

津波遭遇リスク最小化モデルを活用した 自動車避難計画の策定手順

奥村 誠¹・片岡 侑美子²・金 進英³

¹正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1, S502b)

E-mail: mokmr@m.tohoku.ac.jp

²正会員 東京都建設部

E-mail: yumiko.kataoka@plan.civil.tohoku.ac.jp

³非会員 (株) 交通システム研究所 主任研究員 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島7-1-20)

E-mail: kim.jinyoung@tss-lab.com

筆者らは、自治体が自動車を用いた津波避難計画を検討する基礎として、既存の道路インフラの下で安全に避難できる程度を確認することが重要と考え、どの時間帯にどこにどれくらいの車が存在するかを明示的に表現できるCell-basedモデルをベースとして津波遭遇リスクを最小化する最適避難計画モデルを提案し、市町村レベルのネットワークにも適用できることを示した¹⁾。さらに交差点ごとに誘導方向を限定するようなソフト対策を行う場合の最適誘導を求めるための拡張を加えたソフト対策計画モデルを提案した。本論文は、これらのモデルの外側に、施設整備の最適化する部分を付け加えたハード対策計画モデルを提案するとともに、前稿のモデルと組み合わせて、自治体レベルでの自動車津波避難計画を策定する手順を提案する。

Key Words : optimal model, evacuation, tsunami, network improvement

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災は、津波避難に関する我々の考え方に根本的な変化をもたらした。すなわち、それまでの小規模な津波や津波避難訓練の場では、避難すべき人が危険性を認知せず避難行動をとらないことが繰り返し観察され、「避難者が少なすぎる」ことが根本的な問題として認識されていた。東日本大震災時にももちろん、認知が不十分で迅速な避難行動をとらなかったために犠牲になった方が多く存在したと思われるが、危険性を認識して避難行動をとった人が交通渋滞等に遭い津波に巻き込まれることが各地で発生した。言い換えれば地域の避難路などのインフラに対して「避難者が多すぎる」という問題が起っていた。これにより、「いかに迅速に津波警報を伝えて多くの人に避難行動をとってもらうか」だけでなく、「せっかく開始した避難行動によって確実に津波から回避するためには、どのような避難施設が必要で、どのように交通誘導すべきなのか」について、地域ごとに具体的な避難計画を立案することが必要となった。

消防庁は2012年度末に「市町村における津波避難計画

策定指針」を取りまとめ²⁾、それを参考に各地で津波避難計画の策定が進められた。この指針²⁾では、歩行避難が困難な地域は避難ビルなどの指定による垂直避難を基本とし自動車の利用を想定していない。しかし、2012年3月の「交通の教則」においてやむを得ない場合での自動車避難が許容されたことや、東日本大震災および2012年12月の三陸沖地震において、多数の自動車が避難に使用され、渋滞が発生したことを考えれば、「自動車利用を禁止」と唱えるだけではなく、実際に自動車が利用されることを想定した避難方策を検討しておくことが必要である。

自動車を用いた避難に関する既存研究は、現状の避難インフラのもとで想定した避難誘導策のもとでの避難車両の挙動を模擬し、目標とする安全性を達成できるのかを確認するシミュレーションモデルの提案が多い。しかし、シミュレーションモデルには、現在の避難インフラの中でより高い安全性を確保するような車両の避難先や経路配分を求める論理が内包されていないため、現在の避難計画が十分な安全性を確保できない場合、「数ある改善策の中でどのような策が効率的か」という疑問に答えることができない。

筆者らは、自治体が自動車による津波避難計画を策定する際に、既存のインフラのもとで最大限安全に避難できる人数を把握することが重要と考え、Cell-based モデルをベースとする津波遭遇リスク最小化モデルを提案した¹⁾。さらに交差点ごとに誘導方向を限定するようなソフト対策を行う場合の最適誘導策を求めるためにモデルを拡張し、これらのモデルが市町村レベルのネットワークに十分適用できることを示した。

