

辺連結度と最小カットセットを用いた 道路網脆弱性分析

杉浦 聡志¹

¹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

本研究は孤立に対する道路脆弱性の評価方法として辺連結度と最小カットを用いた方法を提案する。まず、道路ネットワークに対するレジリエンスの概念について整理し、既往の道路ネットワークの評価指標、本研究の提案指標がレジリエンスの中でどのように位置づけられるか考察する。つぎに、道路ネットワークの孤立脆弱性を評価する指標として辺連結度を提案する。くわえて道路ネットワークにおいて孤立に対してクリティカルなリンクを特定するために最小カット集合を列挙する方法を構築する。構築した手法は岐阜県の道路ネットワークおよび中部地方の道路ネットワークに適用し、孤立に対する脆弱性について評価した。さらに、孤立に対する脆弱性が高い受援拠点の複数配置を想定することで、孤立の脆弱性を緩和する方策について考察する。

Key Words: Road Network Resilience, Vulnerability, Isolation, Edge connectivity, Minimum 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の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。

被災地と支援する地域の間には 1 つの経路も存在しなくなる (以下、孤立という) のリンク途絶の組み合わせは無数に存在しうる。孤立するリンク途絶の組み合わせのうち、孤立するのに必要な最小のリンク数 (以下、辺連結度という) は、潜在的な道路の脆弱性を表現すると考える。地域間の道路網において脆弱性を評価することは、防災投資など事前の用意のために有用であろう。特に孤立を成立させるリンクが把握できれば、耐災化や災害発生後の啓開作業の優先順位などに活用できると考えられる。以上の背景をもとに、孤立に対する脆弱性評価指標の提案と、孤立に対してクリティカルなリンクを特定する手法を構築することを本研究の目的とする。

本論文の構成を以下に示す。第 2 章では道路ネットワークに対するレジリエンスの概念について整理し、既往の道路ネットワークの評価指標がレジリエンスの中でどのように位置づけられるか考察する。考察を踏まえて本研究が提案する孤立に対する脆弱性評価手法の位置付けを明らかにする。第 3 章では孤立に対する道路ネットワークの脆弱性を評価する指標を提案する。第 4 章では道路ネットワークにおいて孤立に対してクリティカルなリンクを特定する手法を構築する。第 5 章では構築した手法を岐阜県の道路ネットワークおよび中部地方の道路ネ

ットワークに適用した結果について示す。さらに、災害時の受援拠点の配置を想定して、複数の試算ケースにより脆弱性を緩和する方策について検討した。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

(1) 道路ネットワークにおけるレジリエンスの評価

本研究の脆弱性評価を既往研究と比較して位置付けるにあたり、道路をシステムとしてとらえたときのレジリエンスの概念を整理したい。内閣府⁴⁾では強韌性（レジリエンス）の説明において病気や環境の変化を例にあげ、それに対する人・生物のもつ抵抗力および回復力として示している。McDaniels et al.⁵⁾はHolling⁶⁾のengineering resilienceの概念を具体化して図-1を示している。ここでは被災後に残存する機能の度合いを頑健性（Robustness）とよび、機能が元の水準に回復するための時間を迅速性（Rapidty）と呼んでいる。Bruneau et al.⁷⁾では同様の図を示しつつ、レジリエンスの次元をさらに細分化して頑健性（Robustness）、冗長性（Redundancy）、臨機応変性（Resourcefulness）、迅速性（Rapidty）の4つを定義している。頑健性はシステム、およびその要素が外力に対して機能喪失に耐えうる強さのことを指し、冗長性は外力によりシステムの一部に破損や劣化が生じたときにシステム全体が機能要件を満たすことができる程度としている。臨機応変性は災害後の対応において的確に優先順位を与えた下で財源、人的資源を動員し目標を達成する能力、回復の迅速性は被災から回復するまでの速度としている。これらレジリエンスの定義を踏まえて、道路ネットワークのレジリエンス評価について検討しよう。ここで、語彙を統一するため、被災後に残存する機能を総じて抵抗力、被災後に元の機能水準まで復旧する時間を回復力と呼ぶこととする。

頑健性と冗長性は分析対象をどう設定するかによって解釈が異なる。例えば、輸送網を分析対象とすると、道路ネットワークは輸送網において複数あるモードの1つである。この設定においては、ある外力に対する道路ネットワークの機能低下への抵抗力は頑健性と解釈でき、他のモードでの機能代替性は冗長性と捉えることができる。一方、道路ネットワークを評価対象とすると、リンクはそれを構成する1要素となる。この設定においては、リンクの機能低下への抵抗力は頑健性と捉えられ、道路ネットワーク全体で担える機能の代替は冗長性と解釈できる。したがって、頑健性と冗長性を区別して分析するには、分析対象を設定したうえで、それぞれをどのように定義するかを明らかにする必要があるだろう。本稿では道路ネットワークの頑健性をリンクの破損、途絶などの機能低下に関する抵抗力、冗長性はリンク、ノードな

