

複雑ネットワーク分析アプローチによる 追加避難施設の設置候補地選定法

Selecting candidate locations of additional evacuation facilities based on a complex network analysis approach

○湯瀬 裕昭¹, 武藤 伸明¹, 大久保 誠也¹, 池田 哲夫¹, 斉藤 和巳¹
Hiroaki YUZE¹, Nobuaki MUTOH¹, Seiya OKUBO¹, Tetsuo IKEDA¹ and
Kazumi SAITO¹

¹ 静岡県立大学 経営情報学部
School of Management and Information, University of Shizuoka

We address the problem of modeling and analyzing human behaviors under situations like disaster, and to this end, we propose a notion of group connectedness centrality based on a complex network analysis approach. As its typical application, we consider selecting candidate locations of additional evacuation facilities so as to minimize the expected number of persons who cannot move to such facilities, and formalize it as a node (junction) selection problem from a given road network. In our simulations using three major cities in Shizuoka prefecture, we experimentally evaluate the characteristics of the selected locations by changing the road blockage probabilities.

Keywords : complex network, evacuation facility, node selection problem

1. はじめに

日本は、各種の自然的条件から、台風、豪雨、地震などの自然災害が発生しやすい。2000年から2009年にかけてのマグニチュード6.0以上の地震回数は、世界全体の20.5%を占める¹⁾など、世界的に見ても地震の多い国である。21世紀に入ってから、新潟県中越地震、東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震など大きな地震が起り、多大な被害を受けている。地震だけではなく、2015年9月の関東・東北豪雨、2017年7月の九州北部豪雨などによる豪雨災害も起こっている。

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2016年熊本地震の際には、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、時間信頼性²⁾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、移動連結性と移動中心性を提案した^{3,4)}。近年、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⁵⁾と、複雑ネットワークにおける中心性分析問題⁶⁾は、ネットワーク科学分野で注目を集め、多様に研究されている。移動連結性・移動中心性はこれらの考え方を土台にし、拡張したものである。本研究では、静岡県にある三つの主要都市ごとで、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、移動中心性と移動連結性の変化状況を調べたシミュレーション結果を、

グラフを用いて示す。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、移動中心性の改善度の上位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や、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。また、上位地点の現地調査を行い、それを踏まえて上位地点についての考察を行う。

2. 提案手法

大規模災害により複数個所の道路閉塞が起り得る状況で、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、これらをつぶ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 $N_G(\mathcal{D}) = \sum_{u \in \mathcal{R}_G(\mathcal{D})} n(u)$ とすれば、起点から目的地までの移動に必要な最短時間の平均 $A_G(\mathcal{D})$ は次式で与えられる。

$$A_G(\mathcal{D}) = N_G(\mathcal{D})^{-1} \sum_{u \in \mathcal{R}_G(\mathcal{D})} n(u) \min_{w \in \mathcal{D}} t_G(u, w) \quad (1)$$