本論文は、これらのモデルの外側に、施設整備の最適化する部分を付け加えたハード対策計画モデルを提案するとともに、前稿のモデルと組み合わせて、自治体レベルでの自動車津波避難計画を策定する手順を提案する。

2. 最適避難モデルとその拡張

(1) 津波遭遇リスクを最小化する最適避難モデル

まず、前稿¹⁾で提案した津波避難モデルを説明する。このモデルでは、津波避難において渋滞や混雑の発生そのものは問題ではなく、それらの結果として津波と遭遇する危険性が大きな場所に車両が留まってしまうことが問題であると考えられる。この時、渋滞・混雑の発生を許すことにより、安全な側へ車両を詰め込むことができ、総リスクをより小さくできる可能性がある。

i) 地点ごとの津波遭遇リスクの導入、ii) 渋滞・混雑の表現、iii) 各時刻・地点での移動中・渋滞中の車両数の明示的な把握の 3 つ条件を満たす Cell-based Merchant-Nemhausr (M-N)モデル (Nie, 2011³⁾) に基づき、式(1)-(12)のような線形計画問題として定式化を行った。

この問題の内生変数は、時刻 t にセル a から流出する車両数 v_t^a 、セル a に流入する車両数 u_t^a 、時刻 t にセル a から流出せずに時刻 $t+1$ まで留まる車両数の p_t^a である。 A は全てのセルの集合、 A_R は起点セルの集合、 A_S は避難場所セルの集合、 N はノードの集合、 $I(i)$ 、 $O(i)$ はそれぞれノード i の上流側、下流側で繋がっているセルの集合、 C^a はセル a の流入可能最大車両数である。

$$\min_{\{v,p,u\}} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{a \in A} R_t^a \cdot \eta(p_t^a + v_t^a) \quad (1)$$

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

$$p_t^a + u_t^a = p_{t+1}^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A_S \quad (3)$$

$$p_t^a = p_{t+1}^a + v_{t+1}^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A_R \quad (4)$$

$$\sum_{a \in O(i)} u_t^a = \sum_{a \in I(i)} v_t^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A, \forall i \in N \quad (5)$$

$$u_t^a \leq \delta^a (H^a - p_t^a - v_t^a) \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (6)$$

$$v_t^a \leq C^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (7)$$

$$u_t^a \leq C^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (8)$$

$$v_0^a + p_0^a = D^a \geq 0 \text{ (given)} \quad \forall a \in A_R \quad (9)$$

$$0 \leq u_t^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (10)$$

$$0 \leq v_t^a, p_t^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (11)$$

$$\sum_{a \in A_S} p_T^a = \sum_{a \in A_R} D_0^a \quad (12)$$

式(1)は目的関数で、避難行動の結果津波に遭遇して犠牲となる人数の期待値を「時間平均リスク」と定義している。これは、各時刻に各場所に存在する人数とその時刻における津波遭遇リスクを掛けた値の全時刻 (T) での総和を求め、それを時刻数で除して平均化したものである。 $(p_t^a + v_t^a)$ はセル a に時刻 t に存在する車両数であり、一台当りの平均乗車人数 η を乗じて人数となる。時刻 t のセル a における津波遭遇リスク R_t^a の値は、津波シミュレーション等を参考に外生的に与える。本来のリスク値に換えて避難場所セルに 0、それ以外のセルに 1 という値を設定すれば、式(1)は避難完了までの総所要時間になるので、同じ定式化で総所要時間最小化を計算することもできる。

式(2)-(5)は交通量保存則である。式(6)はセル a で収容可能な最大車両数 (収容容量 H^a) の中でまだ使われていない容量に比例してセル a に流入できることを表す。 δ^a は渋滞流の密度波速度を自由流の密度波速度で割った定数である。式(7)、(8)は流入・流出量の容量の制約、式(9)は初期条件を示しており D^a は起点セルの避難車両数である。式(10)、(11)は内生変数の非負制約である。式(12)は避難行動の終了条件であり、計算終了時刻に避難場所セルに存在する車両の合計が総避難車両数に等しいことを表している。

