

歩車混合を考慮したセルベース最適津波避難モデル Cell-based Optimal Tsunami Evacuation Model considering Vehicle-Pedestrian Mixture

竹居 広樹¹, 奥村 誠²

Hiroki TAKEI¹ and Makoto OKUMURA²

東日本大震災以降、徒歩避難が困難な地域や人に対して、やむを得ない場合の自動車避難が容認された。しかし自動車避難は渋滞の発生のほか、歩行者との錯綜が交通事故の危険性を生むという問題がある。歩車混合を扱う最適避難の従来研究では、歩車それぞれの移動速度に悪影響を与えない程度に歩車混合を制限した状況を仮定しており、歩車混合による津波遭遇リスクの緩和効果と交通事故リスクの増加効果を明示的に分析できない。本研究では、著者らのセルベース津波遭遇リスク最小化モデルに歩車混合を明示的に組み込んだ最適化モデルを提案し、実際の市町村のネットワークに適用して、自動車利用率と津波遭遇リスクおよび交通事故リスクの関係、歩車混合時のネットワークの使われ方の変化、交通事故リスクの高い場所と時刻の分析ができることを示す。

Keywords: 津波避難, 歩車混合, セルベースモデル, 津波遭遇リスク, 交通事故リスク

1. はじめに

東日本大震災において、これまでの想定を上回る範囲が津波に襲われ、徒歩による避難が時間的に間に合わない地域が存在することが明らかとなった。また、高齢者などの徒歩避難困難者の対応が検討され¹⁾、津波避難においてやむを得ない場合の自動車の利用が容認されることとなった。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るという効果が期待できる一方、自動車の過剰な利用が混雑をもたらし、期待通りの効果が得られない可能性がある。さらに、東日本大震災時には、混乱の中で認知されていないものの、避難車両と歩行者との交通事故が多数発生したとの指摘もあり²⁾、今後自動車利用を含めた避難計画を検討する上では、歩車の混在がもたらす交通事故リスクにも注意する必要がある。

これまでに、既存の道路網や避難施設などのインフラの下で容認できる自動車避難の限度に関する研究は、シミュレーション分析によるものを中心に多く蓄積されてきたが、歩車の混合の影響を明示的に取り扱ったものは限定的である。

本研究では、著者らが先行研究で開発したセルベース津波遭遇リスク最小化モデル³⁾に歩車混合とその影響を明示的に組み込んだ最適化モデルを提案する。さらに実際の市町村のネットワークに適用して、自動車利用率と津波遭遇リスクおよび交通事故リスクの関係、歩車混合時のネットワークの使われ方の違い、交通事故リスクの高い場所と時刻の分析ができることを示す。

2. 歩車の混合を考慮した避難交通の既存研究

歩車が同一の道路区間に高密度に存在する混合交通流のマクロな特性の研究として、途上国における観測結果の報告⁴⁾が存在するが、津波の襲来が迫る災害時に、文化的背景が異なる日本で同様の特性が現れるかどうかは不明である。そのため個々の車両と歩行者をエージェントとするミクロシミュレーション⁵⁾によるアプローチを利用した研究例がある⁶⁾。しかし、シミュレーションモデルは、仮定した行動原理を前提に所与の外的条件下で発生する可能性が高い状況を模擬することはできるものの、より安全で効率的な避難方法を求める論理が内包されていないため、安全性の目標水準が達成できない場合、何をどのように変更すれば状況が改善できるのかはわからない。自動車を利用した避難にどのような問題があり、避難計画の中で具体的な避難方法を定めていくことによってそれらの問題をどのように解決していけばよいのかを考えるためには、シミュレーションモデルよりも、最適な出発時刻や避難先、経路を明らかにできる最適化モデルの役割が大きいと考えられる。

避難計画の最適化モデルの中で、歩車の混合を扱おうとした研究も少数ながら存在している。Zhang et al. (2014) は、セル・ベースモデルを用いて交差点における歩車交通流の干渉を表現し、イベント会場からの避難誘導を対象に、会場周辺交差点の信号制御の最適化を検討した⁸⁾。結果として得られた最適な信号現示の各フェーズにおいては、歩車の交通流は分離されており歩車の混合状況は発生していないことになる。伊藤ら(2015)は、単路部の道

