

避難可能時間と道路閉塞を考慮した移動信頼中心性に関する研究

Study on the Time-bounded Criticalness Centrality in Consideration of Evacuation Time Limit and Road Blockage

○湯瀬 裕昭¹, 武藤 伸明¹, 池田 哲夫¹, 斉藤 和巳², 大久保 誠也¹
 Hiroaki YUZE¹, Nobuaki MUTO¹, Tetsuo IKEDA¹, Kazumi SAITO² and
 Seiya OKUBO¹

¹ 静岡県立大学 経営情報学部

School of Management and Information, University of Shizuoka

² 神奈川大学理学部

Faculty of Science, Kanagawa University

We address the problem of detecting critical links in a large spatial network in order to maintain network performance, Especially, we focus on the fact that reachability within a maximum permissible time plays an important role in case of disaster evacuation. In order to formulate such requirements, we propose a novel concept called time-bounded criticalness centrality by quantifying the number of people who become unable to move to one of these evacuation facilities within a maximum permissible time when a link is blocked. In our computer experiments using three major cities in Shizuoka Prefecture, we demonstrate that our proposed centrality can produce naturally interpretable detection results by varying maximum permissible times.

Keywords : evacuation facility, road blockage, link selection problem

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、マグニチュード9.0と日本の観測史上最大の地震であり、広範囲に揺れが観測され、日本各地で大きな津波が発生し、甚大な被害をもたらした¹⁾。この地震により、沿岸部および内陸部を含め、東北地方の広範囲な地域にわたって多くの道路が被災した。被害が多かった岩手県と宮城県では、各所で道路の路面亀裂、法面崩壊、道路の液状化などが見られた。さらに、宮城県では橋梁損傷も多く、一方、岩手県では落石・土砂崩れの被害も多くなっている²⁾。つまり、これらの原因により、東北地方の道路ネットワークが至る所で寸断され、その信頼性が大幅に低下したと言える。

中山³⁾らは、道路ネットワークの信頼性を、道路ネットワークに求められる機能の観点から、「連結信頼性」、「時間信頼性」、「走行信頼性」の3つに分類している。その中で、必要な時に必要な場所に行けることを表す到達性を実現する能力の指標として連結信頼性が、目的地に早く到達できることを表す速達性を実現する能力の指標として時間信頼性が提案・使用されている。これらの指標は主に平常時の道路信頼性の指標として用いられている。一方で、先に説明した東北地方太平洋沖地震などの大地震の際には、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、時間信頼性の深刻な低下をもたらした。また、近年多発している豪雨災害の際にも同様な状況が生じている。

本研究では、自然災害発生時に一部の道路リンクが切断されることにより、道路網が複数のサブネットワークに分断されたとしても、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、それらのサブネットワーク内で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という機能要求に着目する。これらの機能要求に対応した信頼性指標として移動信頼中心性を提案する。また、静岡県内の主要3都市について、移動信頼中心性の計算機実験を行う。

2. 関連研究

災害時の道路閉塞による道路ネットワークのリンクの切断は、住民の避難行動に影響を及ぼす。その道路リンクが通れなくなったことにより、避難施設に到達できなくなったり、迂回するために余分な避難時間がかかったりする。津波などの住民の避難行動についての研究として、津波避難シミュレーションモデルの構築や、住民の避難シミュレーションの研究が行われている^{4,5,6)}。また、マルチエージェントシステムを用いた津波避難シミュレーションの研究も行われている^{7,8,9)}。これらの研究では、複数の避難者を地図上などに配置し、避難者一人ひとりの振る舞いや動きをシミュレーションし、時間の経過とともに変わっていく避難者たちの位置や行動を把握する。これにより、避難経路の問題箇所や避難施設の設置場所の妥当性などの検証を行っている。

本研究では、連結信頼性と時間信頼性を土台に、移動信頼中心性を新たに提案し、この中心性に基づきクリティカルリンク同定問題に取り組んでいる。避難する際に通れないと危機的な状況をもたらす道路リンクを検出するという点では、上記の避難シミュレーションにおける避難経路の問題箇所を見つけることに類似しているが、ミクロなレベルで避難者をシミュレーションする動的な計算を行うのではなく、交差点と交差点間の距離に基づき、マクロなレベルで、すべての交差点についての移動

