

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

中島 雅大¹・杉浦 聡志²・高木 朗義³

¹学生会員 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科環境社会基盤工学専攻

(〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail:w4523017@edu.gifu-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学助教 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail:sugi_s@gifu-u.ac.jp

³正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: a_takagi@gifu-u.ac.jp

本研究は、道路ネットワークの孤立に対する脆弱性の評価手法構築を目指したものである。道路ネットワークの孤立脆弱性は複数想定される支援側の拠点と被災地を想定した受援側の拠点が非連結となるときの途絶するリンクの情報で評価する。本稿では、辺連結度+ α -カットに含まれるボトルネックの特定方法を提案する。これは、孤立が成立する最小の途絶リンク数より大きなリンク数で孤立するときのリンクを特定する方法である。これによりある目標とする孤立脆弱性まで緩和するために耐震化等の整備が必要となるリンクを特定することが可能となる。構築した手法を中部地方の道路ネットワークに適用し、孤立の成立に寄与するリンクの数や存在する範囲等から、対象地域の道路ネットワーク孤立脆弱性を考察する。

Key Words : Road Network Resilience, Vulnerability, Isolation, Edge connectivity, Cut

1. はじめに

東日本大震災以降、わが国では大規模自然災害に対して国民生活、経済への被害の最小化を目指す国土強靱化に関する政策が推進されている。国土交通省は 2016 年に道路の防災機能の評価手法(案)¹⁾、道路ネットワークの防災機能の向上効果計測マニュアル(案)²⁾を公表して、道路投資における防災に対する価値を評価する枠組みを提供している。後者のマニュアルではあるリンクが途絶したときのアクセシビリティの変化量を計測し、防災の機能向上として表現する方法が示されている。ただし、このマニュアルでは知見の蓄積によりマニュアル自体の逐次更新を謳っている。このように今後も道路ネットワークの災害時における機能を評価するための知見は蓄積が求められるところであると考え。本研究では道路ネットワークの評価方法の1つとして、ある被災地が複数の道路途絶により、進入できない状況に着目する。

大規模災害時において道路の途絶により陸路による被災地への進入が不可能となれば、救急輸送や物資輸送は困難となる。例えば、東日本大震災直後には内陸から沿

岸、太平洋側を縦断する道路がいずれも破損、途絶したため救援物資等の輸送が困難となった。2017年の九州北部豪雨では緊急輸送道路 11 路線が土砂災害等により途絶し、29 集落が孤立した³⁾。被災地の迅速な緊急対応、復旧・復興のためには支援可能な地域と被災地が連結され、孤立しないことが極めて重要である。

筆者らは以上の問題意識に基づいて、孤立に対する道路ネットワークの脆弱性を評価する手法構築を目指している。杉浦⁴⁾では辺連結度を道路ネットワークの脆弱性指標とすることを提案した。くわえて、最小カットを導出することにより、道路ネットワークの孤立に寄与するリンクを特定する手法を提案した。本稿では、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、杉浦⁴⁾では把握できなかった、孤立が成立する最小の途絶リンク数よりも大きなリンク数で孤立するときのリンクを特定することが可能となる。すなわち、ある目標とする孤立脆弱性まで緩和するために耐震化等の整備が必要となるリンクを明らかにすることができる。提案した手法は中部地方の道路ネットワークに適用し、孤立に寄与するリン

クの数や存在する範囲等を考察することで、対象地域の道路網のネットワーク孤立脆弱性を考察する。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

(1) 道路ネットワーク脆弱性に関する研究

道路ネットワークの機能低下、およびそれに対する抵抗力を評価する概念として信頼性と脆弱性がある。いずれにおいてもネットワーク機能を評価する基準を設定し、そのうえで評価する。また、その評価基準を大きく悪化させるリンクやノードの特定や、評価基準が破損により強く影響する OD ペアを特定する手法が蓄積されている。道路ネットワークの信頼性、脆弱性の評価に関する研究を概観すると表-表-1 のように整理できる。

