \quad (7)$$

$$u_t^a + e_h^a \tilde{u}_t^a \leq \delta^a \{ H^a - (p_t^a + v_t^a) - e_h^a (\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a) \} \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in \{A_R \cup A_D\} \quad (8)$$

$$v_t^a + e_f^a (\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a) \leq C^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A_R \quad (9)$$

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

$$\eta \cdot p_0^a + \tilde{p}_0^a = D^a \geq 0 \text{ (given)} \quad \forall a \in A_0 \quad (11)$$

$$u_t^a, \tilde{u}_t^a, v_t^a, \tilde{v}_t^a, p_t^a, \tilde{p}_t^a \geq 0 \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (12)$$

ただし, 外生値を与えるパラメータは以下の通り。

- $R_t^a$  : 期  $t$  におけるセル  $a$  の津波遭遇リスク ( $0 \leq R_t^a \leq 1$ )
- $\eta$  : 車両の平均乗車人数
- $C^a$  : 自動車のフロー容量

- $\tilde{C}^a$  : 歩行者のフロー容量
- $H^a$  : セルの収容容量
- $\delta^a$  : 渋滞流と自由流の密度波速度の比
- $e_h^a$  : 歩行者と自動車の空間占有量の比
- $e_f^a$  : 歩行者による自動車の流量低下のパラメータ
- $s^a$  : 歩行者のセル通過最小時間
- $D^a$  : 起点セルの避難者人数

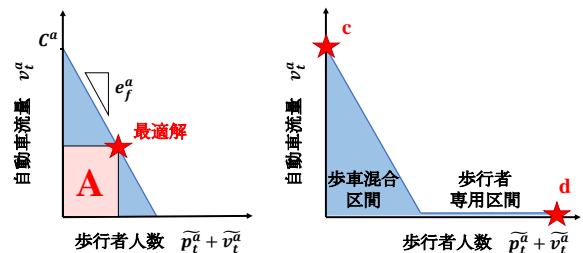
式(1)の目的関数は, 地域全体の津波遭遇リスクの合計値(津波遭遇総リスク)であり, 避難者は津波遭遇総リスクを最小化するように経路誘導される。式(2)~(5)は交通量保存則である。式(6), (7)は自動車または歩行者単独の時のセルへの流入制約である。式(8)はセルの収容能力の制約で, 収容容量から両モードによって占有されている空間を差し引いたセルの空きに比例して流入できることを意味する。式(9)はセルからの流出制約で, 歩行者人数の増加により $e_f^a$ の割合で自動車の流出量が減少することを表している。式(10)は歩行者のセル通過最小時間の制約で, 同一のセルを自動車が1期で通過できるのに対し, 歩行者は $s^a$ 期かかるとすることで, 両者の速度の違いを表現している。式(11)は初期条件であり, 右辺の外生値である起点セルごとの避難者を, 自動車利用者と歩行者に内生的に配分することを意味する。式(12)は操作変数の非負制約である。

以上の式(1)~(12)はすべて操作変数の線形関数であるため, 先行モデルは線形計画問題となる。詳細な定式化については参考文献<sup>8)</sup>に譲ることとする。

### (2) 歩行者専用区間の表現と決定方法

先行モデル<sup>8)</sup>では, 道路区間セルにおける歩行者人数と自動車の交通量の関係を式(9)のように線形の制約式で与えている。そのため, 図-1(a)のような形の実行可能領域となり, セルに存在できる歩行者人数が制限されてしまう。しかし実際の道路区間では, 自動車が流れていないセルでは歩行者をより多く収容することができると考えられる。そのため, 図-1(b)のような非凸な実行可能領域を設定することとする。

非凸な実行可能領域を設定するために, 2本の制約式のうちいずれか1本が満たされていなければならないと



(a) 歩行者専用区間なし (b) 歩行者専用区間あり

図-1 歩行者人数と自動車流量の関係

いう条件（離接制約）を導入する．非常に大きな数 $M$ と道路区間セル $a$ に対するbinary変数 $y^a$ を導入することで，**図-1(b)**のような実行可能領域を操作変数の線形式により記述できる．

$$v_t^a + e_f^a(\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a) \leq C^a + M \cdot y^a \quad (9a)$$

$$v_t^a \leq 0 + M \cdot (1 - y^a) \quad (9b) \\ \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A_R$$

