

辺連結度+ α カットを考慮した道路ネットワーク孤立脆弱性評価手法の構築

岐阜大学 学生会員 ○中島雅大
 岐阜大学 正会員 杉浦聡志
 岐阜大学 正会員 高木朗義

1. はじめに

被災地の孤立は、救急輸送や物資輸送などの迅速な緊急対応、復旧・復興時の大きな妨げとなるため、災害時でも被災地が孤立しない道路ネットワークの構築が重要である。孤立に対する道路ネットワークの信頼性、脆弱性の評価に関する研究はこれまでも取り組まれているが、孤立に寄与する重要な対象が、複数リンクの組み合わせで構成されるのに対し、複数リンクの組み合わせにより脆弱性を評価する手法は未だ確立されていない。孤立に寄与するリンク（ボトルネック）を特定することで、耐災化等の整備の基礎情報として活用できることが期待できる。杉浦¹⁾は辺連結度を道路ネットワークの脆弱性指標とし、最小カットを導出することにより、道路ネットワークのボトルネックを特定する手法を提案した。本研究では、最小カットに加えて、辺連結度+ α -カットに含まれるボトルネックを特定する手法を提案する。これにより、ある目標とするリンク数までのボトルネックを特定できる。提案した手法は中部地方の道路ネットワークに適用し、孤立脆弱性を考察する。

2. 辺連結度の定義と辺連結度+ α -カット導出方法

孤立は被災地を含むノードの集合が支援側拠点のノードを含むノード集合と接続するリンクがなく、分離されたときに生じる。このノード集合間を分離するリンクの集合はカットと呼ばれる。特に含まれるリンクの数が最小になるように選択されたカットは最小カットと呼ばれる。また、ある2点間の最小カットに含まれるリンクの数は局所辺連結度と呼ばれる。本稿において辺連結度という記述は局所辺連結度のことを指す。辺連結度は「ネットワークにおいて、ある2点間の連結を失わせるために最小いくつのリンクを除去すればよいか」を示す値と解釈できる。辺連結度が大きな値であれば、孤立の生起に対して冗長性があるといえる。ただし、辺連結度の値が小さい地域では、辺連結度より微小に大きなリンク数の途絶でも孤立が生じうる。そのため、辺連結度+ α -カットを把握することで、孤立の生起に寄与しうるリンクを網羅的に把握することが可能となる。