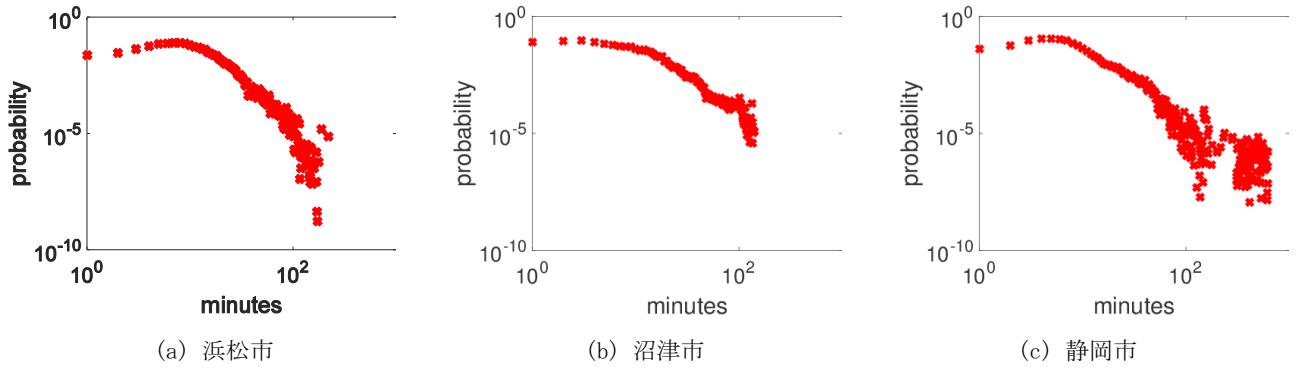


図 1 到着時間分布

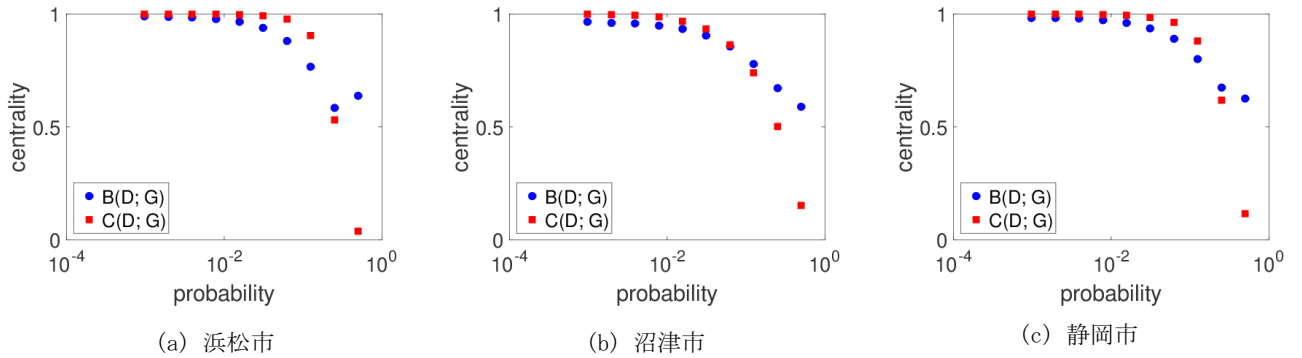


図 2 移動中心性と移動連結性のシミュレーション結果

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。また、 $A_G(\mathcal{D})$ の各グラフ G_m での性能劣化度 $Q_G(\mathcal{D}, G_m)$ を次式のように道路閉塞の有無での最短時間の比に基づき定義する。

$$Q_G(\mathcal{D}, G_m) = N_G(\mathcal{D})^{-1} \sum_{u \in \mathcal{R}_{G_m}(\mathcal{D})} \frac{n(u) \min_{w \in \mathcal{D}} t_G(u, w)}{\min_{w \in \mathcal{D}} t_{G_m}(u, w)} \quad (2)$$

本研究では、十分大きな M に対して、道路閉塞モデルに基づく目的地 \mathcal{D} の移動中心性 $B_G(\mathcal{D})$ 、及び、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。

$$B_G(\mathcal{D}) = M^{-1} \sum_{m \in \{1, \dots, M\}} Q_G(\mathcal{D}, G_m) \quad (3)$$

$$C_G(\mathcal{D}) = M^{-1} \sum_{m \in \{1, \dots, M\}} N_{G_m}(\mathcal{D}) \quad (4)$$

明らかに、 $0 \leq B_G(\mathcal{D}), C_G(\mathcal{D}) \leq 1$ であり、対象とする道路閉塞モデルで、これらを同時に 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。

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

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. 評価実験

本研究では、OSM (OpenStreetMap) データ⁷⁾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

また図1に、分速80mの徒歩を仮定し、避難地までの最短到着時間が区間 $[x, x+1)$ 分となる主体 (人口) 割合の分布を都市別に示す ($x = 0, 1, \dots$)。大半の到着時間は10分未満となるが、山間部に位置するノードなどからは多大な時間を要することなどが分かる。図2は、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、移動中心性 $B_G(\mathcal{D})$ と移動連結性 $C_G(\mathcal{D})$ の変化状況を示す。パーコレーション理論などで広く知られるように、確率が大きくなると移動連結性 $C_G(\mathcal{D})$ は急速に劣化するが、移動中心性 $B_G(\mathcal{D})$ は比較的緩やかに劣化することが分かる。この三都市の結果から、移動連結性及び、移動中心性の変化の仕方は、どの地域においても似たような結果を示すことが予想できる。特に、移動連結性の急激に劣化する変化の仕方は、災害の規模が大きくなり切断される道路の数がある一定を超えると、急にほとんどの人が避難地にたどり着けなくなることを示している。従って、今後仮にほとんどの道路が閉塞される



図3 道路の閉塞確率 1/32 の場合の改善度上位 10 地点



図4 道路の閉塞確率 1/16 の場合の改善度上位 10 地点



図5 道路の閉塞確率 1/8 の場合の改善度上位 10 地点

ような大規模災害が起きた場合、現在の三都市における避難地配置では、避難地へ移動できる信頼性は極端に低いということが言える。

次いで、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 $p \in \{2^{-5}, 2^{-4}, 2^{-3}\}$ 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 3 は 32 本に 1 本の割合で道路が分断される場合、図 4 は 16 本に 1 本の割合で道路が分断される場合、図 5 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。