ここで， $y^a = 0$ の場合，式(9a)が有効になり，式(9b)は右辺が非常に大きな数になるので無視される．逆に $y^a = 1$ の場合，式(9b)が有効になり，式(9a)は無視される．すなわち， $y^a = 1$ となる道路区間セル $a$ が歩行者専用区間である．なお，セルに存在できる歩行者人数の上限は，式(8)により規定される．

道路区間の歩行者専用化の有無は，津波遭遇総リスクを最小化するように指定される．binary変数が導入されるため，本節で提案するモデルは混合整数計画問題となる．目的関数は操作変数の線形式であるため，最適化計算の結果として**図-1(b)**の点cや点dのような単一モードの端点解が得られやすく，歩車の錯綜により生じる交通事故リスク（次節）を抑制できると考えられる．

### (3) 歩車の錯綜回数の表現と交通事故リスク

先行研究<sup>9</sup>と同様に，歩車の錯綜によって交通事故のリスクが発生すると考える．期 $t$ の間にセル $a$ を流出した自動車は，その間に時刻 $t$ にセル $a$ に存在した $(\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a)$ 人の歩行者を追い抜く．同様に $v_t^a$ 台の自動車が歩行者を追い抜くと考えると，期 $t$ のセル $a$ における歩車の錯綜の回数は次の式(13)のように表される．

$$v_t^a(\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a) \quad (13)$$

式(13)は，セル $a$ における自動車流量と歩行者人数の積であり，**図-1**のAの部分の面積として表される．

以下では，全道路区間セル，全期間について，この錯綜回数を合計したものを「交通事故リスク」と呼び，次の式(14)のように与える．

$$\sum_{t=0}^T \sum_{a \in A_R} v_t^a(\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a) \quad (14)$$

式(14)で定義される交通事故リスクは操作変数の積の項を含むため，目的関数や制約条件に加えると線形計画問題ではなくなるため，計画問題に組み込むことは避けるが，最適化の結果として**図-1(b)**の点cや点dのような端点の解が多く得られれば，式(14)で示される交通事故リスクが抑制される利用形態が実現されることが考えられる．先行研究と同様に，津波遭遇総リスク最小化問題の最適解に対して，付加的に交通事故リスクの評価を行う．

## 3. 自治体規模ネットワークにおける計算と考察

### (1) ネットワークの設定

太平洋に面する陸地を持つ宮城県亶理郡亶理町を参考としたネットワークを用いて，自治体規模のネットワークにおける計算可能性を示す．東日本大震災の経験を踏まえ，亶理町では徒歩と自動車の両モードによる避難を考慮した津波避難計画を策定している<sup>10</sup>が，ここでは道路ネットワークの容量に関する言及はなく，渋滞や歩車の混合による問題は考慮されていない．

計算条件は特に記述がない限り，先行研究<sup>9</sup>と同様に設定するものとし，各種パラメータの設定値は付録に記載する．亶理町津波避難計画<sup>10</sup>を参考に，**図-2**のような道路ネットワークを設定する．ただし，先行研究からの変更点として，内陸2カ所の町境の峠を避難場所セルに指定し，町外への避難を認めることとする．この2カ所の避難場所セルの外生値は，自動車と歩行者のフロー容量をそれぞれ45と600，収容容量を無限大とおいた．

津波遭遇リスク $R_t^a$ は，時間が経過するほど津波が迫ることを表す時間リスクと，海に近いほど潜在的なリスクが大きいことを表す距離リスクをそれぞれ滑らかなロジスティック曲線で表現し，式(15)のように両者の積により与えた．なお，避難場所セルについては距離リスクをゼロとおき，時刻に関わらずリスクフリーであると仮

