

鎖流を用いた最速避難計画のモデルと長岡市水道町への適用

長岡技術科学大学 *稲川拓海 INAGAWA Takumi
05000489 長岡技術科学大学 住谷 安史 SUMITANI Yasushi
01309340 長岡技術科学大学 高橋 弘毅 TAKAHASHI Hirotaka

1. はじめに

近年、地震や津波などの大規模な災害が頻繁に発生している。特に、2011年3月に発生した東日本大震災では、防災無線の故障や防波堤の崩壊といった想定外の事態が多数起こり甚大な被害が生じた。地震調査研究推進本部によると、今後30年以内に南海トラフでマグニチュード8以上の地震が発生する確率は70%~80%とされている[1]。このような大規模な災害に対しては、事前に十分な避難計画を立てることが重要である。避難計画を考えるにあたっては、発生時の時間帯や人口分布、気象条件などの様々な場面を想定しておき、想定外の事態にも対処出来ることが必要になる。多数のシナリオに対して避難計画を立てるためには、高速計算が求められる。従来手法(例えば[2]など)では、時間拡大ネットワークを用いることが多く、(地図ネットワーク)×(期間)の計算量が必要になる。そのため、汎用のPCで手軽に計算することが難しかった。一方、加藤ら[3]により、時間拡大ネットワークを用いることなく最速避難の近似解を求めるアルゴリズムが提案されている。本研究では、加藤らの研究に基づきアルゴリズム実装し、その有効性の検証の第一歩として、新潟県長岡市水道町に適用した。

2. 最速避難計画問題の概要

最速避難計画問題とは、動的ネットワークを用いて、ネットワークの始点(ソース)から終点(シンク)までフローを流し、最速避難完了時刻を求める問題である。ソースは避難者(サプライ)、シンクは避難所の容量(シンク容量)をもつ。避難計画問題にネットワークフローを適用するために、道路上の交差点を頂点 $v \in V$ (V : 頂点集合)、交差点間の道路を辺 $a \in A$ (A : 辺集合)とした有向グラフ $G = (V, A)$ を定義する。各辺 a は、単位時間あたりに通過可能な避難者数の上限 $c(a) > 0$ と移動時間 $\tau(a)$ を与える。

避難計画問題では、動的ネットワークモデル $N = (D, c(a), \tau(a), b, S^+, S^-)$ が定義される。 $D = (V, A)$ は頂点集合 V と A からなる有向グラフ、 b は供給関数であり避難開始時点で各ソースに存在する避難者数を示

す。また、 S^+ はソース集合、 S^- はシンク集合である。動的フロー $f: A \times \mathbb{Z}_+ \leftarrow \mathbb{R}_+$ に対し、各辺 $a \in A$ と各時刻 $\theta \in \mathbb{Z}_+$ について、以下の制約が課されている。

容量制約:

$$f(a, \theta) \leq c(a) \quad (\forall a \in A, \forall \theta \in \mathbb{Z}_+). \quad (1)$$

フロー保存則:

$$\sum_{a \in \delta_D^+(x)} \sum_{\theta=0}^{\Theta} f(a, \theta) \leq \sum_{a \in \delta_D^-(x)} \sum_{\theta=0}^{\Theta - \tau(a)} f(a, \theta) + b(x). \quad (2)$$

需要制約:

$$\sum_{s \in S^-} \sum_{a \in \delta_D^-(s)} \sum_{\theta=0}^{\Theta - \tau(a)} f(a, \theta) = \sum_{x \in V} b(x). \quad (3)$$

ここで、式(2)における $\delta_D^+(x)$ は頂点 x からフローが流出する枝集合、 $\delta_D^-(x)$ は頂点 x からフローが流入する枝集合、 Θ は終了時刻である。また、式(3)における S はシンク集合である。

ヒューリスティクスとして鎖流を利用する[3]。まず、スーパーソース ss とスーパーシンク st をネットワークに追加する。次に、 ss と全てのソース間に、サプライの値を容量とする移動時間が0の辺を追加する。また、 st と全てのシンク間に、シンク容量を容量とする移動時間が0の辺を追加する。その後、 ss から st への移動時間を費用とした最小費用最大流を求める。求めたフローを辺素な有効路に分解し、各有効路にサプライを流す。この各有効路に沿ったフローを鎖流と呼ぶ。鎖流に沿いソースからシンクへサプライを流していく過程において「鎖流上にあるソースのサプライが全て流出して値が0になる」、「鎖流上にあるシンクのシンク容量上限までサプライが溜まる」のいずれかを満たした時点で鎖流を終了する。鎖流終了後、再び最小費用最大流を求め、新たな鎖流を求める。これらの計算を全てのサプライがシンクに到達するまでおこなう。