信頼性評価は一般的にリンクが損傷する確率を入力条件に求める。すなわち、リンク、あるいはそれを構成する構造物群の頑健性を確率として表現していると解釈できる。また、信頼性評価においては、被災による機能の低下度合いに確率分布を与えたものと解釈できる。脆弱性は中山¹⁰⁾によれば、カストロフ的災害等は、生起確率の大小にかかわらずなんらかの対策が必要であり、カストロフ性は期待値の範疇では捉えられないため、確率論の俎上に載せず交通ネットワークが機能を果たすうえで弱さのみを対象とする。したがって、本研究で取り扱う「孤立しない」のように、大きな外力が生起したとしても保持すべき機能基準には脆弱性の分析を用いることが適切であると考えられる。

本研究で提案する孤立脆弱性は2点間の連結を評価するものと近いが、必ずしも一致しない。例えば、複数の救命救急に関連する施設があるとき、支援を必要とする地点へは、要求される性能が同一であればどの救命救急施設から到達しても構わない。孤立した状態ではいずれの施設からも支援を必要とする地点に到達できない。

すなわち、単純に拠点を2つ選択した2点間の連結の強さだけでは、孤立の状態を機能基準と設定した評価ができない。また、アクセシビリティや非重複経路本数の研究では、ある1つのリンクに対して、重要性を議論する。本研究で提案する手法は、孤立に寄与する重要な対象が、複数のリンクの組み合わせで構成されることを示す。このような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見当たらない。

(2) 辺連結度とカット

辺連結度とカットはいずれもグラフ理論で使用される言葉である。それら用語の解説と孤立との関係を解説する。孤立は道路ネットワーク上から被災地を含むノードの集合が支援可能な地域側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。通常時は2つのノード集合は連結されているから、分離するためにはいくつかのリンクを途絶(除去)する必要がある。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かのリンクを除去すればよいか」を示す値と解釈できる。したがって、辺連結度未満の数のリンクが被災により損傷しても、かならず1つ以上経路が残存することとなる。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。したがって、辺連結度を道路ネットワークの孤立に対する脆弱性評価指標とすることを提案する。

本研究では辺連結度と共に、少数のリンク途絶により孤立を生起させるリンクを特定する方法を考える。これは道路ネットワーク上において孤立に関してクリティカルなリンクを特定することを意味する。若林らは一連の

表-1 道路災害抵抗力を対象とした既往研究

種類	評価対象	機能水準	対象論文
信頼性	2点間	連結される確率	若林・飯田 ⁵⁾ など
	道路網	ネットワーク容量	Chen et al. ^{6),7)} など
	道路網	時間増大によるトリップ取りやめ量	Du and Nicholson ⁸⁾ , 朝倉ら ⁹⁾ など
	道路網	所要時間	Lo et al. ¹⁰⁾
脆弱性	2点間	アクセシビリティ	D'Este and Taylor ¹¹⁾ など
	2点間	非重複経路本数	Kurauchi et al. ¹²⁾
	道路網	総走行時間	Jenelius et al. ¹³⁾ , Bell ¹⁴⁾ など
	道路網	代替経路の多様性	Xu et al. ¹⁵⁾
	道路網	ネットワーク予備容量	Xu et al. ¹⁵⁾

研究において2点間の連結信頼性を求めるために、ミニマルカットとよばれる最小カットを含むカットの集合を求める方法を提案している。これは双対ネットワークの構築とその探索によりカットを求める。しかしながらこの方法は中川ら¹⁷⁾が述べているように、起終点がネットワークの端に存在しないとき、3次的に双対グラフを構築しなければならず容易でない。一般的に災害時拠点がネットワークの端にあることは稀であり、実用性に課題が残る。加えて、双対ネットワークの構築には対象とするネットワークが平面グラフであることを要求する。平面グラフとはノード間の接続状況を維持したまま、ノードの位置を動かしたとしたときリンクが交差しない状態が存在するグラフのことである。高速道路など複数のノードをまたぐリンクが存在するネットワークは多くの場合リンクの交差が生じ、平面グラフでないため、双対ネットワークは構築できない。したがって、双対ネットワークを用いる方法は災害時の輸送のような広範囲の道路ネットワークを取り扱う検討には適さない。そこで、最小カット、辺連結度+ α -カットの導出により、孤立に対してクリティカルなリンクを特定する方法を構築する。

