

## 緊急輸送道路ネットワークの複数分割を考慮した固有値解析によるリンク脆弱性評価

金沢大学大学院 学生会員 ○中南 孝晶  
 金沢大学 正会員 中山 晶一朗  
 金沢大学 正会員 小林 俊一  
 金沢大学 正会員 山口 裕通

### 1. 研究の背景・目的

災害時における道路の役割は重要で、ネットワークの連結性を高めることが望ましい。連結性を効率的に高めるために、連結性の観点でのネットワーク脆弱性を定量的に評価し、対策を施すことが重要となる。先行研究で、広域に甚大な被害を与える災害に対する大規模ネットワークの効率的な脆弱性評価手法を提案したり、この手法は、道路ネットワークをグラフ化し、その第2最小固有ベクトルに着目しており、リンクの途絶がネットワークをほぼ均等に2つに分断することへの影響を評価している。しかし、大規模ネットワークを2つに分断では、孤立したネットワークが複数の県にまたがるため、もう少し合理的な大ききで分断される事象を考慮した評価を行うことで、より有用な情報を得られる可能性がある。本稿では、先行研究の手法を拡張し、ネットワークの合理的な大きき分断に対する評価を行い、先行研究の結果と比較し、考察する。

### 2. ネットワークのグラフ化と脆弱性評価指標

まず、道路ネットワークにおけるリンク・ノードの関係を隣接行列で記述する。隣接行列  $\mathbf{A}$  の成分  $a_{ij}$  は、ノード  $i, j$  がリンクで接続していると1に、非接続だと0になる。本稿では、リンクの距離の逆数を重みとして採用する。これはリンクの長さが長いほどリンクの途絶リスクが高いことを考慮している。次数行列  $\mathbf{D}$  の対角成分は  $d_i = \sum_j^n a_{ij}$  と定義され、この隣接行列  $\mathbf{A}$  と次数行列  $\mathbf{D}$  を用いると、ラプラシアン行列  $\mathbf{L}$  は  $\mathbf{D} - \mathbf{A}$  である。このラプラシアン行列の第2最小固有ベクトルを  $v_{2i}$  とするとリンク  $(i, j)$  の脆弱性評価指標は  $T_{ij} = |v_{2i} - v_{2j}| \times a_{ij}$  となる。この固有値解析はネットワークのリンクとノードをバネと質点に置き換えた振動問題と関連付けることが可能で、この指標はリンクにはたらく張力である。この指標が大きいリンクほど、ネットワークの連結性に対してクリティカルであると評価する。

### 3. スペクトラルクラスタリングを用いた評価手法の拡張

スペクトラルクラスタリングを用いて、ネットワークの脆弱な部分で  $m$  分割することを考える。これはラプラシアン行列の第  $m$  最小固有ベクトルまでを計算し、その固有ベクトルの成分をユークリッド座標としたものを  $k$ -means 法でクラスタリングを行うことで求めることができる<sup>2)</sup>。  $k$ -means 法の手順は、①各ノード  $i$  をランダムにサブネットワーク  $S_r$  に割り当てる。②  $S_r$  に属するノード  $i$  の重心を計算し、  $i$  と全  $S_r$  の重心との距離を求める。③距離が最も近い  $S_r$  に  $i$  を割り当て直す。④割り当てが変化しなくなるまで繰り返し計算する。つまり、  $m$  次元直交座標系において近いものどうしを集めてクラスタリングしている。このクラスタリングは、比率カットサイズ(Ratio Cut)を最小化する分割の近似解を示しており、クラスタリングの境目を結ぶリンクは脆弱であることを示している<sup>3)</sup>。これらのことから、本研究ではリンク  $(i, j)$  が結ぶノード間の  $m$  次元直交座標系の距離を脆弱性評価指標とする、  $i$  の直交座標を  $(i_1, \dots, i_m)$  とすると、評価指標  $P_{ij} = \sqrt{\sum_r^m (i_r - j_r)^2} \times a_{ij}$  となる。これはリンク 1km あたりのノード間の距離であり、値の大きい方が脆弱なリンクと考える。