1 学生会員, 学士 (工学), 東北大学大学院工学研究科

2 正会員, 博士 (工学), 東北大学災害科学国際研究所

〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, S 502W e-mail: mokmr@m.tohoku.ac.jp Phone: 022-752-2161

路幅員の歩道と車道への割り振りを政策変数として避難完了時刻を最短化する問題を検討した⁹⁾。横山ら(2016)は、時空間ネットワークモデルにおいて、歩車の移動を異なる傾きを持つリンクで表現し、同一の(空間)リンクにおける歩車の交通容量に制限を置いて最適避難パターンを計算する方法を示している¹⁰⁾。これらの研究ではいづれも、歩車それぞれの移動速度は所与の一定値を取り、その速度に悪影響を与えない範囲に他方の交通量が制約されると考えている。つまり、「歩車の混合を考慮する」としているものの、その悪影響が顕在化しない状況のみを許しており、実際に発生する混合の悪影響を把握することはできないアプローチとなっている。

本研究はこれらの研究とは異なり、同一の道路区間(セル)に自動車と歩行者が同時に存在し、互いの移動速度に悪影響を与えると同時に、錯綜に基づく交通事故リスクが発生すると考え、混合の影響を明示的にとらえるところに新規性がある。

3. 歩車混合最適避難モデルの定式化

3.1 変数の定義

本研究では、歩車の混合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³⁾の津波遭遇リスク最小化モデルを拡張して定式化を行う。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 \tilde{u}_t^a , \tilde{v}_t^a , \tilde{p}_t^a と表わす。海からの距離と経過時間に応じて滑らかに増加する関数を用いて津波遭遇リスク R_t^a を外生的に与える。

また以下の記号を用いる。 T は期、 N はノード、 A はセルの集合で、 A_0 は起点セル、 A_R は道路上セル、 A_D は避難場所セルの集合であり、 $O(i)$, $I(i)$ 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。

3.2 モデルの定式化

本モデルの目的関数は、全避難者の津波遭遇総リスクである。

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

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。

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

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

式(2), (3)はセルにおける交通量保存則である。

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

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

式(4), (5)は交差点における交通量保存則である。避難者は出発時に所与の乗車人数 η 人ごとに自動車に乗り込んで避難するか、徒歩で避難するかを選択するが、途中でのモードの変更は行わないものと仮定する。

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

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

式(6), (7)はセルへの流入制約である。 C^a , \tilde{C}^a は自動車および歩行者のフロー容量である。

$$u_t^a + e_1 \tilde{u}_t^a \leq \delta^a \{ H^a - (p_t^a + v_t^a) - e_1 (\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a) \} \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in \{A_R \cup A_D\} \quad (8)$$

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。 e_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。これにより、他のモードの交通量が増えることにより、当該セルへの流入が制約されるという形で歩車混合の影響を取り入れている。

$$v_t^a + e_2 (\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a) \leq C^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A_R \quad (9)$$

式(9)はセルからの流出制約で、当該セルに滞留・移動する歩行者の増加により自動車の通過速度が低下し、 e_2 の割合で自動車の流出量が低下することを表わす。同時に、歩行者の流出に対して $(C^a - v_t^a)/e_2$ という上限値を与えており、歩車の混合が双方のモードの通過速度に与える悪影響を表現している。

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

式(10)は歩行者の速度制約で、 s^a は歩行者が自由流状態でセル a を通過する最小所要時間であり、当該セルの物理的な長さに応じて外生的に整数値を与える。

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

式(11)は初期条件で、 D^a は起点セルの避難者人数である。

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

式(12)は全て操作変数が非負の実数であることを示す。

3.3 モデルの計算方法

以上の式(1)~(11)はすべて操作変数の線形関数であるため、本モデルは全体として線形計画問題となっており、既存の数理計画法のパッケージで容易に計算できる。本研究では Gurobi Optimizer 7.1 のパッケージを利用して Windows 10 PC 上で計算を行った。

3.4 交通事故リスクの表現

本研究では歩車の混合によって交通事故のリスクが発生すると考える。自動車は歩行者より速く走行でき、下流側の制約がなければ1つの期の間にセルを通過して、その間に前方に存在した $(\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a)$ 人の歩行者を追い抜く。同様のことが流出台数 v_t^a のそれぞれの自動車が行うと考えれば、期 t のセル a における自動車と歩行者の錯綜の回数は次式で与えられる。