3. 辺連結度+ α -カット集合の導出方法

(1) 最小カットの導出方法

杉浦⁴⁾ではすべてのリンク容量を 0 とした最大流問題（以下、辺連結度問題という）を繰り返し解く以下の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。

Step1: 評価対象のリンクをすべて接続したネットワークで辺連結度問題を解き、辺連結度の値 N 、辺素な道に利用されるリンクを特定する。

Step2: Step1 で $x_a = 1$ となったリンク、すなわち辺素な道に利用されたリンクを用いて、任意の経路探索アルゴリズムにより経路を特定する。経路は N 回探索し、各回で使用されたリンクはそれ以降では除去する。経路探索方法は問わない。以下、特定された経路を非重複経路と呼ぶ。

Step3: Step1 で $x_a = 1$ となったリンク全てについて、1つずつ除去したネットワークを用意し、それぞれ辺連結度を算出し、除去することで辺連結度が $N-1$ となるリンク（以下、ボトルネックという）を特定する。

Step4: Step2 で特定した経路上に存在するボトルネックを各経路からそれぞれ1つずつ選択したリンクの組み合わせが最小カット集合となる。ただし、2つ以上の経路があるノードで交差するとき、交差する全ての径路において交点よりも起点側か、あるいは終点側のボトルネックを組み合わせるとき

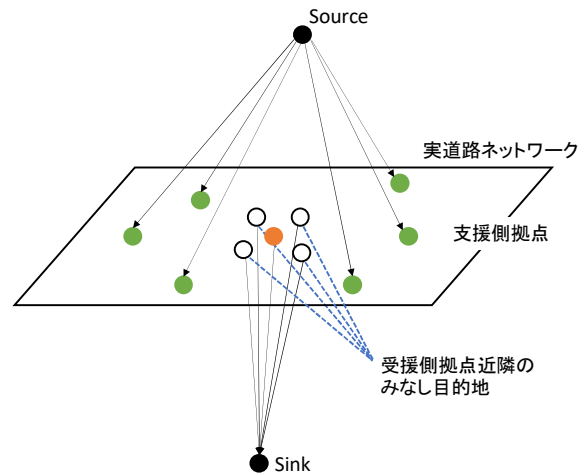


図-1 孤立評価のための One to One ネットワーク

のみ最小カットとして成立することに注意が必要である。

杉浦⁴⁾ではこのアルゴリズムを以下の加工を加えた道路ネットワークに適用している。

被災地と支援が可能な地域という2つの地域間の連結を評価するため、対象とするネットワークに工夫を加える。評価対象とする地域の市役所など中心となる施設を支援側拠点とする。支援側の地域と同時に被災しないと想定され、支援側の災害時の拠点となりうる施設を複数設定する。これらの施設のいずれからでも支援側拠点にたどり着ければ孤立は成立しないため、施設を同時に考慮できるようにする。まず、真の起点を表現するダミーノード (Source) をネットワークに設ける。また、Source と支援側の拠点を接続するダミーリンクを設ける。これにより、真の起点から複数の支援拠点を經由し、支援側拠点に到達する One to One ネットワークが構築できる。このネットワークにおいて辺連結度問題を求解すれば、設定した支援側拠点を全て考慮した辺連結度が求められる。

以上は起点側の工夫であるが、終点側について検討する。辺連結度問題はその性質上、支援側拠点を1つのノードで設定したとき、そのノードの次数が極めて小さければその次数が解となる。これはすなわち、拠点への出入口が限定的であるとき、その出入口にある道路が途絶すれば孤立する、ということの意味する。確かに出入口周辺の道路が限定的である場合にはその対応も災害時に必要であると考えられるが、広域のネットワークの脆弱性を評価する本研究の目的を鑑みればこの解が導出されるケースは捨象したい。そこで、支援側拠点の周辺で、拠点までの道路が災害後速やかに啓開可能と仮定できるようなノードを「みなし目的地」とする。みなし目的地は、広域道路ネットワークでは含まれない街路等で支援側拠点

