

移動連結性に基づく都市避難候補地の選定法 Selection Method for City Evacuation Facilities Based on Reachability Centrality

塚本 竜太郎[†]
Ryutaro Tsukamoto

斎藤 和巳[†]
Kazumi Saito

1. はじめに

本研究は、大規模災害におけるユーザ行動モデルを構築することにより、災害発生時の減災に有用となり、道路網安全性の向上に資する技術の確立を目的とする。東日本大震災や阪神淡路大震災の際には、一部の道路リンクが切断されることにより、他の地域から孤立する地域が発生したり、異なる地点間の最短経路長が大幅に増えたりして、連結信頼性の深刻な低下をもたらした。自然災害発生時に一部の道路リンクが切断され道路網が複数のサブネットワークに分断されたとき、サブネットワーク内には住民の一時避難所や物資蓄積庫が存在することが必須であり、また、サブネットワーク内の一時避難所への到達時間や物資蓄積庫間の輸送時間は短い必要がある。

先行研究では、上記の機能要求に応えるための信頼性指標として、移動連結性を提案した [1]。移動連結性は、人間関係などソーシャルネットワーク上での影響最大化問題 [2] の考え方を土台にし、拡張したものである。本研究では、移動連結性の考え方を土台にし、ある交差点を新たな避難地としたときに、全体として移動連結性がどれ程高まるかを示す指標として、改善度を提案する。また、全リンクの切断確率を変化させながら道路を分断させた場合のシミュレーションにより、静岡県にある三つの主要都市ごとに、改善度の上位 10 地点を示す。それを新たな候補の避難地と考え、都市ごとの避難地配置の特徴、閉塞確率を変化させたときの避難地配置の変化の仕方を調べる。

2. 提案分析法

大規模災害により複数個所の道路閉塞が起こり得る状況で、多数の移動主体（住民など）が起点から目的地（避難地など）に移動する基本行動モデルを定義する。 $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ を道路網の無向グラフ構造とし、 $\mathcal{V} = \{u, v, w, \dots\}$ は交差点に対応するノードの集合、 $\mathcal{E} = \{e = (u, v), \dots\}$ は交差点間の道となるリンクの集合を表すとする。また、 \mathcal{D} を目的地の集合とし、便宜上、それぞれを最寄りのノード（交差点）に対応させ $\mathcal{D} \subset \mathcal{V}$ であるとする。同様に、移動主体の起点もノードに対応させ、ノード u が起点の主体数を $n(u)$ とし、その総数を $N = \sum_{u \in \mathcal{V}} n(u)$ とする。一方、各リンク $e = (u, v)$ に対し、ノード間距離、平均移動速度、及び、(平均) 移動時間 $t_G(u, v)$ が付与されているとする。任意のノードペア u と w の間での移動時間 $t_G(u, w)$ は、これらをつなぐ任意の経路上のリンク移動時間の総和を考え、その最小値（測地距離）として定義する。このとき、目的地に可到達なノード集合を $\mathcal{R}_G(\mathcal{D})$ とし、その主体数を $N_G(\mathcal{D}) = \sum_{u \in \mathcal{R}_G(\mathcal{D})} n(u)$ とする。

道路閉塞モデルに基づき、各リンク $e = (u, v)$ に対し閉塞確率 $p(u, v)$ を設定し、 M 回の独立シミュレーションを実施すれば、移動可能リンク集合が $\mathcal{E}_m \subset \mathcal{E}$ に制限された道路網構造 $G_m = (\mathcal{V}, \mathcal{E}_m)$ を要素とする M 個のグラフ集合 $\{G_1, \dots, G_M\}$ を生成できる。本研究では、十分大きな M に対して、目的地に可到達な移動主体割合を意味する移動連結性 $C_G(\mathcal{D})$ を次式で定義する。

$$C_G(\mathcal{D}) = M^{-1} \sum_{m \in \{1, \dots, M\}} \frac{N_{G_m}(\mathcal{D})}{N_G(\mathcal{D})} \quad (1)$$

明らかに、 $0 \leq C_G(\mathcal{D}) \leq 1$ であり、対象とする道路閉塞モデルで、これを 1 近くに保てる目的地集合 \mathcal{D} は、起こりうる道路閉塞に対し期待値として頑健と言える。

