

徒歩と自動車での移動を考慮した津波災害における最適避難計画

岐阜大学 学生会員 ○横山宗一郎
 岐阜大学 正会員 倉内文孝
 岐阜大学 正会員 杉浦聡志

1. はじめに

東日本大震災では、助かった人の約半数が車避難を選択していた。一方で、渋滞に巻き込まれ避難が遅れた事例や、高齢社会に突入したため、徒歩での避難が困難な要避難支援者が増えてきており、地域の実情に合わせた避難計画が必要である。荒木らの先行研究¹⁾では、全ての経路を数え上げ避難時間最小化問題を解く経路ベースでの避難完了時間最小化モデルを提案しているが、計算量が膨大でありかつ避難者全員が自動車避難を行うと想定したモデルとして構築されたため、実用性に課題を残していた。本研究では、より実用性が高い徒歩と車の2モードでの最適避難計画モデルを構築し、津波災害に対する避難計画の策定に寄与することを目的とする。

2. 2モード最適避難計画モデルの定式化

多出発地単一目的地の動的ネットワークでは、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)は等価であることがJarvis and Ratliff²⁾により証明されている。また、徒歩と車での2つのモードによる避難を想定した最適避難計画モデルを構築するにあたり、リンク間においてモードが混合することによる悪影響を考慮できるモデルが必要である。さらに、避難所によっては車避難が不可能な避難所も存在しうる。それらを踏まえ2モード最適避難計画モデルを以下のように定式化する。

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

subject to

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

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

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

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

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

$$x_a + \beta_a^{pc} x_b \leq s_a^c$$

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

$$x_a + \beta_a^{cp} x_b \leq s_a^p$$

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

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

ただし、 \mathbf{K} : 避難所の集合 x : リンク交通量, c_e : 最終流出リンク a のコスト(始点ノードの時点), \mathbf{O} : 出発地ノード集合, \mathbf{N} : 中間ノード集合, $\mathbf{A}^c, \mathbf{A}^p$: それぞれ自動車および徒歩の通常リンクの集合, 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), 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), 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 に流出するモード m のリンクの集合($m=1$, 車, $m=2$, 徒歩), γ : 自動車の平均乗車人数(人/台), β_a^{cp} : リンク a の自動車の歩行者換算係数(人/台), β_a^{pc} : リンク a の歩行者の自動車の換算係数(台/人)。

式(2)~(4)はそれぞれ出発地ノード、避難完了ノード、それ以外のノードでの交通量保存則、式(5)、(6)は駐車場および避難所容量、(7)、(8)は車、徒歩でのリンク容量制約を示す。パラメータ β により各リンクにおける歩行者から見た車の、あるいは車から見た歩行者の影響の大きさを表現している。

3. 仮想ネットワークでの検証

図1の仮想ネットワークにおいて、各出発地から交通需要を発生させ、時空間拡張ネットワーク上で最適避難計画モデルを適用した。図1に示す各リンク情報は自動車専用リンクであり、便宜上歩行者専用リンクは、自動車専用リンクに対し所要時間を3倍、時間交通容量を6倍に設定して試算し、図2に徒歩と自動車の適正分担を表現した結果を示す。また、表1に避難者数及び避難所容量を、表2に計算

結果から得られた出発地と避難所におけるそれぞれのラグランジュ未定乗数の値を示す。各出発地のラグランジュ未定乗数は出発地の避難完了時間となり、各避難所のラグランジュ未定乗数は、避難所容量制約によって生じる遅れを示しており、この値が大きな避難所を増強させることで、避難完了時間の改善に繋がる。今回の仮想ネットワークにおいては、出発地 1, 4, 7 からの避難が一番長く 29 分であり、避難所 5 の駐車場容量を増強することが、避難完了時間の短縮に有効であることがわかる。しかし、4→7, 7→4 のように冗長経路が生じるなど課題も残る。

4. 実ネットワークの概要

前述した最適避難計画モデルを実ネットワークに適用する。対象地域は荒木ら同様、宮城県亶理郡亶理町とする。亶理町は、東日本大震災で最大深度 6 弱を観測、その後大津波に襲われた地域であり、津波により亶理町の面積の約半分である 3,493ha が浸水、最大浸水深は約 7.3m となった³⁾。亶理町は、太平洋に面し海岸部は平地部が続いており、周辺に高い場所が無く、西側の内陸部まで約 5km の距離があり徒歩での避難が困難、また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た津波避難計画を策定している。また、亶理町の津波避難計画では、避難手段や避難地域などを地域ごとに定めている。図 3 は本研究にて使用する亶理町の実ネットワークにおける、ノード及びリンクを示したものである。このネットワークにおいて、各地域から交通需要を発生させ、避難完了時間等を導出する。

5. おわりに

本稿では、2 モード最適避難計画モデルの定式化、仮想ネットワークでの計算結果を示し、実ネットワークの説明をした。今後は、モデルの改良を進め、実ネットワークにモデルを適用する。亶理町へのモデル適用結果については発表時に示す。

謝辞

亶理町における試行計算において、亶理町役場、東北大学国際災害科学研究所奥村誠教授、金進英助教(当時)にはデータの借用などにおいて多大なる協力を賜った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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: 宮城県亶理町を対象として, 土木計画学研究・講演集, Vol 51, CD-ROM, 2015
- 2) Jarvis, J J and Ratliff, H D: Some Equivalent Objectives for Dynamic Network Flow Problems, Management Science, 28, pp. 106-108, 1982
- 3) 亶理町防災会議: 亶理町地域防災計画第 2 編津波対策編, 2014 年 2 月

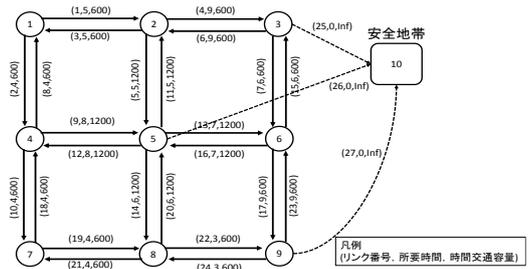


図 1. 仮想ネットワーク

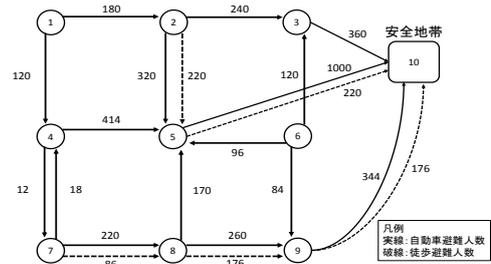


図 2. 仮想ネットワークの計算結果

表 1. 仮想ネットワークにおけるノード条件

ノード番号	避難者数	ノード番号	車の容量	避難者容量
1	300	3	Inf	Inf
2	600	5	500	Inf
4	300	9	Inf	Inf
6	300			
7	300			
8	300			

表 2. 仮想ネットワークにおける計算結果

出発地	ラグランジュ	避難所	駐車容量のラグランジュ	避難者容量のラグランジュ
1	29	3	0	0
2	25	5	8	0
4	29	9	0	0
6	15			
7	29			
8	17			



図 3. 計算に使用する実ネットワーク