(2) 方向指定施策を考慮したソフト対策計画モデル

上記の最適避難モデルは、避難中の全車両に最適な誘導経路が伝達され全車両がそれに従うという理想的な状況に相当するものであり、現実には実行可能性が保証できない。そのため、交差点に道路標識や看板を立てて一方方向のみに避難車両を誘導するというソフト対策を導入して実現性を高めることを考える。

このようなソフト施策導入下での最適解を得るため、交差点からの車両が流入できるセルを全時間帯を通じて 1 つに限定するバイナリ変数 ε^a を操作変数に加え、制約条件式(13)-(15)を加えた混合整数線形計画問題を最適化する。このとき、避難場所に接続する交差点では、避難場所セルに向かうか、別の 1 方向に向かうかは自由に選択できるものとする。

$$u_t^a \leq C^a \varepsilon^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A \setminus A_S \quad (13)$$

$$\sum_{a \in O(i)} \varepsilon^a \leq 1 \quad \forall a \in A \setminus A_S \quad (14)$$

$$\varepsilon^a = \{0,1\} \quad \forall a \in A|A_g \quad (15)$$

また、交差点に無停電型の信号機を設置し、複数の流出路への配分率が時刻によらず一定になるようにコントロールするという半ばハードな政策は、上記の変数 ε^a をバイナリー変数ではなく、区間 $[0,1]$ の連続変数と置くことにより表現できる。

(3) 施設整備政策を最適化するハード対策計画モデル

本稿ではさらに、道路などの避難インフラを予算制約下で複数選んで拡張するハード施設の整備計画を考える。例えば道路の車道幅を拡張して通過速度を高める施設整備事業を、整備費用 g^a を投下してセルのフロー容量 C^a を ΔC^a だけ拡大するものとして表現する。施設整備の可能性を持つセル A_g の中で、セル対象にすることを意味するバイナリー変数 σ^a を操作変数に加え、総予算制約 G のもとで最適化する問題を考える。これは、上記の最適避難モデルのフロー容量制約の式(7)(8)を以下の式(16)~(19)に置き換え、さらに予算制約式(20)を付け加えた混合整数線形計画法として定式化できる。

$$v_t^a \leq C^a + \Delta C^a \sigma^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A_g \quad (16)$$

$$u_t^a \leq C^a + \Delta C^a \sigma^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A_g \quad (17)$$

$$v_t^a \leq C^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A|A_g \quad (18)$$

$$u_t^a \leq C^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A|A_g \quad (19)$$

$$\sum_{a \in A_g} g^a \sigma^a \leq G \quad (20)$$

$$\sigma^a = \{0,1\} \quad \forall a \in A_g \quad (21)$$

3. 自動車による津波避難計画の策定手順

(1) 自動車利用の基本的な考え方

徒歩避難では津波襲来時刻までに安全性が確保できない地域が存在するため、自動車による避難を容認する必要があるとしても、自動車による避難には次のような問題が存在する。

- ・道路等の損傷や液状化、信号の滅灯、踏切の遮断機の停止、沿道の建物や電柱の倒壊等により交通障害が発生する。
- ・交通障害が発生しなくても渋滞が発生し、動けなくなることで津波に巻き込まれる可能性がある。
- ・道路の幅員、車のすれ違いや方向転換の実施可否、交通量の多い幹線道路等との交差、避難した車両の駐車場所等のボトルネックとなる区間等が存在する。
- ・車両の故障や避難途中の放棄等により、道路上に放置された車両は通行の妨げとなるおそれがある。
- ・自力での徒歩避難が困難な避難行動要支援者の避難支援をするための自動車等の通行の妨げとなるおそれ