まで無数に経路が想定できるようなノードと解釈してもよいだろう。みなし目的地は辺連結度が出入口の度数に影響されないよう、受援側拠点の周辺に複数設定する。さらに、真の終点を表現するダミーノード (Sink) をネットワークに設ける。Sinkとみなし目的地を示すノードに1つ以上のダミーリンクで接続する。これにより、図-1のような受援側拠点と支援側拠点間の連結を広域道路ネットワークの脆弱性を評価するためのネットワークが記述できる。

(2) 辺連結度+ α -カットの導出方法

辺連結度+ α -カットの導出方法を検討するにあたり、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、 $\lambda + 1$ 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、最小カットを求めるStep1から4の操作が終了し、 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⁴⁾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、Step2で示した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 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、 $\lambda + 1$ のときの得られた1番目と、2番目の非重複経路を示す。Step3で示した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Step2の非重複経路特定により $k_{n,1,1}^{\lambda+2}$ 、 $k_{n,1,2}^{\lambda+2}$ を求め、Step3の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、

$\{k_{n,1}^{\lambda+1}, k_{n,1,1}^{\lambda+2}, \dots, k_{n,1,1,1}^{\lambda+\alpha-1}, k_{n,1,1,1,1}^{\lambda+\alpha}, k_{n,1,1,1,2}^{\lambda+\alpha}\}$ が特定され、各経路上のボトルネックも特定される。この結果はすべての $\{\lambda + j \mid 1 \leq j \leq \alpha - 1\}$ において、1番目の経路上のボトルネックに操作し、非重複経路を特定したものである。この操作を各段階で特定された2つの非重複経路でそれ

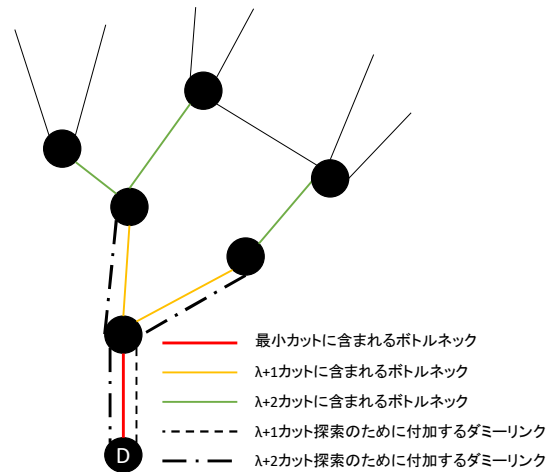


図-2 ボトルネックの緩和のためのダミーリンク

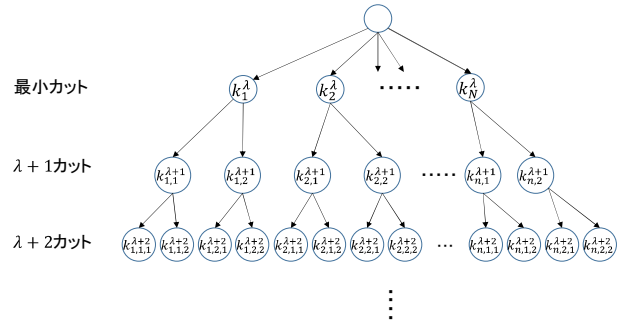


図-3 辺連結度+ α -カットのボトルネックを探索する全探索ノード

ぞれ実行することで、図-図-3のような辺連結度+ α -カットのボトルネックを列挙する全探索アルゴリズムとなる。ただし、この全探索アルゴリズムは以下の課題が残っている。

全探索アルゴリズムにより辺連結度+ α -カットに含まれるボトルネックを列挙可能となる。しかしながら、1つの非重複経路の操作により順次ボトルネックを特定する手続きをとるため、複数の非重複経路で発見されたボトルネックをどのように組み合わせるとカットが成立するかは明示的に表現されない。このため、辺連結度+ α -カットを成立させるボトルネックの全ての組み合わせは把握することができない。くわえて、このアルゴリズムは発見的な手順を取るため、全てのボトルネックが発見される数学的な根拠は現在のところ有していない。ただし、全探索アルゴリズムによる方法でも多くの辺連結度+ α -カットに含まれるボトルネックは特定されるため、防災計画上有益な情報になると考えている。