また、目的地集合 \mathcal{D} に、ある一つの交差点 v が要素として加わった時の移動連結性を $C_G(\mathcal{D} \cup \{v\})$ とする。 $C_G(\mathcal{D} \cup \{v\})$ と $C_G(\mathcal{D})$ の差を移動連結性の改善度とし、次式で定義する。

$$f(v) = C_G(\mathcal{D} \cup \{v\}) - C_G(\mathcal{D}) \quad (2)$$

改善度 $f(v)$ は、後ほど、都市ごとの新たな避難候補地を調べる際の手がかりとして使用する指標である。

3. 実験による評価

本研究では、OSM (OpenStreetMap) データ [3] を元に道路網の構造 $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ を求めた。静岡県の三つの主要都市である浜松市、沼津市、静岡市に着目し、表 1 に実験で用いた各都市の道路網のノード数とリンク数、避難地数を示す。

表 1: 道路網データの概要

	ノード数	リンク数	避難地数
浜松	104,813	255,296	432
沼津	44,980	97,098	232
静岡	53,903	132,888	363

この三都市の道路網データにおいて、全リンクの切断確率 p を $p \in \{2^{-10}, 2^{-9}, \dots, 2^{-1}\}$ で変化させたときの、最も移動連結性の改善度 $f(v)$ が高い値を示した交差点 10 地点を地図上にプロットした。図 1 は、32 本に 1 本の割合で道路が分断される場合の、改善度上位 10 地点を都市ごとにマークで示したものである。浜松市の結果では公園、沼津市の結果では江浦湾の海岸付近、静岡市の結果では浜松市と同様に、公園に多くのマークが集まった。浜松市で改善度の上位 10 地点が集まった天竜川運動公園は、すぐ東側に天竜川という大きな川がある。この付近で川の両脇の土地を結ぶ唯一

[†] 静岡県立大学 経営情報学部



図 1: 閉塞確率 1/32



図 2: 閉塞確率 1/8

の連絡路である県道 61 号が分断された場合、この公園の付近に避難地がないと、川の西側に住む大勢の住民が避難地にたどり着けなくなると考えられる。沼津市でマークが集中した海岸沿いの土地は、周りが江浦湾と山脈に囲まれているため、この土地に住む住民は孤立しやすいと考えられる。静岡市でマークが集中した公園の北側と東側には、住宅密集地が存在する。この二つの住宅地は山脈や高速道路に囲まれており、孤立しやすい地域のため、この公園付近に避難地が存在することは、住民の連結信頼性を高めるうえで重要だと考えられる。

図 2 は、8 本に 1 本の割合で道路が分断される場合の、改善度上位 10 地点を都市ごとにマークで示したものである。浜松市の結果でマークが集中した地点は、北側に航空自衛隊浜松基地、両脇に河川で挟まれており、特に自衛隊基地側には一本も連絡路がないため、まさに孤立しやすい地域といえる。沼津でマークが集中した地点は、黄瀬川と狩野川という大きな河川に囲まれた住宅地である。また、県道という大きな幹線道路に集まっている点も特徴的である。静岡市の結果では、改善度上位 10 地点のすべてのマークが、大きな公園と山脈に囲まれた住宅密集地の交差点上を示した。

以上の結果から、全体的な傾向として、マークは住宅地といった比較的多くの住民がいる地点で、なおかつ大きな幹線道路や河川、公園や山脈に囲まれた孤立しやすい地点に集中することが分かった。このような移動連結性の改善度が高い交差点に新たな避難地を作ることによって、災害時に避難地に到達可能となる住民数が大幅に増えるため、前述のような傾向のある地点を新・避難候補地とする考え方が望ましいと考える。また、閉塞確率が大きな値になるに従って、マークが

示す地点が山間部から都市部周辺に移っていくという傾向が見られた。これは、都市部には道路が多いため、閉塞確率が低い場合は移動連結性の値が小さくなりにくい性質があることに起因すると考えられる。このことから、多くの道路が分断される大規模災害を想定する場合、より都市部に近い地域に避難地を設定することが望ましいと考えられる。

4. おわりに

本研究では、移動連結性の考え方を土台にし、ある交差点を新たな避難地としたときに、全体として移動連結性がどれ程高まるかを示す指標として、改善度を提案した。また、浜松市、沼津市、静岡市を対象に、改善度の上位 10 地点の交差点を示し、マークが示す地点の傾向から、新・避難候補地とすべき場所を調べた。

今後の研究では、静岡県以外の、多様なデータでの検証を進めたい。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金基盤研究 (C)(No.15K00429) の助成を受けた。

参考文献

- [1] 塚本竜太郎, 斉藤 和巳, ”移動中心性と移動連結性による都市避難地の比較評価,”情報処理学会第 79 回全国大会 (IPSJ2017), Mar.2017.
- [2] D.Kempe, J.Kleinberg, and E.Tardos “ Maximizing the spread of influence through a social network ” Theory of Computation, vol.11, pp.105-147, 2015.
- [3] Open Street Map, www.openstreetmap.org