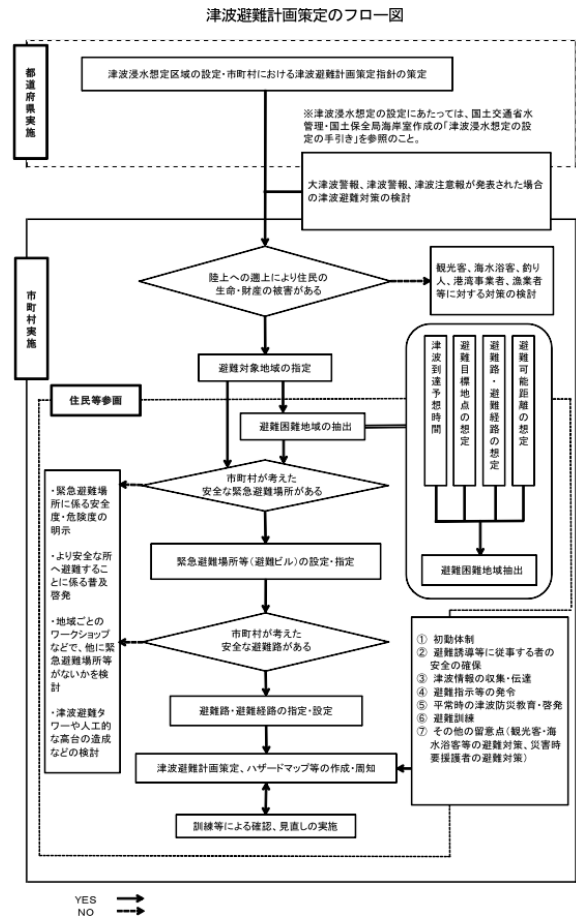


図 1 消防庁が推奨する市町村の津波避難計画の策定手順

がある。

- ・徒歩による避難者の円滑かつ安全な避難の妨げとなるおそれがある。

本稿においては、以上の問題点のうち渋滞の発生とボトルネック区間の存在は考慮するものの、それ以外の問題は不問としている。そのため、まずは消防庁の指針等で推奨されている図-1のような手順に沿って徒歩避難計画を検討し、津波到達予想時間までに避難経路等を通して避難目標地点まで徒歩避難を行うことが困難な「避難困難地域」を抽出する。この「避難困難地域」に限定して、自動車による避難計画を検討することとする。

(2) モデルを活用した自動車避難計画の策定手順

本稿では、「避難困難区域」の避難者が現在の避難インフラの下で「安全な避難」を実行できるのかを確認して、その実現に有効な対策を効率的に選び出すための図-2に示す検討手順を提案する。ここでは2章で説明した上述した最適化モデルの目的関数である式(1)を用いて「安全な避難」を判定する。すなわち式(1)は、避難中に津波に遭遇して被災する人数の期待値である。自治体はあらかじめ、この人数をどの程度に抑えるべきかという「目標値」を定め、それを下回る水準を達成できることを「安全な避難」と定義する。

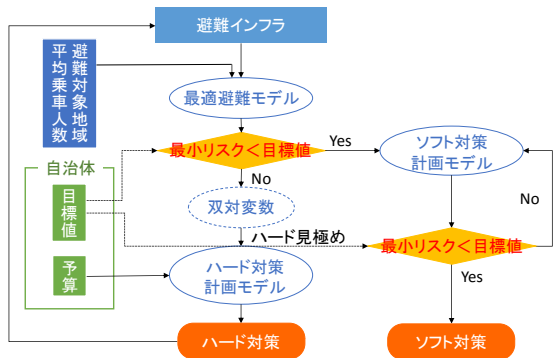


図 2 本研究が提案する自動車津波避難計画の策定手順

自治体は、ソフトな対策により最適に避難者を誘導したとしても「安全な避難」ができない場合に、ハードな施設の整備を計画する。次に、インフラ改善後の状況下で「安全な避難」を実現するために必要なソフト施策を検討する。またインフラの改善には時間がかかることも予想されるため、その整備が完了するまでは1台当たりの乗車人数を高めるなどの追加的なソフト施策が必要となる可能性もある。

