

津波避難におけるコントラフロー適用区間の一考察 Configuration of Contraflow Section in Tsunami Evacuation

竹居 広樹¹, 奥村 誠², 爪林 康太³

Hiroki TAKEI¹, Makoto OKUMURA² and Kota TSUMEBAYASHI³

津波などの自動車避難では、短時間に大量の交通需要が発生するため、一方通行として容量拡大を図るコントラフロー施策が有効であるという意見がある。しかし実際に避難方向と逆方向の交通が観測されており、その必要性が一律に否定できないことを考えると、コントラフロー区間は、効果が確実に得られる区間を最小限指定することが望ましい。筆者らは、自ら運転ができない避難者の途中乗車を考慮できる津波避難モデルを開発した。本研究ではこのモデルにコントラフロー区間の最適化を組み込み、市町村レベルの仮想ネットワークに適用した。分析の結果、自ら運転できる避難者の割合が小さい場合、途中乗車に先立つ逆向き交通を流すために、コントラフロー適用区間が限定されることがわかった。その一方で、パラメータの変動によらず常にコントラフロー化すべき区間が存在することが確認できた。

Keywords: 津波避難, コントラフロー, 途中乗車, 運転可能率, 容量拡大率

1. はじめに

コントラフローとは、双方向通行可能な道路を一方通行化させる施策である。特定の方向の交通容量を拡大できることから、危険な場所から安全な場所へ速やかに避難しなければならない災害時に有効であるとされ、2005年のハリケーン・カトリーナ災害の米国での避難において、コントラフローの効果が確認された¹⁾と報告されている¹⁾。日本国内では、東日本大震災を機に津波避難時の自動車利用が容認された²⁾段階で、未だ適用例は存在しないものの、大規模な施設整備なしに導入できる施策として期待されており、今後の検討が進むと思われる。

災害発生時には海岸部の状況確認、避難の呼びかけや避難困難者の支援などの目的で、主たる避難方向と逆方向の交通が発生しており、それらの中には必要性が否定できないものも含まれるため、一律に全道路をコントラフロー化することは問題が大きい。効果が十分に見込める最小限の区間に絞って実施することが必要であろう。また、災害時の実施事例が少なく、逆方向の走行を想定していない構造の道路をコントラフロー化することの容量拡大効果の大きさも不確実である点に留意が必要である。

筆者らは、自ら運転ができない避難者の津波遭遇リスクを減少させる上で、避難所で同乗者を降ろした自動車を再び海岸方向に移動させ、徒歩避難者を途中で乗車させる「途中乗車」が有効であると考え、運転者、同乗者、歩行者の3モードの交通を最適化する津波避難モデルを開発した³⁾。本研究では、この3モード最適津波避難モ

デルにコントラフロー区間の最適化を組み込み、仮想ネットワークに適用した。分析の結果、コントラフロー区間は途中乗車パターンの影響を受け、自ら運転できる避難者の割合（運転可能率）が小さい場合、途中乗車の重要性が大きく、途中乗車に先立つ逆向きの交通を流すためにコントラフロー適用区間は限定されることがわかった。また、パラメータの変動によらず常にコントラフロー化すべき区間も存在することが確認できた。

2. コントラフローに関する既往研究と本研究の要件

日本において、避難時のコントラフロー施策の効果を量的に確認した研究として、中川ら⁴⁾、安藤ら⁵⁾がある。中川らは、対象地区内の幹線道路をコントラフロー化する施策を提案し、総避難時間の減少、早期避難完了人数の増加などの効果が得られることを示した。安藤らは、津波最適避難モデルの計算結果に基づく自動車の遅れの大きさに基づいてコントラフロー区間を設定し、コントラフロー施策が避難完了時間の縮減に大きく寄与することを示した。

これらの研究では逆方向の交通を考慮していないが、これまでの調査⁶⁾や研究⁷⁾でも、送迎交通や立ち寄り行動などの逆方向の交通の存在が報告されている。特に、自ら運転できない避難者が多い場合、途中乗車の必要性が高まり、逆方向の交通を禁止することは大きな問題を生む危険性がある。途中乗車を考慮すれば、コントラフローが適用できる区間は限定されると考えられる。

