

# 津波避難における途中乗車施策の効果分析

爪林 康太<sup>1</sup>・竹居 広樹<sup>2</sup>・奥村 誠<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 鹿島建設株式会社 東北支店 (〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町 1-27)

E-mail:tsumebay@kajima.com

<sup>2</sup>学生会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579 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>3</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:mokmr@m.tohoku.ac.jp

東日本大震災では、多くの人々が津波からの避難に際して自動車を用い、渋滞中に津波に遭遇するという問題が発生した。その一方で、徒歩避難が困難なため自動車に頼らざるをえない地区が存在することが確認された。本研究では、先行研究で構築した津波遭遇リスク最小化モデルを拡張し、運転者、歩行者、同乗者の3モードを設定して、歩行者から同乗者へのモード遷移である途中乗車の取り扱いを可能にする。本モデルを仮想の市町村規模ネットワークに適用し、途中乗車施策の効果を定量的に分析できることを示した。その結果、徒歩避難が困難な地区に十分な運転者・自動車が存在しない場合には、途中乗車が津波遭遇リスクを減らすための有効な施策となることを確認した。

**Key Words:** tsunami evacuation, on-route car riding, tsunami encounter risk, optimization,

## 1. はじめに

「交通の方法に関する教則」<sup>1)</sup>により、津波からの避難方法は原則徒歩と定められていたが、東日本大震災以降、徒歩による水平避難が困難な避難者の存在が明らかになった。これを受けて教則が改定され、やむを得ない場合に限り自動車による避難が認可された。徒歩での水平避難が困難な例としては、地震発生時に平坦な沿岸部において、津波の難を逃れられるような構造物や高台まで徒歩でたどり着けない場合や、高齢者や要介護者、または地震による負傷者で自力での移動が困難である場合などがあげられる。これらのケースでは、避難者が自ら自動車を運転できない状況にある可能性がある。特に、高齢化が進む集落では運転可能な壮年者が他の地域で仕事を持ち、日中はその集落に滞在していなかったり、十分な車両台数が集落内になかったりする可能性がある。これらの場合、日中の滞在者の全員が車両で避難開始することはできないため、他の地域から運転者が車両を移動させ、途中で乗車させることを含めて途中乗車について検討を行っておくことが望ましい。

もちろん、東日本大震災では安全な場所から、海岸に近い地域に取り残された人々を迎えに行ったことによって命を落とした人が少なくない。そのため、このような

途中乗車に頼らない「津波てんでんこ」のような避難の在り方を追求するべきであるという意見も強い。しかし、運転者のリスクへの悪影響に比べて途中乗車のリスク軽減効果ははるかに大きい可能性もあり、これまで実際にも確認されている途中乗車が発生しないことを前提に議論を進めることは好ましくないと考えられる。そのため、途中乗車を明示的に考慮し、それに伴うリスクの変化を評価する必要があると考えられる。

本研究の目的は、途中乗車の効果を定量的に確認するための方法を提案することにある。先行研究で構築した津波遭遇リスク最小化モデルを運転者、歩行者、同乗者の3モードに拡張し、歩行者から同乗者へのモード遷移である途中乗車が可能なモデルを提案する。モデルを用いた分析の結果、徒歩困難地区に十分な運転者・自動車が存在しない場合、途中乗車が有効な施策となりうる一方で、運転者のリスク増加を伴うことを確認した。

## 2. 既往研究と本研究の要件

国土交通省は 2011 年に、青森県から千葉県沿岸の市町村における聞き取り調査<sup>2)</sup>によって避難行動の実態を調査している。その中で、地震直後に発生した移動

( $N=2210$ ) のうち 37%は直接避難を行わず家族や知人の探索や被害状況の確認を目的に移動していることが報告されている。また、同調査により回答者( $N=10603$ )のうち 64%に当たる 6750 人が自動車による避難を行っており、その理由の中に「家族に避難困難者がいた」(15%)や、「安全な場所まで遠くて、車でないといけない」(24%)という必要に迫られたケースのほかに、「家族を探したり迎えに行こうと思った」(11%)という理由もあり、津波避難の過程で実際にも運転者以外の避難者を乗車させるための交通が発生していたことがわかる。