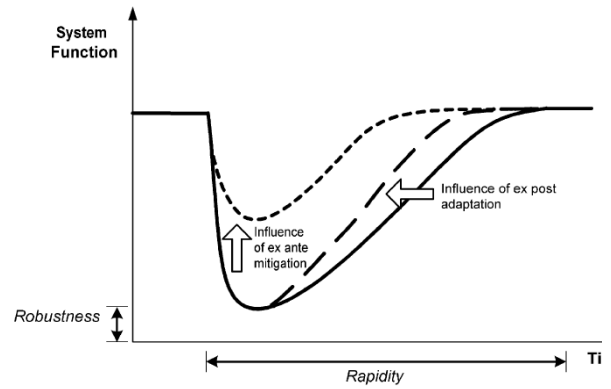


図-1 レジリエンスの概念⁵⁾

表-1 災害レジリエンス機能指標の例⁸⁾

発災からの経過時間	災害対応の段階（機能に対応）	指標（例）
数日	救命救急	拠点病院へのアクセシビリティ
数カ月	救援（救援物資輸送）	災害拠点から避難所等へのアクセシビリティ（連結性・所要時間）
数カ月	復旧活動	交通容量、消費者余剰
数年	経済活動の継続・復興	交通容量、消費者余剰

ど構成要素の一部が損傷したときのネットワーク全体での機能低下に関する抵抗力と定義する。臨機応変性と迅速性はいずれも回復力に大いに関係すると思われるが、その度合いは財源やその他リソースの配分とそれらをマネジメントする計画に大きく依存する。したがって、この評価には道路ネットワークのほか各種リソースやそのマネジメントを入力情報とする必要がある。

多々納⁸⁾はBruneau et al.⁷⁾の機能の充足度、レジリエンスの次元の議論を基に、災害時における道路ネットワークへの社会的ニーズを整理、考察している。災害からの経過時間と重点が置かれる災害対応が異なることに着目し、表-1のようにレジリエンス機能指標を例示している。このように社会的ニーズを考慮すれば、災害後の各段階の交通目的に応じて複数の機能指標を設定し、レジリエンスを多元的に評価することが有効であると指摘している。以上の議論をもとに道路ネットワークの評価方法について検討しよう。災害発生直後から復旧活動が本格化するまでは救命救急、救援物資の輸送などわずかな容量であっても到達することが要求される交通目的が多いと考えられる。すなわち、特定の2点の接続を評価することが適切であるといえる。くわえて、このときには緊急輸送に関わる車両以外は必要があれば排除が運用上可能であ

ること鑑みれば、一般の利用者行動や混雑も考慮する必要がないと仮定しても差し支えないだろう。復旧活動が本格化し、復興期に至るまでは経済活動のために多数の OD ペアからなる交通需要に処理できることが求められる。したがって、OD 需要と混雑を考慮したネットワークとしての機能評価が必要といえる。ただし、被災の状況や復旧の進行経緯によってはこのように明確に 2 分でできないことも生じ得るが、いずれにせよレジリエンスの評価においてはこの 2 つの道路ネットワークの輸送目的を考慮することが適当であろう。

(2) 道路ネットワークの信頼性・脆弱性評価

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。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。ある特定の 2 点間が連結されるか否かを道路ネットワークの機能基準として定義し、接続される確率を信頼性として定義した連結信頼性と呼ばれる研究がある(若林・飯田⁹⁾、飯田・若林¹⁰⁾、中川ら¹¹⁾)。ネットワーク全体におけるサービス水準の信頼性を評価するものは、機能の設定をネットワーク容量としたもの(Chen et al.¹²⁾、Chen et al.¹³⁾) 時間増大によるトリップ取りやめの量(Du and Nicholson¹⁴⁾、朝倉ら¹⁵⁾)、所要時間(Lo et al.¹⁶⁾) などがある。これらはいずれもリンク容量の変動を確率的に与えて、サービス水準の低下量とそれが生起する確率を求める。

脆弱性は中山¹⁷⁾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の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。

脆弱性は被災による結果のみを評価することから、破損することが前提に議論されており、頑健性については評価対象とせず、冗長性のみを評価するものといえる。道路ネットワーク全体のサービス水準を機能基準として脆弱性を評価するものとしてはサービス水準を総走行時間(Jenelius et al.¹⁸⁾、Bell¹⁹⁾)としたもの、代替経路の多様性(Xu et al.²⁰⁾)、ネットワーク予備容量(Xu et al.²⁰⁾)など

がある。一方、特定の 2 点間の接続を機能基準として脆弱性を評価する方法はアクセシビリティによるもの(Chang and Nojima²¹⁾、D'Este and Taylor²²⁾) 非重複経路によるもの(Kurauchi et al.²³⁾、瀬戸ら²⁴⁾)がある。アクセシビリティでの評価は 1 つのリンクの破損を想定し、設定したアクセシビリティ指標の変動を評価するものである。くわえて、2 点間経路、連結を直接的に評価するものではない。非重複経路はある 2 点間の連結の強さを非重複経路の数で表現する。本研究で提案する孤立への抵抗力はこの 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、単純に拠点と 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。このことから、孤立の状態を機能基準として道路ネットワークを評価する手法論は見当たらない。

