

車と徒歩での避難を想定した最適避難計画のモデル化

岐阜大学 学生会員 ○三荒智也

岐阜大学 正会員 倉内文孝 高木朗義 出村嘉史

1. はじめに

洪水災害では限られた時間内に安全な場所へ避難することが重要となる．またその避難計画を策定する上で移動手段を考えなければならない．東日本大震災では，徒歩での避難が現実的ではない地区もあれば，渋滞によって車で避難しきれなかった地域もあった．さらに，高齢者など車で避難を必要とする人も存在しており，従来の画一的な「徒歩での避難」を想定していることの妥当性に対する疑問が呈されている．本研究では，洪水災害に対し，車と徒歩での避難を想定した最適避難計画をモデル化する．

2. 最適避難計画モデルの構築

2.1 最適避難計画の考え方

本研究では，滞留リスク，行動制約損失，移動コストの3つを避難に関わる総コストとし，それを最小にする最適避難計画を考える．

滞留リスク：浸水などの危険が迫ることによる，その場にとどまることのリスク．

行動制約損失：避難所では行動が制約されることを想定した避難所の滞在時間に比例して増加する損失．

移動コスト：安全な場所へ移動するためのコスト．

上記の総和を最小化し，なおかつ時間帯ごとにすべてのリンク容量および避難所の受け入れ可能容量を満たすような最適避難の方法を求める．

2.2 最適避難計画モデルの定式化

最適避難計画モデルを下記の通り定式化する．

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

Subject to

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

$$\sum_{s=1}^S (\alpha x_{a(j)s}^c + x_{a(j)s}^p) \leq f_j \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{a \in In(i)} x_{as}^c - \sum_{a \in Out(i)} x_{as}^c + q_{is}^c = 0 \quad \forall s, i \neq d \quad (4)$$

$$\sum_{a \in In(i)} x_{as}^c - \sum_i q_{is}^c = 0 \quad \forall s, i = d \quad (5)$$

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

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

$$0 \leq x_{as}^c \leq (1 - y_{as}^p) c_{as}^c - y_{as}^{cp} k_{as}^c \quad \forall s, a \quad (8)$$

$$0 \leq x_{as}^p \leq (1 - y_{as}^c) c_{as}^p - y_{as}^{cp} k_{as}^p \quad \forall s, a \quad (9)$$

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

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

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

$$x_{as}^c, x_{as}^p \geq 0 \quad \forall i, s \quad (13)$$

ただし， x_{as}^m ：時間帯 s にリンク a をモード m で利用する避難者数， t_{as}^m ：時間帯 s にリンク a を利用した場合のモード m の所要時間， c_{as}^m ：時間帯 s のリンク a ，モード m の容量， q_{is}^m ：時間帯 s にノード i からモード m で避難する人数， q_i ：ノード i からの総避難人数， r_{is} ：時間帯 s にノード i に滞留する一人あたりのリスク， e_{js} ：時間帯 s にノード j に避難することによる一人あたりの行動制約損失， $In(i)$ ：ノード i へ流入するリンクの集合， $Out(i)$ ：ノード i から流出するリンクの集合， f_j ：避難所ノード j の容量（避難可能人数）， y_{as}^m ：避難経路の性質を決定するダミー変数， k_{as}^m ：モードごとのリンク a に関わる共用による容量減少量， l_{as}^m ：モードごとのリンク a に関わる共用による所要時間増加量， α ：平均乗車人数， m ：モード（ c ：車， p ：歩行者）．

本研究では，車および徒歩での2つの避難モードを想定するが，ある道路を歩行者のみあるいは車のみで利用する場合と比較して，共用する場合には両者の錯綜により，双方に容量の減少が生じるものとした．目的関数の第1, 2項は滞留リスク，第3項は行動制約損失，第4項は共用による所要時間増加を加味した移動コストを示しており，これらの総和を最小化することで最適避難方法を算出する．式(2)は車と徒歩での避難者数の和が総避難人数を超えない