信頼中心性を静的に計算できる点が異なっている。

3. 移動信頼中心性

本稿では、道路網などの空間ネットワークを、自己ループをもたない単純無向グラフと見なし、それを $G = (V, E)$ と表現する。ここで、 $V = \{u, v, w, x, \dots\}$ と $E = \{e, \dots\}$ はそれぞれ G 中のノードとリンクの集合を表す。各リンク e はノードペア $e = \{u, v\}$ で表現する。加えて、ここでの問題設定では、避難施設のような、ある固定されたノード集合 $U \subset V$ を仮定する。また、 G 上のリンクをたどってノード u から到達可能なノードの集合を $R(u; G)$ とする。ただし、 $u \in R(u; G)$ である。このとき、 G 上のリンクをたどって任意の $u \in U$ から到達可能なノードの集合を $R(U; G)$ とする。すなわち、 $R(U; G) = \bigcup_{u \in U} R(u; G)$ である。

一方、住民など移動主体の起点をノードに対応させ、ノード $v \in V$ が起点の主体数を $n(v)$ とし、その総数を $N = \sum_{v \in V} n(v)$ とする。また、各リンク $e = (v, w) \in E$ に対し、ノード間距離、移動速度、及び、移動時間 $t(v, w; G)$ が付与されているとする。任意のノードペア v, w に対し、2 ノード間の任意の経路上のうち、経路上のリンクの移動時間の総和が最小になるものを、 v と w 間の最短経路とする。また、そのときに必要な移動時間を $t(v, w; G)$ と定義する。すると、各 $v \in V$ に対し、どれかの $u \in U$ までの移動に必要な最短時間 $f(v; U, G)$ は次式で定義できる。

$$f(v; U, G) = \min_{u \in U} t(v, u; G)$$

なお、 $v \notin R(U; G)$ のケースでは、 $f(v; U, G) = \infty$ と便宜上定義する。

いま、巨大地震と津波の発生に伴い、津波による想定浸水域と到達時刻が公表され、その地域の住民が最寄りの津波避難ビルなどに、その到達時刻前に避難を完了しなければならない状況などを考える。このとき、津波到達時刻までの時間、すなわち移動が許容される上限時間 (maximum permissible time) を τ とすれば、 G 上のリンクをたどってこの時間内に避難完了できる主体数 $g(\tau; G)$ は次式で求めることができる。

$$g(\tau; U, G) = \sum_{\{v \in V | f(v; U, G) \leq \tau\}} n(v)$$

本研究では、このような上限時間が設定された状況で、通行不能になると危機的な状況を起こしうる道路セグメントをクリティカルリンクとして検出し分析する。そのために、グラフ G に対して、リンク e を削除したグラフを $G(e) = (V, E \setminus \{e\})$ で定義する。さらに、与えられた許容時間 τ に対して、リンクの上限時間付きクリティカル度 (time-bounded criticalness degree) を次式で定義する。

$$h(e; \tau, U, G) = g(\tau; U, G) - g(\tau; U, G(e)) \quad (1)$$

すなわち、リンク e が通行不能になったとき、避難不能となる主体数を式 (1) で定義し、この指標が大幅に増大するリンクはクリティカルであるとして分析する。

以降では、式 (1) の指標を移動信頼中心性と呼ぶ。

4. 評価実験

4.1. 実験設定

本研究では、実際の道路ネットワーク $G = (V, E)$ とその中の避難施設 U のデータを用いて、提案手法の効果を評価した。具体的には、浜松市、沼津市と静岡市の道路ネットワークデータと、各都市に準備されている避難施設のデータを利用した。これらの都市は、地震による津波と富士山の噴火による危険性を有している。各都市の道路ネットワークのデータ $G = (V, E)$ は、OSM (OpenStreetMap)¹ のデータから抽出した。浜松市のネットワークデータにおけるノード数、リンク数、避難施設数はそれぞれ、104, 813, 127, 648, 397であるのに対し、沼津市のネットワークデータでは、15, 483, 19, 053, 209となっている。また、静岡市のネットワークデータでは、53, 904, 66, 444, 355となっている。各ノードに接続するリンク数の平均、すなわち各ノードの平均次数は、浜松市で2.44、沼津市で2.46、静岡市で2.47である。

また、ここでは、提案法の基本性能を評価するために、すべてのリンク $(u, w) \in E$ に対して、そのリンクの移動速度は秒速1mとした。また、今回の実験では、主体数 $n(v)$ を全て1とした。この設定は、避難者の人数ではなく、単純にノード数を扱うこと等価になる。