3. 新潟県長岡市水道町への適用

新潟県長岡市水道町の地理情報(図1)を基に、実装したアルゴリズムを適用した。道路ネットワークのデータ

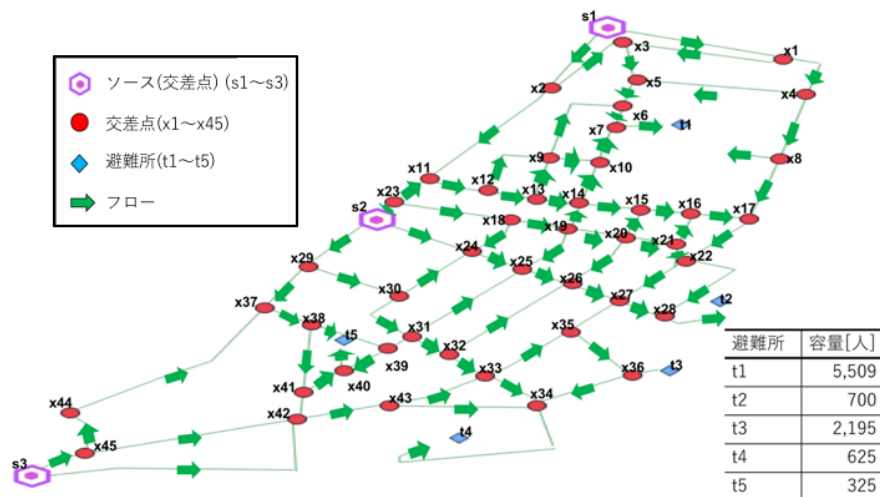


図 1: 新潟県長岡市水道町ネットワーク.

は、国土地理院が提供している基盤地図情報 [4] を、避難所の位置情報は長岡市が提供している避難所のオープンデータ [5] を利用し、また、その容量は図 1 に示すように仮定した。さらに、各辺の移動速度は、災害避難時の平均歩行速度とされている時速 2km を一率で採用した [6].

各避難所 ($t1 \sim t5$) の容量 (シンク容量) の合計 9,354 人を、ソース $s1$ のみ、 $s2$ のみ、 $s3$ のみ、および、 $s1 \sim s3$ に容量 1/3 ずつを設定の 4 パターンで与え、図 1 のネットワークを用いて、実装したアルゴリズムを適用した。得られた最速避難完了時刻 [sec] を表 1 に示す。表 1 において、 $s1$ のみに避難者を与えたときの最速避難完了時間が、 $s2$ のみ、 $s3$ のみに避難者を与えた場合と比較して小さな値になっている。これは、 $s1$ からの距離が最も近い避難所 $t1$ のシンク容量が、他の避難所と比較して大きく、効率的に避難行動をとることができていることに起因する。

表 1: シミュレーションの条件と結果.

避難者数 [人]			最速避難完了時刻 [sec]
$s1$	$s2$	$s3$	
9,354	0	0	5,520
0	9,354	0	8,443
0	0	9,354	8,796
3,118	3,118	3,118	3,146

4. おわりに

最速避難計画問題に対して、加藤ら [3] により提案されている鎖流を用いるアルゴリズムを実装し、新潟県長岡市水道町のデータを利用し避難終了時間を求めた。実装したアルゴリズムが正しく機能していることを確認できたため、今後は、アルゴリズムの拡張を進め、また、対象地域を拡大するなど、様々なケースを想定してシミュレーションをおこなう。

参考文献

- [1] 地震調査研究推進本部, 「南海トラフで発生する地震」, https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_kaiko/k_nankai/ (2019 年 7 月 1 日 閲覧).
- [2] Naoyuki Kamiyama, Atsushi Takizawa, Naoki Kato and Yuto Kawabata, “Evaluation of capacities of refuges in urban areas by using dynamic network flows”, The 8th International Symposium on Operations Research and Its Applications (LNOR 10), pp. 453–460, 2009.
- [3] 加藤直樹, 瀧澤重志, “最速避難計画のモデリングと解法”, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, Vol. 60 No.8, pp.437-442, 2015.
- [4] 国土交通省 国土地理院, 基盤地図情報サイト, <https://www.gsi.go.jp/kiban/index.html> (2019 年 7 月 1 日 閲覧).
- [5] 長岡市, 長岡市オープンデータ, <https://www.city.nagaoka.niigata.jp/shisei/cate10/> (2019 年 7 月 1 日 閲覧).
- [6] 国土交通省, 「2. 広域防災の拠点整備に関わる調査」, http://www.mlit.go.jp/kokudokeikaku/souhatu/h16seika/10bousai/10_sky2.pdf (2019 年 7 月 1 日 閲覧).