

# 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

横山 宗一郎<sup>1</sup>・安藤 宏恵<sup>2</sup>・倉内 文孝<sup>3</sup>・杉浦 聡志<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 元岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

<sup>2</sup>学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: u3121002@edu.gifu-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: kurauchi@gifu-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 岐阜大学助教 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: sugi\_s@gifu-u.ac.jp

東日本大震災での経験を踏まえ、内閣府では、津波災害時において徒歩避難を原則としつつ、やむを得ず車での避難が必要な場合のみ車を使った避難を認めた。しかし、徒歩と自動車が混在する状況下における効率的な避難の考え方は未だ確立していない。先行研究では、避難計画策定時の支援を目的として、避難完了時間の最小化を目的とする最適避難計画モデルを構築しているが、ここでは単一の交通モードを仮定しており、徒歩と自動車の異なるモードによる避難を考えることができていない。本研究では、より実用性が高い避難計画モデルとするため、徒歩と車を用いる混合モードでの避難における津波災害に対する最適避難計画モデルを構築する。混合モードでの避難を対象とすることで、より現実的かつ効率的なものとなり、避難計画立案の一助とすることを目的とする。

**Key Words** : *space-time extended network, Tsunami disaster, optimal evacuation planning, bimodal transportation*

## 1. はじめに

東日本大震災以前、津波避難は家屋倒壊、落下物、道路の損傷、交通渋滞等が発生する恐れがあることから原則徒歩と定められていた。しかし、東日本大震災では、津波到達までの時間が短かったことや避難場所までの距離が遠いなどの地域の実情から、助かった避難者の約半数が車避難を選択している。また、車を使用した人のうち4分の1が「渋滞で動けなかった」、「被災で信号が停止していた」、「がれき散乱や道路陥没で通行しづらかった」などと、避難の際に何らかの問題が生じている<sup>1)</sup>。このような実際の災害時の避難状況や被災者の声があり、なおかつ、高齢社会に突入した現在、徒歩での避難が困難な要避難支援者の存在も考慮し、地域の地形や環境、避難所や高台の位置、要避難支援者の有無など、それぞれの地域の実情に合わせた避難計画が必要であるといえる。実際、宮城県亘理町にて2013年6月に実施された総合防災訓練では、自動車での津波避難を許容したところ、避難者の約8割が車で避難している<sup>2)</sup>。また、和歌山県みなべ町では、自動車を用いた津波避難訓練やワークシ

ョップ等の実践的活動が定期的におこなわれている<sup>3)</sup>。高知県黒潮町においても、2014年6月に高台の住民が避難車両の誘導に備え、「車の誘導方法を考える訓練」を実施し<sup>4)</sup>、2016年4月には、初めて車避難を含めた津波避難訓練が実施された。このように多くの地域で自動車を用いた津波避難訓練を実施しており、車での避難が検討され始めている。車避難を考慮した避難計画の策定が急がれるが、具体的な計画手法については未だ確立されていないのが現状といえる。

自動車による津波避難に関する研究では、金ら<sup>5)</sup>、福田ら<sup>6)</sup>、片岡ら<sup>7)</sup>のように、避難計画策定や交通ネットワーク評価のための自動車を使った避難シミュレーションモデルの構築およびシナリオ分析などがみられる。金井ら<sup>8)</sup>、門野ら<sup>9)</sup>、柴山ら<sup>10)</sup>は、東日本大震災による被災者の被災当日における避難行動を調査し、防災意識や地域特性、被災状況が避難行動に及ぼす影響を分析することで、今後の津波災害対策のための有益な情報を提供している。このように、現象を理解するための演繹的アプローチや実際の避難状況の把握は非常に重要であるが、それとは別に、それぞれの地域の住民がどこに向

かって、どの交通手段で逃げるともっともはやく避難を完了することができるのか、といった最適な避難方法を検討する規範的アプローチも必要であると考え。本研究では、津波災害を対象とし、規範的な考え方に基づく最適避難計画モデルの構築をおこなう。本モデルは、地域ごとに徒歩避難あるいは車避難を予め定めることができる避難計画支援ツールになることが可能であり、避難計画策定や避難完了時間の短縮のための対策を検討する際の一助となると考える。