4.2. 実験結果と考察

本研究では、静岡県内の主要3都市について、災害時の避難可能時間となる上限時間 τ を5分から30分まで5分刻みで変化させ、計算機実験を行った。

最初に、道路閉塞が発生せず、すべての道が通れるとした場合の計算を行った。浜松市 (HA)、沼津市 (NU)、静岡市 (SH) のそれぞれで、設定した上限時間 (maximum permissible time) 内に、避難施設への到達が成功する避難成功率 (success ratio) を図1に示す。

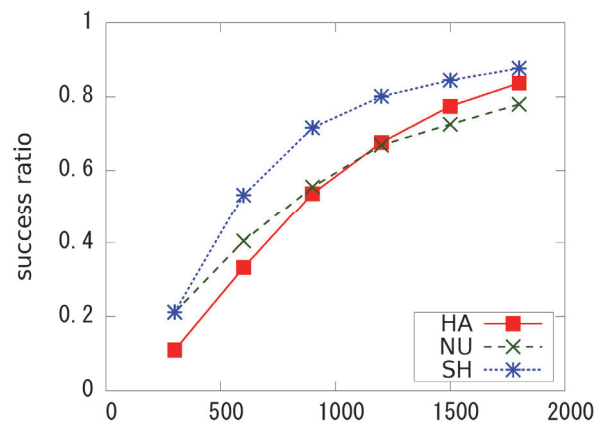


図1 道路閉塞がない場合の避難成功率

図1より、上限時間が5分 (300 sec.) では、どの市でも避難成功率は10%から20%程度と比較的低いものの、上限時間が30分 (1,800 sec.) では、75%程度以上に右肩上がり増加していることが分かる。このような状況は、上限時間が増加するとともに避難成功率が高くなるという、避難に関する我々の直感的な感覚とも一致し、本モデルの妥当性を示唆する結果と考えられる。

¹ <https://openstreetmap.jp/>

次に、各リンク e について、(1)式で定義される移動信頼中心性（上限時間付きクリティカル度）を計算した。浜松市(HA)、沼津市(NU)、静岡市(SH)のそれぞれについて、全リンクの移動信頼中心性の最大値を図2に示す。

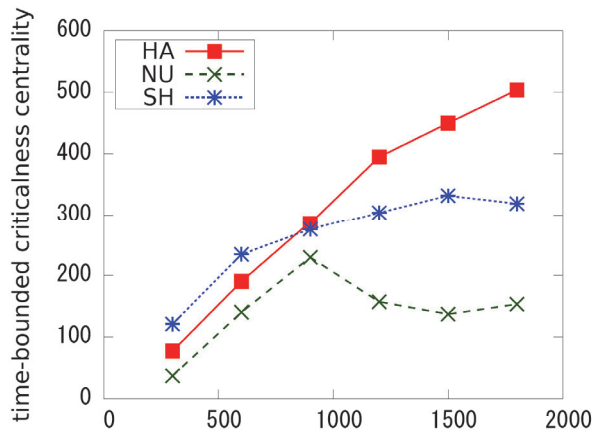


図2 道路閉塞がある場合の移動信頼中心性の最大値

図2より、浜松市では、上限時間が長くなるにつれて、

80程度から500程度に右肩上がり増加していることが分かる。沼津市では、40程度から230程度に増加し、その後、一旦140程度に減少し、最終的には150程度に増加していることが分かる。静岡市では、120程度から330程度まで増加し、その後、320程度まで減少していることが分かる。3都市とも、上限時間が長くなるにつれ、全体的に見ると増加傾向が読み取れるが、上限時間を増加させた場合の移動信頼中心性の最大値の挙動には、単純な傾向（単調増加、単調減少）があるとは言えない。

計算結果のうち、上限時間を15分とした主要3都市の移動信頼中心性の上位200位までのリンクの中心地点を図3に示す。図内のマーカーについては、ひし形は移動信頼中心性のリンクを表し、星形は避難施設を表している。

3都市の中で、浜松市の面積が1番大きく、静岡市が浜松市より少し小さい、両市に比べて沼津市の面積は小さい。図3の避難施設の分布をみると、浜松市と静岡市では北側に山間部のエリアまで広がっていることがわかる。しかし、沼津市では比較的海側に偏っていることがわかる。また、3都市とも比較的まばらに移動信頼中心性のリンクが存在していることが分かる。