鳩山ら<sup>3)</sup>は、東日本大震災の避難状況から、徒歩避難を原則とするルールに疑義を呈し、徒歩避難速度を用いて自動車避難が必要な地域を峻別したうえで、その地域で全員が自動車に同乗できない場合は津波避難タワーを建てる必要があることを指摘している。しかし、自動車を送り込むことによって徒歩避難できない住民の避難を支援する可能性については考えられていない。また、後藤<sup>4)</sup>は、国土交通省による東日本大震災後の聞き取り調査データを基に住宅が全壊した住民の避難途中の帰宅行動及び立ち寄り行動による影響を分析している。後藤らは避難時の立ち寄り行動が危険であると結論付けているが、取り残される人の命を救うため、やむを得ず途中乗車をさせる可能性は考慮されていない。

以上のように、途中乗車は実際の現象として認識されているにもかかわらず、途中乗車が発生しないことを前提に研究が行われてきたため、その効果は評価されてこなかった。本研究では途中乗車による効果が最大でどの程度になるかを調べるため、最適化手法を用いて途中乗車の効果分析を行う。先行研究<sup>5)</sup>で開発した津波遭遇リスク最小化モデルを運転者、歩行者、同乗者の三つのモードに拡張するとともに、歩行者と同乗者の間のモードの遷移を可能とすることで途中乗車を考慮した拡張型の最適津波避難モデルを構築し、これを用いて途中乗車の効果を分析する。

### 3. 拡張型最適津波避難モデルの構築

#### (1) 集合と変数の定義

モデルのネットワークは、セルの集合 $A$ と、ノードの集合 $N$ によって構成される。セルの集合 $A$ は、起点セルの集合 $A_0$ 、避難場所セルの集合 $A_D$ 、および道路上セルの集合 $A_R$ からなる ( $A = A_0 \cup A_D \cup A_R$ )。単位時間を3分間に設定し、3分おきに各セルの状態が更新されるものとする。最終時刻を $T$ と設定し、時刻 $t$ から時刻 $t+1$ までの時間を期 $t$ と呼ぶ ( $t = 0, \dots, T$ )。

変数の定義は以下のとおりである。期 $t$ にセル $a$ に流入、流出する自動車台数を $u_t^a$ 、 $v_t^a$ とし、期 $t$ の間セル $a$

を流出せず、時刻 $t+1$ までセル $a$ に滞留する自動車台数を $p_t^a$ とする。同様に、期 $t$ のセル $a$ の流入、流出、滞留する歩行者人数を $\bar{u}_t^a$ 、 $\bar{v}_t^a$ 、 $\bar{p}_t^a$ 、同乗者人数を $\overline{u}_t^a$ 、 $\overline{v}_t^a$ 、 $\overline{p}_t^a$ とする。

#### (2) モデルの定式化

本研究では、地域住民の人命の保護を第一に考え、最も安全な避難方法を検討する。したがって、目的関数は式(1)によって定義された地域住民全員の津波遭遇総リスクとし、これを最小化する。

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

$R_t^a$ は期 $t$ におけるセル $a$ の津波遭遇率であり、外生的に与える。 $(p_t^a + v_t^a)$ 、 $(\bar{p}_t^a + \bar{v}_t^a)$ 、 $(\overline{p}_t^a + \overline{v}_t^a)$ はそれぞれ期 $t$ にセル $a$ に存在する運転者、歩行者、同乗者人数で、 $\{\cdot\}$ は期 $t$ にセル $a$ に存在する全避難者人数である。これに津波遭遇率を乗じ、全セル・全時刻について総和をとったものが津波遭遇総リスクである。

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

$$\frac{p_t^a + u_t^a}{\bar{p}_t^a + \bar{u}_t^a + \overline{p}_t^a + \overline{u}_t^a} = \frac{p_{t+1}^a + v_{t+1}^a}{\bar{p}_{t+1}^a + \bar{v}_{t+1}^a + \overline{p}_{t+1}^a + \overline{v}_{t+1}^a} \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (2-b)$$

式(2-a)はセル内での自動車の交通量保存則である。式(2-b)は歩行者と同乗者の交通量保存則であり、歩行者と同乗者の間のモード遷移を可能とするため、歩行者と同乗者を合わせた保存則を設定する。なお、この制約を歩行者と同乗者に分けることで、途中乗車なしの場合の計算ができ、途中乗車の有無による比較が可能である。

$$\sum_{a \in O(i)} u_t^a = \sum_{a \in I(i)} v_t^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall i \in N \quad (3-a)$$

$$\sum_{a \in O(i)} \bar{u}_t^a = \sum_{a \in I(i)} \bar{v}_t^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall i \in N \quad (3-b)$$

$$\sum_{a \in O(i)} \overline{u}_t^a = \sum_{a \in I(i)} \overline{v}_t^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall i \in N \quad (3-c)$$

