

媒介中心性を用いた道路ネットワークの堅牢性評価

高橋 良武[†], 一ノ瀬 元喜[‡]

静岡大学 総合科学技術研究科 工学専攻 数理システム工学コース[†]
静岡大学 学術院工学領域 数理システム工学系列[‡]

1. はじめに

媒介中心性 (betweenness centrality) は, Freeman [1] によって定義されたネットワーク指標の一つで, あるノード (リンク) の重要度を測るために用いられる. 道路交通の分野では, Lämmer ら [2] が道路網分析に取り入れて以降, Kirkley ら [3] が世界 97 都市における媒介中心性の分布を調査するなどの事例が存在する. 媒介中心性を用いて道路ネットワークの堅牢性を検証する研究も行われており, Duan ら [4] は媒介中心性の高いノードを削除していくと, ランダムな削除と比較して大幅にネットワークが崩壊することを示した. 後年, Casali ら [5] はリンクの媒介中心性を用いて削除するリンクを選択した場合も, ネットワークの崩壊を促しやすことを検証した. このような先行研究の流れにおいて, 「媒介中心性の高いリンクから削除を行った場合, 異なる構造の道路ネットワーク間で, どのような差が現れるのか」という点に関する研究は未だ不十分である. そこで本研究は, 媒介中心性を用いたリンク削除方法による, 複数の道路ネットワーク間での堅牢性の差を調査し, 堅牢性の高低に関係する特徴を明らかにすることを目的とする.

2. 分析手順

2.1 道路網データの構築

道路をネットワークとして表現するために, OpenStreetMap (OSM)[6] という地図情報サービスを利用した. この OSM の道路データを Python へ取り込むことができるパッケージ “OSMnx” [7] が開発されているため, 分析ではこのパッケージを使用した. 道路ネットワークは交差点をノード, 道路区間をリンクとした無向グラフであり, 本研究では道路長をリンクの重みとして用いた. 取得対象のデータは静岡県内の車が通行可能な道路で, 43 市区町ごとに分割して取得した. なお 43 個のネットワークに含まれる総ノード数は 235,678, 総リンク数は 327,754 となっている.

Robustness assessment of road networks using betweenness centrality

[†]YOSHITAKE TAKAHASHI, Mathematical and Systems Engineering, Shizuoka University

[‡]GENKI ICHINOSE, Mathematical and Systems Engineering, Shizuoka University

2.2 リンクの媒介中心性の計算

媒介中心性はネットワーク分析における指標の一つであり, あるノード (またはリンク) が最短経路として選択される度合いを表す. 「車による移動は最短経路を利用して行われる」とすると, 媒介中心性の高いリンクは交通量が集中する可能性があると思なすことができるため, 注目する指標とした. リンクの集合 E とノードの集合 V からなるネットワーク $G = (E, V)$ について, リンク $e \in E$ の媒介中心性 $BC(e)$ は以下の式で表される.

$$BC(e) = \sum_{s,t \in V} \frac{\sigma(s,t|e)}{\sigma(s,t)} \quad (1)$$

ここで, $\sigma(s,t)$ はノード (s,t) 間の最短経路数であり, $\sigma(s,t|e)$ はそのうちリンク e を通る経路数である. 地域間の比較を行うため, ネットワークのノード数 n を用いて経路数で正規化した $BC'(e)$ を使用した.

$$BC'(e) = \frac{2}{n(n-1)} BC(e) \quad (2)$$

なお, 媒介中心性を算出する上での最短経路は, リンクの重み (道路長) に基づく最短距離経路とした.

2.3 媒介中心性分布の計算

地域ごとの中心性の傾向を掴むために, まず [0.0, 0.1] の範囲で 10 階級に区切って, 媒介中心性の度数分布を集計した. そのうえで, x を階級値, y を相対度数として累乗近似を行った. ここでは非線形関数 $y = bx^a$ を対数変換することで求められる $Y = aX + b$ を基に最小二乗法で近似を行い, それによって算出された傾き $|a|$ を “分布の傾き” として地域比較の指標に用いることとした. 分布の傾きが大きいほど分布の偏りが大きい, つまり交通量の集中が偏りやすい傾向を見ることができる.

