

東北大学	学生会員	○片岡	侑美子
東北大学	正会員	金	進英
東北大学	正会員	奥村	誠

1. はじめに

これまで自動車を利用した避難は原則禁止とされていたが、東日本大震災を踏まえ、やむを得ない場合は自動車避難が認可された。それゆえ、今までの徒歩原則だった避難計画の見直しも必要になってくる。

本研究では、避難計画のために、徒歩と自動車の2つの移動手段を考慮した最適避難モデルを用いて、対象地域における津波避難計画を定量的に評価する。

2. 避難計画モデル

本研究では、倉内ら¹⁾が提案した避難計画における最適数理モデルを用いて、避難所への避難者の最適配分を行う。本節では、倉内らのモデルについて説明をする。

本モデルは、避難時に発生するコストの最小化を目的関数にした混合整数線形計画問題である。避難時の移動手段として車と徒歩を考慮し、道路が車と徒歩の両方で使用されたときに考えられる容量の低下や移動時間の増加も表現している。

目的関数は以下の式(1)のようである。交通手段ごとに車による避難を c 、徒歩による避難を p の添え字で区分して、時間帯 s にノード i から避難する人数、 q_{is}^c , q_{is}^p と、時間帯 s にリンク a を利用する避難者数、 x_{as}^c , x_{as}^p を未知変数とした、最小化問題である。第一項は滞留リスク、第二項は避難損失、第三項が所要時間を表している。

滞留リスクとは、時間の経過に伴って増加する被災地域のリスクであり、各ノード i における時間帯 s の一人あたりのリスクを r_{is} と定義する。ここで、 α は平均乗車人数である。避難損失とは、避難所にいることで生活する不便さを表し、時間帯 s にノード j に避難することによる1人あたりの損失(e_{js})と定義する。避難損失を定義したことにより、避難所に避難しない選択肢(垂直避難)も生じる。所要時間は、被災地域から避難所まで移動するために通ったリンク a の所

要時間(t_a)の総和で、 t_a の値は一定である。

車と徒歩の避難を比較すると、車避難ではリンク容量(c_{as}^c)は制限されるが、所要時間(t_{as}^c)は短い。徒歩避難では、リンク(c_{as}^p)容量は大きい、所要時間(t_{as}^p)が長くなる。共用時は、一つの手段のみで避難する場合に比べ、両方の容量は減少(k_{as}^c , k_{as}^p)して、所要時間は増加(l_{as}^c , l_{as}^p)する。ここで、避難時のリンクの使用有無を0と1のダミー変数 y_{as}^c , y_{as}^p , y_{as}^{cp} で定義する。ここで、添え字 cp は共用時を表す。

$\min$

$$\left\{ \sum_{s=1}^S \sum_i r_{is} q_i - \sum_{s=1}^S \sum_i \left(\sum_{s'=s}^S r_{is'} \right) (\alpha q_{is}^c + q_{is}^p) \right\} + \sum_{s=1}^S \sum_j \sum_{s'=1}^S (e_{js'}) (\alpha x_{a(j)s}^c + x_{a(j)s}^p) + \sum_{s=1}^S \sum_a (\alpha x_{as}^c (t_{as}^c + y_{as}^{cp} l_{as}^c) + x_{as}^p (t_{as}^p + y_{as}^{cp} l_{as}^p)) \quad (1)$$

制約条件は各ノードに対する避難発生交通量保存則(式(2)), 各リンクの容量制約(式(3), (4)), 各避難所の容量(f_j)制約(式(5)), 交通量保存則(式(6)~(9)), リンクの使用有無の制約(式(10), (11)), 非負条件(式(12))がある。

$$\sum_s \alpha q_{is}^c + q_{is}^p \leq q_i \quad \forall i, s \quad (2)$$

$$0 \leq x_{as}^c \leq (1 - y_{as}^p) c_{as}^c - y_{as}^{cp} k_{as}^c \quad \forall s, a \quad (3)$$

$$0 \leq x_{as}^p \leq (1 - y_{as}^c) c_{as}^p - y_{as}^{cp} k_{as}^p \quad \forall s, a \quad (4)$$

$$\sum_{s=1}^S (\alpha x_{a(j)s}^c + x_{a(j)s}^p) \leq f_j \quad \forall j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{a \in In(i)} x_{as}^c - \sum_{a \in Out(i)} x_{as}^c + q_{is}^c = 0 \quad \forall s, i \neq d \quad (6)$$

$$\sum_{a \in In(i)} x_{as}^c - \sum_i q_{is}^c = 0 \quad \forall s, i = d \quad (7)$$

$$\sum_{a \in In(i)} x_{as}^p - \sum_{a \in Out(i)} x_{as}^p + q_{is}^p = 0 \quad \forall s, i \neq d \quad (8)$$

$$\sum_{a \in In(i)} x_{as}^p - \sum_i q_{is}^p = 0 \quad \forall s, i = d \quad (9)$$

$$y_{as}^c, y_{as}^p, y_{as}^{cp} \in \{0, 1\} \quad \forall s, a \quad (10)$$

$$y_{as}^c + y_{as}^p + y_{as}^{cp} = 1 \quad \forall s, a \quad (11)$$

$$q_{is}^c, q_{is}^p \geq 0 \quad \forall i, s, \quad x_{as}^c, x_{as}^p \geq 0 \quad \forall i, s \quad (12)$$