式(3)はノードに接続するセル間の交通量保存則である。 $O(i)$ 、 $I(i)$ 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。

$$\bar{u}_t^a \leq u_t^a(\theta - 1) \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (4-a)$$

$$\bar{v}_t^a \leq v_t^a(\theta - 1) \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (4-b)$$

$$\overline{p}_t^a \leq p_t^a(\theta - 1) \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A_R \quad (4-c)$$

式(4)は同乗者数の上限に関する制約である。θは車両1台あたりの最大乗車人数であり、同乗者はθを上回ることができない。

$$u_t^a \leq C^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (5-a)$$

$$\widetilde{u}_t^a \leq \widetilde{C}^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (5-b)$$

式(5)はセルへの流入制約である。C<sup>a</sup>,  $\widetilde{C}^a$ はそれぞれ自動車、歩行者の単位時間あたりのフロー容量である。

$$e_1 \cdot u_t^a + \widetilde{u}_t^a \leq \phi^a \{H^a - [e_1(p_t^a + v_t^a) + (\widetilde{p}_t^a + \widetilde{v}_t^a)]\} \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A_R \quad (6)$$

式(6)はセルの収容容量による流入制約である。この制約は、セルに流入できる交通量が、収容容量H<sup>a</sup>のうちの空いている容量に比例することを表している。e<sub>1</sub>は歩行者と自動車の占有空間の比を表し、比例定数φ<sup>a</sup>は渋滞流と自由流の密度波速度の比である。

$$v_t^a + e_2(\widetilde{p}_t^a + \widetilde{v}_t^a) \leq C^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A_R \quad (7)$$

式(7)はセルからの流出制約で、セル内に存在する歩行者人数が増加することにより、自動車の速度が低下して流量が減少することを表している。e<sub>2</sub>は流量低下の係数である。

$$\widetilde{v}_t^a = 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, \epsilon^a\}, \forall a \in A_R \quad (8-a)$$

$$\widetilde{p}_t^a \geq \sum_{s=1}^{\epsilon^a} \widetilde{u}_{t-s}^a \quad \forall t \in \{\epsilon^a + 1, \dots, T\}, \forall a \in A_R \quad (8-b)$$

式(8)は歩行者のセル通過所要時間による制約である。ε<sup>a</sup>は歩行者がセルaを通過する際の最小所要時間である。歩行者は少なくとも流入してから期ε<sup>a</sup>が経過するまではセルaから流出できず、滞留すると考える。式(8-a)はt = ε<sup>a</sup>期までの制約を、式(8-b)がt = ε<sup>a</sup> + 1期以降の制約を表している。

$$v_t^a = 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, \tau\}, \forall a \in A \quad (9-a)$$

$$\widetilde{p}_t^a \geq \sum_{s=1}^{\tau} \{(p_{t-s}^a + u_{t-s}^a) - (p_{t-s+1}^a + v_{t-s+1}^a)\} \quad \forall t \in \{\tau + 1, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (9-b)$$

式(9)はモード遷移にかかる時間に関する制約である。車両に乗車する際にτ期の時間を要することを示している。初期時点での乗車にτ期を要すると考え、式(9-a)によりτ期まで避難開始しないよう制限している。式(9-b)は歩行者が同乗者に遷移する途中乗車において、τ期後まではセルを流出できず、同乗者として滞留することを示している。

$$(\widetilde{p}_t^a + \widetilde{u}_t^a) \geq (p_{t+1}^a + v_{t+1}^a) \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (10)$$

$$\widetilde{v}_t^a, \widetilde{v}_t^a = 0 \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall a \in A_D \quad (11)$$

本モデルでは歩行者と同乗者の間でモードの遷移が可能であるが、避難途中の道路セルで自動車から降りて徒歩で避難することは考えにくいため、式(10)のように避難途中で歩行者が増加しないという制約を設ける。また、同乗者と歩行者は避難場所セルから流出できないことを、式(11)により規定している。これにより、一度避難場所セルに流入した歩行者と同乗者は最終期Tまでそのセルに滞留することになる。なお、運転者に対してはこの制約は設けていないため、運転者は避難場所セルから流出可能であり、途中乗車させるために再び歩行者のいる道路上セルに向かうことができる。

$$p_0^a + \widetilde{p}_0^a + \widetilde{p}_0^a = D^a \quad \forall a \in A_O \quad (12)$$