さらに、これらの研究ではコントラフロー施策により

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, S502W

3 非会員, 学士 (工学), 鹿島建設株式会社

e-mail: mokmr@m.tohoku.ac.jp Phone: 022-752-2161

順方向の交通容量が2倍になると仮定しているが、逆方向の走行を想定していない構造の道路では容量拡大が小さいことも考えられる。その場合でもコントラフロー化が有効であるかは不明である。

本研究では、筆者らの、運転者、同乗者、歩行者の3モード津波遭遇リスク最小化モデル³⁾を基本モデルとして、さらにコントラフロー適用区間を指定する0-1変数を付け加えた拡張型の最適化モデルを構築する。この時、コントラフロー施策による容量拡大率をパラメータとして与え、値を変化させて計算を行う。さらに、途中乗車の必要性を左右する運転可能率のパラメータを変動させて、コントラフロー化すべき区間の数や位置に対する影響を確認する。このように日本での適用例がなく、容量拡大効果が不透明な状況であるため、パラメータ値の変動による道路の利用形態の比較を行うことができるモデルを提案する。

3. コントラフロー内生化モデルの構築

筆者らは、自動車と歩行者の2モードを考慮したセルベース津波避難モデル⁸⁾に同乗者を加えた3モードとすることにより、途中乗車を含む最適な津波避難交通を算出するモデル³⁾を作成した。本研究はこのモデルを基本モデルとして、さらにコントラフロー区間を指定する0-1変数を付け加える。以下ではまず、基本モデルを概説し、本研究での拡張について述べる。

3.1 基本モデルにおける集合と変数の定義

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 、および道路区間セルの集合 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 に滞留する運転者人数を 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 \tilde{u}_t^a 、 \tilde{v}_t^a 、 \tilde{p}_t^a 、同乗者人数を \bar{u}_t^a 、 \bar{v}_t^a 、 \bar{p}_t^a とする。本モデルは歩行者から同乗者へのモード遷移(途中乗車)を可能とするが、運転者はモード遷移をしないため、運転者人数=自動車数と扱うことができる。

3.2 基本モデルの定式化

基本モデルの目的関数は式(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。

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

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。 $(p_t^a + v_t^a)$ 、 $(\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a)$ 、 $(\bar{p}_t^a + \bar{v}_t^a)$ 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。

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

$$\tilde{p}_t^a + \tilde{u}_t^a + \bar{p}_t^a + \bar{u}_t^a = \tilde{p}_{t+1}^a + \tilde{v}_{t+1}^a + \bar{p}_{t+1}^a + \bar{v}_{t+1}^a \quad (2-b)$$

$$\forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A$$

式(2)~(3)は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。

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

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

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

式(3)はノードにおける交通量保存則で、 $O(i)$ 、 $I(i)$ 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。

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

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

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

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る。

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

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

式(5)はセルへの流入制約である。 C^a 、 \bar{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。

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

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^a 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_1 は歩行者と自動車の占有空間の比を表し、比例定数 ϕ^a は渋滞流と自由流の密度波速度の比である。

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

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_2 は流量低下の係数である。

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

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

式(8)は歩行者のセル通過所要時間による制約である。 ϵ^a 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^a 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 $t = \epsilon^a$ 期までの制約を、式(8-b)が $t = \epsilon^a + 1$ 期以降の制約を表している。

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

$$\overline{p}_t^a \geq \sum_{s=1}^{\tau} \{(\overline{p}_{t-s}^a + \overline{u}_{t-s}^a) - (\overline{p}_{t-s+1}^a + \overline{v}_{t-s+1}^a)\} \\ \forall t \in \{\tau + 1, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (9-b)$$

式(9)は途中乗車の所要時間に関する制約である。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。

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

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

本モデルでは歩行者と同乗者の間でモードの遷移を認めるが、避難途中の道路セルで同乗者が自動車から降りて徒歩で避難することを認めない。式(10)は避難途中の道路セルで歩行者が増加しないという制約である。また、同乗者と歩行者は一旦到着した避難場所セルから流出しないことを式(11)により規定している。なお、運転者に対してはこの制約は設けていないため、運転者は同乗者を避難場所セルで降ろしたのち流出し、途中乗車に向けて再び歩行者のいる道路上セルに向かうことができる。

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

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^a は起点セル a の避難者人数である。

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

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^a はセル a で自ら運転できる人の割合のパラメータ（運転可能率）である。