3. 平野部地域における津波避難計画

3.1 シナリオ及びデータの設定

本研究では、倉内らのモデルを用いて津波を想定した数理避難計画を行う。まずは、データの設定について説明をする。対象とした地域は宮城県亶理郡亶理町で、海に面して平野部が続いており、海岸線から高台までの距離が 4km 以上あるのが特徴である。ここでの避難人口は平成 22 年国勢調査の昼間人口を用い、道路上のノードで発生することにした。避難時に車両を利用する場合の平均乗車人数は二人と仮定した。地震が発生した際、入路閉鎖するため高速道路は使わないこととし、6 つの時間帯に分けて計算する。

地域の危険度は地域を沿岸部から内陸にかけて、約 2km ずつ縦に三分割して設定した。計算簡略化のため、定数である目的関数第一項の $\sum_{s=1}^S \sum_i r_{is} Q_i$ を削除することで、滞留リスクはその時間帯に避難することによる危険度の軽減と定義できた。その値は、時間帯 1 の時は危険度の高い順に 180, 120, 60 とし、その後の時間帯では 6, 4, 2 ずつ減少するように設定をした。津波避難を前提とした場合、津波到着時間以内に必ず 1 次避難をする必要があるため、避難損失は全避難所 0 とした。

リンクの容量と速度は、道路の種別を参考にし、表 1 のように 10 分間の値を基準に設定した。道路を車両と徒歩が共用する時の容量減少率・所要時間増加率は、車、徒歩それぞれ 15%・25%減, 30%・10%増とした。

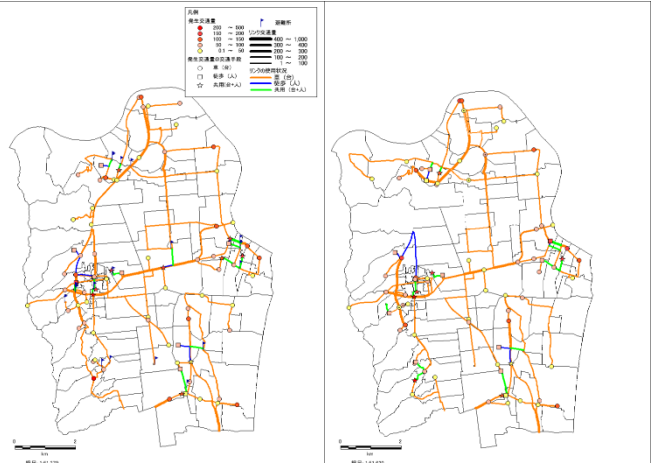
表 1. リンクの設定値

道路種別	リンク容量		自由流速度	
	車(台/10min)	徒歩(人/10min)	車(km/h)	徒歩(km/h)
国道	233	233	40	4
主要幹線道	210	117	40	4
一般道	210	117	30	4
その他	146	117	20	4

3.2 津波避難計画問題の計算結果

避難所の容量を制限しない場合と、容量を制限した場合（1500 人）に分けて避難計画モデルの計算の行った結果のうち、時間帯 1 (s=1) のネットワーク状況を示したのが、図 1 の (a) と (b) である。凡例のように、ノードの形で交通手段、ノードの色で発生交通量を、リンクの色で交通手段、リンクの太さでリンク交通量を表している。対象地域の左上を比べてみると、容量制限がある場合は迂回する車両が発生することが見られる。また、左中では、避難をやめる

ノードや、移動手段を変更しているノードがあることが分かる。一方、多くのリンクが車で利用され、当該地域は避難の際に車両の移動も有効だと言える。



(a) 避難所容量制限なし (b) 避難所容量 1500 人

図 1. 時間帯 1 (s=1) のネットワーク状況

避難所容量が制限された時の迂回度を把握するため、リンク長はそれぞれ異なるものの、各時間帯の使用リンク数で比較してみた（表 2 参照）。車両の場合は約 1.5 倍、徒歩は約 1.2 倍になり、避難所の容量が制限されると避難距離が長くなっていることが分かる。避難所の容量によって避難移動手段や避難距離が異なり、避難人口やネットワークを考慮しながら設定する必要があるといえよう。

表 2. 避難時に使用されたリンク数

避難所容量	手段	s=1	s=2	s=3	s=4	s=5	s=6	計
制限ない	車両	240	210	186	118	25	11	790
	徒歩	33	13	12	8	5	6	77
1500 人	車両	235	216	252	196	179	128	1206
	徒歩	37	20	10	7	10	10	94

4. おわりに

本研究では、倉内らによって提案されたモデルを沿岸平野部地域に適用することで、避難時の適切な移動手段や避難行動パターンについて分析を行った。

しかし、このモデルでは渋滞が発生しないため、より現実性のある避難計画を設けるためにはシミュレーションとの融合が必要であると思われる。また、目的関数でトレードオフになる滞留リスクと所要時間の設定値の妥当性検証も今後の課題となる。

【参考文献】

1) Kurauchi, F., Miara, T., and Takagi, A., Optimal Bimodal-evacuation Planning Model for Island Flooding, The 8th Annual Conference of International Institute for Infrastructure, Renewal and Reconstruction (IIIRR), B5-2, 2012