以上の議論より、本研究は災害直後の被災地と支援可能な地域を設定し、被災地が孤立するか否かを機能基準とするレジリエンスにおける抵抗力(冗長性)の評価手法を提案するものと位置付けることができる。

(3) 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、最小の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¹⁾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 次元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. 道路網の孤立に関する脆弱性評価方法

(1) 辺連結度の算出方法

辺連結度の算出には最大流問題による解法がよく知られている。最大流問題はある OD ペアについて、各リンク容量制約を超過しない制約の下、ネットワーク上を通行できる最大のフローを求める問題である。最大流問題において、リンク容量を全て 1 としたとき、以下の(1)式から(5)式で定式化できる。

$$\max_{x,y} y \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{out(s)} x_a - y = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{in(t)} x_a - y = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{in(n)} x_a - \sum_{out(n)} x_a = 0 \quad \forall n \in N \quad (4)$$

$$x = \{0,1\} \quad y = \{0,1,2 \dots\} \quad (5)$$

ただし、 y は辺素な道の数 (未知変数)、 x_a はリンク a が辺素な道に含まれれば 1、そうでなければ 0 をとる未知変数、 $out(k)$ はノード k から流出するリンクの集合、 $in(k)$ はノード k に流入するリンクの集合、 N は道路ネッ

トワークのノード n の集合、 s は起点ノード、 t は終点ノードを示す。

(1)式は目的関数であり、ネットワーク上を通行できる OD フローの最大化を示す。(2)から(4)式はフローの保存則、(5)式は各変数の取りうるあたりに関する制約である。この問題は、最大流問題のリンク容量を 1 とすることで、リンクを重複しない経路の数を最大化する問題と解釈でき、Kurauchi et al²⁾と等価の問題である。これは、Menger の定理により「辺素な道の数と辺連結度は等しい」ことが証明されていることによる。辺素な道とは Kurauchi et al²⁾の非重複経路と同義である。したがって、(1)から(5)の問題 (以下、辺連結度問題という) により辺連結度が求められる。

(2) 孤立評価のための One to One ネットワーク

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受援側拠点とする。受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受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、受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、受援側拠点を 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、受援側拠点の周辺で、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受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次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-2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。

4. 最小カット集合の列挙方法

最小カットは辺連結度と等しい数のリンクで構成されるが、必ずしもその組み合わせは一意であるとは限らない。例えば、図-3のネットワークは (s, t) 間において辺連結度が2であり、リンク {A, B} と {C, D} はいずれも最小カットである。このような最小カットを構成するリンクの組み合わせ（以下、最小カット集合という）を全て列挙する方法を構築する。

最小カット集合の導出は以下の手順で可能である。この手順で最小カット集合が導出可能であることを示すためには、数学的証明が必要となる。証明については付録を参照されたい。

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。

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、交差する全ての経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ただけ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。

Step2 で特定した経路上にはボトルネックが複数存在することもある。そのため、最小カット集合は複数の組み合わせが生じる。Step4で1つの経路に複数のボトルネックが存在するとき、どの1つを選択するかによる各経路の組み合わせを生成すれば、すべての最小カット集合を列挙することが可能である。

ここで、最小カット集合列挙の計算負荷を軽減するために、辺連結度問題のうち、(1)式で示した目的関数に工

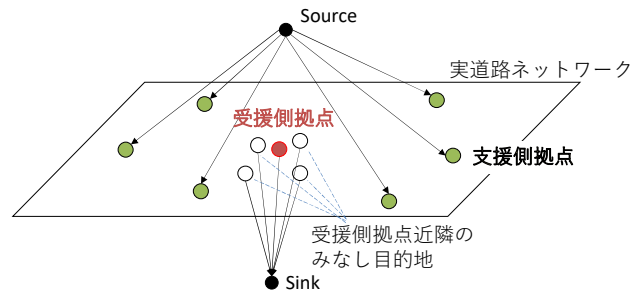


図-2 孤立評価のための One to One ネットワーク

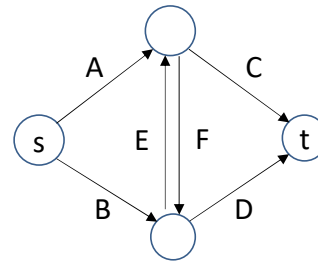


図-3 辺連結度2、最小カットが2つあるネットワーク

夫を加える。(1)式で示される目的関数は、辺素な未知の数を示す項のみを含む。したがって、辺連結度問題を求解したとき、 y については一意に最大化された値が求まるが、そのときに $x_a = 1$ となるリンク集合はボトルネックと無関係なリンクを冗長に含むことも生じる。

Step3 では、 $x_a = 1$ となったリンクを全て1つずつ除去したネットワークを用意し、辺連結度問題を求解する。そのため、 $x_a = 1$ となるリンクは少ない方が計算負荷上有利である。そこで、辺連結の値に影響しない範囲で、 $\sum_{a \in A} x_a$ を小さくするよう、目的関数にリンクの数を示す項を導入する。以上より、辺連結度問題の目的関数を(6)式とする。

$$\max_{x,y} y - \varepsilon \sum_{a \in A} x_a \quad (6)$$

ただし、 ε : 十分に小さな値である。

5. 実ネットワークへの適用

(1) 岐阜県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岐阜県周辺の道路ネットワークに適用する。災害後の物資輸送を想定し、郡上市役所を受援側の拠点、支援側の拠点に岐阜県内の9市役所を設定した図-4に示した道路ネットワークを対象とする。郡上市役所から街路等で経路が無数に想定できるノードを5つ選定し、各2つずつダミーリンクを Sink と接続した。リンク数はダミーリンクを含めて 4796、ノード数は Source と Sink を含めて 1782 である。試算には汎用プログラミング言語 MATLAB を使用し、線形計画ソルバーで