規範的アプローチによる最適避難計画モデルとして、倉内<sup>11)</sup>、荒木ら<sup>12)</sup>は、静的ネットワークを時間軸に拡張した時空間拡張ネットワーク (STEN, Space-Time Extended Network)<sup>13)</sup>において、すべての人が避難完了するまでの所要時間のうち一番長いものが最も短くなるような避難方法を求める経路ベース最適避難計画モデルを構築し、実際のネットワークに適用したケーススタディを示している。しかしながらこの方法では、ネットワーク上の考えるすべての経路を数え上げる必要があり、実ネットワークに適用する際、計算量が膨大となり実用的ではない。このような課題点を改善するため、安藤ら<sup>14)</sup>は時空間拡張ネットワーク (STEN) において、Jarvis and Ratliff<sup>15)</sup>が示した『動的なmany-to-one ネットワークにおいては総避難時間最小化と避難完了時刻最小化が等価である』ことを援用し、総避難時間最小化問題により最適避難方法を得るリンクベース最適避難計画モデルを構築している。これにより、大幅な計算所要時間の短縮が可能となり、より実用的なモデルとなったといえる。しかし、ここでは単一の交通モードを仮定しており、全員が同一の手段により避難をおこなうという点では非現実的である。本研究では、リンクベース最適避難計画モデルを基に、先行研究で残された課題であった交通手段について、2つのモードでの検討が可能な歩車混合型最適避難計画モデルを構築した。さらに、構築したモデルを用いて、宮城県亘理郡亘理町での実ネットワークにおいて試算し、モデルの挙動を確認するとともに、本モデルによる試算結果の避難計画への反映方法について検討した。

## 2. 津波避難計画の現状

我が国の防災計画は災害対策基本法<sup>16)</sup>を基に、災害対策の根幹をなす防災分野の最上位計画として、防災基本計画を中央防災会議が策定している<sup>17)</sup>。この防災基本計画に基づき、指定公共団体が地域防災計画を策定している。防災基本計画は平成23年12月に東日本大震災の影響を踏まえた地震・津波対策の抜本的強化、最近の災害等を踏まえた防災対策の見直しを反映し、「津波災害

対策編」の追加等といった修正がなされた。しかしながら、それに基づいて策定されるべき地域防災計画の修正は速やかに実施されていない現状がある。津波避難対策推進マニュアル検討会では、2012年12月1日を基準日として、沿岸市町村及び津波被害が想定される市町村約660団体を対象とした津波避難対策に関するアンケート結果を示しており、地域防災計画を「修正した」と回答したのは65団体、「修正したがさらに検討中」が95団体であり、「検討中」と回答したのは396団体と全体の約7割以上であった(回収率:86.2%)<sup>18)</sup>。このように、東日本大震災の経験を踏まえ、速やかに地域防災計画を修正した市町村は少なく、検討中の市町村が大半を占めていた。東日本大震災の経験を活かし、今後発生が予想される南海トラフ地震をはじめとする大震災に備え、一刻も早い地域防災計画の修正が必要である。本モデルは、避難の際の基本となる最適避難方法を示しており、事前計画として、各自治体による地域の実情を考慮した地域防災計画の策定に大きく寄与するものと考えている。

## 3. 歩車混合型最適避難計画モデルの構築

### (1) 最適避難計画について

#### a) 最適避難計画の方針

本研究で構築する最適避難計画は、計画者が設定した避難計画に避難者全員が従うことを仮定する、規範的アプローチによる最適避難計画としている。また、避難計画において最適避難である状態というものは、すべての方の避難が完了する避難完了時間を最小とするものとし、それぞれの地域住民が、どの交通手段で、どの避難所に避難すべきなどの避難の仕方を求めるものとする。そのため、実際の各自治体で策定されている地域防災計画の避難計画の方法とは異なる可能性がある。

#### b) 最適避難計画モデルの概要

本モデルでは、Jarvis and Ratliff<sup>15)</sup>が証明する、多出発地単一目的地の動的ネットワークにおいて、避難完了時間最小化と各時間帯の避難完了を示すノードからの流出時間帯で重み付けした最小化問題 (Exit Flow 最小化問題) の等価性に基づく、リンク交通量を未知変数としたExit Flow 最小化問題によりモデルを構築する。Exit Flow 最小化問題にすることで、避難経路を特定する必要がなく、計算コストの縮小が可能である。

津波避難時の問題のひとつとして、車で避難をおこなった場合の渋滞問題がある。そこで、リンクに容量制約を課し、リンク容量を超えない範囲で交通量を割り当てることにより、待機せざるを得ない避難者が生じ結果として到着時間が遅れる様子を表現する。また、本モデルの最大の特長である歩車混合型での避難の想定が可能で

ある点については、歩車がリンクを混合して使用することにより、双方のリンク容量を減少させるものと考え、歩行者による自動車の容量低下、および自動車による歩行者の容量低下を表現する。

## (2) 歩車混合型最適避難計画モデルの定式化

先行研究である倉内<sup>1)</sup>の時空間拡張ネットワーク (STEN) を活用し、時間軸を考慮したうえで、徒歩と自動車での避難の2つのモードによる避難を想定した最適避難計画に資する数理計画モデルを構築した。ネットワークは図-1に示すような時空間に拡張されたものである。ノードとリンクは以下のように定義される。