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

交通事故リスクは全地域、全期間にについて、この錯綜の数を合計したものに比例すると考えられ、次式により与えられる。

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

このように交通事故リスクは操作変数の積を含むため、目的関数あるいは制約条件に加えると線形計画問題ではなくなり、解の一意性やアルゴリズム上の問題を引き起こす。そこで本研究では、津波遭遇総リスク最小化の線形計画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というアプローチをとる。

4. 実ネットワークでの計算結果

4.1 計算条件の設定

太平洋に面する平地を持つ宮城県亶理郡亶理町を対象とし、同町の津波避難計画¹¹⁾を基に必要値を設定した。本研究では単位時間を3分、自動車と歩行者の自由流速をそれぞれ20km/h、4km/hとし、図1のような2車線以上の道路が避難経路になりうるとして、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、4個の避難場所セルを含めたセルの総数は303個である。収容容量 H^a はセルの長さを平均車頭間隔(7.5mと設定)で割った値とした。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、都道府県道を90、その他道路を62.5とした。歩行者のフロー容量 \tilde{C}^a (単位：人/3分)は一律に600とした。

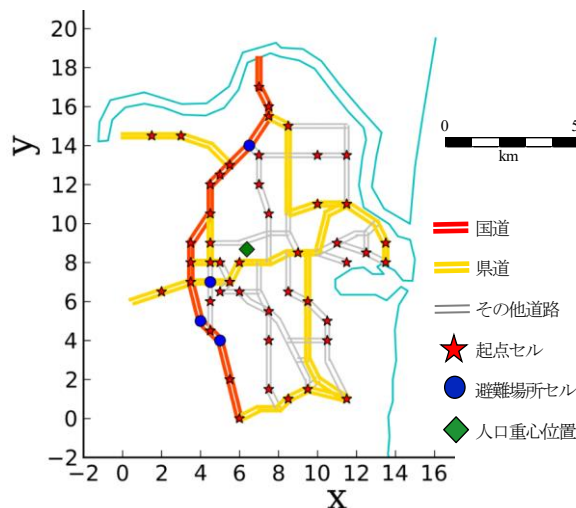


図1 対象とするネットワーク

表1 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
館南上	327	4.5	4.5	南長瀬	190	4.5	4.5
館南下	547	4.5	4.5	北長瀬	663	4.5	4.5
南町南	518	4.5	4.5	一本松	285	7.5	4.0
南町北	608	4.5	6.0	新丁	274	7.5	5.5
上町南	149	4.5	6.0	開墾場	265	10.5	4.0
上町北	403	4.5	6.0	長瀬浜	459	9.5	6.0
南城東	921	6.0	6.5	大畑浜	132	10.5	5.0
北城東	716	6.0	8.0	野地	363	11.5	1.0
中町	465	5.0	6.5	浜吉田東	287	9.5	1.5
五日町	170	5.5	7.0	浜吉田西	961	8.5	1.0
新井町	443	4.5	8.0	浜吉田北	782	7.5	1.5
新町中	108	5.0	8.0	本郷	425	11.5	13.5
新町南	336	5.0	8.0	あぶくま東	232	13.5	9.0
新町北	184	5.0	8.0	あぶくま西	232	11.5	11.0
駅前西	330	5.0	8.0	箱根田西	301	11.0	9.0
駅前東	398	5.0	8.0	箱根田東	386	12.5	8.5
下茨田	2256	6.0	8.0	港町	299	13.5	8.0
桜小路東	455	4.5	8.0	鳥屋崎	229	11.5	8.0
桜小路中	63	4.5	8.0	上郡	998	4.5	12.0
桜小路西	483	3.5	8.0	下郡	1757	5.0	12.5
祝田東	198	5.5	7.0	小山	144	1.5	14.5
祝田西	247	2.0	6.5	田沢	199	3.0	14.5
祝田南	384	3.5	7.0	早川	1345	5.5	13.0
新町	274	5.0	8.0	森房	1144	7.5	15.5
鹿島	1895	4.5	9.0	上の町	198	7.5	15.5
神宮寺	789	4.5	10.5	中泉	1132	7.5	16.0
高屋	993	9.0	8.5	今泉	1105	7.0	17.0
柴町	224	8.5	6.5	牛袋	804	8.5	15.0
倉庭	438	3.5	9.0	十文字町	154	10.0	13.5
吉田	109	6.0	0.0	十文字村	538	7.0	13.5
中原	198	5.5	2.0	榎袋	163	7.0	12.0
旭台	895	5.5	2.0	鷺屋	89	7.5	10.5
上大畑	151	5.5	2.0	藤	177	10.0	11.0
下大畑	623	5.5	2.0	合計(重心)	34010	6.38	8.68