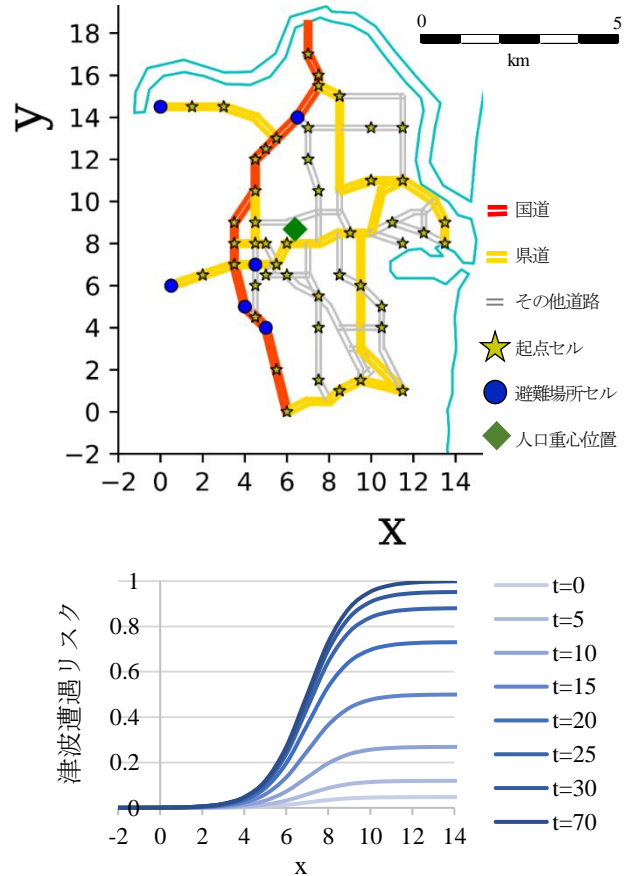


図-2 対象とするネットワークと津波遭遇リスク



定した。互理町は沿岸部に平坦な地形が広がり、安全な高台がほとんど存在しないため、標高などの地形条件については考慮しないものとする。

$$R_t^a = \text{時間リスク}(t) \times \text{距離リスク}(x) \quad (15)$$

$$= \frac{1}{1 + e^{-0.2(t-15)}} \times \frac{1}{1 + e^{(x-7)}}$$

本研究では、歩行者専用区間の有無による比較を行うため、歩行者専用区間なし、歩行者専用区間ありの2ケースで計算を行う。以下の計算では次のように、それぞれをCase 0, Case 1と呼ぶ。

- Case 0 : 歩行者専用区間なし
- Case 1 : 歩行者専用区間あり

**(2) 歩行者専用区間の有無による各リスク値の比較**

まず、歩行者専用区間を導入しないCase 0と、導入するCase 1, の津波遭遇総リスクと交通事故リスクの値をそれぞれ比較する。図-3に各ケースの津波遭遇総リスクと交通事故リスクを示す。Case 0に比べてより広い実行可能領域を設定したことにより、Case 1では目的関数である津波遭遇総リスクを7割程度まで抑えられる。加えて、交通事故リスクも3割以下に抑えられている。Case 0では自動車と歩行者が同一のセルを同時に利用したことにより、歩車の錯綜が多く発生する。これに対し、Case 1では多くの歩行者が錯綜の発生しない歩行者専用区間を利用し、自動車がそれ以外の経路を利用したことにより、歩車の同一区間の利用が少なくなり、錯綜回数が減少する。歩行者専用区間の指定により、津波遭遇総リスクを減少させることができるのに加え、歩車の錯綜を避ける端点解が実現されるため、地域全体で発生する交通事故リスクの総量が抑えられたと考えられる。

**(3) 道路の利用形態の比較と歩行者専用区間の分布**

Case 0とCase 1について、各モードの道路の利用形態を比較する。図-4(a)に各ケースの自動車、歩行者の累積通過台数および人数を示す。色が濃いほど累積台数、人数が多いことを表している。一部の区間が歩行者専用化されることで、特に自動車の避難経路が変化する。例えば、町中央部を横断する県道が歩行者専用化されたことにより、自動車はその1つ北の道路へと迂回して避難場所に向かうことになる。

図-4(b)にCase 1での歩行者専用区間を示す。町中央部と南部を東西に横断する県道と、内陸部を縦断する国道を中心に歩行者専用区間に指定されている。互理町では、人口が内陸部を縦断する国道に沿った地域に集中している。人口が密集している場合、自動車よりも徒歩で避難