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

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^a はセル a の要援護者率である。

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

式(16)は内生変数の非負制約である。

以上の基本モデルでは、式(1)～(16)はすべて操作変数の線形関数であるため、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。

3.3 コントラフロー区間の指定

続いて、コントラフロー区間を指定する binary 変数を付け加える。 δ^a をセル a のコントラフローを司る binary 変数とし、平常時はゼロの値をとる。 $b(a)$ はセル a の対向車線のセルを意味し、 $\delta^a = 0$ かつ $\delta^{b(a)} = 0$ では平常通り両方向の通行が可能であり、 $\delta^a = 1$ の時は通行が一方に制限され自動的に $\delta^{b(a)} = 0$ となる。ここで、コントラフロー区間のフロー容量の増加割合を示すパラメータ ω を考え、0 から 1 の間の数値を外生的に与える。コントラフロー化によりセルの自動車収容容量も ω に比例して拡大すると仮定する。すなわち、フロー容量及び収容容量は $1 + \omega$ 倍になる。また、歩行者はコントラフロー施策の影響を受けないと仮定する。以上のことを流入・流出に関する制約条件に反映すると、式(5-a)、式(6)、式(7)はそれぞれ、式(5-a)'、式(6)'、式(7)'となる。

$$u_t^a \leq \begin{cases} C^a(1 + \omega \cdot \delta^a) & \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A_R \\ C^a(1 - \delta^{b(a)}) & \end{cases} \quad (5-a)'$$

$$e_1 \cdot u_t^a + \overline{u}_t^a \leq \phi^a \{H^a(1 + \omega \cdot \delta^a) - [e_1(p_t^a + v_t^a) + (\overline{p}_t^a + \overline{v}_t^a)]\} \\ \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A_R \quad (6)'$$

$$v_t^a + e_2(\overline{p}_t^a + \overline{v}_t^a) \leq C^a(1 + \omega \cdot \delta^a) \\ \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A_R \quad (7)'$$

また、コントラフロー施策は対向するセルの両方に対して同時に実行することはできないことを、式(17)の追加により表現する。

$$\delta^a + \delta^{b(a)} \leq 1 \quad \forall a \in A_R \quad (17)$$

この拡張により、binary 変数が操作変数に追加された混合整数計画問題となる。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. 実規模仮想ネットワークにおける分析

4.1 対象とするネットワーク

以下では、図1のような、宮城県亶理郡亶理町の道路網を仮想したネットワークに最適化モデルを適用し、コントラフロー施策の適用区間を分析する。亶理町津波避難計画⁹⁾に基づき、町内の2車線道路を避難可能道路とし、先行研究⁸⁾と同様に道路ネットワークを設定する。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か所の避難所および、津波から避難するのに十分な標高が期待できる町境の峠部の2か所を加え、合計6か所に設定した。先行研究^{3,8)}と同様に、各道路セルにおける津波被災リスク値は、地震発生45分後($t=15$)を変曲点とするロジスティック曲線に従い、海岸からの距離に対するS字型の関数で与えた最終的なリスク値に漸

近していくものとして滑らかに変化させる。

途中乗車所要時間 τ は1とし、最大乗車人数 θ は4.0、要援護者率は0.1として計算を行った。この場合、運転可能率が0.025以上であれば、1回の乗車で全ての要援護者を乗車させることができ、途中乗車なしでも避難させることが可能である。