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、歩行者フロー容量は600、自動車収容容量は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。なお式(8)において避難場所セルでは $e_1 = 0$ 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。

起点セルの位置と避難人口を表1に示す。全域の総和は34010人である。同町の人口は西寄りに南北に縦貫する国道に沿った地域に集中しており、人口重心の位置は避難場所が集中する地域内に位置している。以下の計算では1台当たりの平均乗車人数は2.0人として計算するため、自動車分担率が0.132を超えると避難所の駐車容量の不足により、最後まで避難場所に入ることができない車両が発生することになる。なお、計算上の避難時間の最大値は $T=70$ としている。

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現する時間リスクと、海に近いほど潜在的なリスクが大きいことを表現する距離リスクの積として与えた。具体的には津波避難計画²⁰⁾を参考として式(15)のようなロジスティック曲線により与えた。なお、避難場所セルの距離リスクをゼロとおき、時刻にかかわらずリスクフリーであると仮定した。

$$R_t^a = \text{時間リスク}(t) \times \text{距離リスク}(x) \\ = \frac{1}{1 + e^{-0.2(t-15)}} \times \frac{1}{1 + e^{(x-7)}} \quad (15)$$

4.2 自動車分担率の影響分析

(1) 全域における平均自動車分担率

自動車の利用が与える影響を確認するため、対象地域全域平均の自動車分担率 ε^{ave} を所与とし、その条件を満たす中で最も目的関数である津波遭遇総リスクを小さくするように起点セルごとの自動車分担率を最適化する。すなわち、以下の条件を加えて最適化を行う。

$$\sum_{a \in A_0} \eta \cdot p_0^a = \varepsilon^{ave} \sum_{a \in A_0} D^a \quad (16)$$

式(16)の左辺は全域における自動車台数に乗り込む避難者数であり、右辺はそれが全域の避難人口の ε^{ave} 倍であることを示している。

(2) 平均自動車分担率によるリスク値の変化

平均自動車利用率 ε^{ave} に対する津波遭遇総リスクと交通事故リスクの変化を図2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、津波遭遇総リスクは大きくなる。他方、自動車が

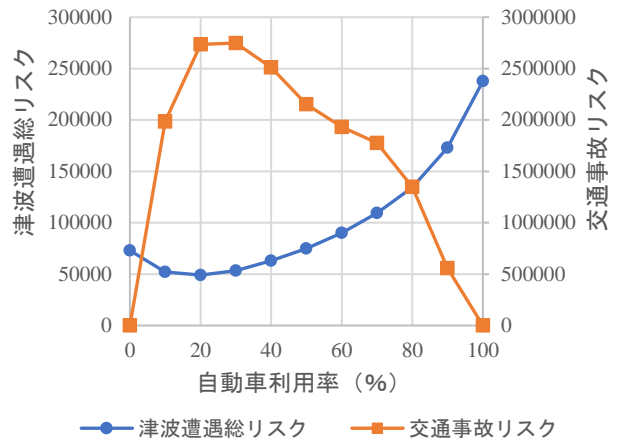


図2 平均自動車利用率とリスク値の関係

存在しないため、式(14)の交通事故リスクは0となる。

次に平均自動車利用率を上げると、避難距離が長い地域での自動車利用が可能となり、津波遭遇総リスクは減少する。他方、歩車の混合の増加により交通事故リスクは増加する。

平均自動車利用率が0.2を超えると、混雑の発生や、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津波遭遇総リスク値は減少しなくなる。交通事故リスクは、 $\varepsilon^{ave} = 0.3$ 以降は歩行者の減少により減少に転じる。全員が自動車で避難した場合 ($\varepsilon^{ave} = 1$)には歩行者が存在しないため交通事故リスクは再び0となる。