- 通常ノード : 実際に存在するノードを時空間に拡張したもの。(  $Nnum \times (Snum+1)$  )
- 避難完了時ノード : 避難完了を表現するノード。各時間帯にひとつずつ存在する。(  $Snum+1$  個)
- 出発地ノード : 避難者が存在するノード。(  $Onum$  個)
- 避難完了ノード : 最終的な目的地。図1中の△のノード。(1個)
- 通常リンク : 実際に存在するリンクを時空間に拡張したもの。車、歩行者を個別に取り扱う。リンク数は、時間帯数  $Snum$  と各リンクの所要時間の関係により変化する。混雑による遅れは考えず、容量を超える交通を受け入れることはできない。
- 流出リンク : 避難完了時刻ノードと避難完了ノードをつなぐリンク。(  $Snum+1$  個)
- 避難所リンク : 避難所ノードと避難完了時刻ノードをつなぐリンク。車、歩行者を個別に取り扱う。(  $2 \times Knum \times (Snum+1)$  個)
- 出発地リンク : 出発地ノードと通常ノードをつなぐリンク。車、歩行者を個別に取り扱う。(  $2 \times Onum \times (Snum+1)$  個)

時空間ネットワーク上での総避難時間最小化と避難完了時刻最小化の等価性を証明した Jarvis and Ratliff<sup>15)</sup> を援用し、さらに STEN を用いることで、避難完了時刻の最小化問題は、各時間帯の避難完了を示すノードからの流出フローの時間帯で重み付けした最小化問題 (Exit Time 最小化問題) と等価であることが示されている。よって、Exit Time 最小化問題として歩車混合型最適避難計画モデルの定式化を以下に示す。

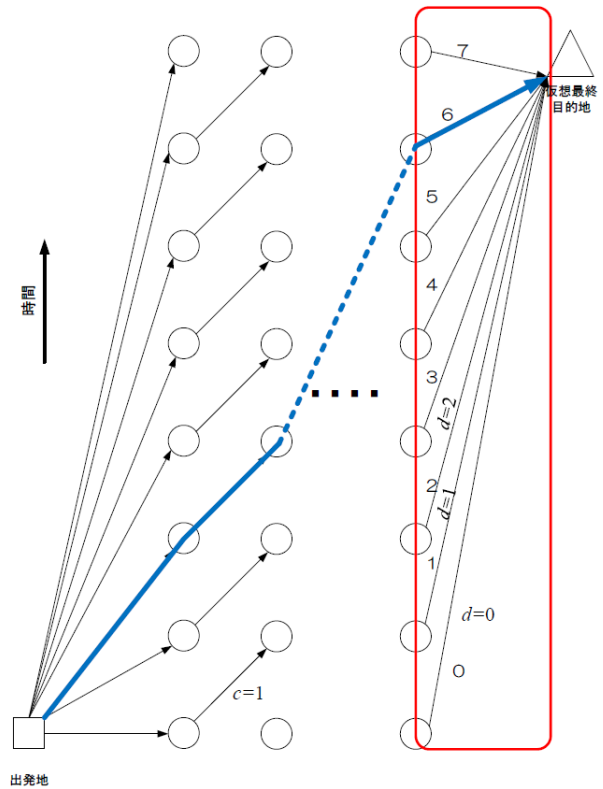


図-1 時空間ネットワーク

$$\min \sum_{e \in E} c_e x_e \quad (1)$$

subject to

$$-\sum_{a \in Out(1,o)} \gamma x_a - \sum_{a \in Out(2,o)} x_a + q_o = 0 \quad \forall o \in O \quad (2)$$

$$\sum_{a \in In(1,e)} \gamma x_a + \sum_{a \in In(2,e)} x_a - x_e = 0 \quad \forall e \in E \quad (3)$$

$$\sum_{a \in In(m,n)} x_a - \sum_{a \in Out(m,n)} x_a = 0 \quad \forall m = 1, 2, n \in N \quad (4)$$

$$\sum_{a \in Out(1,k)} x_a \leq j_k^c \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{a \in Out(k)} x_a \leq j_k^p \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\forall b = \{b | l_a = l_b, it_b \leq it_a, ot_b \geq ot_a, b \in A^p\}, \quad a \in A^c \quad (7)$$

$$\forall b = \{b | l_a = l_b, it_b \geq it_a, ot_b \leq ot_a, b \in A^c\}, \quad a \in A^p \quad (8)$$

$$x_a \geq 0, \quad \forall a \in A \quad (9)$$

ただし、

- O : 出発地ノードの集合 (個数は  $Onum$ )
- N : 中間ノードの集合 (個数は  $Nnum$ )
- S : 計算対象の時間帯数 ( $s=0 \sim Snum$  まで計算するとし、個数は  $Snum+1$ )
- E : 最終目的地に接続されるリンク (最終流出リンク) の集合 (個数は  $Snum+1$ )
- K : 避難所の集合 (個数は  $Knum$ )
- $A^c, A^p$  : それぞれ自動車および徒歩の通常リンクの集合