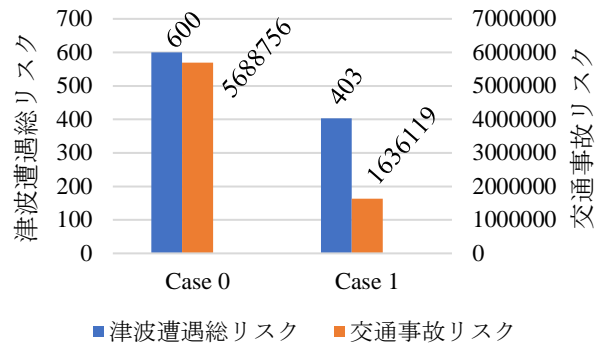
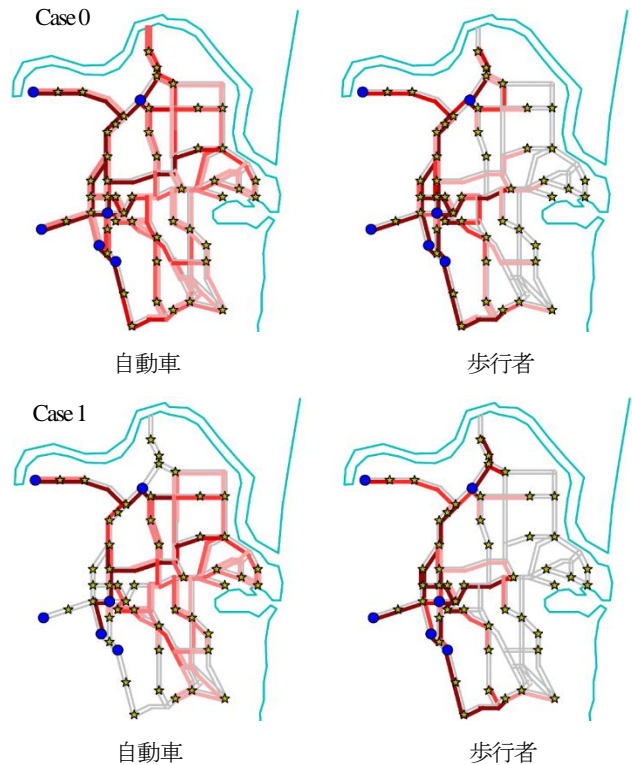
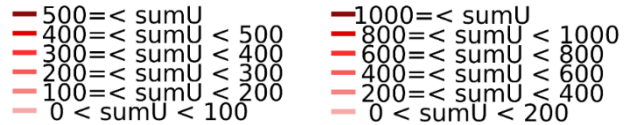


図-3 各ケースの津波遭遇総リスクと交通事故リスク



(a) 道路区間を通過した累積自動車台数・歩行者人数



(b) 歩行者専用区間に指定される道路区間(Case 1)

図-4 各ケースにおける道路の利用形態

したほうが避難者が高密度で存在でき、多くの交通量を流す上で有利である。避難場所に近い内陸部に人口が集中している場合、道路区間の歩行者専用化が有効な施策になり得ると考えられる。

(4) 交通事故リスクの空間分布

Case 0およびCase 1における交通事故リスクの空間分布を図-5に示す。色が濃いほどリスクが高いことを表す。歩行者専用区間なしの場合、沿岸側から内陸側に向かう多くの道路で交通事故リスクが発生するが、一部の道路区間を歩行者専用化することにより、交通事故リスクの発生する道路区間の数を減少させることができる。一方で、歩行者専用化を導入しても、避難場所に向かう道路区間の一部で交通事故リスクは発生する箇所がある。具体的には、町北西部の峠へ向かう県道や、避難需要が集中する町中心部の避難場所付近の道路区間がこれにあたる。ネットワーク接続の関係上、代替経路が少ない場合には、同一の道路区間に歩車が混在する状況を避けるのは難しい。このような区間では、歩道の拡幅、縁石による歩車道の分離などを施し、交通事故の発生リスクを防ぐ必要があると考えられる。本モデルによる計算結果は、そのような部分的な交通事故対策を施す際に、どの区間を対策すべきかの根拠となる情報の提供が期待できる。