式(12)は初期時点で起点セルの避難者がいずれかのモードに振り分けられることを意味している。D<sup>a</sup>は起点セルaの避難者人数である。

$$u_0^a, \widetilde{u}_0^a, v_0^a, \widetilde{v}_0^a, \widetilde{v}_0^a = 0 \quad \forall a \in A_O \quad (13)$$

式(13)は、すべてのフローはt=1以降に動き出すことを意味している。

$$p_0^a \leq \xi^a \cdot D^a \quad \forall a \in A_O \quad (14)$$

式(14)は運転者数の制約である。ξ<sup>a</sup>はセルaで自動車を保有する運転可能な人の割合である。

$$\sum_{t=0}^T (v_t^a - \widetilde{u}_t^a) \geq \eta^a \cdot D^a \quad \forall a \in A_O \quad (15)$$

式(15)は、高齢者や怪我人など徒歩避難が不可能な人が起点セルを同乗者として流出することを示している。η<sup>a</sup>は徒歩避難が不可能な人の割合である。

$$u_t^a, \widetilde{u}_t^a, v_t^a, \widetilde{v}_t^a, p_t^a, \widetilde{p}_t^a, \widetilde{p}_t^a \geq 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (16)$$

式(16)は内生変数の非負制約である。

以上、式(1)を目的関数、式(2)~(16)を制約条件と設定した拡張型最適津波避難モデルを提案する。式(1)~(16)はすべて操作変数の線形関数であるため、本モデルは線形計画問題となっており、解の一意性、大域性が保証される。本研究では、数値最適化ソルバーGurobi Optimizer 7.1のパッケージを利用し、Windows 10 PC上で計算を行った。

## 4. 適用ネットワークの設定

### (1) 対象とする道路ネットワーク

本章では、構築したモデルの実市町村規模ネットワークへの適用可能性を示す。図-1のような、宮城県亶理郡亶理町の道路網を基にしたネットワークを用いる。亶理町津波避難計画<sup>7)</sup>に基づき、町内の2車線道路を避難可能道路として最適化計算を行う。図-1で各モードは左側車線を通行するものとする。道路ネットワークの主な設定値は先行研究<sup>9)</sup>のとおりである。ただし、避難場所セルについては、津波浸水想定区域の外側にある逢隈小学校、亶理小学校、亶理中学校、吉田小学校の4か所の避難所に加え、津波から避難するのに十分な標高が期待できる内陸側で町外（角田市）につながる道路の町境の峠部の2か所、合計6か所に設定した。

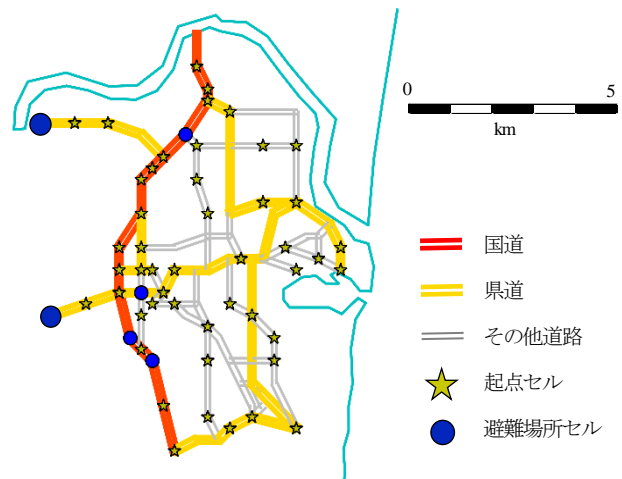


図-1 対象とするネットワーク

### (2) パラメータの設定

#### a) 要援護者率 $\eta^a$

高齢者や乳幼児など単独では避難が困難な人の割合として、以下の計算では全域で一様に $\eta^a = 0.1$ と設定する。

#### b) 運転可能率 $\xi^a$

地震発生時に自動車免許を保有しており、且つ自分で運転できる自動車がある人の割合として、以下では $0.1 \leq \xi^a \leq 1$ の範囲で設定する。

#### c) 最大乗車人数 $\theta$

車両の最大乗車人数を $\theta$ として、以下では $2 \leq \theta \leq 4$ の範囲で設定する。

#### d) 乗り込み時間 $\tau$

最初の乗車と途中乗車のための時間として $\tau$ 期間、つまり $\tau \cdot 3$ 分間を要すると考える。以下では一様に $\tau = 1$ として設定する。