- $dt$  : 単位時間 (分)
- $s^c$  : 自動車のリンク交通容量 (台/ $dt$ )
- $s^p$  : 歩行者のリンク交通容量 (人/ $dt$ )
- $m_a$  : 各リンク  $a$  のモード (0=区別なし, 1=車, 2=歩行者)
- $it_a, ot_a$  : 各リンクの流入時刻および流出時刻
- $l_a$  : STEN 上のリンク  $a$  の静的ネットワーク上のリンク番号
- $j_k^c$  : 避難所  $k$  の自動車での容量 (駐車可能台数に相当). なお, この値を 0 にすることで, 徒歩避難のみ受入可能な避難所を表現可能.
- $j_k^p$  : 避難所  $k$  の受入可能容量 (一時避難可能人数に相当)
- $c_a$  : 最終流出リンク  $a$  のコスト (=流出時刻)
- $q_n$  : 出発地  $n$  からの避難需要 (人)
- $In(n)$  : ノード  $n$  に流入するリンクの集合
- $Out(n)$  : ノード  $n$  から流出するリンクの集合
- $In(m, n)$  : ノード  $n$  に流入するモード  $m$  のリンクの集合 ( $m=1$ , 車,  $m=2$ , 徒歩)
- $Out(m, n)$  : ノード  $n$  から流出するモード  $m$  のリンクの集合 ( $m=1$ , 車,  $m=2$ , 徒歩)
- $\gamma$  : 自動車の平均乗車人数 (人/台)
- $\beta_a^{cp}$  : リンク  $a$  の自動車の歩行者換算係数 (人/台) (自動車1台の歩行者容量に及ぼす影響)
- $\beta_a^{pc}$  : リンク  $a$  の歩行者の自動車換算係数 (台/人) (歩行者1人の自動車容量に及ぼす影響)
- $x_a$  : リンク  $a$  の交通量

である. なお, 上記の問題は線形計画問題となっている. 制約条件について, 以下に説明する.

**a) 出発地ノードにおけるフロー保存**

ここでは, 出発地にいる避難者全員が避難するものとする. 式 (2) は, 各目的地から流出する交通量がその地点の避難者数に等しいことを示す. なお, ここでの定式化においては, あるノードに流入する場合を正, 流出する場合を負としてとらえている. また, 車を利用する場合には, 複数人 ( $=\gamma$ ) 乗車することも想定している.

**b) 避難完了時刻ノードにおけるフロー保存則**

Exit Flow を算定するために, 避難完了時刻ノードにおけるフロー保存を考える. 式 (3) のように書ける. 避難完了時刻ノードから流出するノードは唯一であるため, ここでは  $x_e$  と示している.

**c) 通常ノードにおけるフロー保存**

通常ノードにおいては, モードを個別に取り扱う必要がある. すなわち, 途中で徒歩から自動車に乗り換える, ということはできない. したがって, 式 (4) のように記述できる. なお, 流入・流出リンクには通常リンクだけでなく, 出発地リンク, 避難所リンクも含まれていることに注意が必要である.

以上が等号制約条件として設定される. 次に不等号制

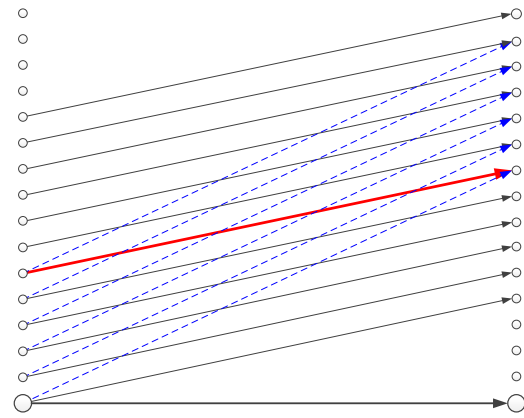


図-2 自動車リンクと歩行者リンクの相関

約条件について考える.

**d) 避難所における容量制約**

前述の通り, 各避難所には, 自動車の受入可能容量と避難者の受入可能容量の 2 種類が存在する. よって自動車の受入可能容量を示す式 (5) と, 避難者の受入可能容量を示す式 (6) の 2 つの制約条件となる.

**e) リンク容量制約**

車と徒歩の 2 モードによる避難に際し, リンク容量制約に対して工夫を加える. すなわち, リンクを混合して使用することによって, 双方のリンク容量を減少させるものとする. なお, この関係式は, STEN において交差しうるすべてのリンクを対象とする. 図-2 を用いて説明する. 今, 車での移動を表すひとつのリンク (赤色) に対して, 青い点線で示された徒歩リンクが交差する. この場合, これら全てのリンクに対して, 式 (7) の容量制約が成立するものとする. 同様に, 歩行者の容量についても自動車が走行することによって低下が生じるものとし, 式 (8) の制約条件を課す.