4. 実ネットワークへの適用

(1) 中部地方道路ネットワークへの適用

構築した道路網連結性評価方法を中部地方の道路ネット

ネットワークに適用する。道路ネットワークは無向リンクで記述する。これは、計算負荷を小さくするための工夫である。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、非現実的な仮定ではないと考える。対象ネットワークは、郡上市役所、下呂市役所を受援側拠点とする 2 ケースを考える。支援側の拠点は、岐阜県内の受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図-4 のネットワークを対象とする。受援側拠点からは街路等で経路が無数に想定できるノードを適宜選出し、各 2 つずつダミーリンクを Sink と接続する。同様にすべての支援側拠点と Source にも 2 つずつダミーリンクを設置した。リンク数はダミーリンクを含めて、14,682、ノード数は Source, Sink を含めて 5,171 である。この条件において辺連結度 $+ \alpha$ -カットに含まれるボトルネックを特定した。求解には汎用プログラミングソフト MATLAB を使用し、最大流問題には maxflow 関数を使用した。

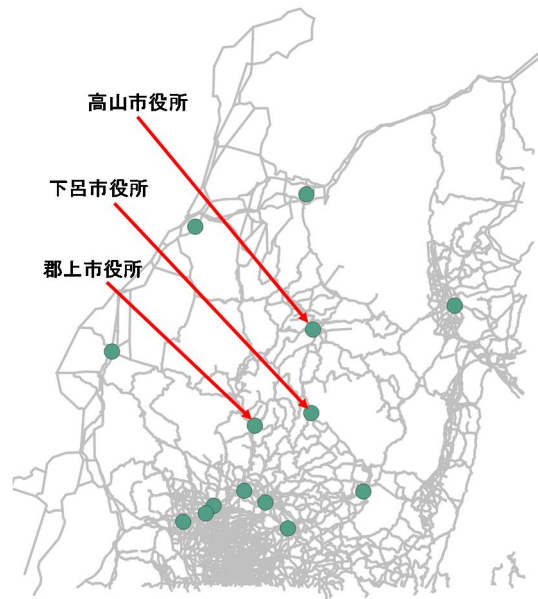


図-4 中部地方ネットワーク

(2) 郡上市役所における辺連結度 $+ \alpha$ -カットに含まれるボトルネック

図-図-5に示すとおり、郡上市役所における辺連結度は、6であり、赤色破線がそのボトルネックである。非重複経路ごとにボトルネックをまとめて青破線で囲み、番号を与えている。この各非重複経路内のリンクがそれぞれ断絶すると孤立が成立する。杉浦⁴⁾より、高山市役所を受援側拠点としたときの辺連結度が7であることから、郡上市役所を受援側拠点としたときはより孤立脆弱性が高いといえる。高山市役所の孤立が生起する最小リンク数が7であることから、郡上市役所を受援側拠点としたケースにおいて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、 $\alpha = 1$ として試算した。演算に要した時間は、筆者所有のPCで数分程度であった。郡上市役所における辺連結度 $+ \alpha$ -カットに含まれるボトルネックの位置は図-図-6に示すとおりである。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。全探索アルゴリズムの過程では、同一のリンクが複数の非重複経路でボトルネックとして発見されることが生じるため、ここではボトルネックとして特定されたときの最小の j の値を採用した。すなわち、 $\alpha = 0$ のときは最小カット集合を意味するため、図-図-5の赤破線と図-図-6における赤破線の位置は一致する。青線は $\alpha = 1$ 、すなわち7つのリンクが同時に被災すれば孤立する条件において最小カットに含まれず新たに発見されたボトルネックである。最小カットと同様に、ボトルネックの多くは郡上市