図3において、上限時間が増加した場合、沼津市は北側の山間部のエリアがほとんどないため、浜松市と静岡市

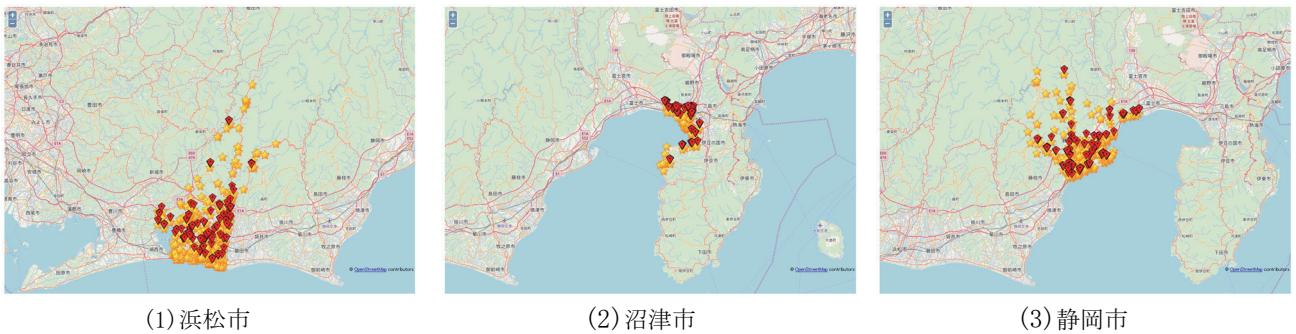


図3 上限時間15分の3都市の移動信頼中心性の上位200位までのリンクの中心地点

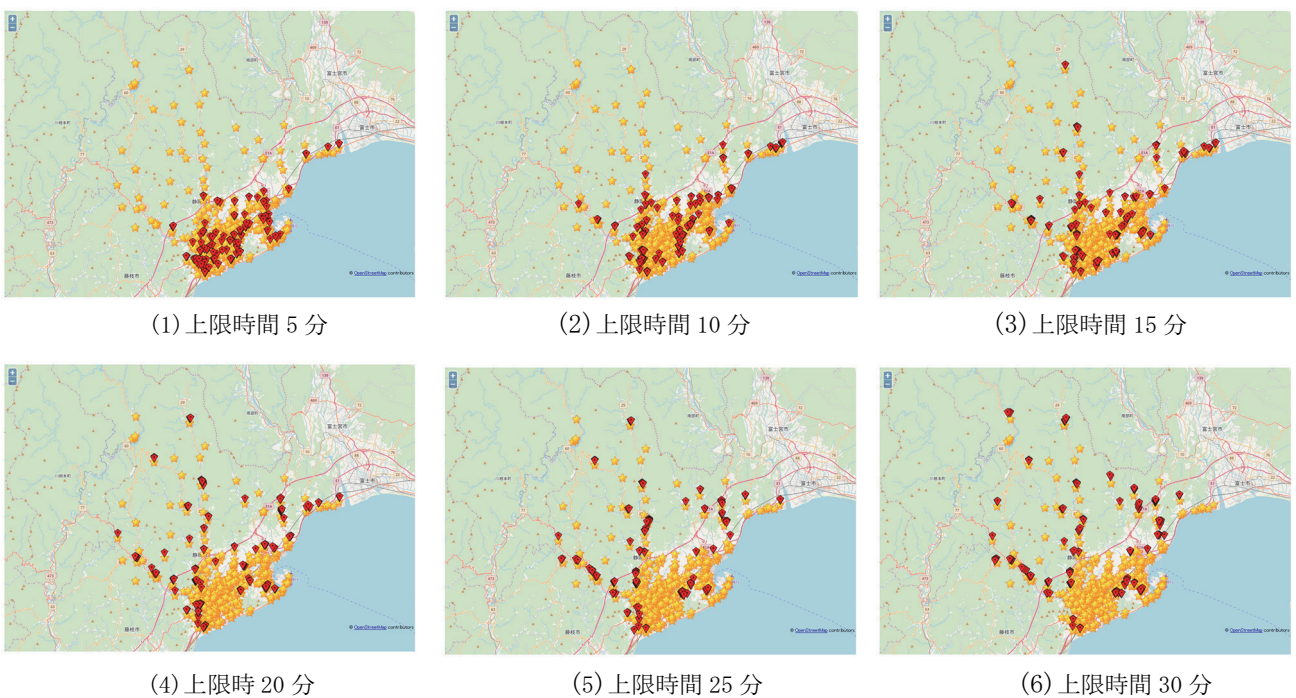


図4 静岡市の移動信頼中心性の上位200位までのリンクの中心地点

に比べ、移動信頼中心性が小さくなっていると考えられる。

上限時間を変化させた場合の移動信頼中心性の様子を調べるために、静岡市での移動信頼中心性についての結果を、中心性の上位200位のリンクの中心点をプロットしたものを図4に示す。