以上により, 歩行者による自動車の容量低下, あるいは自動車走行による歩行者の容量低下を表現することが可能である. なお, 換算係数  $\beta$  をリンクごとに設定しているが, これは例えば十分な幅員の歩道が確保されており, なおかつ車道を歩行者が利用することが想定しづらい場合ゼロにするなど, リンク特性に応じて柔軟に対応可能とするためである. これより, モードにより避難可能な場所が異なる可能性をもつ, 徒歩と自動車が混合することで生じる悪影響を考慮できる最適避難計画モデルが構築できた.

**4. 実ネットワークにおけるモデルの実用性検証**

**(1) 対象地域と試算ネットワーク**

対象地域は, 先行研究<sup>12) 14)</sup> と同じ宮城県亶理郡亶理町とする. 亶理町は, 太平洋に面し海岸部は平地が続い

ており、西側の内陸部まで約5kmの距離がある。そのため、津波避難の際、徒歩での避難が困難であることや、普段から自動車を主な移動手段としている人が多い等の理由を踏まえ、自動車での避難も考慮し、地域ごとに、避難手段や避難所などを定めた津波避難計画を策定している<sup>19)</sup>。亙理町は東日本大震災の際に、約60分で津波が到達したことから、津波避難計画において、「津波到達までの時間」を60分、「地震発生から避難までに要する時間」を15分と設定し、「津波発生後の避難可能時間」を45分としている。そのため、本研究での試算結果検討においても、避難可能時間45分をひとつの目安として考える。計算に使用するネットワーク図を図-3に示す。STENによりネットワークを時空間に拡張するため、ノード数、リンク数が飛躍的に増加することを考慮し、亙理町の主要な道路に限定したネットワークである。また、近隣のリンク同士を集約したところはリンク容量を足し合わせており、実際の道路の容量は損なわないように配慮した。静的ネットワーク上にて、リンク数は往復合わせて120、ノード数は36、そのうち避難所ノードは8、出発地ノードは23である。避難者は地域に居住する人口（総人口7,325人）<sup>20)</sup>をノードに割り付けて設定しているため、ここでの避難計画は夜間人口を想定したと考えることができる。各避難所の収容人数は、亙理町の「避難所開設・運営マニュアル」<sup>21)</sup>に示されている避難所容量を用い、駐車可能台数については、標準地図<sup>22)</sup>より計測した駐車可能な面積を1台あたりの駐車面積<sup>23)</sup>で除した値を駐車可能台数と仮定している。以上の条件により、前章で構築したモデルを用いて、試算した結果を次節に示す。

(2) 試算結果の考察

a) 一時避難所を利用しないケース

一時避難所は浸水区域内に位置することもあり、実際の災害時には利用できない可能性、あるいは大きな津波の場合に浸水被害が生じる懸念もある。そのため、まずは一時避難所を利用できないケースに関して検討をおこなう。このケースで使用可能な避難所は津波浸水区域外の4カ所であり、平均乗車人数は2人とした。まず、交通モードの選択状況に注目すると、7,325人の避難者の中で徒歩避難を選択した人は図-3のノード29を出発し、ノード24に避難した231人のみとなり、他の避難者はすべて車避難をおこなうという結果になった。これは、沿岸地域からの避難の際、徒歩避難では大幅な所要時間を要するため、車での避難をせざるを得ないことを意味しており、比較的避難所の近くの避難者のみ徒歩避難することが最適な避難方法ということになった。なお、ここでは津波による浸水が想定される地域を対象として分析を行っており、なおかつ津波に対して安全な高台が津波浸



図-3 試算ネットワーク図

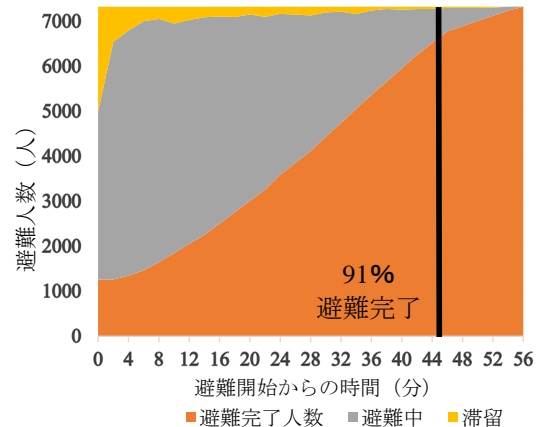


図-4 車避難を制限したケースでの避難状況

水地域には存在しないと仮定した計算結果であるため、多くが車避難を選択したといえる。次に、全体の避難状況についてみると、全体の避難完了時間は78分、徒歩での避難完了時間は37分となった。また、避難開始からの避難完了人数の推移を図-4に示すが、これより亙理町津波避難計画にて定められている避難可能時間45分以内に避難を完了した避難者は59%であり、40%近くが現状の避難所容量およびネットワークでは避難が難しい結果になった。

b) 一時避難所への車避難を制限したケース

次に、津波浸水区域内にある一時避難所への車避難を制限するケースにて試算する。図-3に示す4カ所の一時避難所は駐車場容量を0とすることで、車避難を禁止し、徒歩による避難者のみを受け入れることとした。先ほどのケースと同じく平均乗車人数は2人としている。まず、交通モードの選択状況に注目すると、7,325人中5,020人