### 4. 北陸・東海地方周辺の緊急輸送道路ネットワーク

北陸・東海地方周辺の実緊急輸送道路ネットワーク(5460 リンク, 3841 ノード)において、今回提案した手

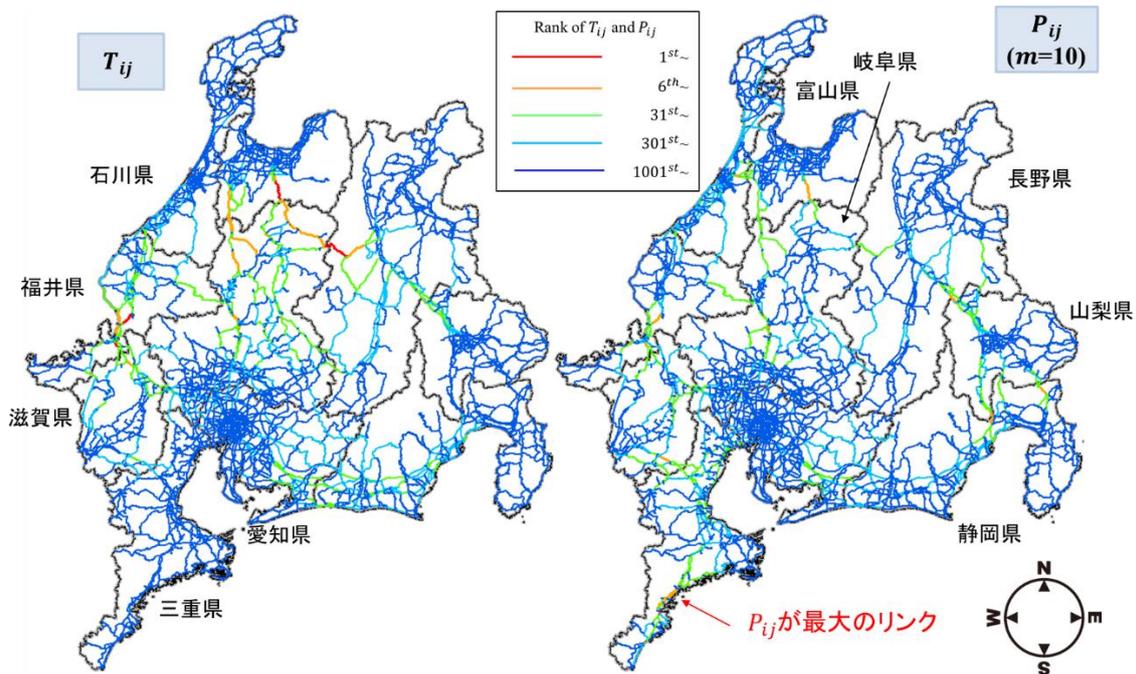


図-1 緊急輸送道路ネットワークの脆弱性評価の比較

法と先行研究で得られた脆弱性評価の比較を行う。なお、今回はネットワークに属する県数と等しい  $m = 10$  についての結果を示す。図-1は、それぞれの指標  $T_{ij}$  と  $P_{ij}$  について値が大きい順に色分けしている。赤色で示されたリンクは脆弱性が高く、青色のリンクは脆弱性が低い。先行研究の指標  $T_{ij}$  では敦賀市付近、岐阜県北部の県境付近が特に脆弱であり、伊豆半島や能登半島などは、ネットワークの端に位置することから、ネットワーク全体の連結性に対する影響が小さく評価されるため青色で示される。一方、指標  $P_{ij}$  では、三重県の先端付近に最も脆弱なリンクが存在する。この部分は緊急輸送道路が1本のみであり、その先にあるノード数が比較的多い部分である。また、伊豆半島の付け根付近の順位も上がっており、先行研究と比較して、合理的な規模での分断を考慮した相対的な脆弱性評価を行うことができた。

## 5. まとめと研究展望

本研究では、先行研究で取り扱った固有ベクトルを用いた脆弱性指標をスペクトラルクラスタリングの理論を用いて拡張した評価手法を提案した。先行研究では、ネットワークをほぼ均等に2分割されることに対する脆弱性を評価していたが、本研究では、先行研究よりも小さいある程度のまとまりをもった分割に対する評価を行い、先行研究では把握できなかったある程度局所的なリンクの相対的な脆弱性を評価できた。今後は、適切な  $m$  の値の決定方法の検討と、沿道斜面や浸水区域などのリスクを考慮した分析を行う。

## 謝辞

本研究の一部は国土交通省新道路技術会議において採択され、国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究により実施したものである。ここに記して感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 中南孝晶・中山晶一朗・小林俊一・山口裕通：固有値解析を用いた複数分割による緊急輸送道路ネットワークの脆弱部分推定，土木計画学研究発表会・講演集，Vol. 56，CD-ROM，2017。
- 2) Luxburg, U. A. Tutorial on Spectral Clustering. *Statistics and Computing*, Vol. 17, pp. 395–416, 2007.
- 3) Hagen, L. and A. Kahng. New Spectral Methods for Ratio Cut Partitioning and Clustering. *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, Vol. 9, pp. 1074–1085, 1992