ある GUROBI を呼び出して辺連結度問題を求解した。

試算の結果、辺連結度は5であり、ボトルネックは図-5、6に示す赤色破線の通りであった。図中灰色でないリンクは辺素な道に利用されたリンクであり、色は経路探索により識別された経路ごとに異なる色を与えられている。灰色のリンクはその他のリンクである。ボトルネックは赤太破線で示している。図-3では経路ごとにボトルネックをまとめて紫破線で囲い、番号を与えている。紫破線に囲まれたボトルネックのうち、1地点でも破損しリンクが途絶すれば辺連結度は1低下する。加えて、全ての紫破線内それぞれのボトルネックが1つ以上ずつ途絶すれば、郡上市役所は支援側拠点から孤立する。ボトルネックの多くは郡上市役所周辺に集中した。すなわち、山間地に位置する郡上市役所は市街地への進入路が限定的であり、連結の弱点となっていることがわかる。一方で、図-6で2と表示したボトルネックだけは市街地への進入路ではない。このボトルネックより郡上市街地側には2つの路線が供用されているものの、当該地点で1つのリンクのみとなるため、ボトルネックとなっている。したがって、大規模災害時にはこのリンクが孤立の原因となることも考えられるため、市街地付近ではないが、管理者は注意を払う必要があるだろう。

このように本研究の提案手法で道路網の孤立脆弱性を評価し、脆弱性の要因となるクリティカルなリンクを特定することができる。計算時間は筆者の所有する汎用PCで数秒程度であることから、実用上も問題ないと考える。

(2) 中部地方道路ネットワークへの適用

岐阜県道路ネットワークより広範囲な道路ネットワークでの試算が可能であるか検証するため、中部地方を対象とするネットワークに適用する。また、地域による差を分析するために、高山市役所と下呂市役所を支援側の拠点とする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図のネットワークを対象とする。支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、最小カット集合を算出した。このケースにおいても筆者の汎用PCで数分程度で結果が得られた。試算の結果、高山市役所で7、下呂市役所で3となった。したがって、この比較においては高山市役所よりも下呂市役所は孤立に対して脆弱であるといえる。最小カット集合の位置は図-8、9に示すとおりである。高山市役所は市街地への進入路がいずれもボトルネックとなっており、その進入路が破



図-4 郡上市役所を支援側拠点とするネットワーク

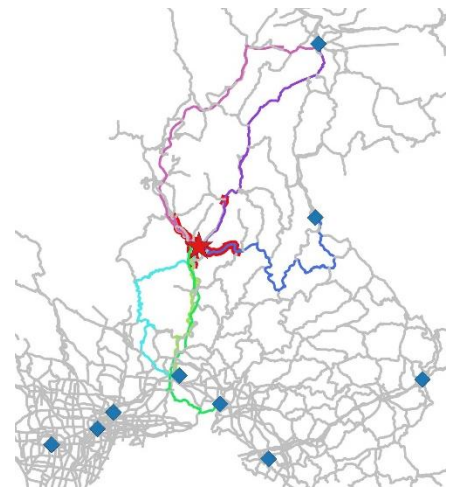


図-5 ボトルネック試算結果 (郡上市役所広域)

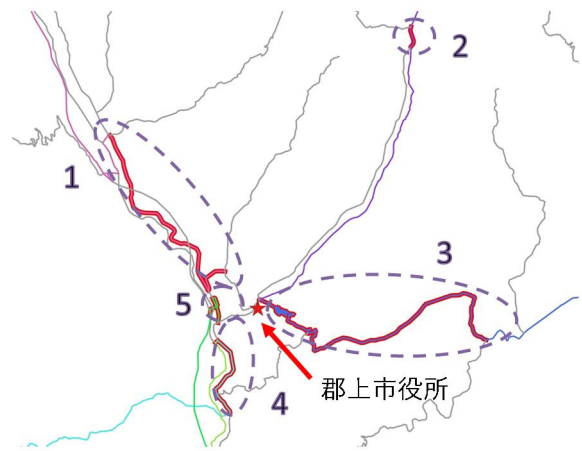


図-6 ボトルネック試算結果 (郡上市役所周辺)

損・途絶したときに孤立が生起する。一方、下呂市役所は市役所近隣に河川があり、それを渡河する橋梁を示す

図中の2と、市役所にアクセスする国道41号を示す1, 3が破損・途絶したときに孤立する。したがって、下呂市役所はすぐ近接するリンクがわずか3つ同時に被災すれば孤立する。もし災害時の受援拠点として市役所を想定する場合、最小カットに選択されたリンクについては耐震化、あるいは迅速な復旧が可能な事前の用意が必要となるだろう。その場合でも大きな外力が生じたときには孤立は生じるため、辺連結度を増大させるような道路整備も検討の余地があるだろう。

