

代表ノード抽出による避難施設候補地の推定

伏見 卓恭† 齊藤 和巳‡ 池田 哲夫§ 風間 一洋¶

†東京工科大学 ‡神奈川大学 §静岡県立大学 ¶和歌山大学

1 はじめに

近年、日本をはじめ、世界中で災害が多発している。災害発生時には、住民の速やかな避難により被害を減らすことができる。したがって、避難所の設置場所は近隣の住民からアクセスしやすい必要がある。さらに、災害時には、河川の氾濫や地割れ、家屋や電柱の倒壊により、避難経路上の道が閉塞する可能性が高い。このような状況下であっても、避難施設は孤立せず、多くの住民が辿り着ける必要がある。本研究では、道路網のグラフ構造に着目し、確率的リンク切断により災害時の道路閉塞をモデル化し、適切な避難所設置場所を推定、推薦する手法を提案する。

グラフ上での施設配置問題は k -median 問題として研究されており、効率的な近似解法も提案されている [3, 4]。また、災害による道路閉塞により対象地域は分断されるが、リンク切断によるグラフのコミュニティ抽出とみなせる。様々なコミュニティ抽出手法 [2, 1] が提案されているが、道路ネットワークでは次数分布がほとんど一様分布であり、一般のネットワークと比較して最大次数が高くないため、既存手法では適切な結果は得られない。

本研究では、確率的に発生するリンク切断によりグラフがいくつかのサブグラフに分断される状況において、多くのノードに到達可能なノード、すなわち、大きな連結成分に属するノードを抽出し、そのノードを避難所設置場所として提示する。具体的には、各ノードの連結度を、各リンク切断確率における可到達ノード数の期待値により定義した連結中心性を提案する。

2 提案手法

提案手法では、確率的リンク切断下での可到達ノード数の期待値により各ノードの連結度を定義する。交差点をノード、2つの交差点間の道をリンクとし、 N 個のノードの集合 \mathcal{V} と L 本のリンク集合 \mathcal{E} からなる無向の道路ネットワークを $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ と表記する。いま、各リンク $e \in \mathcal{E}$ に対して、地理的性質などに基づく道路の閉塞モデルにしたがって決定されるリンク非切断

確率 $p(e; s)$ が与えられたとする。ここで $0 \leq s \leq 1$ は、災害の規模などの非切断確率を制御するパラメータである。そして、ノード $v \in \mathcal{V}$ の連結度を以下のように定義する：

$$cnc(v) = \int_0^1 \sum_{\mathbf{x} \in \{0,1\}^L} |c(v; G_{\mathbf{x}})| q(\mathbf{x}; s) r_1(s) ds. \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{x} は全 L 本のリンクに対するリンクの状態を表す確率変数の実現値ベクトルであり、リンク $e \in \mathcal{E}$ が切断されている状態では $x(e) = 0$ 、切断されていない場合は $x(e) = 1$ である。さらに、 $G_{\mathbf{x}}$ は、 2^L パターンの中の1つの実現値 \mathbf{x} におけるグラフ構造を表しており、 $c(v; G_{\mathbf{x}})$ はグラフ $G_{\mathbf{x}}$ におけるノード v の可到達ノード集合、すなわち、同一の連結成分に含まれるノードの集合を表す。 $q(\mathbf{x}; s) = q(G_{\mathbf{x}}; s) = \prod_{e \in \mathcal{E}} p(e; s)^{x(e)} (1 - p(e; s))^{1-x(e)}$ は、全リンクに対する独立なベルヌーイ試行に基づき計算する $G_{\mathbf{x}}$ の発生確率である。提案手法では、積分区間を H 個に分割し、 J 回のシミュレーションに基づき効率的に近似値を求める。

確率的リンク切断の状況下において、隣接するノードどうしは同一の連結成分に属する可能性が高く、連結度の値も近い値を示す。単に連結度の高いノードを避難所設置候補地とすると、ある特定の地域に偏って避難所を設置することになってしまう。そこで、他の設置場所との位置関係を考慮して候補地を推定するために、集合連結中心性と呼ぶ指標に拡張する。集合連結中心性では、ノード集合 \mathcal{R} の連結度を以下のように定義する：

$$cnc(\mathcal{R}) = \int_0^1 \sum_{\mathbf{x} \in \{0,1\}^L} |c(\mathcal{R}; G_{\mathbf{x}})| q(\mathbf{x}; s) r_1(s) ds. \quad (2)$$

ここで、 $c(\mathcal{R}; G_{\mathbf{x}}) = \bigcup_{r \in \mathcal{R}} c(r; G_{\mathbf{x}})$ は集合 \mathcal{R} の少なくとも1つの要素 $r \in \mathcal{R}$ へ到達可能なノードの集合を表す。避難所設置の観点では、より多くのノードから到達可能であることが望ましいため、 $cnc(\mathcal{R})$ を最大にするようにノード集合 \mathcal{R} を求める。以降、抽出したノードを代表ノードと呼び、代表ノードを避難所設置候補地とする。連結中心性と同様に、 J 回のシミュレーションに基づき効率的に近似値を求める。本研究では、 $K = |\mathcal{R}|$ 個の設置候補地を貪欲法により抽出する。その後、残りのノードを最も連結度の高い代表ノードのコミュニティに割り当てる。

