

動的ネットワークフローを用いた避難所の収容人数の評価

02104460 中央大学 *神山直之 KAMIYAMA Naoyuki
 京都大学 川端祐人* KAWABATA Yuto
 01104684 京都大学 加藤直樹 KATOHI Naoki
 京都大学 瀧澤重志 TAKIZAWA Atsushi

1. はじめに

近年、多発する大規模災害に対する危機管理システムの構築の必要性が叫ばれている。大規模災害時の避難において、十分な避難所の確保は非常に重要な問題の一つである。本論文では、現時点での避難所の収容人数が適正であるかを判断し、災害時にボトルネックとなる避難所を見つける問題を数理モデル化し、汎用的な解決方法を提案する。

避難所の収容人数の評価に対する一つアプローチとして、避難所をポロノイ点と考え、都市をいくつかのポロノイ領域に分割し、各領域内に存在する人の数と避難所の収容人数を比べる手法が考えられる。確かに、それぞれの人が最も近い避難所に避難するという仮定は妥当であると考えられるため、このアプローチは大変有益であるが、しかしこのアプローチにおいては都市のネットワークの構造を全く考慮に入れていないことが問題となる。そこで、本論文では、人の避難をネットワークフロー理論における動的ネットワークフロー [1] を用いて避難計画問題へとモデル化し、人々が最も効率的、つまり最速に避難した際の避難所への避難人数を用いることで、どの避難所がボトルネックとなっているかを発見する手法を提案する。

2. 定義

避難計画問題においては、点集合 V と辺集合 A を持つ有向グラフ $D = (V, A)$ 、容量関数 $c: A \rightarrow \mathbb{R}_+$ 、移動時間関数 $\tau: A \rightarrow \mathbb{Z}_+$ 、サプライ関数 $b: V \rightarrow \mathbb{R}_+$ 、そしてシンクの集合 $S \subseteq V$ で構成される動的ネットワーク $\mathcal{N} = (D, c, \tau, b, S)$ が与えられる。ただし、 \mathbb{R}_+ と \mathbb{Z}_+ は、それぞれ非負の実数と非負の整数の集合である。都市地域における避難計画を想定しているならば、点は建物、辺は道路をモデル化していると考えられる。辺 $a \in A$ に対して、容量 $c(a)$ は単位時間あたり a を通過す

ることのできる人数を、移動時間 $\tau(a)$ は a を通過するのに必要な時間を表している。点 $v \in V$ に対して、サプライ $b(v)$ は v に存在する人の数を表している。また、シンク集合 S への避難を考えているので、任意の $s \in S$ に対して $b(s) = 0$ 、そして s から出る辺はないと仮定する。この時、避難計画問題は全てのサプライをシンクまで流すことが可能な最小時間を求める問題である。形式的には、動的ネットワーク \mathcal{N} が与えられたとき、避難計画問題は以下のように定義される。

$$\text{minimize} \{ \Theta(f) \mid f \text{ は } \mathcal{N} \text{ で実行可能} \}.$$

ただし、動的フロー $f: A \times \mathbb{Z}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$ が以下の三つの条件を満たすとき実行可能であるとする。
 容量制約. 任意の $a \in A$ と $\theta \in \mathbb{Z}_+$ に対して

$$0 \leq f(a, \theta) \leq c(a).$$

フロー保存則. 任意の $v \in V$ と $\Theta \in \mathbb{Z}_+$ に対して

$$\sum_{a \in \delta(v)} \sum_{\theta=0}^{\Theta} f(a, \theta) - \sum_{a \in \rho(v)} \sum_{\theta=0}^{\Theta - \tau(a)} f(a, \theta) \leq b(v).$$

要求制約. 以下を満たす $\Theta \in \mathbb{Z}_+$ が存在する。

$$\sum_{s \in S} \sum_{e \in \rho(s)} \sum_{\theta=0}^{\Theta - \tau(e)} f(e, \theta) = \sum_{v \in V} b(v). \quad (1)$$

ただし、 $\delta(v)$ と $\rho(v)$ は、それぞれ A の辺の中で始点と終点が v の辺の集合、 $\Theta(f)$ は (1) を満たす最小の Θ である。この問題に対しては、Hoppe and Tardos [2] によって多項式時間アルゴリズムが提案されているが、本論文では実装の容易さと拡張性より Ford and Fulkerson [1] によって提案された時間拡大ネットワークを使用した。

ここで、本論文で提案する動的ネットワークフローを用いた避難所の収容人数の評価の方法を説明する。上記の避難計画問題の定義では各避難所

*現在, NTT AS 研.