(3) 下呂市役所における4振興事務所の考慮

辺連結度が3と小さな値となった下呂市役所について、物資輸送を想定したケースを追加検討する。物資輸送の受援拠点を下呂市役所1つとすると、孤立に対する脆弱性が高いため、他の施設でも物資輸送拠点としての機能を果たせると仮定する。下呂市役所には4つの振興事務所（萩原、小坂、金山、馬瀬）が存在する。これらのいずれに到達しても物資受け入れが可能だと想定して、これらのノード、およびその近隣のノードをみなし目的地として設定する。みなし目的地に該当するノードと Sink

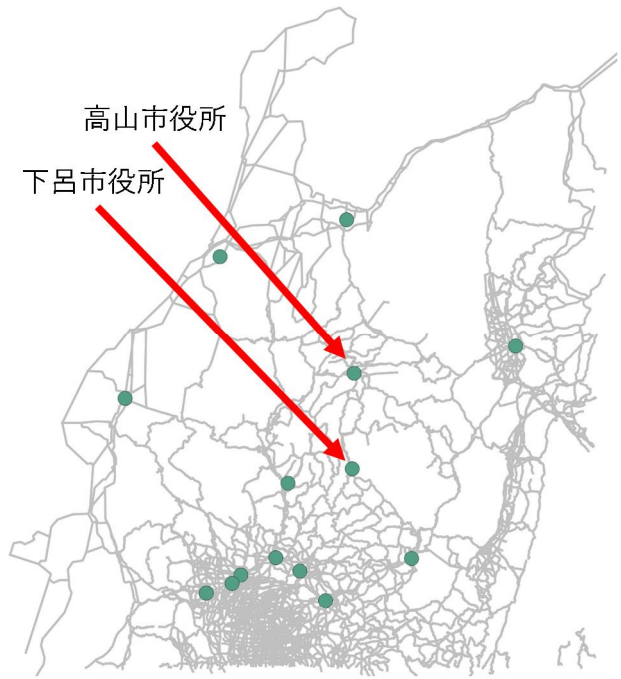
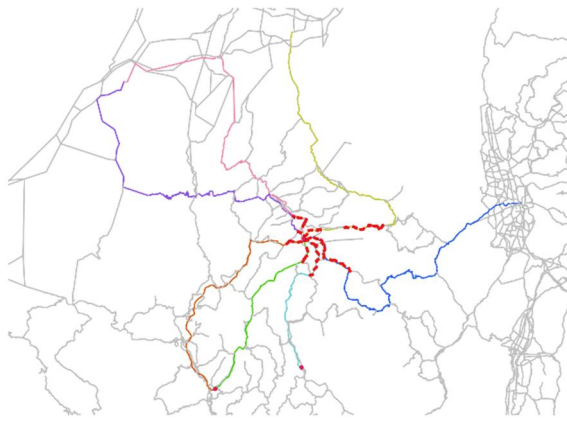
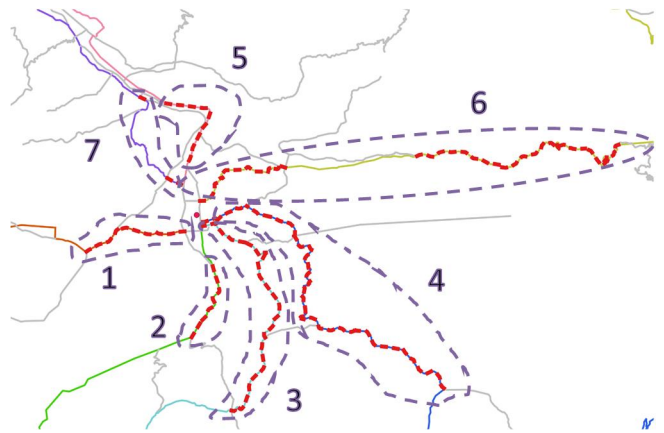