本研究で取り上げた津波避難総リスクと交通事故リスクは、単位も異なり単純に足し合わせることはできないが、 $\varepsilon^{ave} = 0$ というケースと比べて、 $\varepsilon^{ave} = 0.5$ 以降は両者がより大きな値をとるため、危険性が増加してしまっていることがわかる。すなわちこの地域では自動車の利用を認める場合でも、それは地域人口の5割以下とする必要がある。さらに、 $\varepsilon^{ave} = 0.2$ と $\varepsilon^{ave} = 0.3$ を比べると、2つのリスクとも後者の方が大きく、自動車利用率増加のメリットはない。以上のことから、合理的な自動車利用率の範囲は0~0.2または0.3~0.5程度となり、「徒歩での避難を基本とする」という原則を守る必要があることがわかる。

4.3 ネットワークの利用形態の比較

以下では全員が歩行者の場合をケース(a)、図2で津波遭遇総リスクが最小となった $\varepsilon^{ave} = 0.2$ のケースをケース(b)、全員が自動車利用の場合をケース(c)と呼ぶ。図3には、3つのケースにおけるセルごとの歩行者、自動車の流出量の期間合計値を示している。

まず、(a)全員が歩行者の場合、出発セルから避難所に向かう最短経路に沿って東西方向の3本の道路と内陸部を縦断する国道に多くの交通が流れている。また、西側遠方のセルにも多くの避難者が集中する。これは西側の山側の出発セルの避難者は、よりリスクの高い道路を通

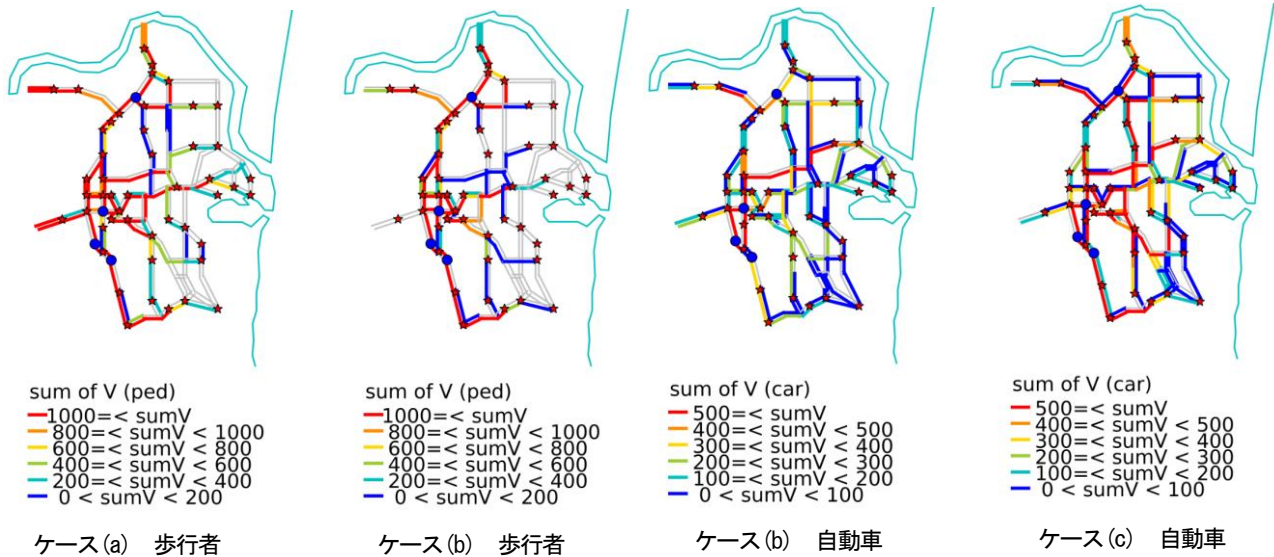


図3 ネットワークの利用形態の比較

過ぎて東にある避難場所に移動するよりも、よりリスクの低い西側の道路上に移動して留まる方が安全であることによる。言い換えれば、これらの西側の道路が一時避難場所としての役割を果たしている。海岸に近い東側の地域では、リスクが上昇するまでの時間に極力西側に遠ざかることが重要となるため南北方向の交通は見られない。