Estimation of Evacuation Facility Locations Based on Representative Nodes Extraction

†Takayasu FUSHIMI

†Tokyo University of Technology

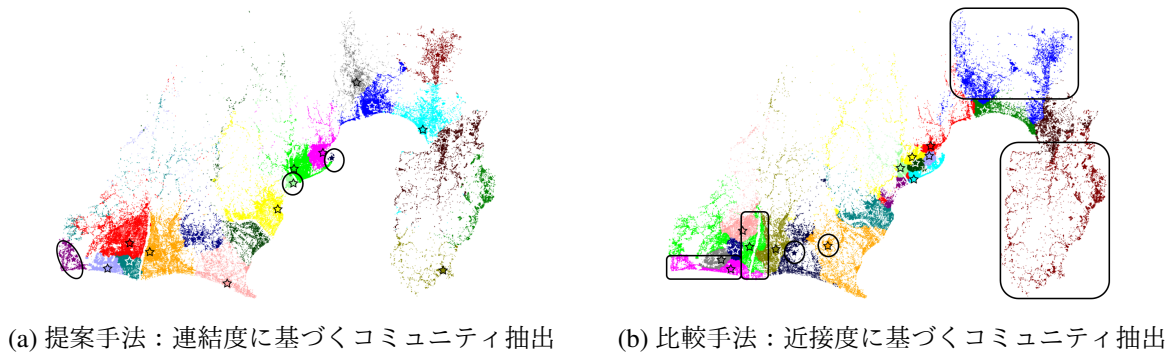


図 1: 避難所設置候補地と抽出領域

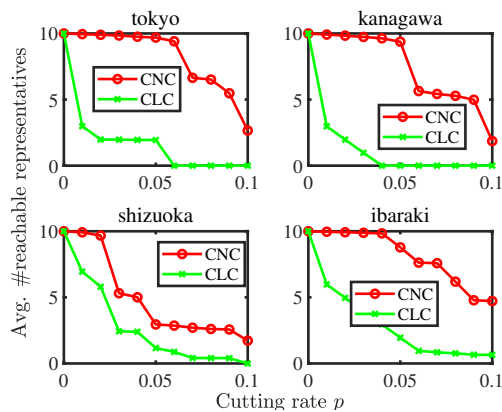


図 2: 推定設置場所への到達性

3 評価実験

評価実験では、静岡県、神奈川県、東京都、茨城県の4つの道路網を対象に、シミュレーション回数を $N = 10,000$ 、避難施設設置数を $K = 20$ で提案手法を評価する。比較手法として、近接度（グラフ距離）に基づく中心性指標である近接中心性を拡張した集合近接中心性に基づき代表ノードを抽出し、グラフ距離によりボロノイ分割することで各代表ノードのコミュニティを抽出する。

図 1 は、静岡県道路網に対するコミュニティ抽出結果であり、星ノードは集合中心性により抽出した代表ノード（候補地）を表しており、ノードの色はコミュニティを意味している。図 1(a) を見ると、提案手法は山岳エリアを避けて代表ノードを抽出しており、おおそ大きな川や山などの自然環境によりクラスタリングされている。丸で囲った代表ノードは湖畔や半島などに位置しており孤立しやすいが、近傍に多くのノードが存在しており、避難所が必要な領域である。

図 1(b) を見ると、丸で囲った代表ノードは山の上に位置しており、災害時に避難しにくい場所が抽出されている。四角で囲ったコミュニティは河川や山にまた

がって分布しており、災害時に閉塞しやすく避難所に到達できない可能性がある。

次に、エッジ媒介中心性ランキングにおいて上位 $p\%$ のエッジを切断した状況下で、避難所設置候補地への到達可能性を定量的に評価する。図 2 は、切断リンクの割合 p に対する各ノードからの平均可到達代表ノード数を表す。図 2 から、4つのネットワークにおいて、近接度に基づく比較手法（CLC）より連結度に基づく提案手法（CNC）の方が平均可到達代表ノード数が高いことがわかる。特に、全リンクのうち10%が閉塞しても住民は少なくとも1つの避難施設に辿り着けることが確認できる。

4 おわりに

本研究では、災害における道路閉塞を確率的リンク切断によりモデル化し、可到達ノード数の期待値によりノードの連結度を定義した。連結度の高いノードを避難所設置候補地として抽出した結果、近接度に基づく手法と比較して、適切なノードを抽出できることを確認した。今後は、人口密度を考慮したモデルに拡張する予定である。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 (No.17H01826) (No.18K11441) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Blondel, V. D. et al.: Fast unfolding of communities in large networks, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, Vol. 2008, No. 10, p. P10008 (2008).
- [2] Clauset, A. et al.: Finding community structure in very large networks, *Phys. Rev. E*, Vol. 70, No. 6, pp. 066111+ (2004).
- [3] Jain, K. et al.: A New Greedy Approach for Facility Location Problems, *Proceedings of the Thirty-fourth Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, pp. 731–740 (2002).
- [4] Tabata, K. et al.: An Efficient Approximate Algorithm for the 1-Median Problem on a Graph, *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol. E100.D, No. 5, pp. 994–1002 (2017).