は車を使用し浸水区域外の避難所へ、2,305人は徒歩により一時避難所へ避難するという結果であった。全体の避難完了時間は56分、徒歩での避難完了時間は23分となった。避難所4カ所のみで避難をおこなうよりも、22分の避難完了時間の短縮ができており、一時避難所への徒歩避難と併用することが有効であることがわかる。また、避難可能時間45分時点での避難完了率は98%であり、全員が45分で安全な場所に避難できる結果とはなっていないものの、一時避難所を利用しないケースの45分時点避難完了率59%から大幅に改善できている。

今回のケースでは平均乗車人数を2人と仮定したが、このケースにおいて徒歩避難が4カ所へ分散していること、徒歩のみならず津波浸水想定区域外に車避難がおこなわれていることを踏まえ、平均乗車人数を変化させた場合について分析する。

c) 平均乗車人数の影響

一時避難所への車避難を制限したケースにおいて、平均乗車人数を1~4人に変化させたときの避難完了時間の短縮効果について考察する。図-5に示すように、乗車人数ごとに避難完了時間は1人から1人増えるごとにそれぞれ38分、14分、6分短縮されたことがわかる。よって、1台あたり2人の乗車は避難完了時間の減少効果が著しく、1人1台での乗車では大幅な避難時間を要することがわかる。また、乗車人数が3人以上からは、避難可能時間45分をクリアしている。このように、平均乗車人数を何人以上にすれば避難が可能なのかといった議論も本モデルを用いておこなうことができる。なお、次節以降では、平均乗車人数は2人と仮定し分析を進める。

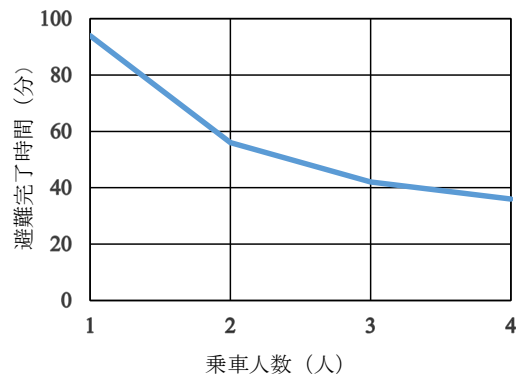


図-5 避難完了時間の変化 (一時避難所は徒歩利用のみ)

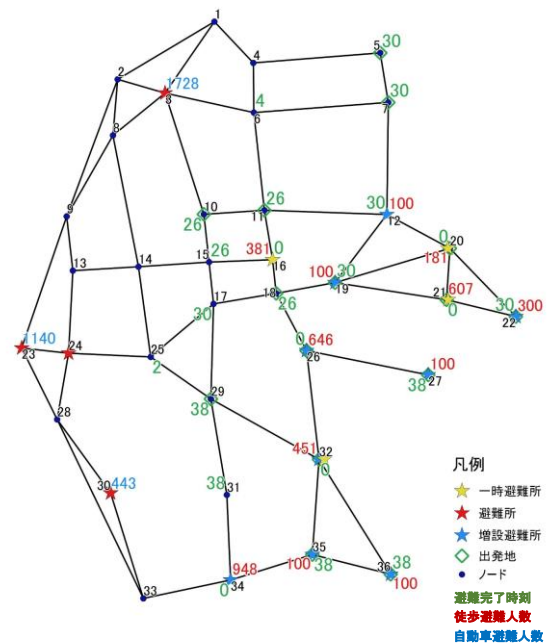


図-6 一時避難所を増設した際の検討結果

(3) 避難完了時間短縮の検討

本研究では、地震の影響により交通流に影響がでないなど理想的な条件を仮定している。そのため、実際の避難時は、前節で示したような本モデルでの計算結果より避難完了時間が大幅に遅れることは十分に考えられる。しかし、理想的な条件を仮定した状態での結果は、実際の避難の基本となるため、このような条件下での避難完了時間短縮の検討は必要だと考える。

ここでは、前節で示した一時避難所を利用しないケースをもとに、施策を実施した際の避難完了時間短縮効果について考察する。

a) リンク容量の増大効果

避難完了時間短縮のための検討策のひとつとして、リンク容量の増加がある。本研究では、リンクを一方通行化させるコントラフローを実施することでリンク容量の増加を図った。対象リンクは、一時避難所を利用しないケースにおいて、特にリンク混雑率が高かった県道10号にあたる東西路線 (ノード19→18→17→25→24→23を繋ぐもの) と、北部に位置する避難所3への主要リンクで