4. 改善度上位地点の現地調査

地図だけでは、改善度上位地点の状況が詳しく分からない。そのため、図3から図5に示されるマークの上位地点について、現地に実際に行き、道路や建物の状況などについて目視による調査を行った。現地調査の際に、現地の様子を写真撮影した。図3に示されているマークの上位地点について現地調査を行った際に撮影した現地の写真の一部を図6に示す。

調査した場所の状況は次のとおりである。図3(a)の場所は、天竜川河川敷の運動公園で、サッカー場として利用されていた。図3(b)の場所は、有度山総合公園で、テニスコートなどの運動施設があった。図3(c)の場所は、上位のマークが多い海沿いの民家などがある地域と、山の中腹にあった。図4(a)の場所は、図3(a)と同じ場所であった。図4(b)の場所は、一戸建ての多い住宅地であった。図4(c)の場所は、上位のマークが多いサービスエリア下の道路と、山の中腹にあった。図5(a)の場所は、航空自衛隊の基地に囲まれている場所で民家や畑などがあった。図5(b)の場所は、図4(b)と同じ場所であった。図5(c)の場所は、道路と民家などが多い場所であった。

5. 改善度上位地点についての考察

図 3 の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 地点の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り、図 6 (a) のようにサッカー場となっている。サッカーの試合や練習などで多くの市民が集ま



(a)浜松市

(b)静岡市

(c)沼津市

図6 道路の閉塞確率 1/8 の場合の改善度上位地点の写真

る場所である。この付近で川の両脇の土地を結ぶ唯一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ったり、サッカー場の市民の避難地が必要と考えられる。静岡市でマークが集中した運動公園の東側に一戸建ての家が多く集まった住宅地が存在する。この住宅地は山に囲まれており、孤立しやすい地域といえる。図 6(b)のように運動公園となっている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有用だと考えられる。沼津市で上位のマークが集中した海岸沿いの土地は、図 6(c)のように前が江浦湾、後ろが山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。

図 4 の浜松市の結果でマークが集中した場所は、マークの位置が若干動いているが、図 3 にほぼ近いものである。静岡市のマークが集中した場所は、一戸建ての家が多く集まった住宅地で、山と大きな公園に囲まれており、外部に接続する道路も少なく、孤立する可能性が高い。沼津市の上位のマークが集中した場所は、新東名高速道路の下りサービスエリアの下側の場所で、サービスエリアにアクセスするための道路となっており、サービスエリアから脱出するうえで重要な場所となっている。

図 5 の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、特に自衛隊基地側はフェンスで仕切られ、一本も連絡路がないため、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上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、図 4 と同様に山と大きな公園とに囲まれた住宅密集地の交差点上を示した。

シミュレーションと現地調査の結果から、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。昔から決めてある学校などの避難地をそのまま利用し続けている場合が多いが、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。そこで、新たな避難地を考える場合、新避難候補地とする考え方が望ましいと考える。

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。

6. おわりに

本研究では、災害等により道路が分断された際の、避難地移動のための信頼性指標として、移動中心性と移動連結性を提案し、また、浜松市、沼津市、静岡市を対象に、OSM の道路データを用いて道路閉塞モデルに基づいたシミュレーションを行った。シミュレーションの移動中心性・移動連結性の変化状況から実際に災害が起きた際の信頼性を評価した。特に、移動連結性の劣化の仕方は、ある一定の閉塞確率までは緩やかであるものの、それを超えると急速に劣化することが確認でき、どの地域でも似た変化状況を示すことが明らかになった。

さらに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、改善度上位 10 地点の交差点を示した。マークが示す地点の現地調査とマーク位置の傾向から、新避難候補地とすべき場所を調べた。

今後の研究では、本研究での提案手法の改良を行って、新避難候補地選定法を確立し、それを基に、大規模災害が起きた場合の道路の信頼性の低さを解決するような、より良い避難候補地を提案していきたい。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金基盤研究(C)(No. 17K01302)の補助を受けた。

参考文献

- 1) 平成 22 年度防災白書,
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h22/index.htm>
- 2) 中山 晶一郎他, 道路交通の信頼性評価, コロナ社, 2014.
- 3) 塚本竜太郎, 齊藤 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 (IPJSJ2017), Mar. 2017.
- 4) 塚本竜太郎, 齊藤 和巳, “移動連結性に基づく都市避難候補地の選定法,” 第 16 回情報科学技術フォーラム (FIT2017), Sep. 2017.
- 5) 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.
- 6) M. E. J. Newman “ Networks: An Introduction” Oxford University Press, 2010.
- 7) Open Street Map, <http://www.openstreetmap.org>