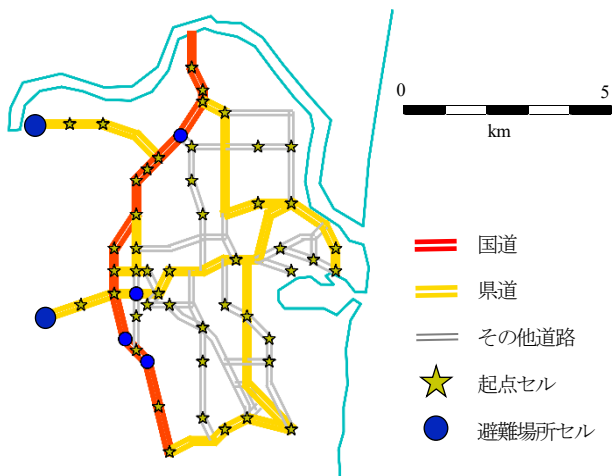


図1 対象とするネットワーク

4.2 コントラフロー施策の効果分析

(1) コントラフロー実施によるリスクの低減効果

まずコントラフロー施策の実施によるリスク低減効果を分析する。表1は、運転可能率 ξ が20%という条件のもとで、コントラフローを実施しないと、コントラフロー化による容量拡大率を3段階($\omega = 0.1, \omega = 0.5, \omega = 1.0$)設定してコントラフロー化を最適な区間で実施したときの、合計4ケースの総リスク値を比較したものである。これによると、容量拡大率が0.1と小さくても、適切なコントラフロー区間を設定することにより総リスク値を1割以上抑えられることがわかる。また、容量拡大率1.0すなわち片側1車線道路の2倍の容量拡大を仮定すると、コントラフロー化により総リスク値を55%まで抑えられることがわかった。

表1 コントラフロー施策によるリスク値の比較

運転可能率 $\xi=0.2$	総リスク値 (比)	区間数
コントラフローなし	18146 (1.00)	0
コントラフロー実施($\omega=0.1$)	16153 (0.89)	33
コントラフロー実施($\omega=0.5$)	11789 (0.65)	35
コントラフロー実施($\omega=1.0$)	9922 (0.55)	35

(2) 運転可能率の変化に伴うコントラフロー区間数

容量拡大率 ω を0.5に固定し、運転可能率 ξ を変化させた時のコントラフロー区間数と総リスク値を図2に示す。図2より、運転可能率が大きいほど総リスク値は減少し、コントラフローに設定される区間数は多くなるこ

とがわかる。運転可能率が40%以上のとき、コントラフロー区間数は54で一定となり、総リスク値も不変であることから、同一の区間の集合がコントラフローに設定されていることがわかる。このケースでは、運転可能率が40%未満の範囲において、運転可能率の違いがコントラフロー区間の設定に影響を与える可能性がある。

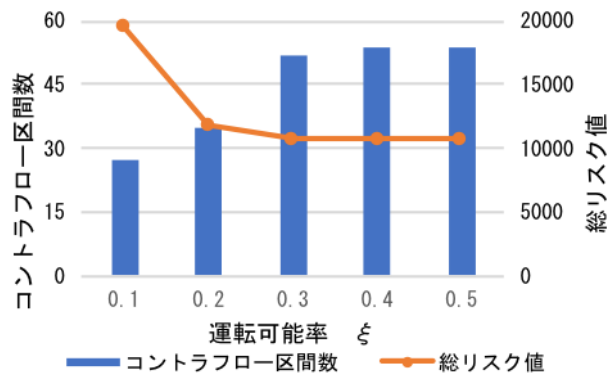
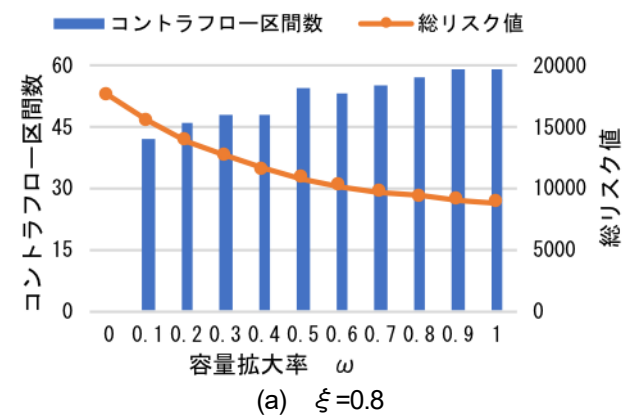


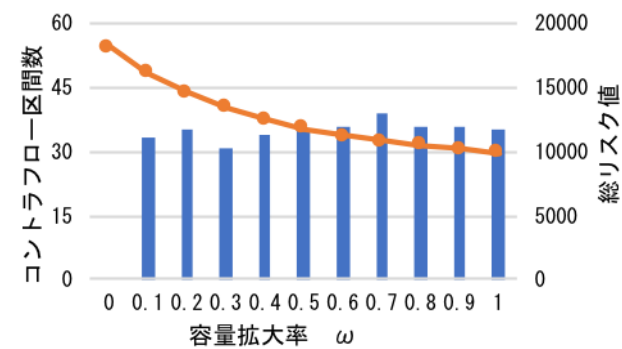
図2 運転可能率と区間数・総リスクの関係 ($\omega=0.5$)