図-7 中部地方ネットワーク

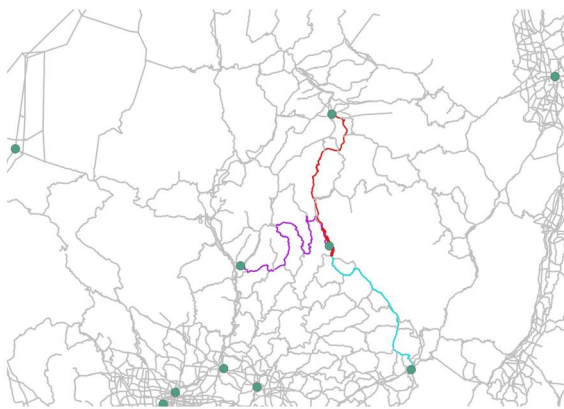


(a) 広域



(b) 高山市役所周辺

図-8 高山市役所のボトルネック試算結果

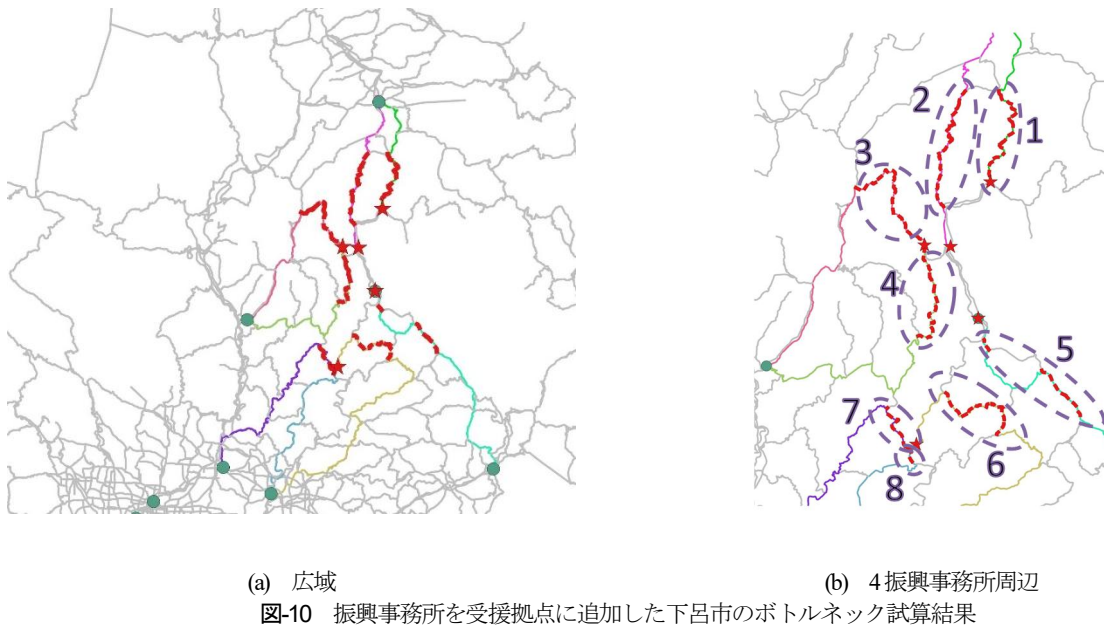


(a) 広域



(b) 下呂市役所周辺

図-9 下呂市役所のボトルネック試算結果



(a) 広域

(b) 4 振興事務所周辺

図-10 振興事務所を受援拠点に追加した下呂市のボトルネック試算結果

にダミーリンクを2つずつ接続したネットワークにおいて試算した。その結果、辺連結度は高山市役所よりも大きい8となった。最小カット集合を図-10により確認すると、市役所1つを対象とする試算と比べて、ボトルネックが広範囲に分散している。これらが同時に途絶しない限りいずれかの受援側拠点に到達できるため、孤立への脆弱性は大きく緩和されたと考えられる。

市役所のみを受援側拠点とするために辺連結度を増大させるには、複数リンクの道路整備が必要となり、膨大な費用を要することも考えられる。そのような場合には、1つの拠点とその地点に至るための経路を整備するより、振興事務所など機能代替が可能な施設を受援側拠点としてハード、ソフトの用意をすることが適切であろう。なお、この検討では触れていないが、いずれかの受援拠点へ到達した後、避難所等への経路が確保されていることも重要である。同様に災害直後の救命活動等のために、消防署、病院等と各被災地への接続も重要となる。これらの孤立脆弱性についても本研究の提案手法で検討が可能である。

このように本研究の提案手法を用いれば、受援側、支援側などの拠点群を対象とした2集合間の孤立脆弱性評価と、孤立に対してクリティカルなリンクを特定することができる。加えて、受援拠点の設定により被災時の孤立に対する脆弱性の緩和策の検討にも応用できることを示した。

6. おわりに

本研究は道路ネットワークにおけるレジリエンスの評価方法について整理し、孤立に関する脆弱性を評価する

本研究の位置づけについて述べた。つぎに道路ネットワークにおける被災地の孤立に関する脆弱性の評価方法として辺連結度を指標とすることを提案した。また、孤立に対してクリティカルなリンクである最小カット集合の列挙方法を構築した。構築した方法を岐阜県周辺、中部地方の道路ネットワークに適用し、辺連結度と最小カット集合が実用的な範囲の計算時間で算出可能であることを示した。くわえて、辺連結度が小さい地域においては、受援拠点を複数追加することで、孤立に対する脆弱性を緩和できることを示した。本研究に残された課題を以下に整理する。

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。辺連結度問題は最大流問題と等価である。本稿では線形計画法によって求解した。しかし、最大流問題は Nagamochi and Ibaraki(2008)により最大隣接順序を用いた効率的な解法が提案されている。これらの援用により、より大規模なネットワークへの対応が可能となることが期待できる。

本稿では辺連結度で道路網の脆弱性評価を表現する方法を提案した。しかしながら、辺連結度、すなわち孤立する最小限のリンク数のみで評価するだけでは必ずしも十分とはいえない。例えば辺連結度が小さい評価対象の道路ネットワークに辺連結度+1となる多数のカットが生じる場合、それらへの対応も対策のために必要であろう。したがって、辺連結度+ α でのカット集合も把握する手法が必要である。これらについてもグラフ理論では small cuts²⁹や suboptimal cut²⁰などと呼ばれ、列挙方法の知