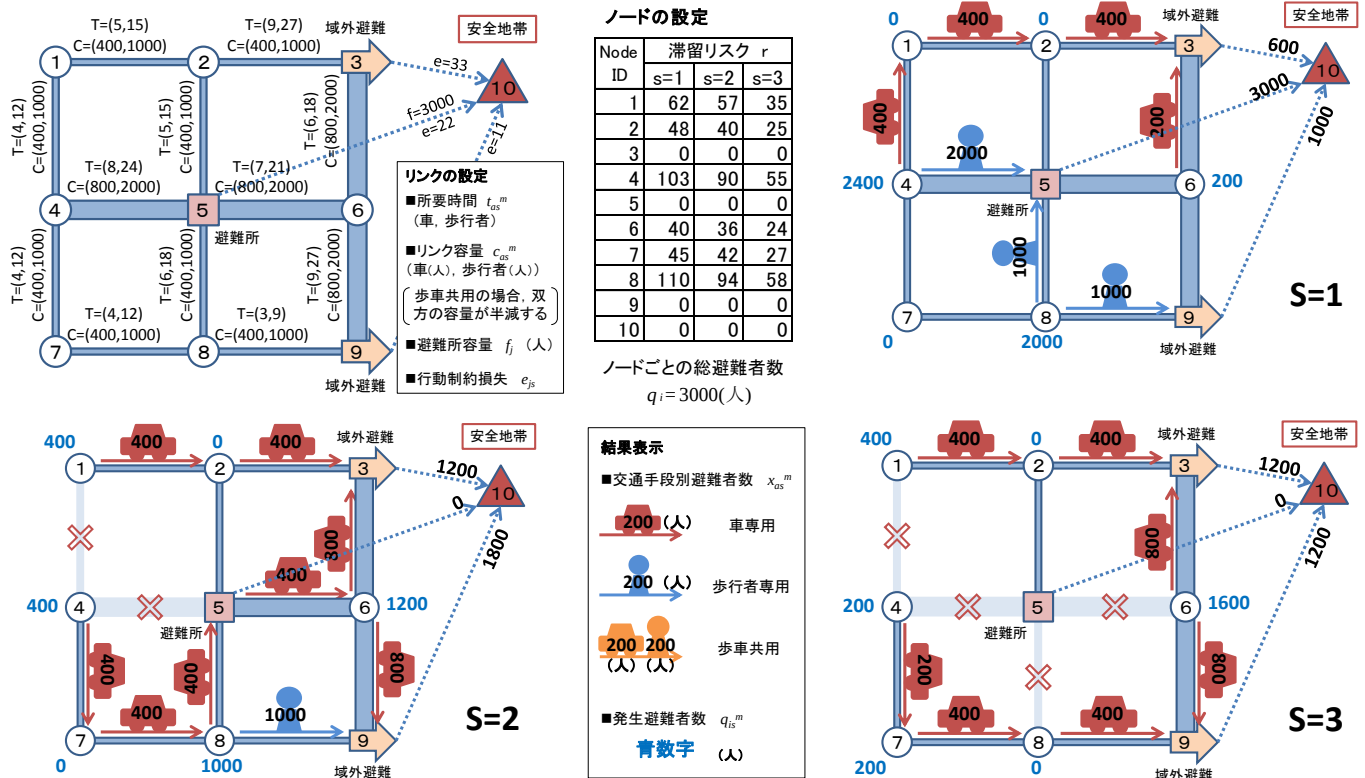


図 1 仮想ネットワークでの計算結果

制約である。式(3)は避難者が避難所の容量を超えない制約、式(4), (5)および(6), (7)はそれぞれ車と徒歩の交通量の保存条件、式(8), (9)は歩車共用による容量減少を考慮したモードごとのリンク容量の制約である。浸水等により道路が利用できない場合には、リンク容量を調節する。式(10), (11)は、各リンクの利用形態を示すダミー変数にかかわる制約条件であり、各リンクは車専用、歩行者専用あるいは共用のいずれかをとる。最後に式(12), (13)は非負制約条件である。未知変数は、 x_{as}^m , q_{is}^m , y_{as}^m である。紙面の都合上詳細は省略するが、この問題は適切な補助変数を導入することで、混合整数線形計画問題として定式化される。

3. 仮想ネットワークでの検証

仮想ネットワークの設定と計算結果を図 1 に示す。3つの時間帯を想定し浸水により一部道路が利用できない（図中の×）として最適避難方法を求めた。避難者数は各ノードから 3,000 人である。

計算結果を見ると、比較的早い時間帯において、ノード 4, 8 のような滞留リスクが大きいノードからの避難を促す結果となっている。また移動速度は遅いが、一度にたくさんの移動ができる歩行者を先に移動させている。このシナリオの総避難人数では、避難すべき人すべてを避難させることができず、ノ

ード 1 では 2,200 人、ノード 2 では 3,000 人、ノード 7 では 2,800 人は出発地にとどまることが最適となった。これらのノードは滞留リスクが低く、移動することの危険や損失よりその場に留まるほうが良いと判断されるためである。また、今回の計算では歩車共用が最適という結果は算出されなかった。同じリンクを歩行者と車で共用する場合、相互に負の作用が生じるためと考えられる。

4. おわりに

本研究では、今後の避難計画の策定に役立てるため、最適避難計画のモデル化と検証を行った。その結果、滞留リスクが大きいノードから、優先的に避難所に避難させるということが明らかとなった。また、車と歩行者を分離することが洪水時の避難において有効な手段になることがわかった。今後は、本モデルのインプットデータの作成方法を検討した上で実ネットワークにこのモデルを適用し、分析を進めていく予定である。

謝辞

本研究は、京都大学防災研究所共同研究「地震ならびに洪水を想定した災害発生時の交通管理と避難計画に関する研究」(23G-10, 2011～2012 年, 研究代表者: 倉内文孝) の研究成果の一部である。記してここに謝意を示す。