杉浦¹⁾はすべてのリンク容量を0とした最大流問題を繰り返し解くアルゴリズムで最小カットを導出する方法を提案している。辺連結度+ α -カットの導出方法を検

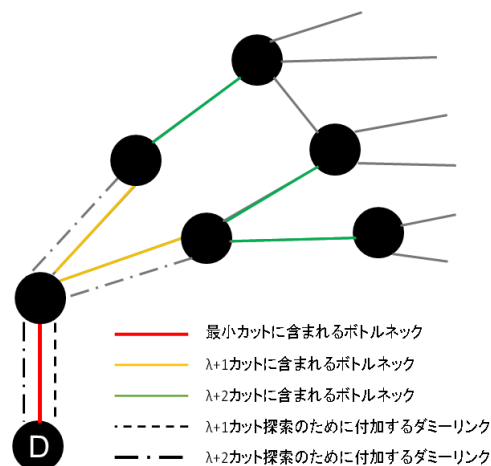


図-1 ボトルネックの緩和のためのダミーリンク

討するにあたり、以下の定義を置く。辺連結度の値を λ 、ある1つの非重複経路を k_n^λ 、非重複経路の全集合を K^λ とする。リンク数 λ の途絶により孤立が成立するリンクの組み合わせは最小カットであり、リンク数 $\lambda+1$ で成立する組み合わせを $\lambda+1$ カット、以降同様に $\lambda+2$ カット、 $\lambda+3$ カットのように呼ぶ。さて、杉浦¹⁾の最小カットを求める操作が終了し、 λ 、 K^λ が把握できていることを想定しよう。このとき、 $k_n^\lambda \notin K^\lambda$ の非重複経路には何の操作もくわえない前提を置き、任意の n 番目の非重複経路 k_n^λ に着目する。杉浦¹⁾で証明されているように、 k_n^λ 上にはボトルネックが必ず1つ以上存在する。 k_n^λ 上の全てのボトルネックのノード間に容量1を持つダミーリンクを1つずつ付与する。このネットワークにおいて辺連結度問題を求解すると、ボトルネックの容量条件が付与されたリンクにより緩和されるため、辺連結度は $\lambda+1$ となる。このとき、経路探索を実行すると、 $k_n^\lambda \notin K^\lambda$ の非重複経路のほかに k_n^λ 上のボトルネック、付加したダミーリンクをそれぞれ含む2つの非重複経路 $k_{n,1}^{\lambda+1}$ 、 $k_{n,2}^{\lambda+1}$ が構成される。添え字は k_n^λ に対して操作をした結果、 $\lambda+1$ のときのに得られた1番目と、2番目の非重複経路を示す。次にボトルネックの探索を実行すると、最小カットに含まれるボトルネックと付加したリンクを含む $\lambda+1$ カットのボトルネックが特定される。 $k_{n,1}^{\lambda+1}$ 、 $k_{n,2}^{\lambda+1}$ は非重複経路の条件を満たすため、最小カットと同様に必ず1つ以上のボトルネックを含む。ここでさらに、 $\{k_{n,2}^{\lambda+1}, k_n^\lambda \notin K^\lambda\}$ を操作せず、 $k_{n,1}^{\lambda+1}$ 上のボトルネックのノード間にさらに1つずつ容量1をもつダミーリンク

を付与する. このネットワークにおいて辺連結度問題を求解すれば, 辺連結度は $\lambda + 2$ となる. あとは同様に非重複経路の特定により $k_{n,1,1}^{\lambda+2}$, $k_{n,1,2}^{\lambda+2}$ を求め, ボトルネックを特定する. この手順を要求される α まで繰り返すと, $\{k_{n,1}^{\lambda+1}, k_{n,1,1}^{\lambda+2}, \dots, k_{n,\dots,1,1}^{\lambda+\alpha-1}, k_{n,\dots,1,1}^{\lambda+\alpha}, k_{n,\dots,1,2}^{\lambda+\alpha}\}$ が特定され, 各経路上のボトルネックも特定される.

3. 中部地方道路ネットワークへの適用

対象ネットワークは, 郡上市役所, 下呂市役所を支援側拠点とする 2 ケースを考える. 支援側拠点は, 岐阜県内の支援側拠点を除く主要 9 市役所と, 松本, 金沢, 富山, 福井の各市役所を設定した. また, 災害時を想定すれば, 必要に応じて規制に基づいた道路の逆走が可能であるため, 無向リンクで記述する. リンク数は 7,341, ノード数は 5,171 である. この条件で辺連結度 $+\alpha$ -カットにおけるボトルネックを特定した.

杉浦より, 郡上市役所の辺連結度は 6 であり, 高山市役所の辺連結度が 7 であることから, 郡上市役所において 7 つのリンクで孤立が生起するときのボトルネックを特定するため, $\alpha = 1$ とした. 郡上市役所の辺連結度 $+\alpha$ -カットに含まれるボトルネックの位置を図-2 に示す. 図中リンクに付した数値は, 最小カットの演算において特定された非重複経路に識別番号を与え, 全探索アルゴリズムで発見されたときに, どの初期の非重複経路から分岐して発見されたかを示している. 図上の強調色はボトルネックとして最初に発見されたときの $\{j | j \leq \alpha\}$ の値を表している. ボトルネックの多くは郡上市役所周辺に集中しており, 郡上市役所周辺への山地を経由する全ての進入路が, ボトルネックに含まれた. また, 広範囲に多数のボトルネックが存在することから, 孤立が生起する途絶リンクの組み合わせ数は格段に大きくなることが予想され, 高山市役所のケースと比べて, 辺連結度は 1 という小さな差であるが, 孤立に対する脆弱性は大きな差があることが示唆される. 下呂市役所の辺連結度は 3 であり, 郡上市役所の試算の際と同様に, 7 つのリンクが同時に被災すれば孤立する場合を考慮できるよう $\alpha = 4$ に設定した. 下呂市役所の辺連結度 $+\alpha$ -カットに含まれるボトルネックの位置を図-3 に示す. ボトルネックは, 郡上市役所と比較しても明らかに多く, より広範囲に存在している. 高山市役所と同程度まで孤立脆弱性を緩和するためには, これらのボトルネックの構造物等の整備が必要となるが, ボトルネックの範囲, 数からこれらすべてを整備するのは膨大な費用を要するため, リンクを新設し, 辺連結度を増大させる方法も有効であると考えられる.