4. 市町村レベルのネットワークへの適用例

(1) 対象地域のデータ設定

宮城県亶理郡亶理町を対象とし、同町の津波避難計画⁹⁾を基に必要値を設定した。本研究では単位時刻を 2 分、自由流速度を 30km/h とし、避難経路となる道路を最大 1km のセルに区切る。徒歩による「避難困難地域」対応して 9 個の起点セルを設け、4 個の避難場所セルを含めたセルの総数は 256 個である。収容容量 H^a はセルの長さを平均車頭間隔 (5m と設定) で割り小数点以下を切り捨てた値とした。フロー容量 C^a (単位: 台/2 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 66, 都道府県道を 60, その他道路を 41 とした。起点セルのフロー容量・収容容量は共に無限大、避難場所セルのフロー容量は 60, 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。

対象地域の避難人口の総和は 3389 人、全員が避難場所セルに避難するには平均 1.51 人以上の乗車が不可欠となる。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、津波シミュレーションの浸水深の推移と被害関数を用いて与えることが考えられるが、ここでは簡単に式(22)のロジスティック曲線を用いて、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。また、避難場所セルは時刻にかかわらず安全であると仮定し、距離リスクを

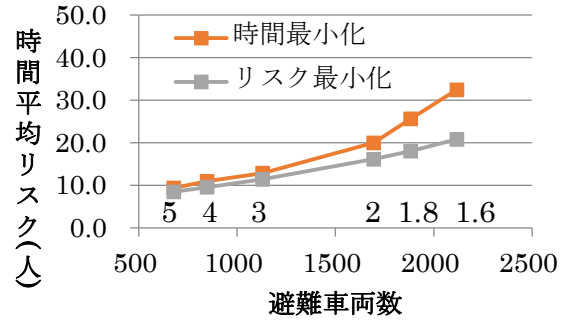


図 3 平均乗車人員とリスク水準との関係

0 と設定した。

$$\begin{aligned} \text{津波遭遇リスク} &= \text{時間リスク}(t) \times \text{距離リスク}(x) \\ &= \frac{1}{1 + e^{-0.2(t-23)}} \times \frac{1}{1 + e^{(x-7)}} \end{aligned} \quad (22)$$

(2) 平均乗車人員とリスク水準の関係

まず、現状の避難インフラの状況における平均乗車人数とリスク水準の関係を確認する。1台当たりの平均乗車人数を1.6~5.0の間で変化させながら、2.(1)の最適避難モデルを用いて、リスク最小化と総所要時間最小化の計算を行い、最小リスク水準を図3に示している。

これより、平均乗車人数が大きいほど車両数が小さく、最小リスクが小さくなるが、その効果は避難車両数に比例しているわけではないことがわかる。また総所要時間最小化に比べてリスク最小化を行うと、その値を65~90%に抑えることができる。

自治体はこの結果を見ながら、目標とするリスク水準を設定する。ここでは対象地域人口の1/100である33.9人を目標値に設定すると仮定する。図3より平均乗車人数1.6人以上であればこの水準を実現することが不可能でないことがわかる。

(3) 有効なハード対策の検討

2.(1)の最適避難モデルは線形計画法として定式化されているため、最適解における双対変数の値は、当該の制約の緩和がもたらす目的関数の改善の有無を示している。すなわち、制約条件(4)~(6)の双対変数をみることで、道路ネットワーク上のどのセルの容量が目的関数の改善に影響を持つ可能性があるかを調べることができる。双対変数が時刻ごとに別の値をとることを勧告し、0でない値を取った回数を図示した結果を図4に示す。1~10回を青色、11~20回を緑色で示した。容量制約が効いているセルはネットワークの中央部分に多い。逆に、0以外の値を取らなかった双対変数は、現在の状態から改善する必要がないことを示しており、図4の左下や沿岸部の道路は、改善の必要はないと考えられる。ただし、ある最適解において双対変数の値を持たないものの、あるセル