(3) 容量拡大率の変化に伴うコントラフロー区間数

次に運転可能率を固定して、容量拡大率を表すパラメータ ω の値を変化させた場合のコントラフロー区間数と総リスクの値を図3に示す。運転可能率80%のとき、コントラフロー区間数は $\omega = 0$ ではゼロであるが、 $\omega = 0.1$ から42に急増し、その後も徐々に増加していく(図3(a))。



(a) $\xi=0.8$



(b) $\xi=0.2$

図3 容量拡大率と区間数・総リスクの関係

これは、 $\omega = 0$ において内陸に向かうセルの中に、一時的に最大フロー容量で車が流れ、その対向車線に交通が存在しないセルが存在することを意味している。その状況で、 ω が少しでも増加すればコントラフロー化することにより、多くのフローを流せるようになる。

なお、 ω の増加に伴い総リスク値は連続的に減少するが、その減少効果は逓減する。

運転可能率が 20%のときは、 $\omega = 0.1$ から区間数が急増するものの、その後は30 前後にとどまり、小幅な増減を繰り返す（図 3(b)）。容量拡大率の違いによらず、コントラフロー化すべき区間は安定している可能性がある。総リスク値は、 ω の増加に伴って連続的に減少するが、その効果は逓減している。なお、リスク値は運転可能率 80%のときよりも 1 割程度大きな値となっている。

4.3 施策の適用区間の確認

(1)パラメータの違いによる適用区間の变化

容量拡大率 ω と運転可能率 ξ の次の 4 通りのケースについて、適用区間の比較を行う。

- ・ケース 1 : $\omega = 0.1, \xi = 0.8$ の場合
- ・ケース 2 : $\omega = 0.5, \xi = 0.8$ の場合
- ・ケース 3 : $\omega = 0.1, \xi = 0.2$ の場合
- ・ケース 4 : $\omega = 0.5, \xi = 0.2$ の場合

各ケースの適用区間の位置と区間数、総リスク値を図 4 に示す。全ケースに共通する特徴として、避難場所に近い道路の多くがコントラフロー化されている。これらの道路は避難してきた自動車が集中するため、容量拡大の効果が大い区間であると考えられる。

運転可能率の高いケース 1、ケース 2 では、避難者は運転者や車両の制約なしに自動車を最大限使用することができ、自動車の流れを良くすることがリスクの低減につながるため、適用区間数は比較的多い。一方で、運転可能率の低いケース 3 では、適用区間数はケース 1 と比べて少ない。運転可能率が低いとき、沿岸地区の住民の多くは徒歩で起点セルを出発するが、避難距離が長いいため避難完了までに時間がかかる。これらの住民のリスクを減らすため、内陸部の地区から沿岸部へ自動車を移動し、途中乗車させるのが効果的である。そのために沿岸部への交通が生じる東西方向の道路にはコントラフローを適用しないという結果となる。

また、運転可能率の違いにより設定されるべきコントラフロー区間も大きく変わる。運転可能率が小さいケースでは避難方向と逆の方向に一方通行化されている区間も存在しており、コントラフロー区間を設定する上で運転可能率の把握は重要な要因であるといえる。

一方で、ケース 1 とケース 2、ケース 3 とケース 4 を比較すると、容量拡大率の差異により、リスク値には 1.4 倍程度の違いがあるものの、適用区間にさほど大きな差

はない。このことから、特定の道路区間は容量拡大率の大小にかかわらずコントラフロー化すべきであり、反対にいかにコントラフロー能力が大きくてもコントラフローにすべきでない道路区間が存在することが示唆される。





	$\xi = 0.8$	$\xi = 0.2$
$\omega = 0.1$	Case1  区間数=42 総リスク値=15448	Case3  区間数=33 総リスク値=16153
$\omega = 0.5$	Case2  区間数=54 総リスク値=10766	Case4  区間数=35 総リスク値=11789

図 4 各ケースの適用区間の位置

(2)途中乗車の有無による適用区間の比較

(1)の結果から、運転可能率による適用区間の違いは、途中乗車の必要性の違いが逆方向の交通の必要性を左右したためであると推察される。このことを確認するため、容量拡大率を $\omega = 0.5$ 、運転可能率を $\xi = 0.2$ に固定して、途中乗車を認める場合と認めない場合を設定し、適用区間を比較する。結果を図 5 に示す。