(5) 交通事故リスクの時間分布

各ケースにおいて、交通事故リスクが発生する時間帯を確認する。図-6(a)は、各ケースにおける交通事故リスクおよびその原因となる道路区間セルの自動車流量と歩行者人数の時間的変化を示したものである。この2つのグラフは縦軸のスケールが異なることに注意されたい。一部の区間を歩行者専用化するケースでは自動車の利用できる区間が減少するが、道路区間全体としての自動車流量と歩行者人数の時間変化は、どちらのケースでも類似した傾向がみられる。すなわち、自動車流量は避難開始直後に最も高くなり、それ以降ならかに減少する。歩行者人数は避難開始直後から $t = 5$ にかけて増加し、その後 $t = 50$ 前後にかけて次第に減少する。

図-6(b)は交通事故リスクのスケールを統一したものである。全期間を通して歩行者専用区間を指定したケースのほうが小さい値をとっている。いずれのケースでも $t = 10$ 前後で最も高い交通事故リスクが発生しており、ピーク時の交通事故リスクはCase 0に比べてCase 1では約4割(42%)まで抑えられている。

(6) フェーズごとの歩行者専用区間の指定の検討

ここまでの計算は、一部の道路区間を避難開始直後から避難終了まで常に歩行者専用化することを考えてきた。本節では、一定時間経過後に道路区間の利用形態を変え

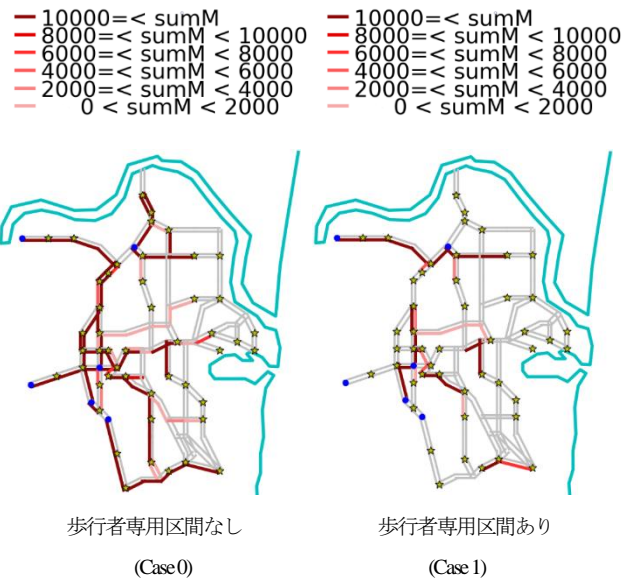
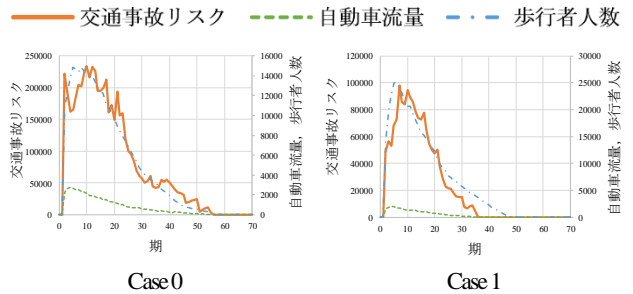
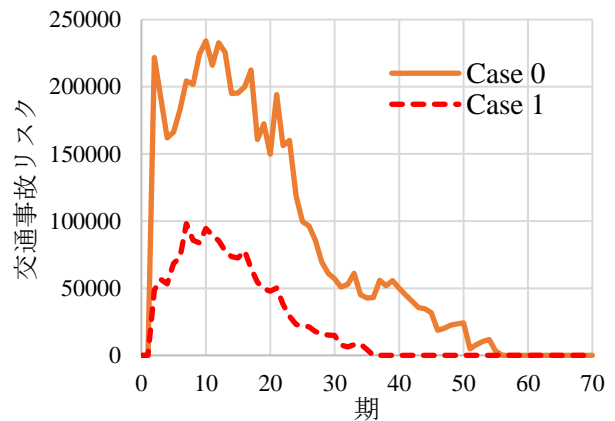


