5M-03

歩車混合型の最速避難計画に関する研究

塙　洋介[†]　　加藤　直樹[†]　　瀧澤　重志[‡]　　東川　雄哉[†]

京都大学大学院工学研究科[†]　　大阪市立大学大学院工学研究科[‡]

１．はじめに

東日本大震災以降、一部地域では自動車の利用を考慮に入れた津波避難計画策定の必要性が出てきた。自動車による避難は渋滞を引き起こし被害を拡大させてしまうリスクがある一方で、適切な自動車避難の利用が、避難時間の短縮につながると予見される。多くの自治体では津波避難時の自動車利用に関するルールを検討しているが、対策が遅れているのが現状である。

本論文では歩車混合型の避難時間最小化問題を時間拡大ネットワークを用いた線形計画問題として定式化し、最適な自動車利用率の分布や各道路上での車道と歩道の割合を求めるアルゴリズムを開発し、実際の津波被害が予測される地域に適用することでその有効性を検討する。

２．ネットワークフロー問題

避難計画への数理的なアプローチとしてネットワークフローを用いるものがある。ネットワークフロー問題では、交差点と道路をそれぞれ点（ノード）と辺（エッジ）からなるネットワークグラフに置き換えることで、都市を単純なモデルとして扱う。ネットワークフローを用いた避難計画問題に関する研究として井上[1]は普遍的最速流をモデルを用いて、避難を扱う問題の定式化を行い、実際の都市に適用し考察を行った。最速フローモデルでは避難完了時刻の最小化を行い、避難完了時刻の下限や、その際の避難経路や避難所割当てを求めることができる。一方でネットワークフロー問題では、歩行者と自動車のように速度の異なる複数のフローをそのまま扱うことは困難とされている。本研究では一般のネットワークフロー問題に一部工夫を加えることで、多品種流のネットワークフロー問題を解く手法を提案する。

３．提案手法

本手法では、各ノードに対して、徒歩避難を行う人数と自動車避難を行う人数を変数として与え、各エッジには、道幅に対して車道が占める割合を変数として与えることで、二品種流のネットワーク問題を仮想的に２つのネットワークに分解し、それぞれを単品種流問題として扱う。ここでは時刻Θまでの避難完了者を最大化する最大フロー問題を繰り返し解くことで、避難者全員が避難を完了できる最小の時刻を特定する。歩車混合型の避難完了者数最大化問題を定式化すると次のようになる。

・入力データ

$N = (G = (V, A), b(v), d(a), w(a))$

$b(v)$：サプライ、$d(a)$：経路長、$w(a)$：道幅

・パラメータ（添え字 w は歩行者、c は車両を表す）

歩行速度：V_w＝1.0m/s 、走行速度：$V_c = 3.0$m/s

流動係数：$Q_w = 1.5$人/m･s 、Q_c＝0.25人/m･s

※流動係数：一秒間に道幅 1m を通過する人数

・変数

道幅に対して車道が占める割合：$x(a)$,$a \in A$

時刻 θ で辺 a に侵入する徒歩避難者数：$f_w(a, \theta)$

時刻 θ で辺 a に侵入する車両避難者数：$f_c(a, \theta)$

頂点 v の避難者の内、徒歩避難者数：$b_w(v)$

頂点 v の避難者の内、車両避難者数：$b_c(v)$

・目的関数

目標時刻までの避難完了者数を最大化する。

$$\text{maximize} \quad \sum_{s \in S} \sum_{a \in \delta^-(s)} \sum_{\theta=0}^{\theta - \lfloor d(a)/V_w \rfloor} f_w(a, \theta) + \sum_{s \in S} \sum_{a \in \delta^-(s)} \sum_{\theta=0}^{\theta - \lfloor d(a)/V_c \rfloor} f_c(a, \theta)$$

・制約式

① 容量制約

時刻 θ で辺 a に侵入する避難者数は辺の道幅によって上限が与えられる。

$$f_w(a, \theta) \le w(a) \cdot (1 - x(a)) \cdot Q_w$$
$$f_c(a, \theta) \le w(a) \cdot x(a) \cdot Q_c$$

② 流量保存則

0 からθまでの各時刻 t において、時刻 t までに頂点 v を出発する避難者数の総和の上限は、時刻 t までに頂点 v に到達した避難者と最初から頂点 v にいた避難者数の総和となる。

$$\sum_{a \in \delta^+(v)} \sum_{\theta=0}^{t} f_w(a, \theta) \le \sum_{a \in \delta^-(v)} \sum_{\theta=0}^{t - \lfloor d(a)/V_w \rfloor} f_w(a, \theta) + b_w(v)$$

$$\sum_{a \in \delta^+(v)} \sum_{\theta=0}^{t} f_c(a, \theta) \le \sum_{a \in \delta^-(v)} \sum_{\theta=0}^{t - \lfloor d(a)/V_c \rfloor} f_c(a, \theta) + b_c(v)$$

$$(t = 0, 1, \ldots, \theta)$$

③ サプライの制約

頂点 v のサプライは頂点 v から徒歩で逃げる人と車で逃げる人の和に等しい。

$$b(v) = b_w(v) + b_c(v)$$

４．実験

提案手法を実際の都市に適用し、その有用性を検討する。ここでは南海トラフ地震に伴う津波の被害が懸念され、実際に自動車の利用を検討している和歌山県みなべ町を対象とした。みなべ町では南海トラフ地震に伴い、最大津波高 14m の津波が地震発生後約 20 分で到達し、浸水面積は 450ha が予想されている。また、浸水予測地

A study on quickest evacuation planning under mixed traffic of cars and pedestrians