途中乗車を認めない場合（図 5(a)）には、沿岸から内陸に向かう道路の多くが連続的にコントラフロー区間に設定され(1)のケース 2 と類似している。区間数はケース 2 より若干少ない 50 である。

他方途中乗車を認める場合（図 5(b)）は(1)のケース 4 と同じ設定であり、コントラフローの適用区間は 50 から 35 に減少している。沿岸部の道路のコントラフロー区間は限定的となり、むしろ避難場所に近い内陸部に多く設定されている。これは途中乗車のために、内陸から沿岸に自動車を送り、道路上で歩行者を乗車させるための逆方向の交通が発生する。それらを通行させるため、東西

方向の道路はコントラフロー化しないという解であると解釈できる。以上のことから、運転可能率による違いは、途中乗車の必要性の違いによるものであると考えられる。

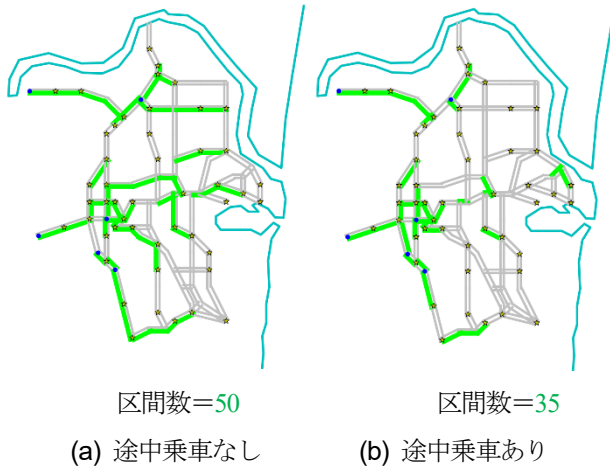


図5 途中乗車の有無による適用区間の比較

5. おわりに

本研究では、津波避難時のコントラフロー施策の適用性を分析するため、3モードの津波避難モデルを拡張し、コントラフロー区間を最適に定めるモデルを提案した。

仮想ネットワークでの分析例を通して、運転可能率が低い範囲では、その割合が設定すべきコントラフロー区間の数や位置に大きな影響を与えることがわかった。これは、途中乗車の必要性が高いため、沿岸部に向かう方向の交通のためのルートを確保する必要性が生じることによる。このことから、コントラフロー区間は地域の運転可能率を考慮して慎重に設定すべきである。その一方で、容量拡大のパラメータ値によらずコントラフロー化すべき区間が存在することが明らかとなり、施策を実行する場合に最低限コントラフロー化を行うべき区間を示すことができた。

今後の課題として、実際の災害避難時にコントラフロー施策を実施する場合、通常時と異なる道路運用を行うことになるため、混乱を招かないような交通制御を行う方法を検討する必要がある。コントラフロー施策によりどのような影響が生じるのかを精査すべきであり、それ

らの諸問題について議論できるようモデルを改善していくことが望まれる。

参考文献

- 1) 佐藤照子, 中須正, 水谷武司, 坪川博彰, 原口弥生, 大楽浩司, 加藤敦, 池田三郎: 2005年米国ハリケーン・カトリーナ災害の特徴, 防災科学技術研究所主要災害調査, No.41, pp.1-22, 2006.
- 2) 警察庁: 交通の方法に関する教則 (平成29年10月30日), <https://www.npa.go.jp/koutsuu/kikaku/kyousoku/index.htm>. (2018年5月2日閲覧)
- 3) 爪林康太, 竹居広樹, 奥村誠: 津波避難における途中乗車施策の効果分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.57, CD-ROM, 2018.
- 4) 中川貴文, 中村俊之, 嶋本寛, 宇野伸宏: 自動車利用を考慮した津波避難計画モデルの構築, 土木計画学研究・講演集, Vol.47, CD-ROM, No.49, 2013.
- 5) 安藤宏恵, 倉内文孝, 杉浦聡志: 時空間拡張ネットワークを用いたリンクベース最適避難計画モデルの構築, 土木学会論文集 D3, Vol.72, No.5, pp.I_683-I_694, 2016.
- 6) 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>. (2018年5月2日閲覧)
- 7) 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, Vol.16, No.10, pp.86-104, 2016.
- 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, pp.A_129-A_137, 2018.
- 9) 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>. (2018年5月2日閲覧)