図-5 交通事故リスクの空間分布



(a) 各ケースの交通事故リスクと自動車流量, 歩行者人数の時間変化



(b) 各ケースの交通事故リスクの時間分布の比較

図-6 交通事故リスクの時間分布

ることを考える。

各種パラメータ値をCase 1のように設定し、避難開始直後から $t = 5$  (15分後)までをフェーズ1、 $t = 5$ から $t = 10$  (30分後)までをフェーズ2、 $t = 10$ 以降をフェーズ3とする。各フェーズに対して歩行者専用化の有無

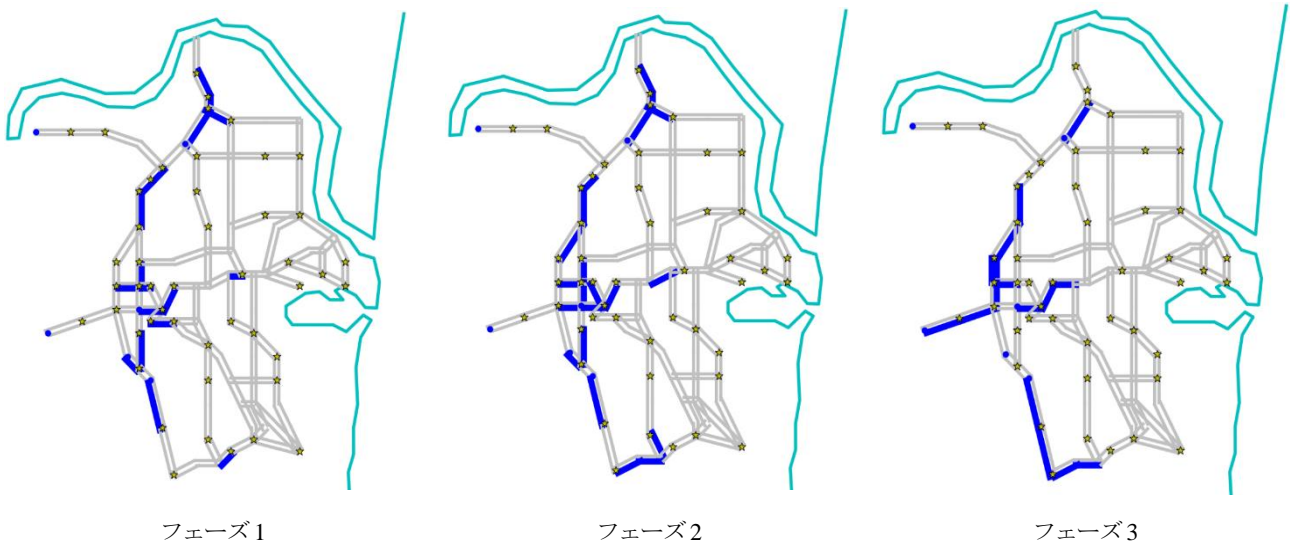


図-7 各フェーズにおける歩行者専用区間の位置

を表すbinary変数を与えることで、フェーズごとに道路の使われ方を変化させるものとして計算を行う。計算の結果、各フェーズにおける歩行者専用区間は図-7のようになった。フェーズの進行に伴い、歩車混合区間から歩行者専用区間に切り替わるセルと、その逆に切り替わるセルの両方が存在することがわかった。津波遭遇総リスクは395、交通事故リスクは1668932となり、Case 1と比較して津波遭遇総リスクは2%減少、交通事故リスクは2%増加した。

本モデルによりフェーズごとの歩行者専用区間の指定を検討する場合、binary変数の数が道路区間数×フェーズ数となり、計算負荷の増大への対応が課題となる。

#### 4. おわりに

本研究では、先行研究で開発した歩車混合型セルベース最適津波避難モデルに、道路区間の歩行者専用化を導入し、歩行者専用区間を指定する最適化モデルを提案した。歩行者数と自動車流量の関係を表す制約の中で、自動車が流れていなければより多くの歩行者がセルに収容できることを表現した。

提案モデルを実市町村規模のネットワーク適用し、影響の分析を行った。津波遭遇総リスクを最小化する最適化計算の結果、人口が集中している内陸部で、避難場所に向かう車線が歩行者専用区間に指定されることがわかった。歩行者専用区間の導入による津波遭遇総リスクの低減効果の確認に加え、歩車の錯綜回数の空間分布、時間分布を比較し、歩行者専用化による交通事故リスクの抑制効果を確認した。