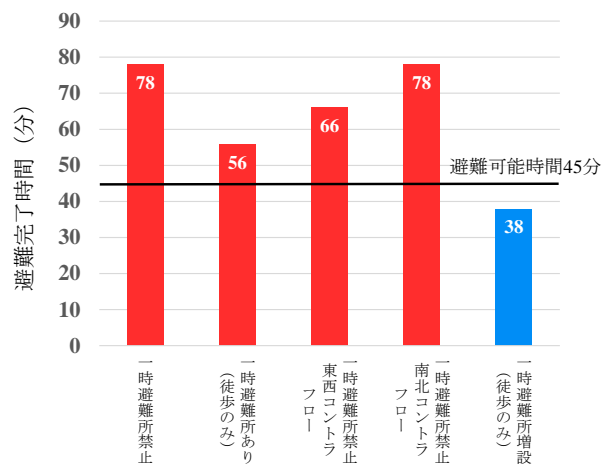


図-7 各ケースでの避難完了時間

ある南北路線 (ノード19→12→7→4→1→3をつなぐもの) の2つの経路を対象とし、コントラフローを実施してみた。まず、東西リンクでの実施について、交通モード選択状況は、徒歩避難者がノード29から発生した74人のみとなり、車利用を主体とする避難となった。また、全体

の避難完了時間は66分、徒歩での避難完了時間は32分と、コントラフロー実施前と比較して12分の避難完了時間短縮効果がみられた。また、避難可能時間45分時点の避難完了率は70%と11%の改善がみられた。つぎに、南北リンクでの実施について、交通モード選択状況は徒歩避難者がノード29から発生した264人のみとなり、東西リンク時と同様に車避難を主体とする結果であった。しかし、全体の避難完了時間は78分、徒歩での避難完了時間は38分となり、コントラフロー実施前と同刻となった。さらに、45分時点避難完了率は56%と、実施前と比較して3%低下した。

このように、リンク容量増加の施策をおこなう際、対象とするリンクによって大きく効果が異なり、対象が不適切な場合は効果が見込めないことがあることが示された。そのため、対象リンクの選定や優先順位の決定は非常に重要な意味を持つ。本モデルは、その際のひとつの指標になり得ると考えられる。

#### b) 一時避難所の増設効果

前項で示すとおり、リンク容量を増大させた場合、避難完了時間の短縮が可能なケースもみられたものの、車避難を助長するものであった。本来の津波避難では徒歩避難を主体として避難が理想であるため、徒歩避難を主体とし、かつ避難完了時間を短縮することに期待し、図-6の青星の位置に一時避難所の増設をおこなう。これらは、互理町津波避難計画にて建設予定とされている一時避難所と高速道路階段を追加し、計11カ所の一時避難所としたケースである。図-6中の試算結果にもあるように、津波浸水区域外の避難所へは車による避難者が、浸水区域内の一時避難所へは徒歩による避難者が避難する結果となり、歩車分離での避難が最適という結果になった。このケースでは、徒歩避難を選択した避難者は全体の55%となり、徒歩避難が主体となった避難であることがわかる。全体の避難完了時間は38分、徒歩での避難完了時間は19分となり、避難開始45分以内にすべての避難者が避難完了できている。よって、津波避難時の避難方法を原則徒歩避難としたうえで、避難完了時間を短縮するためには、地域特性や場所の特徴を捉え、適切な位置に、求められる種類であり十分な容量の避難所を設置することが重要であるといえる。

## 5. おわりに

本研究では、それぞれの地域の住民がどこに、どの交通手段で避難すべきかといった、規範的な考え方に基づく歩車混合型最適津波避難計画モデルの構築した。構築したモデルを用いて、宮城県亶理郡亶理町の実ネットワークにおけるさまざまなケースでの試算、検討をおこな

った。その結果、本モデルを用いることで、平均乗車人数の設定や使用可能な避難所、避難所の位置などによる避難完了時間の増減効果を知ることができた。さらに、亶理町の現状のネットワーク条件では、亶理町津波避難計画に記されている避難可能時間45分間で全員が避難することは難しく、何らかの対策が必要であることがわかった。また、避難完了時間短縮のための施策検討では、一時避難所の増設の効果が最も高く、避難完了時間を大幅に短縮できることがわかった。このように、本モデルは避難計画策定や避難完了時間短縮のための対策検討が可能であり、各自治体が事前の津波避難計画を議論する際の参考になり得ることを示した。