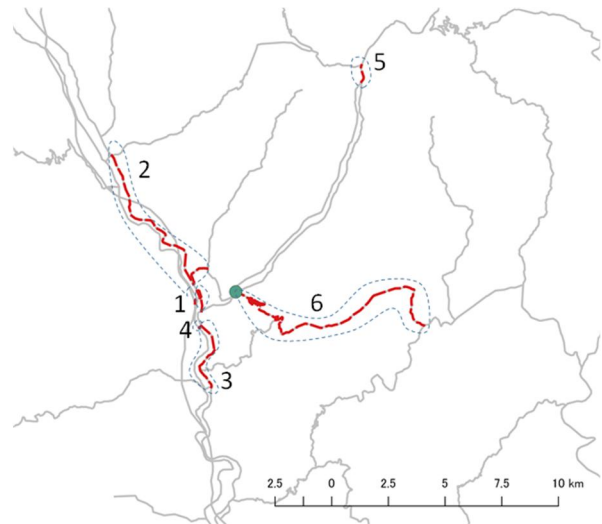


図-5 郡上市役所の最小カット集合

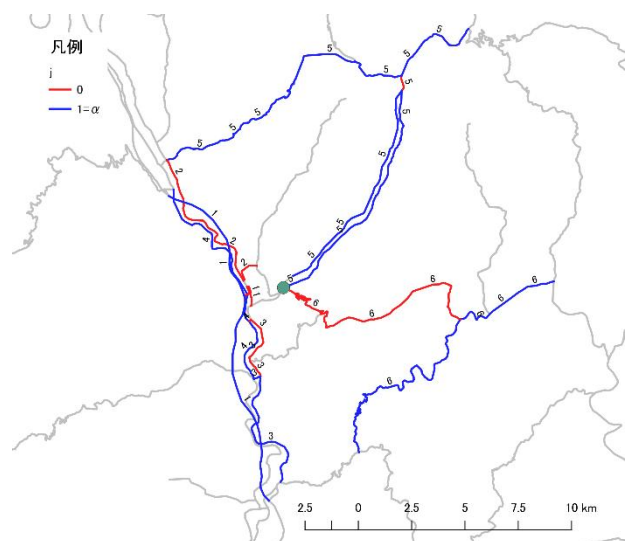


図-6 郡上市役所を受援側拠点としたときのボトルネック位置
役所周辺に集中しており、山間地に位置する郡上市役所

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、最小カットのボトルネックと比べ、広範囲に多数のボトルネックが存在する。第3章で述べたように数は明らかにできないものの、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のが予想できる。したがって、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。

(3) 下呂市役所における辺連結度+ α -カットに含まれるボトルネック

道路ネットワークは前項と同じ設定都市、下呂市役所を受援側拠点としたケースにおける辺連結度は3であり、**図-8**の赤色破線がそのボトルネックである。非重複経路ごとにボトルネックをまとめて青破線で囲み、番号を与えている。下呂市役所は、すぐ近接するリンクがわずかに3つ同時に途絶すれば孤立が成立する。辺連結度が3であることから、高山市役所、郡上市役所と比較して孤立に対して脆弱といえる。さらに、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に $\alpha = 4$ に設定し、全探索アルゴリズムにより辺連結度+ α -カットに含まれるボトルネックを試算した。演算に要した時間は筆者所有のPCで十数分であった。下呂市役所を支援側拠点としたケースにおけるボトルネックの位置は**図-9**に示すとおりである。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。例えば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を頑健に整備する、あるいは被災しても途絶を速やかに解消できるような整備を必要とすることとなる。しかしながら、ボトルネックの範囲、数からこれらすべてのボトルネックを整備するのは膨大な費用を要することが考えられる。このような場合には、リンクを新設し、辺連結度を増大させるような方法も有効であるだろう。このように本研究の提案手法を用いれば、ある目標点となるリンク数で孤立が生起するときのボトルネ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。