本提案モデルはbinary変数を含む混合整数計画問題であり、ネットワークの大規模化や時間方向への拡張を検

討する場合、計算負荷の増大への対応が課題となる。また、自動車による避難を余儀なくされる要援護者が地区に一定数存在すると考えられるため、その存在を考慮したモデル化が求められる。これらの課題に対して、今後とも改良を進めていく必要がある。

#### 付録 計算条件の設定

自治体規模ネットワークでの計算における外生値の設定について述べる。

単位時間を3分、自動車と歩行者の自由流速度をそれぞれ20km/h、4km/hとし、道路を最大1kmのセルに区切る。同町の67の行政区ごとに夜間人口に基づき表-1のように避難者数を与える。67個の起点セル、6個の避難場所セルを含めたセルの総数は305個である。収容容量 $H^a$ はセルの長さ1kmあたり150台とした。自動車のフロー容量 $C^a$ （単位：台/3分）は一般的なシミュレーションで用いられている道路種別毎の値を参考に、国道を100、県道を90、その他道路を62.5とした。歩行者のフロー容量 $C^p$ （単位：人/3分）は一律に600とした。起点セルのフロー容量・収容容量は共に無限大とおく。避難場所セルの自動車フロー容量は90（町境の2カ所の峠については45）、歩行者フロー容量は600、自動車収容容量は表-2のように各避難場所の駐車容量を与え、4カ所の合計は2251台である。2カ所の峠の収容容量は無限大とする。計算に用いるネットワークはすべて2車線道路であることから、歩車混合のパラメータはセルに関わらず一定（ $e_h^a = 1/15$ ,  $e_f^a = 1/6$ ）とおいた。なお式(8)において避難場所セルでは $e_h^a = 0$ と設定しているため、歩行者は自由に流入できることを仮定している。車両1台当たりの平均乗車人数は2.0人として計算する。なお、計算上の避難時間の最大値は $T = 70$ としている。



表-2 起点セルの位置と避難人口

行政区名	人口	x	y	行政区名	人口	x	y
小山	144	1.5	14.5	早川	1345	5.5	13.0
祝田西	247	2.0	6.5	吉田	109	6.0	0.0
田沢	199	3.0	14.5	南城東	921	6.0	6.5
祝田南	384	3.5	7.0	北城東	716	6.0	8.0
桜小路西	483	3.5	8.0	下茨田	2256	6.0	8.0
倉庭	438	3.5	9.0	榎袋	163	7.0	12.0
館南下	327	4.5	4.5	十文字村	538	7.0	13.5
館南下	547	4.5	4.5	今泉	1105	7.0	17.0
南町南	518	4.5	4.5	浜吉田北	782	7.5	1.5
南長瀬	190	4.5	4.5	一本松	285	7.5	4.0
北長瀬	663	4.5	4.5	新丁	274	7.5	5.5
南町北	608	4.5	6.0	鷺屋	89	7.5	10.5
上町南	149	4.5	6.0	森房	1144	7.5	15.5
上町北	403	4.5	6.0	上の町	198	7.5	15.5
新井町	443	4.5	8.0	中泉	1132	7.5	16.0
桜小路東	455	4.5	8.0	浜吉田西	961	8.5	1.0
桜小路中	63	4.5	8.0	柴町	224	8.5	6.5
鹿島	1895	4.5	9.0	牛袋	804	8.5	15.0
神宮寺	789	4.5	10.5	高屋	993	9.0	8.5
上郡	998	4.5	12.0	浜吉田東	287	9.5	1.5
中町	465	5.0	6.5	長瀬浜	459	9.5	6.0
新町中	108	5.0	8.0	蕨	177	10.0	11.0
新町南	336	5.0	8.0	十文字町	154	10.0	13.5
新町北	184	5.0	8.0	開墾場	265	10.5	4.0
駅前西	330	5.0	8.0	大畑浜	132	10.5	5.0
駅前東	398	5.0	8.0	箱根田西	301	11.0	9.0
新町	274	5.0	8.0	野地	363	11.5	1.0
下郡	1757	5.0	12.5	鳥屋崎	229	11.5	8.0
中原	198	5.5	2.0	あぶくま西	232	11.5	11.0
旭台	895	5.5	2.0	本郷	425	11.5	13.5
上大畑	151	5.5	2.0	箱根田東	386	12.5	8.5
下大畑	623	5.5	2.0	港町	299	13.5	8.0
五日町	170	5.5	7.0	あぶくま東	232	13.5	9.0
祝田東	198	5.5	7.0	合計(重心)	34010	6.38	8.68