表-1 総リスク値に対するパラメータの影響—1

途中乗車無	$\theta=2.0$	3.0	4.0	途中乗車有	$\theta=2.0$	3	4
$\xi=0.2$	43126	30341	21341	$\xi=0.2$	40934	26214	18146
0.4	37302	24336	17794	0.4	35971	23910	17488
0.6	35852	24336	17794	0.6	35610	23906	17486
0.8	35852	24336	17794	0.8	35610	23906	17486
1.0	35852	24336	17794	1	35610	23906	17486

表-2 総リスク値に対するパラメータの影響—2

途中乗車無	$\theta=2.0$	2.5	3.0	3.5	4.0
$\xi=0.1$	50102	45404	41168	37301	33815
0.2	43126	36102	30341	25556	21341
0.3	39313	31639	25533	20658	17794
0.4	37302	29089	24336	20658	17794
0.5	35852	29089	24336	20658	17794
途中乗車有	$\theta=2.0$	2.5	3.0	3.5	4.0
$\xi=0.1$	49492	41589	33950	28055	23680
0.2	40934	32691	26214	21601	18146
0.3	37127	29303	24070	20295	17493
0.4	35971	28784	23910	20295	17493
0.5	35621	28784	23910	20295	17493
有/無	$\theta=2.0$	2.5	3.0	3.5	4.0
$\xi=0.1$	0.99	0.92	0.82	0.75	0.70
0.2	0.95	0.91	0.86	0.85	0.85
0.3	0.94	0.93	0.94	0.98	0.98
0.4	0.96	0.99	0.98	0.98	0.98
0.5	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98

合であることが確認できる。

## 5. 途中乗車の効果分析

### (1) 途中乗車が影響する条件

まず、途中乗車の有無の両パターンについて、最大乗車人数 $\theta$ と運転可能率 $\xi^a$ をそれぞれ変化させて計算した時の総リスク値を表-1に示す。途中乗車の有無にかかわらず、 $\theta$ と $\xi^a$ が大きいほど、つまり初期時点で自動車に乗車できる人が多いほど、総リスクの値は小さくなる。ただし、灰色で塗られた両者の積が1を超えるケースでは、初期時点で全員を乗車させるための運転者及び車両が確保できるため、 $\xi^a$ を変化させても総リスクの値はほぼ一定となる。このとき、途中乗車の有無による総リスク値の変化率は1~2%と僅かであり、途中乗車の影響はほとんどない。つまり、途中乗車の効果が発揮されるのは、出発地点に十分な運転者や自動車が存在しない場

### (2) 途中乗車の有無による総リスクの変化

表-1の中で途中乗車の効果がみられた条件の下で、途中乗車による具体的な影響を分析するため、 $\xi^a \leq 0.5$ の範囲でさらに細かくパラメータを設定した計算結果を表-2に示す。表-2より、 $\theta$ と $\xi^a$ の積が1以下の場合では、途中乗車によって総リスク値を99~70%に低下させることができる。 $\theta$ が大きく、 $\xi^a$ が小さいほど効果は大きくなるが、これは、自ら運転できない徒歩避難者を運転者

のリスクの増加により輸送できるようになるためであると考えられる。ただし、 $\theta = 2.0$ の条件下では、途中乗車による総リスクの減少幅が小さい。これは、自動車のキャパシティが小さい場合、同乗により減少する歩行者のリスクよりも運転者のリスクの増加が大きいため、途中乗車の効果が小さいためであると考えられる。

途中乗車の効果がみられた $\xi^a = 0.2, \theta = 3.0$ という設定値において、途中乗車を認めない条件を case1, 途中乗車を認める条件を case2 と呼ぶ。それぞれのケースにおける各セルの方向別モード別の累積通過人数を図-2, 図-3 に示す。2つの図を見ると、どのモードも避難場所セルがある内陸側へ向かう交通量が多いが、case2 の運

転者の図では沿岸側へ向かう交通量が発生している。これは沿岸部の徒歩避難者を輸送するために生じた交通であると考えられる。また、case2 の沿岸部の徒歩避難者数は case1 と比べて少ない。case1 の内陸へ向かう歩行者の交通量が連続しているのに対し、case2 で一部の歩行者の交通量が途絶えている理由は、そのセルで途中乗車が生起しているためである。case2 の同乗者については、西向きセルで運転者の図とほぼ同一の色分けとなっており、これは内陸へ向かうときには最大乗車人数に近い人数が同乗していることを示している。一方で、沿岸へ向かう同乗者の交通量はなく、空車であることがわかる。