5. おわりに

本稿では辺連結度+ α -カットに含まれるボトルネッ

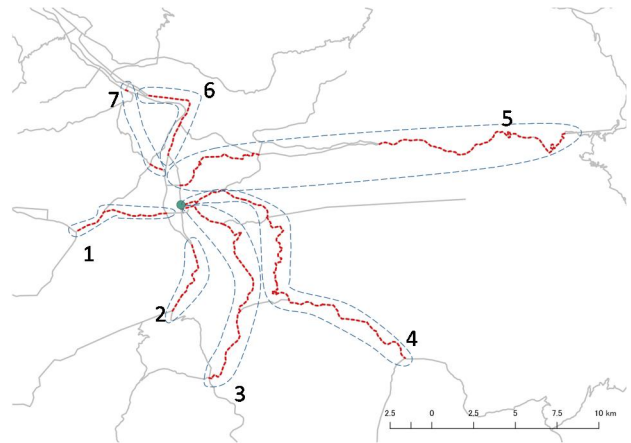


図-7 高山市役所を受援側拠点とした最小カット試算結果

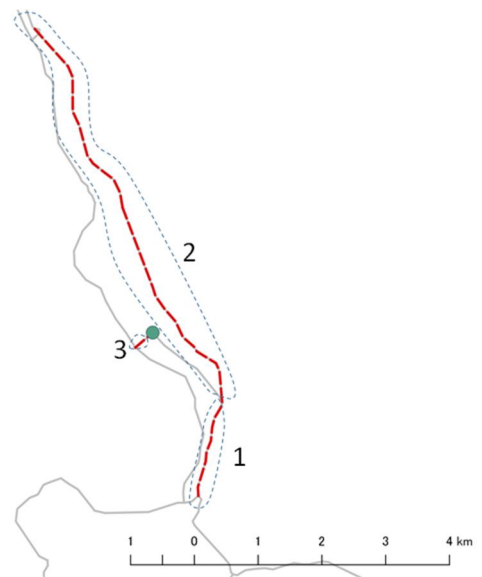


図-8 下呂市役所を受援側拠点としたときの最小カット集合

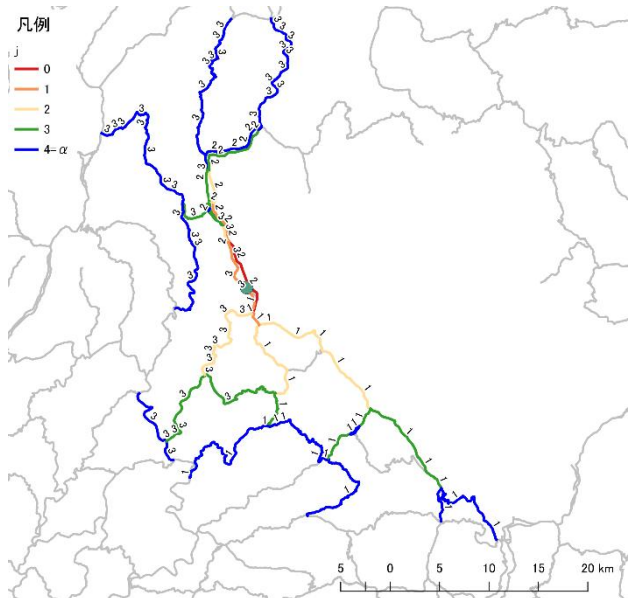


図-9 下呂市役所を受援側拠点としたときのボトルネック位置

クを列挙する方法を構築し、中部地方の道路ネットワークに適用した例を示した。試算結果では郡上市役所を受援側拠点としたケースにおいては $\alpha = 1$ としたときでも

ボトルネックの量が大きくなり、孤立が成立する組み合わせ数が飛躍的に大きくなることを示した。下呂市役所を受援側拠点としたケースでは、 $\alpha = 4$ のときのボトルネックを示した。このケースでは郡上市役所の例よりも格段にボトルネックの量が多くなり、孤立が成立する組み合わせ数が膨大になることを示唆した。このように本稿で提案した手法は、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、またどの程度の範囲に存在すること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。試算ケースにおいて、提案アルゴリズムの計算時間は筆者の所有する汎用PCで数分から十数分程度であったが、 α の値を本稿の試算例よりも大きくするとき、組み合わせ数は爆発的に増加するため、演算の工夫が求められる。本稿では全探索アルゴリズムによるボトルネックの特定までの手続きを示した。しかしながら、カットが成立するボトルネックの組み合わせを把握するための方法は未開発である。したがって、今後は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大き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、本稿での試算は街路を含まないネットワークでの試算に留まる。救命救急などで利用する道路は街路も含めて詳細なネットワークで検討される必要があるだろう。したがって、より大きなネットワークでの評価が実用上必要となることが考えられる。そのとき、実用に耐えうる程度の計算時間で実行可能か検証が必要である。