$$(6) u_t^a \leq \delta(H^a - p_t^a - v_t^a)$$

$$(7) v_t^a \leq C^a$$

$$(8) u_t^a \leq C^a$$

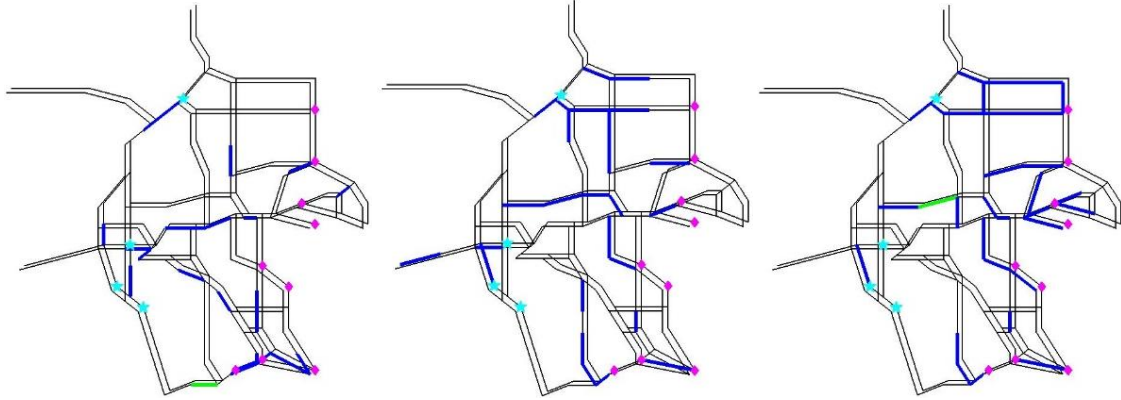


図 4 双対変数がゼロ以外の値を持った回数 (平均乗車人数 20 人, 総リスク最小化)

表 1. 平均乗車人数 2 人で拡張されたセル番号

補強数	1	2	3	4	5	9	10
	229	152	152	124	152	124	152
		153	153	152	153	152	153
			229	153	203	153	198
補強されたセル				229	204	198	199
					229	199	200
						200	201
						201	202
						202	203
						229	204
							229

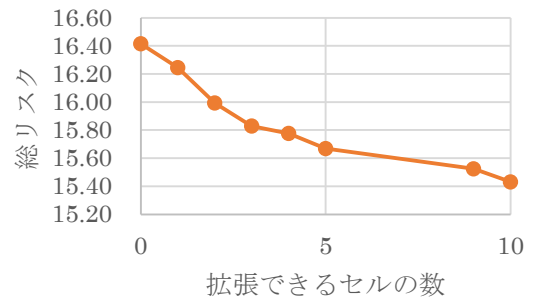


図 6 拡張するセルの数とリスク水準との関係

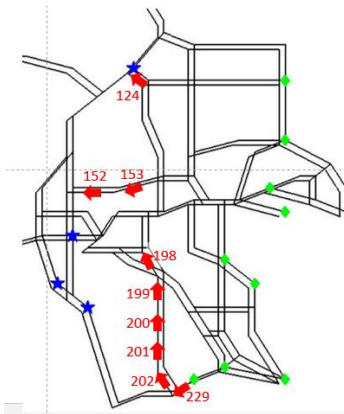


図 5 補強されたセル

を改善した状況でもう一度最適化問題を解き直すと新たにゼロでない値をもつ可能性があることには注意が必要である。

このことを踏まえて、リスク低減に効果的な複数の道路拡張区間を 2.(3) のハード施策計画モデルを用いて計算する。ここでは簡単のため、すべての一般道路セルを拡張でき容量を一律、 $\Delta C=10$ (台/2min) だけ増加させることができると仮定する。またセルごとの拡張費用も一律に $g^a = 1$ と置く。これより全予算額 G は拡張可能な

道路セルの数を意味する。

G の値を 0~10 まで変化させて、拡張すべきセルを計算した結果を表 1 に示す。選ばれた拡張セルの位置は図 5 の示す通りで、避難者が多い図右下からの避難ルートを増強することが効果的であることがわかる。また整備区間数の設定で一連のセルが合わせて改善できるかどうかにより、整備順序が変化することも確認できる。また、一連の整備による総リスクの低下の様子を図 6 に示しており、全体的として効果が大きなセルから順位選定されるために下に凸の曲線となっているが、複数セルが一つのルートを形成できるか否かによって厳密には凸にはなっていないことが確認できる。