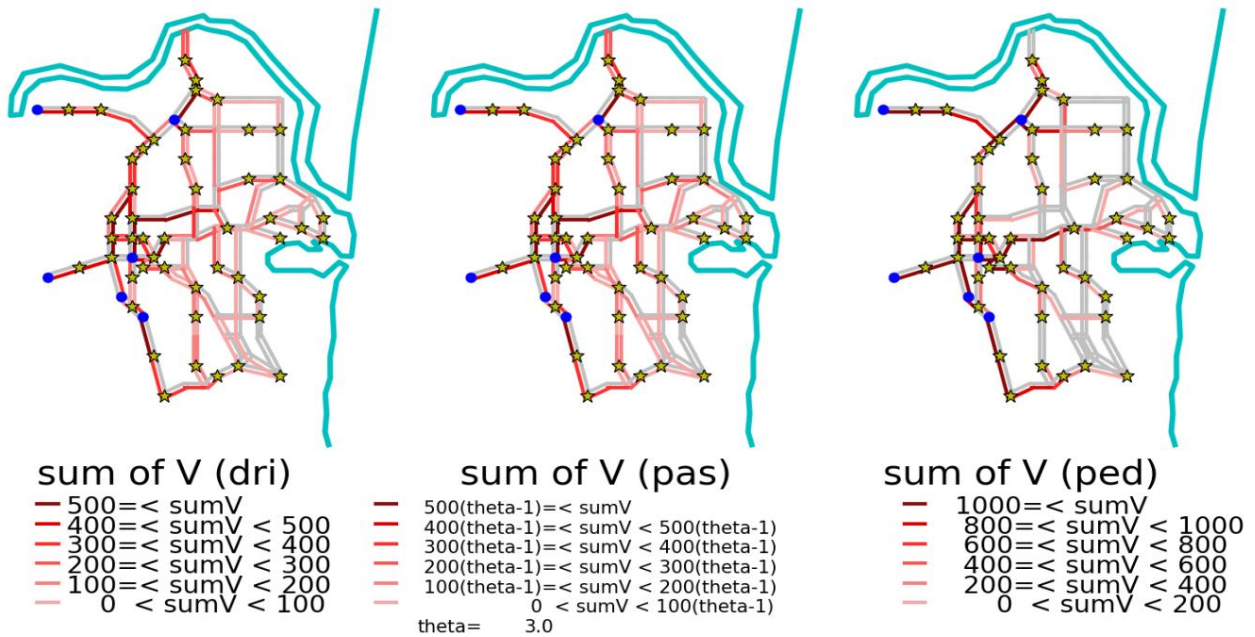


図-2 各セルの累積通過人数(case1) (左から運転者・同乗者・歩行者)