このように本研究の提案手法を用いれば, ある目標とするリンク数で孤立が生起するときのボトルネ

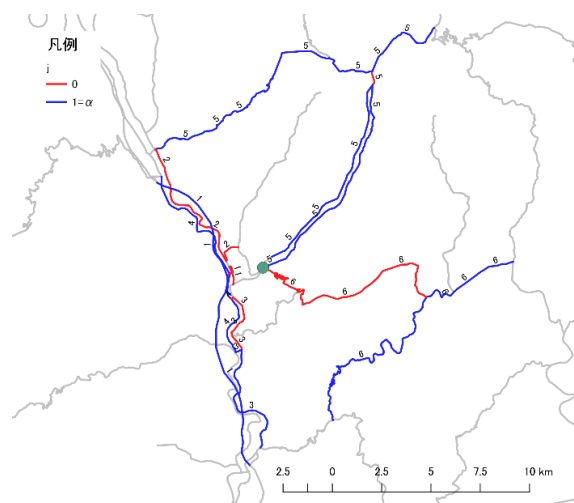


図-2 郡上市役所を支援側拠点としたときのボトルネック

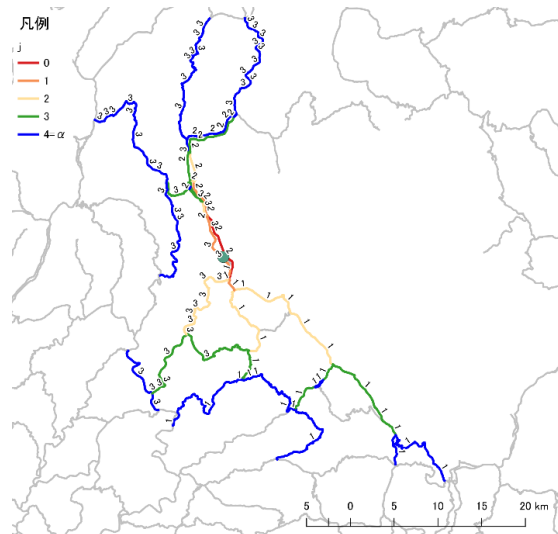


図-3 下呂市役所を支援側拠点としたときのボトルネック

ックを明らかにすることができる. これにより, 地域間や拠点間で孤立脆弱性に寄与するリンクがどの程度の量, あるいはどの程度の範囲に存在するのかを比較することができ, 防災計画の基礎資料として活用することが期待できる. また, ボトルネックとして見つかったときの j の値は耐震化等の整備優先順位をつけるときにも有用な情報となるだろう.

4. おわりに

今後の課題として, カットが成立する組み合わせの列挙方法の開発と, 途絶リンク数に対応するカットの組み合わせ数を明らかにすることが必要である. カットの組み合わせ数が多いほど孤立が生起する危険性は高いため, 脆弱性評価には有用な情報となろう. また, 今回は街路を含まないネットワークでの試算に留まるが, 救命救急などで利用する道路は街路も含めたものであるため, より詳細なネットワークでの評価を検討する.

参考文献

- 1) 杉浦聡志: 辺連結度と最小カットセットを用いた道路脆弱性分析, 土木計画学研究講演集, Vol.57, 43-06, 2018.