謝辞

本研究は越山科学技術振興財団の研究助成（道路ネットワークの断絶に着目した脆弱性評価モデルの開発，研究代表者：杉浦聡志）を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 国土交通省道路局都市局：道路の防災機能の評価手法（案），[<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-hyouka/pdf/hyouka.pdf>]，（最終閲覧日：2018年7月28日）。
- 国土交通省道路局都市局：道路ネットワークの防災機能の向上効果計測マニュアル（案），[http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-hyouka/pdf/nw_manual.pdf]，（最終閲覧日：2018年7月28日）。
- 毎日新聞「九州豪雨 緊急道 11 路線寸断 集落孤立招く」，2017.7.16，[<https://mainichi.jp/articles/20170716/k00/00m/040/142000c>]，（最終閲覧日：2018年7月28日）
- 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。
- 若林拓史，飯田恭敬：交通ネットワーク信頼性解析への信頼性グラフ理論の適用の考え方，土木計画学研究・講演集，No.10，pp.125-132，1987。
- Chen, A., Yang, H., Lo, H.K. and Tang, W.H.: A Capacity Related Reliability for Transportation Networks, *Journal of Advanced Transportation*, Vol.33, 183-200, 1999.
- Chen, A., Yang, H., Lo, H.K. and Tang, W.H.: Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results, *Transportation Research Part B*, Vol.36, pp.225-252, 2002.
- Du, Z.P. and Nicholson, A.: Degradable Transportation Systems: Sensitivity and Reliability Analysis, *Transportation Research Part B*, Vol.31(3), pp.225-237, 1997.
- 朝倉康夫，柏谷 増男，為広 哲也：災害時における交通処理能力の低下を考慮した道路網の信頼性評価モデル，土木計画学研究・論文集，Vol.12，pp.475-484，1995。
- Lo, H.K. and Tung, Y.K.: Network with degradable links: capacity analysis and design, *Transportation Research Part B*, Vol.37, pp.345-363, 2003.
- D'Este G.M. and Taylor M.A.P.: Network Vulnerability: an Approach to Reliability Analysis at the Level of National Strategic Transport Networks, In: Bell MGH, Iida Y (eds.) *The Network Reliability of Transport*, Pergamon, 2003.
- Kurauchi, F., Uno, N., Sumalee, and A., Seto, Y.: Network evaluation based on connectivity vulnerability. In Lam, H.K., Wong, S.C., Lo, H.K. (Eds.), *Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee*. Springer, pp. 637-649, 2009.
- Jenelius, E., Petersen, and Mattsson, L-G.: Importance and exposure in road network vulnerability analysis, *Transportation Research Part A*, Vol.40, pp.537-560, 2006.
- Bell, M.G.H.: A Game Theory Approach to Measuring the Performance Reliability of Transport Networks, *Transportation Research Part B*, Vol.34(6), pp.533-546, 2000.
- Xu, X., Chen, A., Jansuwan, S., Heaslip, K., Yang, C.: Modeling transportation network redundancy. *Transportation Research Procedia (21st International Symposium on Transportation and Traffic Theory)* 9, 283-302, 2015.
- 中山晶一郎，朝倉康夫編著：道路交通の信頼性評価，

第 5 章“連結信頼性とその評価“, pp.77, コロナ社,
2014.

17) 中川真治, 若林拓史, 飯田恭敬 : n 番目最短経路を

用いた簡便な信頼性解析法とその交通管理運用策
への適用, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.861-
868, 1996.

THE METHOD OF ISOLATION VULNERABILITY ASSESSMENT FOR ROAD NETWORK
CONSIDERING EDGE CONNECTIVITY + α -CUT

Masahiro NAKASHIMA, Satoshi SUGIURA, Akiyoshi TAKAGI