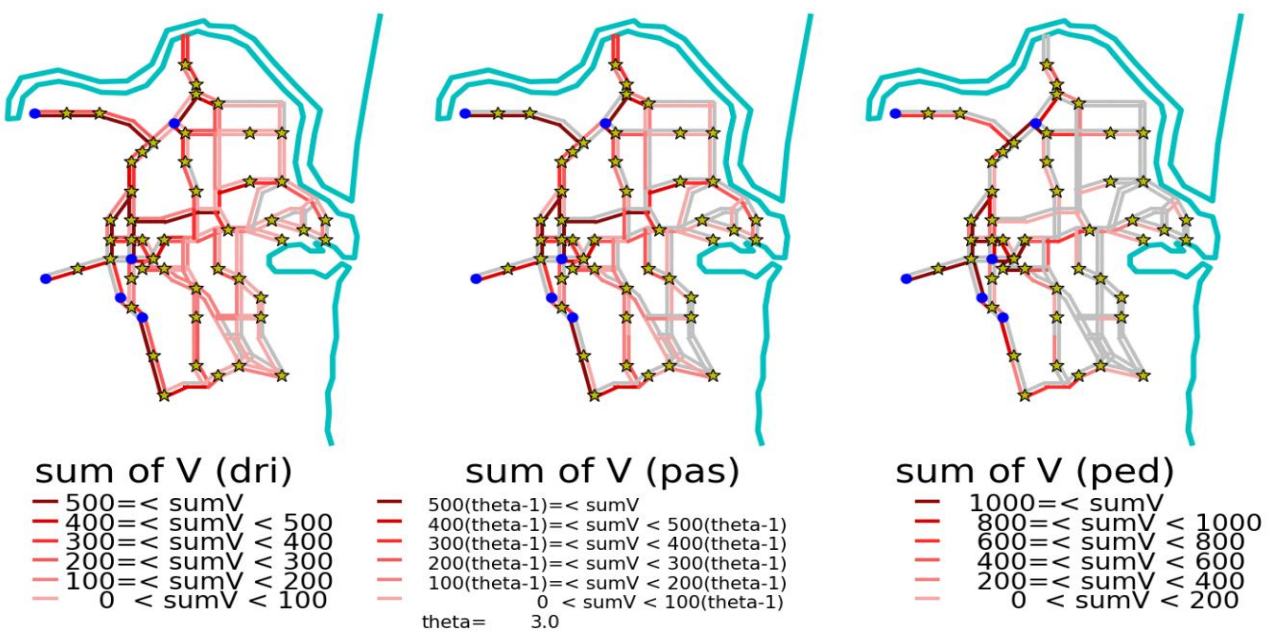


図-3 各セルの累積通過人数(case2) (左から運転者・同乗者・歩行者)

### (3) 途中乗車の発生箇所

途中乗車が生起する状況を知るために、case2 の各道路セルの累積途中乗車人数を図-4に、途中乗車人数とその重心位置の経時変化を図-5に示す。なお、重心は途中乗車の生起セルの座標と途中乗車人数の積の総和を、期tの総途中乗車人数で除して求めることができる。

図-4より途中乗車はネットワーク上の広範囲で生起しており、大半は避難場所セルへ向かう経路上にあることが読み取れる。図-5の左縦軸は途中乗車人数を示し、左縦軸のx軸は原点が内陸側にあり、xが大きいくほど海に近いことを意味している。図-5より、途中乗車の生起はt=5期から始まり、t=6~11期でピークを迎え、その後、変動しながらも次第に減少していることがわかる。また、重心の座標を見ると、途中乗車の生起箇所ははじめ沿岸側に集まり、次第に内陸部へと移っている。これより、避難場所からの距離が遠い沿岸や南東部の避難者から先に途中乗車させ、内陸へ輸送することがリスクを低下させる効果的な方法であることが確認できる。

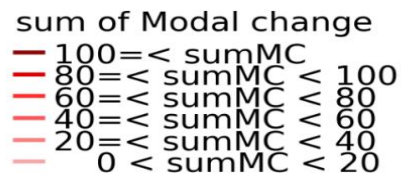


図-4 各セルにおける累積途中乗車人数(case2)

### (4) 運転者と非運転者のリスク

(2)節で示したように、途中乗車を認めれば総リスクは減少するが、運転者のリスクが増大する可能性がある。case1 と case2 のリスク値と一人当たりリスク値を表-3に示す。なお、case2 では歩行者と同乗者の一人当たりリスクは途中乗車によって変動するため、両者を合わせて計算した非運転者一人当たりの平均値を示す。表-3より、途中乗車によって運転者のリスクが 1341 増加しているのに対し、非運転者のリスクが 5468 減少していることがわかる。即ち、運転者と車両が十分存在しない条件下では、途中乗車によって運転者のリスクの増加値の4倍超の非運転者のリスクを減少させることができる可能性があることがわかる。

次に、一人当たりのリスクを比較する。case1 では一人当たりリスクは運転者と同乗者が等しく 0.61、歩行者は 1.16 であり、同乗者と歩行者の平均値は 0.95 である。自動車を運転できない人の中で最初に自動車に同乗できるか否かにより、リスクが倍近くになっている。一方 case2 では、運転者の一人当たりリスクが 0.80、歩行者と同乗者の平均リスク（非運転者一人当たりリスク）が 0.76 となっており、運転者のリスクが約 131%に増加していることと引き換えに、非運転者のリスクは 81%に減少している。このケースでは、運転者の一人当たりリスクは非運転者より大きくなり、途中乗車の導入によってリスクの大小関係が変化している。

以上より、自動車や運転者が十分存在しない条件下においては、途中乗車施策は総リスクを大きく低下させる可能性がある。その一方で、運転者のリスク増加を伴うという問題が残ることに留意する必要がある。