表-3 避難場所セルの駐車容量

避難場所	駐車容量	x	y
逢隈小学校	380	6.5	14.0
亘理小学校	320	4.5	7.0
亘理中学校	1351	4.0	5.0
吉田小学校	300	5.0	4.0
合計	2251		

難計画策定を支援する津波避難評価システムの開発、情報処理学会論文誌, Vol.55, No.5, pp.1498-1508, 2014.

- 3) Zong, X., Xiong, S. and Feng, Z. : A conflict-congestion model for pedestrian-vehicle mixed evacuation based on discrete particle swarm optimization algorithm, *Computers & Operations Research*, Vol.44, pp.1-12, 2014.
- 4) Fang, W., Li, Q., Li, Q., Han, L. D. and Shau, S-L. : A space-time efficiency model for optimizing intra-intersection vehicle-pedestrian evacuation movements, *Transportation Research Part C*, Vol.31, pp.112-130, 2013.
- 5) Zhang, X. and Chang, G.-L. : A dynamic evacuation model for pedestrian-vehicle mixed-flow networks, *Transportation Research Part C*, Vol.40, pp.75-92, 2014.
- 6) 横山宗一郎, 安藤宏恵, 倉内文孝, 杉浦聡志 : 徒歩と自動車の混合モードにおける津波最適避難計画モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol.53, CD-ROM, No.59-03, 2016.
- 7) Laxman, K. K., Rastogi, R. and Chandra, S. : Pedestrian flow characteristics in mixed traffic conditions, *Journal of Urban Planning and Development*, 136(1), pp.23-33, 2010.
- 8) 竹居広樹, 奥村誠 : 歩車混合避難における津波遭遇リスクと交通事故リスク, 交通工学論文集(特集号), Vol.4, No.1, A\_129-A\_137, 2018.
- 9) Nie, Y., A cell-based Merchant-Nemhauser model for the system optimum dynamic traffic assignment problem, *Transportation Research Part B*, Vol.45, No.2, pp.329-342, 2011.
- 10) 宮城県亘理郡亘理町 : 亘理町津波避難計画(平成 26 年 2 月), <http://www.town.watari.miyagi.jp/index.cfm/24,27476,c,html/27476/20140619-222512.pdf>, (参照 2018-07-30)

(2018.7.31 受付)

## 参考文献

- 1) 総務省消防庁 : 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), pp.12-60, [http://www.fdma.go.jp/neuter/about/shingi\\_kento/h24/tsunami\\_hinan/houkokusho/p02.pdf](http://www.fdma.go.jp/neuter/about/shingi_kento/h24/tsunami_hinan/houkokusho/p02.pdf), (参照 2018-7-30)
- 2) 畑山満則, 中居楓子, 矢守克也 : 地域ごとの津波避

EFFECT OF PEDESTRIANIZATION OF ROAD SECTIONS  
IN CASE OF TSUNAMI EVACUATION

Hiroki TAKEI and Makoto OKUMURA

After the Great East Japan Earthquake, the establishment of a plan for evacuation in tsunami by pedestrian-vehicle mixed flow is being considered in many municipalities. Although the characteristics of pedestrian-vehicle mixed flow are hardly revealed, it is considered that exploring the evacuation method to avoid mixing is necessary because the existence of adverse effects of mixing is obvious. In this research, we attempt that increasing pedestrian capacity by dedicating specific road sections to pedestrians (that is "pedestrianization"), reducing tsunami encounter risk. We carried out an optimization to designate a pedestrianization section on a real municipal scale network. On the result of optimization, we show that tsunami encounter risk can be reduced by dedicating the road section near the evacuation shelter where the population is concentrated to pedestrianization section. In addition, by comparing the spatio-temporal distribution of traffic accident risk due to presence or absence of pedestrianization section, we confirmed the effect of suppressing traffic accident risk by the pedestrianization of the road section.