つまりシンクに対する容量は設定されていなかったが、ここではある一定の人数制限が与えられているとする。そして、このときの最速フローを求め、そのフローに対して容量の限度まで流れているシンクを見つけることにより、避難の際ボトルネックとなる避難所を見つけることができる。

3. 数値実験

本節では、京都市の道路網データ (空間データ基盤 25000, 平成 15 年) を用いた数値実験の結果を紹介する。まず、使用する道路データに関しては、幅員が 4 メートルから 13 メートルの道路を 3 段階に離散化して用いる。避難者の人数は、各行政区の人口が一様に分布しているものとしてみならず。また、使用する避難所に関しては広域避難所を扱った (図 1)。

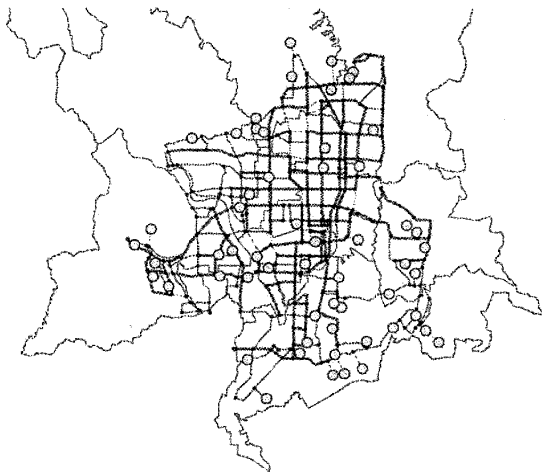


図 1: 京都市内の避難所の位置。ただし図中の丸は避難所の位置を表している。

図 2 は全人口の 20% が避難した時の避難所の様子を表している。この図より、京都市北西部の避難所は、この段階で既に満員となっており、収容人数が十分ではないことがわかる。

また、図 3 は全人口の 50% が避難した時の避難所の様子を表している。この段階になると京都市の中心部の避難所に関しても、満員となる所が多くなっている。しかし一方、南東部周辺においては、まだ避難所の収容人数に関して余裕があり、京都市全体としては避難所の配置のバランスに改善の余地があることがわかる。

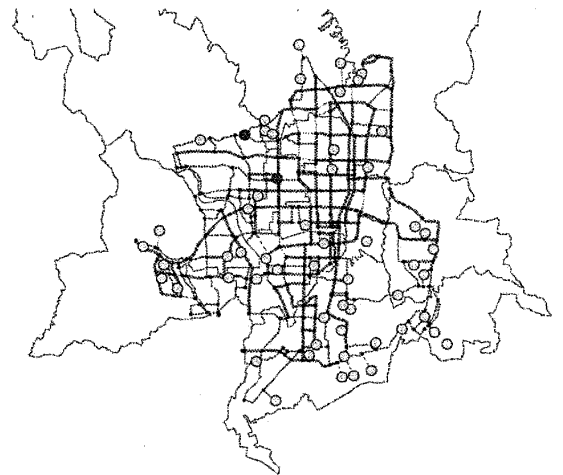


図 2: 全人口の 20% が避難した時の避難所の様子。ただし、色の濃い丸は満員となっている避難所を表している。

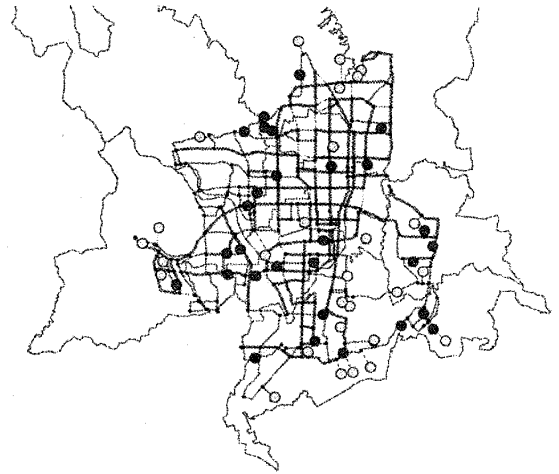


図 3: 全人口の 50% が避難した時の避難所の様子。

4. 今後の課題

本論文では、避難の際にボトルネックとなる避難所を求めることを目的としたが、今後の課題としては避難の際、多くの人々が滞留する、ボトルネックとなる道路を見つける手法を提案することがあげられる。

謝辞. 本研究は科学研究費補助金基盤研究 (B) (21300003) の補助のもとで行われました。

参考文献

- [1] L. R. Ford Jr and D. R. Fulkerson. *Flows in Networks*. Princeton University Press, 1962.
- [2] B. Hoppe and É. Tardos. The quickest transshipment problem. *Mathematics of Operations Research*, Vol. 25, No. 1, pp. 36–62, 2000.