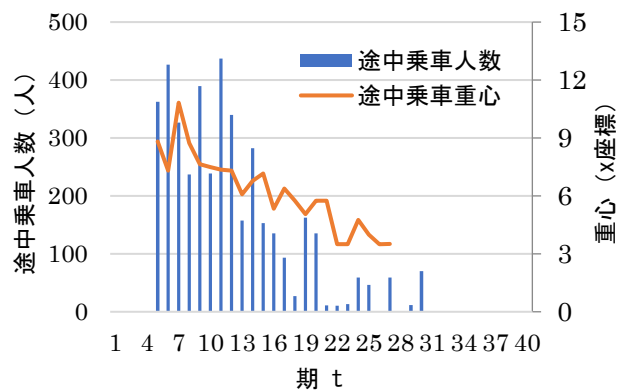


図-5 途中乗車人数とその重心位置の経時変化(case2)

表-3 途中乗車の有無によるリスク値の変化 (括弧は一人当たりリスク)

リスク値 (一人当たり)	case1	case2	変化量 case2-case1	変化率 case2/case1
運転者	3411(0.61)	4752(0.80)	1341(0.19)	1.31
同乗者	6821(0.61)	6599(----)	-222(----)	0.97
歩行者	20109(1.16)	14863(----)	-5246(----)	0.74
非運転者	26930(0.95)	21462(0.76)	-5468(-0.18)	0.80
総リスク	30341(0.89)	26214(0.77)	-4127(-0.12)	0.86

## 6. むすびに

本研究では、避難時に実際に起きており、今後も発生する可能性がある途中乗車について、これまで研究や政策の検討時には考慮されてこなかったことを指摘し、徒歩避難困難地区に十分な車両や自動車が存在しない場合

に途中乗車を考慮する必要性があることを述べた。そして、津波遭遇総リスクの最小化を目的関数とし、モードの遷移を可能とすることにより途中乗車が考慮可能な拡張型の最適津波避難モデルを構築した。

提案したモデルを自治体規模の仮想ネットワークに適用し、途中乗車による交通特性の変化や総リスク及び各モードの一人当たりリスクの変化を確認した。その結果、途中乗車の考慮により、総リスクを低減できる一方で、運転者のリスク増加を伴うことを示した。

本研究で用いたモデルでは、途中乗車の考慮が行うことが可能となり、途中乗車に要する時間や要援護者の割合を設定することにより各状況の最適な避難方法を検討する助けとなりうる。特に今後は、要援護者が多い状況で途中乗車による効果が発揮されることを踏まえ、異なる要援護者割合に対して分析を行うことが必要である。さらに、運転者のリスク増加を防ぐ方策について検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 警察庁：交通の方法に関する教則（平成 26 年 9 月 1 日）,

<https://www.npa.go.jp/koutsuu/kikaku/kyousoku/index.htm>（参照 2018-04-26）

- 2) 国土交通省都市局街路交通施設課：津波避難を想定した避難路 避難施設の配置 及び避難誘導について（第 3 版）, <http://www.mlit.go.jp/common/000233464.pdf>（参照 2018-04-26）
- 3) 鳩山紀一郎, 平松大輝：自動車を利用した津波避難方針設計手法に関する基礎的検討, 交通工学論文集, 特集号, 1 巻, 2 号, 2015.
- 4) 後藤洋三：東日本大震災津波避難における帰宅行動と立ち寄り行動の影響, 日本地震工学会論文集, 16 巻, 10 号, 2016.
- 5) 片岡侑美子, 奥村誠, 金進英：津波遭遇リスクを最小化する自動車避難最適化モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol.53, 2016.
- 6) 竹居広樹, 奥村誠：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, 土木計画学会研究・講演集, vol. 55, CD-ROM, 2017.
- 7) 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 2018-04-26）

(2018.4.27 受付)

## EFFECT OF ON-ROUTE CAR RIDING IN TSUNAMI EVACUATION

Kota TSUMEBAYASHI, Hiroki TAKEI and Makoto OKUMURA

Many people evacuated by car in the Great East Japan Earthquake, and encountered tsunami during a traffic jam. On the other hand, existence of the district which is difficult to evacuate on foot was confirmed. In this study, we expanded the evacuation model minimizing the tsunami encounter risk developed in a previous study by considering 3 types of travel mode: driver, passenger and pedestrian. The model permits the transition from pedestrian to passenger, that is called as on-route car riding and extra movement of cars to the district with risk of tsunami inundation, from inland area. We applied the expanded model to the virtual municipality network and analyzed the effect of on-route car riding. As a result of the analysis, on-route car riding is proved to have large effect for risk reduction, when drivers or vehicles are not sufficient for affected residents in the tsunami-prone coastal districts.