† Hanawa Yosuke , † Katoh Naoki, † Higashikawa Yuya , ‡ Takizawa Atsushi

†Graduate School of Engineering, Kyoto University

‡Graduate School of Engineering, Osaka City University

Copyright ©2015 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

域は海岸線から 1~2km にわたっており(図 1)、一部地域は津波の到達までに、浸水域外または最寄の避難ビルに徒歩で逃げることができない津波避難困難地域に指定されている。また、みなべ町は浸水予測地域を高速道路が横断し、IC（インターチェンジ）も存在するため、高速道路を活用する可能性も考えられる。

これらの現状を踏まえ、本実験では避難先別に以下の４つのシナリオを設定し避難時間の計算を行う。

・シナリオ１　避難先を浸水域外のみとする
・シナリオ２　浸水域外+津波避難ビル
・シナリオ３　浸水域外+IC
・シナリオ４　浸水域外+津波避難ビル+IC

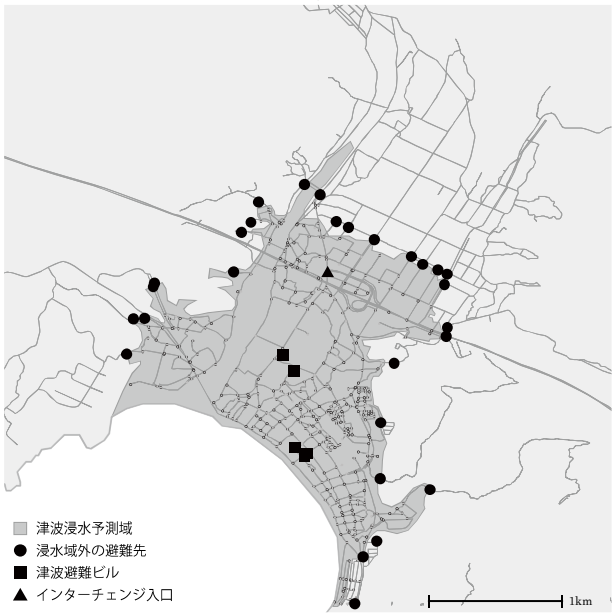

図１　対象地域道路ネットワークと避難先の分布

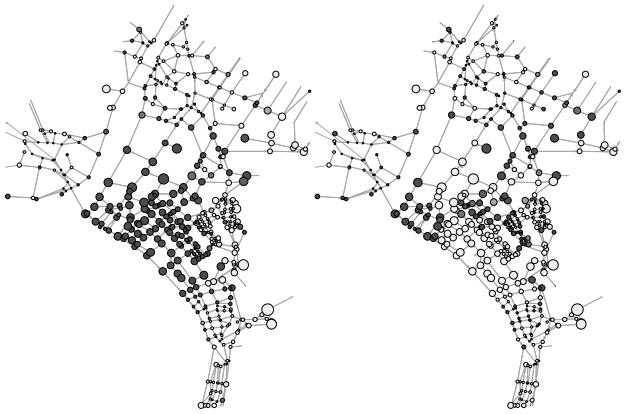

図２　シナリオ１（左）とシナリオ２（右）の結果の比較

実験の結果、いずれのケースにおいても歩行者のみの避難と比べて避難時間の短縮が見られた（表１）。当初の予想通り適切な車両利用が避難時間の短縮につながることがわかった。続いて結果の詳細を見ていく。

図２では、頂点のサイズがその点から出発する避難者数を表し、また頂点の色が濃ければ濃い程、車両避難の割合が高いことを表す。シナリオ１と２を比較すると、シナリオ２では避難ビルがある沿岸部の車両避難率が著しく低下しており、避難ビルの有用性が伺える。また、どちらの結果も比較的車両利用率の濃淡がはっきり分かれていることもわかる。一方で、シナリオ１、２に IC を追加して実験したシナリオ３、４では避難完了時刻の短縮は見られず、車両利用率の変化もほとんど見られなかった。これは、IC の入口から高速道路に上るまでの距離が長く、浸水域外へ逃げる距離とほとんど変わらなかったためと考えられる。

表１　各シナリオにおける実験結果

	避難時間	車両利用率	避難時間(徒歩のみ)
シナリオ１	10 分 30 秒	63.4%	24 分 55 秒
シナリオ２	9 分 5 秒	34.2%	17 分 30 秒
シナリオ３	10 分 30 秒	63.1%	24 分 55 秒
シナリオ４	9 分 5 秒	35.2%	17 分 30 秒

図３はシナリオ４における自動車と歩行者それぞれの経路の使用状況を表現している。線の太さが実際に占有している道幅、矢印の向きが進行方向、線の色が濃いほど、占有率が高いことを意味する。自動車が多くの経路を利用している一方で歩行者は限定的な使用に留まっている。これは自動車と歩行者の行動範囲の差からきているものと思われる。実際、津波避難ビル周辺の道路は歩行者の占有率が高く、自動車はほとんど使用していない。このことから歩車の効率的な棲み分けが効率的な避難につながることが予想される。

図３　シナリオ４における車道（左）と歩道（右）の利用割合

５．まとめ

本研究では、歩車混合の最適避難計画を計算する手法を開発し実際の都市への適用を試みた。その結果、車両避難割合の高い地域と低い地域が比較的はっきりと分かれることがわかった。また、みなべ町の場合、高速道路への避難が必ずしも避難完了時間の短縮に寄与しないこともわかった。今後はより多くの地域で本手法を適用することで、津波避難時における自動車避難のあり方を検討していきたいと思う。

謝辞

本研究の一部は東京大学空間情報科学研究センターとの共同研究で行われたことを付記する。

参考文献

[1]　井上雅樹, 普遍的最速フローモデルを用いた緊急災害時における避難計画手法に関する研究, 京都大学修士論文, 2011

Copyright ©2015 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.