次に(c)全員が自動車利用のケースを確認する。図3の右端の図に示すように、このケースでも、中央部の東西方向の3本の道路と内陸部を縦断する国道が多く利用されることは同様であるが、混雑を避けるために地域全体の道路が使用されている。特に、中央部の東西の3本の道路に南北から流入する交通が多く見られる。東部の海岸寄りの南北の道路では、むしろ南北に分散する方向の交通が多い。このケースでも自動車の一部は西側遠方のセルへ向かっている。これにより後続の自動車が津波遭遇リスクの高い東側の区域で待たされることなく、速やかに避難場所へ入ることが可能となる。

最後に歩車の混合を含むケース(b)を確認する。このケースにおいても、歩行者が最短経路に沿った道路を集中的に利用しているが、ケース(a)と比べると海に近い東側では自動車が利用されるため、歩行者の交通量は減少している。また東西方向の利用は中央部の3本の道路のうちの2本と、最南端の道路に集約されている。また自動車はケース(c)と同様に、遠回りを含め様々な経路を分散的に利用しているが、中心部の東西方向の3本の道路のうち、歩行者が集中する2本の道路の利用が少ないことが確認できる。これは、歩車が同じセルを同時に使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。

4.4 交通事故リスクの空間的、時間的分布

上記のケース(b)における交通事故リスクの値について、その空間的分布を図4に、時間的分布を図5に示している。

図4から、交通事故リスクは地域の西側を南北に走り避難所に連結する国道、およびその国道に東西方向に連結する主要道路で高い値を取っている。一方、海岸に近い東側の区域ではほぼ全員が自動車を使用するため歩行者が存在せず、交通事故リスクは0に近い数字をとる。またリスクが高い方向は限定されており、両方向ともに大きな値を持つ区間は少数である。

図5には交通事故リスクとともに、その原因となる自動車交通量、歩行者人数の時間的変化を一緒に示している。これから、歩行者に比べて自動車の方が移動の開始、時間的な立ち上がり早く、減少の仕方も早い。交通事故のリスクは、地震発生直後に高い値を取り、時間の経過とともに急速に小さくなっている。

以上を踏まえて、この地域で交通事故リスクを抑える方法を考察する。リスクの高い道路は国道と、地域を東西に結ぶ2本の道路、南東から中央部に斜めにつながる主要道路に集中している。これらの道路は国道、県道であり、他の道路に比べて用地幅が広く確保されているため、歩道を連続的に需要に応じた幅で整備しておくことが望まれる。次に交通事故リスクが高い方向が1方向であることから、歩道が片側にしか整備できない場合を含めて歩行者を道路の右側を通行させることにより、避難車両と対面交通とすることができ安全性が高まる。

時間的に見てリスクが高いのは、津波の襲来までまだ余裕がある早い時間帯である。そのため、早い時間帯には自動車の出発を歩行者と異なる方向のみに限定し、同一方向への出発は控えることが考えられる。この場合、

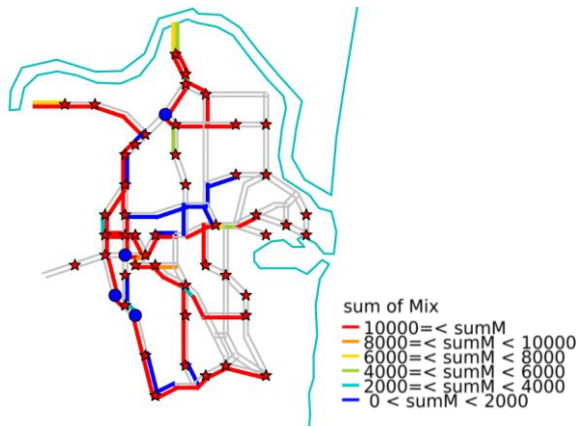


図4 交通事故リスクの空間的分布(ケースc)

歩行者の出發が一段落してから出發地域に残された人がいないかどうかを確認し、その人達を自動車に収容しながら出發するという方法が考えられる。このように自動車の出發を遅らせることは自動車利用者の津波遭遇リスクを高めるが、本モデルにおいて初期時点の自動車の流入容量の値を小さく設定して計算を試みることにより、望ましい政策を探索することが可能であると考えられる。