図4を見ると、上限時間が長くなるにつれて、静岡市の中心部から郊外へ、そして山間部のほうに移動信頼中心性のリンクが広がっているような傾向が見られた。沼津市と浜松市の計算結果でも同様の傾向がみられた。許容される上限時間が短い場合には、図2からも分かるように、避難成功率は低く、避難所の近隣ノードのみから避難可能となるため、図4の(1)のように、そのような避難施設やノードが多く存在する市の中心部にクリティカルリンクが多く存在したと考えられる。これに対して、許容される上限時間が長くなると、市の中心部では、比較的容易に迂回することが可能になるため、図4の(2)や(3)のように、市の中心部から郊外の方にクリティカルリンクが移ったと想定できる。一方、許容される上限時間がさらに長くなると、図4の(4)から(6)のように、少しずつ山間部の方にクリティカルリンクが移っていくことも見て取れる。なお、静岡市の中心付近で避難施設が疎の部分は日本平である。

これらの実験結果は、本提案モデルに基づき、移動信頼中心性の高いリンクの検出が実現できることを示唆している。

移動信頼中心性の高いリンクは、住民が避難する際に通行不能になると危機的な影響を及ぼす道路を示している。災害前に移動信頼中心性の高い道路を検出し、その道路に対して、事前に補強工事や道路の拡張、代替路の整備などの対策を行うことにより、津波などの避難時間が限られる災害が起きた際に無事に避難施設にたどり着ける人数の増加に寄与できると思われる。

5. おわりに

本研究では、災害発生時に道路閉塞に起因して道路網がサブネットワークに分断された際の道路網信頼性指標として、複雑ネットワーク研究分野での中心性概念を拡張・応用し、移動信頼中心性を提案した。その応用として、巨大地震と津波の発生により住民が避難するなど、移動が許容される上限時間が設定された状況で、通行不能になると危機的な状況を起こしうる道路セグメントをクリティカルリンクとして検出する問題に取り組んだ。

計算機実験では、静岡県の主要な3都市を対象に、避難可能な上限時間を変化させたときの特性について評価した結果を示した。避難可能な上限時間が長くなるにつれて、移動信頼中心性の最大値が単調変化していくのではなく、都市や避難可能な上限時間によって挙動が異なることが明らかになった。また、ノード数だけの計算結果により、都市の中心部から外側のほうにクリティカルリンクが広がっていく傾向があることが明らかになった。

本研究では、提案手法の基本的な特性を把握するため、ノードへの人口割り当てを全て1とし、実際の人口ではなく、ノード数に基づき計算を行った。次の段階の研究としては、各都市の人口分布に応じて、ノードへの人口割り当てを行うことにより、実際の人口を考慮した計算を行うことが考えられる。

今後の研究では、国勢調査などのメッシュ単位で提供される人口データからノードへの人口の割り当てを行い、

割り当て人口に基づく計算を実施し、その結果を分析したいと考えている。

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 24 年度防災白書,
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h24/index.htm>
- 2) 村井貞規, 高橋秀典: 東日本大震災が道路ネットワークに及ぼした影響について, 東北工業大学新技術創造研究センター紀要 Eos 26(1), 55-60(2014)
- 3) 中山晶一朗他, 道路交通の信頼性評価, コロナ社, 2014
- 4) 鈴木介, 今村文彦: 住民意識・行動を考慮した津波避難シミュレーションモデル, 自然災害科学 23(4), 521-538(2005)
- 5) 目黒公郎, 織田浩平: 研究速報「津波災害時の避難行動シミュレーションモデルの開発」, 生産研究 57(4), 155-159(2005)
- 6) 熊倉宏晃, 山口裕基, 戸田和之: 銚子マリーナ周辺地域における津波に対する避難行動シミュレーション, 千葉科学大学紀要 (8), 7-15(2015)
- 7) 齋藤崇, 鏡味洋史: マルチエージェントシステムを用いた津波からの避難シミュレーション : 奥尻島青苗地区を例として, 日本建築学会計画系論文集 70(597), 229-234(2005)
- 8) 大畑大志郎, 高井伸雄, 鏡味洋史: 釧路市中心市街地における津波避難施設配置の評価 : マルチエージェントシステムを用いた津波からの避難シミュレーション その2, 日本建築学会計画系論文集 72(612), 87-91(2007)
- 9) 小柳 雄揮, 有川 太郎 : 津波避難シミュレーションを用いた津波避難タワーの効果の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学) 72(2), I_1567-I_1572(2016)