今後の課題としては、状況再現が可能であるシミュレーションなどを用い、今回設定した計算条件の妥当性も含め、最適避難計画モデルの効果を検証する必要がある。また、現在のモデルでは、交差点による交通容量の低下を反映していない。現実には、交差点での容量低下は必至であるため、交差点での交通量制約を与えたうえで、避難完了時間などについて議論すべきである。さらに、本研究で示した総避難時間最小化を下位問題とし、上位問題にネットワーク整備費用の最小化をもつレベルのネットワークデザイン問題が定義できると考える。

#### 参考文献

- 1) 中日新聞「半数以上が車で避難」、2014.2.3. .
- 2) 高知新聞「最大津波」と付き合う黒潮町 諦めない「思想」紡ぐ」、2016.3.18. <https://www.kochinews.co.jp/article/13677/> (2016.4.19閲覧)
- 3) 照本清峰：自動車利用を含めた津波避難ルール（案）に関する地域モデルの形成 -和歌山県みなべ町を事例とした実践に基づく検討、都市計画論文集 Vol.50No.3, 2015
- 4) 亶理町：アンケート結果（H25.6.9 防災訓練時実施）集計結果、2013年7月
- 5) 金進英, 片岡侑美子, 奥村誠：交通シミュレーションを用いた自治体の避難計画の評価、土木計画学研究・講演集, Vol.49, CD-ROM, 2014
- 6) 福田崇紀, 奥嶋政嗣：都市地域における津波避難計画策定のための自動車利用避難シミュレーションの適用、土木計画学研究・講演集, Vol.48, CD-ROM, 2013.
- 7) 片岡侑美子, 金進英, 奥村誠：実規模交通シミュレーションに基づく道路渋滞の分析、土木計画学研究・講演集, Vol.49, CD-ROM, 2014.
- 8) 金井昌信, 片田敏孝：“津波から命を守るための教訓”の検証～岩手県釜石市を対象とした被害日本大震災における津波避難実態調査から～, 災害情報, No.11, 2013.
- 9) 門野樹, 浅野光行；津波災害時における避難行動の対策評価—茨城県大洗町を対象として—, 土木計画学研究・講演集, Vol.46, CD-ROM, 2012

- 10) 柴山菜摘, 森田哲夫, 細川良美, 塚田伸也, 三上卓, 後藤洋三: 東日本大震災津波避難行動調査に基づく避難遅れの要因分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.46, CD-ROM, 2012
- 11) 倉内文孝: STEN (Space-Time Extended Network) を用いた最適津波避難計画モデルの構築, 土木計画学研究・講演集, Vol.50, CD-ROM, 2014.
- 12) 荒木麻里, 倉内文孝, 杉浦聡志: 時空間拡張ネットワークを用いた津波最適避難計画モデルの実ネットワークへの適用: 宮城県亘理町を対象として, 土木計画学研究・講演集, Vol.51, CD-ROM, 2015
- 13) Bell, M.G.H. and Iida, Y.: "1.11 Time Dependency", In *Transportation Network Analysis*, Wiley, 15, 1997
- 14) 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, 土木計画学研究・講演集, Vol.52, CD-ROM, 2015
- 15) Jarvis, J.J. and Ratliff, H.D.: Some Equivalent Objectives for Dynamic Network Flow Problems, *Management science*, 28, pp.106-108, 1982.
- 16) 災害対策基本法 (昭和三十六年十一月十五日法律第二百二十三号), 2015年7月
- 17) 中央防災会議: 防災基本計画, 2014年1月
- 18) 消防庁国民保護・防災部防災課: 津波避難対策推進マニュアル検討報告書, 2013年3月
- 19) 亘理町: 亘理町津波避難計画, 2014年2月
- 20) 亘理町: 行政区別年齢別集計表, 2013年5月
- 21) 亘理町: 避難所開設・運営マニュアル, 2014年2月
- 22) 国土地理院: 地理院タイル, 標準地図, 2014年4月
- 23) 国土交通省: 駐車場設計・施行指針について, 1994年9月

(2016. 4. 22 受付)

## OPTIMAL BIMODAL TSUNAMI EVACUATION PLANNING MODEL BY CAR AND ON FOOT

Souichiro YOKOYAMA, Hiroe ANDO, Fumitaka KURAUCHI and Satoshi SUGIURA

The Great East Japan Earthquake occurred in Japan in 2011. Subsequently, the Cabinet Office of Japan revised the Basic Disaster Management Plan and decided that evacuation by car should be admitted if unavoidable. But the efficient process of planning evacuation by car and foot has not been established yet. The previous study constructs an optimal evacuation planning model where the total evacuation time is to be minimised. But, it cannot consider evacuation by car and by walk because it is only considered a single mode (basically by car). Hence, this paper attempts to construct an optimal bimodal (by car and foot) evacuation planning model with the purpose of minimising the time to finish an evacuation for a more practical evacuation planning model. This model allowed for a more realistic optimal evacuation characterization and it is possible to aid in the drafting evacuation plans.