見があり、これらが援用できると考えられる。

本稿では下呂市役所を対象とした試算において、辺連結度が小さいため、4つの振興事務所を考慮する方策について示した。しかしながら、孤立に対する脆弱性を緩和するために、新規道路建設を検討することも生じうるだろう。特に道路ネットワークが疎であり、日常的にも生じる事故等でも大きな影響を受けるような地域であれば経路の冗長性確保は課題となる。そのとき、辺連結度を効率よく増大させる新規リンクを探索する方法が必要になると考えられる。グラフ理論の分野ではこの問題は辺連結度増大問題として知られており、任意の辺連結度となるように、設定したコストを最小とする新規リンクの集合を求める手法が開発されている。この手法の援用により、道路新規建設のための計画法も開発可能であると考えられる。

道路ネットワークのレジリエンスの評価方法の構築という観点では、本研究も含めて信頼性および脆弱性の評価方法は機能の低下に対する抵抗力を表現することのみに留まる。道路ネットワークのレジリエンスを評価するためには、回復力の評価方法構築が必要となる。Cimellaro et al²⁷⁾では過去の災害における電力、水道、ガスの復旧速度から回復力の評価が試みられている。しかしながら、先述したように回復力には災害後に投じられたリソースやそれらをマネジメントする計画の与える影響が大きいと思われる。したがって、過去の復旧事例による復旧速度が一般性をもち、他地点での評価に適用可能かどうかは疑問が残るところである。くわえて、道路ネットワークが与える影響も少なからず存在するだろう。例えば、密な道路ネットワークであれば、復旧に必要な材料の輸送が容易であるなど、迅速性を向上させることも期待できる。したがって、道路ネットワークの形状や容量などその他の属性を踏まえて回復力を評価する手法が必要になると考えられる。直接的に回復力を示すものではないが、既往の知見では道路ネットワークの啓開作業順序を取り扱ったもの²⁸⁾や除雪の作業順序の決定に関するもの²⁹⁾などがある。これらは道路ネットワークの形状とリソースの量を制約として、作業手順の最適化を図るモデルを示している。回復力の評価構築に向けてはこのような研究が参考になるものと考えられる。

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。

付録 最小カット集合特定方法の証明

最小カット集合の特定方法として第4章に示した手順の正当性を証明する。なお、本文中では道路の通行不能状況を表現するとき損傷、途絶という言葉を用いたが、ここではネットワーク上の取り扱いだけを示すため、リンクの除去という表現を用いる。

補題 1：辺連結度と辺素な道に利用されるリンクで構成可能な起終点間経路（以下、非重複経路とよぶ）の数は等しい。

証明：辺素な道は経路間でリンクを重複しない経路の集合である。非重複経路の数が辺連結度より大きいと仮定すると、経路間で重複するリンクがないことから、辺連結度の数のリンクを除去しても必ず1つ以上の経路が存在する。これは Menger の定理に反する。一方で、辺素な道に利用されるリンクで構成できる経路が辺連結度より小さいと仮定すると、辺連結度より少ない数のリンクを除去することで経路を0とすることができる。この場合も Menger の定理に反する。以上より、辺連結度と辺素な道に利用されるリンクで構成可能な起終点経路の数は等しい。

補題 2：全ての非重複経路にはそれぞれ1つ以上ボトルネックが存在する。

証明：ボトルネックは除去するとネットワークの辺連結度を1低下させるリンクと定義した。辺連結度がNであるネットワークにおいて、任意の1つの非重複経路上にあるボトルネックについて検討する。非重複経路に存在するボトルネックを除去すれば辺連結度がN-1に低下する。補題1より、非重複経路の数もN-1に低下する。すなわち、非重複経路に該当しないリンクも含めても代替可能な非重複経路は構成不可能であることが直ちにいえる。ある1つの非重複経路上には複数のボトルネックが存在し、そのボトルネックが2つ以上除去されたときを考えよう。ボトルネックが除去された非重複経路以外の非重複経路はボトルネックが除去されていない。このとき、非重複経路数は明らかにN-1であり、補題1から辺連結度もN-1となる。したがって、ボトルネックが2つ以上除去されたとしてもそれが同一非重複経路上である限り辺連結度の低下量は1である。以上のことから、辺連結度と非重複経路数が等しい Menger の定理を成立させようするのは、各非重複経路上に1つ以上ボトルネックが存在するときのみに限られる。

この証明より、以下の系1も成立する。

系 1：同一非重複経路上のボトルネックが2つ以上除去

されたとしても辺連結度の低下量は1である。

補題 3：辺素な道に利用されるリンクが任意のノードで交差するとき、最小カットはその交点より起点側かあるいは終点側のいずれかにのみ存在する。

証明：辺素な道に利用されるリンクが任意のノードで交差するとき、図-11 の左における経路 {AB, CD}, {AD, BC} のように非重複経路は経路探索方法の差異により一意に特定できない。この {A, B, C, D} の全てにボトルネックが存在することとする。このとき、図-11 右の {B, C} のように交点より起点側と終点側のそれぞれを除去したときは (s, t) 間の経路が構成可能となり、カットとして成立しない。カットとして成立するのは交点より起点側か、あるいは終点側、およびその両方のボトルネックの組み合わせを除去したときに限る。起点、終点側のすべてのボトルネックを除去すれば除去する辺の数は、起点側のみ、終点側のみを除去するよりも明らかに大きく、最小カットにはなりえない。したがって、補題 3 が成立する。