(4) ソフト対策の検討

ついで、2.(2) のソフト施策計画モデルを用いて、避難方向指定などの必要性を検討する。一旦ハード施設の整備を行わない 4.(2) の状況に戻り、2.(2) のモデルを適用した結果を図 3 に書き加えたものが図 7 である。

この結果から、すべての車両の挙動を最適にコントロールできる状況に比べ、交差点ごとに進行方向を指定するという方策の下ではリスクの値は 1.4~2.2 倍に大きくなる。先のケースでは達成できた 33.9 人というリスクの目標値を達成するためには、平均乗車人員を 2.2 人以

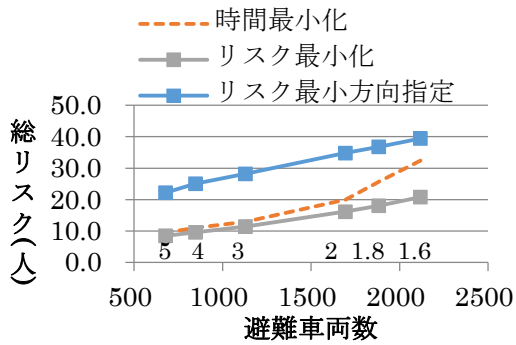


図 7 方向指定時の総リスクの変化

上にすることが必要である。

なお、2.(2)のソフト施策計画モデルにおける方向指定変数 ϵ^a のいくつかをバイナリー変数ではなく区間[0,1]の連続変数として指定することで、固定的な看板の代わりに無停電型の信号機などの誘導を行うことの効果を検討できる。

5. 結論

本稿では、筆者らが提案した津波遭遇リスクを最小化する最適避難モデルを基本とし、交差点ごとに誘導方向を限定するようなソフト対策を行う場合の最適誘導を求めるためのソフト施策計画モデル、道路容量の拡大を最適化するハード施策計画

モデルを提案するとともに、前稿のモデルと組み合わせて、自治体レベルでの自動車津波避難計画を策定する手順を提案した。

今後は、これらのモデルを用いた津波避難計画策定方法の確立のための研究を継続するとともに、歩行者と自家用車との混合交通問題の検討、支援を必要とする避難者の存在や避難開始までの必要時間制約の考慮などのモデルの拡張を検討することが必要である。

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 (CD-ROM), Vol. 53, OR7158, 6 ページ.
- 2) 消防庁国民保護・防災部防災課：第 2 章 市町村における津波避難計画策定指針,津波対策推進マニュアル検討会報告書(2013), 12-60.
- 3) Nie, Yu Marco. : A cell-based Merchant-Nemhauser model for the system optimum dynamic traffic assignment problem, Transportation Research Part B: Methodological 45.2 (2011): 329-342.
- 4) 宮城県亶理郡亶理町：“亶理町 津波避難計画（平成 26 年 2 月）”，亶理町 HP, 2015.7

(2016. 7. 31 受付)

AUTOMOBILE TSUNAMI EVACUATION PLANNING METHOD BASED ON RISK MINIMIZING MODELS

Makoto OKUMURA, Yumiko KATAOKA and Jinyoung KIM

Evacuation using a car got allowed if it is needed after the 2011 Great East Japan Earthquake. Each local government have to renew its evacuation plan with consideration of car usage. The authors proposed an automobile tsunami evacuation model to minimize the risk of being caught by tsunami, under the limitation of given road network and number of automobile evacuee.

This study first proposes an expanded mixed integer linear programming model to find the most effective road network reinforcement plan in order to reduce the minimum risk. Secondly, we propose a standard planning procedure of both hardware and software policies to certify the given risk level. The applicability of the proposed method is illustrated through a case study in a real municipality.