2.4 堅牢性の評価

堅牢性の評価では, 交通集中が起りやすいリンクにおいて通行障害 (渋滞や交通事故による通行止め) が発生することを想定し, リンクを除外していくことでネットワークの構造がどのように変化するかを調査した. 媒介中心性の値が高いリンクから順に 1 つずつ削

除していき、最大クラスタサイズの相対的变化を測定した。リンク損失率 l における最大クラスタサイズ S_l は

$$S_l = \frac{s_l}{s_0} \quad (3)$$

と表される。 s_l は l における最大クラスタサイズ、 s_0 は $l = 0$ すなわちリンク削除を行っていない元来の道路ネットワークにおける最大クラスタサイズを表している。

3. 結果と考察

3.1 道路ネットワークと媒介中心性の分布

一例として、浜松市中区における媒介中心性の計算結果を地図上で可視化したものと、媒介中心性の分布を図1に示す。媒介中心性の高いリンクは市街地の主要道が多いことや、媒介中心性はべき分布に従うことが確認された。

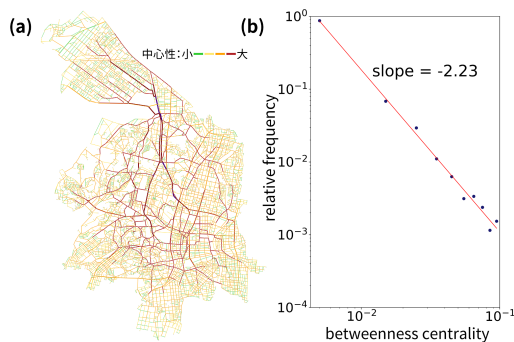


図 1: 浜松市中区における (a) 媒介中心性の可視化と (b) 媒介中心性の分布

3.2 リンク削除による堅牢性の評価

最大クラスタサイズ $S_l = 0.5$ となるリンク損失率を l_h と定義し、 l_h の値に応じて抽出した6地域における S_l の変化を示したものが図2であり、いずれのネットワークも $l = 0.05 \sim 0.3$ で大きくネットワークが崩壊することが示された。各市区町の l_h と分布傾きとの散布図を図3に示す。相関係数は0.52であり、分布傾きが大きいほど l_h が大きい、すなわちネットワークが崩壊しにくく「堅牢性が高い」傾向にあることが判明した。分布の傾きが大きい地域は交通量の集中が起りやすい一方で、崩壊しにくい経路が相対的に多く存在するため、う回路が形成されやすくなるためと考えられる。

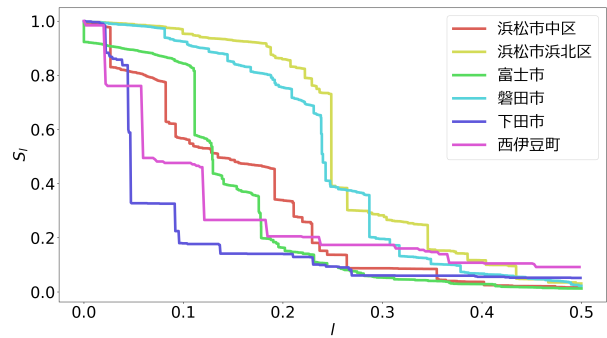


図 2: l_h の値が上位、中位、下位の各2地域における S_l の変化。

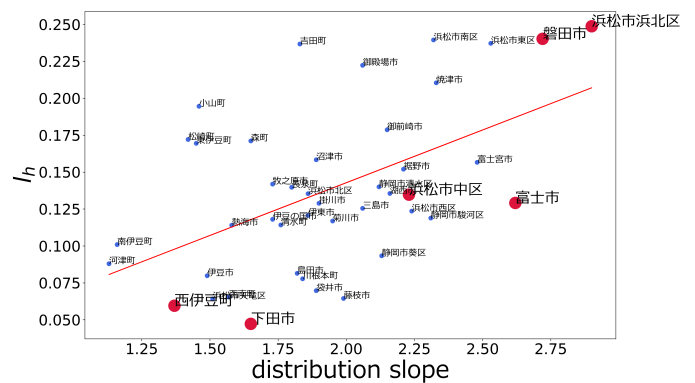


図 3: 分布の傾きと l_h の散布図。

4. おわりに

静岡県内における道路ネットワークについて、リンクの媒介中心性に着目した分析を行った。その結果、リンク削除による堅牢性の評価によって、堅牢性が高い地域は分布傾きが大きい傾向があるという特徴が判明した。

5. 参考文献

- [1] L. C. Freeman. (1977), A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, Vol. 40, No. 1, pp 35–41.
- [2] S. Lammer, B. Gehlsen and D. Helbing. (2006), Scaling laws in the spatial structure of urban road networks. *Physica A*, 363, 89-95.
- [3] A. Kirkley, H. Barbosa, M. Barthelemy, and G. Ghoshal. (2018), From the betweenness centrality in street networks to structural invariants in random planar graphs. *Nature Communications*, 9, 2501.
- [4] Y. Duan, F. Lu. (2014) Robustness of city road networks at different granularities. *Physica A*, 411, 21-34.
- [5] Y. Casali, H. R. Heinimann. (2020) Robustness response of the Zurich road network under different disruption processes. *Computers, Environment and Urban Systems*, 81, 101460.
- [6] OpenStreetMap Foundation 「OpenStreetMap」 <https://www.openstreetmap.org/> (2022年1月2日最終閲覧)
- [7] G. Boeing. (2017) OSMnx: New Methods for Acquiring, Constructing, Analyzing, and Visualizing Complex Street Networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 126-139.