他方、地域の西側の国道や避難場所セルの周辺での交通事故リスクを減少させるためには、標高が高く津波遭遇リスクが低い地域に自動車を止めるか、もしくは歩行者の避難が完了するまで待機させてから自動車を避難場所に流入させることが有効であろう。上記の計算例では津波遭遇リスクを式(15)のようななめらかな曲線を用いて与えたため、標高が十分に高い場所においても0ではないリスク値が与えられている。実際には事実上リスクが0と見なせる場所が多く存在する可能性があり、一時避難場所として位置づけることが可能であろう。

5. 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、その際の交通事故リスクが評価できることを示した。実際の地域を例とする計算から、津波避難において自動車利用を認めるとしても、徒歩避難を基本とし、自動車の利用率の上限値を守る必要があることを確認した。本モデル内には交通事故リスクを最小化する原理は内包していないが、交通事故リスクの発生場所や時間帯を確認することによって、リスクを減少させる方向性が議論できることがわかった。

一方で、実際の地域の避難計画に適用するためには、歩車混在の影響パラメータを実証的に設定するとともに、地形や標高などを反映した津波遭遇リスク値の設定が課題となる。今後ともこれらの改良を進めていく必要がある。

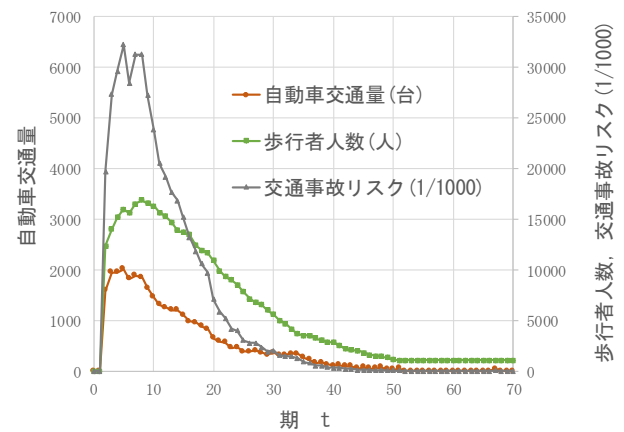


図5 交通事故リスクの時間的分布(ケースc)

謝辞

本研究の遂行に当たり、岐阜大学倉内文孝先生、東北大学桑原雅夫先生から貴重なコメントをいただいた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中央防災会議：防災対策推進検討会議津波避難対策検討ワーキンググループ報告，内閣府 HP，<http://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/pdf/report.pdf>，2014。（参照 2017-04-14）
- 2) 河北新報：第2部・車避難のリスク（下）凶器／秩序失われ膨らむ危険，特集わがこと防災・減災のページ，http://www.kahoku.co.jp/special/spe1114/20130202_01.html，2013。（参照 2017-04-26）
- 3) 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
- 4) Laxman Kotker K., Rastogi Rajat and Chandra Satish: Pedestrian flow characteristics in mixed traffic conditions, *Journal of Urban Planning and Development*, 136(1), 23-33, 2010.
- 5) Zong Xinlu, Xiong Shengwu and Feng Zhixiang: A conflict-congestion model for pedestrian-vehicle mixed evacuation based on discrete particle swarm optimization algorithm, *Computers & Operations Research*, 44, 1-12, 2014.
- 6) 佐藤祥路・鈴木勉：自動車と歩行者の混在が津波避難に与える影響と交通手段制御施策効果の分析，第23回地理情報システム学会学術発表大会，C-1-2，<https://www.gisa-japan.org/conferences/proceedings/2014/papers/C-1-4.pdf>，2014。（参照 2017-04-26）
- 7) 中居楓子・畑山満則：住民の避難行動の分析及び地域住民との連携による避難計画の検討と評価：高知県黒潮町における災害リスクコミュニケーションの事例研究，土木計画学研究・講演集，

- Vol.47, CD-ROM, No.54, 2013.
- 8) Zhang Xin and Chang Gang-len: A Dynamic evacuation model for pedestrian-vehicle mixed-flow networks, *Transportation Research Part C*, 40, 75-92, 2014.
 - 9) 伊藤慈彦・加藤直樹・滝澤重志：歩車混合型の最速避難計画に関する研究, *日本建築学会学術講演梗概集 2015(都市計画)*, 217-218, 2015.
 - 10) 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.
 - 11) 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 2015-09-01）