命題：非重複経路上に存在するボトルネックを各非重複経路においてそれぞれ 1 つ以上除去したとき、孤立が成立する。ただし、辺素な道に利用されるリンクが任意のノードで交差するとき、最小カットを成立させるボトルネックの組み合わせは、交点より起点側か、終点側のいずれかに除去するリンクが集中するものに限る。

証明：補題 1, 補題 2, 系 1 より任意の辺連結度が N のネットワークにおいて、孤立が成立するとき、すなわち辺連結度が 0 となるときは、N 個の各非重複経路上のボトルネックがそれぞれ 1 つ以上ずつ除去されたときに限られる。補題 3 より非重複経路に交点が存在するときの最小カットの条件は証明済みである。

以上証明終わり。

参考文献

- 1) 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4月10日)。
- 2) 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4月10日)。

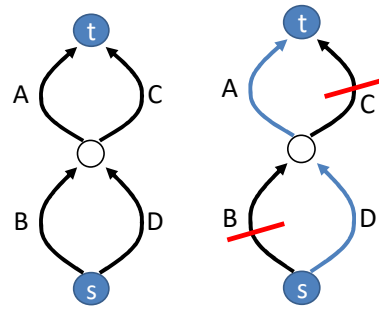


図-11 ボトルネックの組み合わせがカットにならない例

- 3) 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4月10日)
- 4) 内閣官房国土強靱化推進室 HP：国土強靱化とは～強くて、しなやかなニッポンへ～ [https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/kokudo_pamphlet.pdf], (最終閲覧日：2018年4月3日)
- 5) McDaniels, T., Chang, S., Cole, D., Mikawoz, J., and Longstaff, H.: Fostering resilience to extreme events within infrastructure systems: characterizing decision contexts for mitigation and adaptation. *Global Environ. Change* 18, 310–318, 2008.
- 6) Holling, C.S.: Resilience and stability of ecological systems. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 4, 1–23, 1973.
- 7) Bruneau, M., Chang, S., Eguchi, R., Lee, G., O'Rourke, T., Reinhorn, A., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W., and von Winterfelt, D.: A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, *EERI Spectra Journal*, Vol.19, No.4, pp.733-752, 2003.
- 8) 多々納裕一：道路ネットワークのレジリエンスの計量化に向けて、高速道路と自動車, 第 60 巻, 第 9 号, pp.5-8, 2017.
- 9) 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.
- 10) 飯田恭敬, 若林拓史：ブール演算を用いた道路網ノード間信頼度の上・下限値の効率的算出法, 土木学会論文集, No.395/IV-9, pp.75-84, 1988.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) Du, Z.P. and Nicholson, A.: Degradable Transportation Systems: Sensitivity and Reliability Analysis, *Transportation Research Part B*, Vol.31(3), pp.225-237, 1997..
- 15) 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.
- 16) 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.
 - 17) 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.
 - 18) 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.
 - 19) 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.
 - 20) 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.
 - 21) Chang, S.E. and Nojima, N.: Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective, *Transportation Research Part A*, Vol.35, pp.475-494, 2001.
 - 22) 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.
 - 23) 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.
 - 24) 瀬戸裕美子・倉内文孝・宇野伸宏: 脆弱性の概念を用いた道路網接続性評価に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.37, CD-ROM, 2008.
 - 25) Nagamochi, H., Nishimura, K., and Ibaraki, T.: Computing all small cuts in undirected networks, *SIAM j. Discrete Math.* Vol.10, No.3, pp.469-481, 1997.
 - 26) Yeh, L.P., Wang B.F., Su, H.H.: Efficient algorithms for the problems of enumerating cuts by non-decreasing weights, *Algorithmica*, Vol.56, pp.297-312, 2010.
 - 27) Cimellaro, G.P., Solari, D., and Bruneau, M.: Physical infrastructure interdependency and regional resilience index after the 2011 Tohoku earthquake in Japan, *earthquake engineering & structural dynamics*, Vol.43, pp.1763-1784, 2014.
 - 28) Itabashi, R., Sakai, K., Kusakabe, T., and Asakura, Y.: A Location-routing Decision Model for First-aid Restoration of a Damaged Road Network. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.11, pp.557-565, 2015.
 - 29) Perrier, N., Langevin, A., Cambell, J.F.: A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part III: Vehicle routing and depot location for spreading, *Computers & Operations Research*, Vol.34, pp.211-257, 2007.

(2018.*.* 受付)

ISOLATION VULNERABILITY ANALYSIS FOR ROAD NETWORK USING EDGE CONECTIVITY AND MINIMUM CUT

Satoshi SUGIURA