

# Graph Topology 指標を用いた 道路ネットワーク評価手法の検討

明光 就平<sup>1</sup>・倉内 文孝<sup>2</sup>・安藤 宏恵<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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 岐阜市柳戸1-1)  
E-mail: x4523037@edu.gifu-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)  
E-mail: kurauchi@gifu-u.ac.jp

<sup>3</sup>学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)  
E-mail: hiroe@gifu-u.ac.jp

災害が発生したとしても深刻な機能低下に陥らない道路ネットワークを構築することは我が国において重要な課題である。そのため、道路ネットワークの信頼性評価方法が様々提案されているが、データ収集や計算に手間がかかるものも多い。またネットワークの詳細度や範囲等の前提条件によって結果に差が生じることもあり、安定的な方法論は未だ確立されているとはいえない。本研究ではネットワークの形状的な特徴量を表す Graph Topology 指標を用いた安定的かつ容易な道路ネットワークの評価手法を検討する。本稿では、そのなかでも中心性指標に着目し、脆弱性の従来評価手法のひとつである非重複経路数の数え上げとの比較により、信頼性・脆弱性評価における Graph Topology 指標の活用妥当性について検証した結果を報告する。

**Key Words:** Graph Topology, Centrality, Eigenvector Centrality, Vulnerability

## 1. はじめに

災害発生後の状況下では道路の役割は一層重要となる。道路ネットワークの一部区間の不通によって、集落の孤立や長大な迂回を余儀なくされるなどの悪影響が生じる可能性もあり、道路ネットワークは災害に対して常に頑健であるとはいえない。実際にわが国では、阪神淡路大震災の発災直後には橋脚の倒壊や損傷、桁のずれといった被害や道路沿線の構造物の倒壊が多くみられた。そのため立体構造の道路の不通、落橋、倒壊の影響により幹線道路のいたるところが寸断された。また、東日本大震災の発災直後には津波による橋桁の流出や路面亀裂、冠水やがれきの堆積による道路の不通等が各地で起こり救援物資の供給や人命救助の大きな妨げとなった。このようなことから、大規模災害には交通機能の低下が付随しているといえる。そのため、災害が発生したとしても深刻な交通機能低下に陥らない道路ネットワークを構築することは我が国において重要な課題である。また、交

通には災害の影響以外にも交通事故や日々の交通需要の変動など多くの不確実性をふくむ事象が関係しており、それらを考慮したうえでのより確実な交通サービスの提供をするためのネットワークの信頼性の分析が必要である。しかしながら、従来の信頼性分析では災害の発生確率の推定や OD データ、経路探索などが必要であり、それらの推定精度や計算量の膨大さ、対象とするネットワークの規模や形状が変われば結果が大きく変わってしまうことに課題があり、正確に大規模な道路ネットワークの信頼性や脆弱性を議論できる方法は確立されていない。そのため、安定的かつ容易に道路ネットワーク信頼性や脆弱性を評価可能とする手法が必要である。

一方、近年の膨大なデータ蓄積を踏まえ、人的関係などを分析する社会ネットワーク分析 (Social Network Analysis, SNA) が盛んに行われている<sup>1)</sup>。これら一連の研究においては、人と人とのつながりの形状を分析しており、その際には中心性 (Centrality) といった Graph Topology 指標を用いることが一般的である。SNA においては、元来巨大なネットワークを取り扱うことが多いこともあり、

Graph Topology 指標として用いられているものは比較的計算負荷が小さい。また、ネットワークの信頼性、脆弱性の観点からの分析も数多く提案されており、これらの知見を交通ネットワークに活用することが期待される。ただし、それら Graph Topology 指標について、交通工学的視野から見た場合の意味づけは十分に吟味すべきである。以上の背景を元に、本研究では Graph Topology 指標による交通ネットワーク評価の可能性について検討を加える。

本論文の構成は以下のとおりである。1.では、本研究の背景と目的を述べた。2.では道路ネットワークの信頼性・脆弱性評価の動向についてまとめる。3.では Graph Topology 指標のひとつである中心性指標について、非重複経路数の数え上げと比較することで接続脆弱性評価への活用可能性について検討した結果について述べる。4.では中心性指標の中でも固有ベクトル中心性を用いた接続性の評価について解説する。5.において、本研究で得られた知見をまとめ、今後の展開の可能性を論じる。

## 2. 道路ネットワークの信頼性・脆弱性評価の動向

大規模災害等による道路の途絶や OD 需要の極端な増加等は道路ネットワークに対し広範囲に影響を及ぼすことから、道路ネットワークの様々な変動に対する評価は必要とされており、平常時に起こる些細な変化に対する交通機能の頑健性評価、災害や渋滞等のリスク評価、災害に対する交通機能の強靱性評価等さまざまおこなわれてきた。その中でも、リスク評価は対象とする事象の発生確率とその事象による被害の大きさの積として定義することができ、災害や渋滞などによって本来の交通機能が十分に発揮できていない状態を期待値として評価することができるため、災害時の影響を把握するための一般的なネットワーク信頼性評価手法として広く用いられている。例えば岡田ら<sup>2)</sup>は、利得の有無や発生源、制御の可否によってリスク分類をし、被害を軽減しようとするためのシステムの冗長性と経済効率性のトレードオフの調整やシステムの故障の程度を確率重要度として期待値として考える等リスク管理をすることが有効であることを示している。多々納<sup>3)</sup>は、自然災害のリスクについて述べており、自然災害自体はハザードと呼ばれ、必ずしも被害を巻き起こすわけではなく、被害対象 (exposure) とそれらが脆弱である (vulnerable) という条件が存在したときに被害が起こるとされているため、被害対象やその災害脆弱性を制御していくことが災害を軽減していくことの鍵である、と指摘している。また、低頻度であり一度被災すれば破局的な被害をもたらす災害リスクはカタストロフ・リスクと呼ばれており、小林ら<sup>4)</sup>は、低確率であり影響度の大きな事象を対象とする従来の期待値

評価では、災害リスクの評価が困難であることを指摘している。

道路ネットワークを対象とした信頼性評価に関する研究分野では、交通容量や交通需要に着目した信頼性評価手法として、Chen et al.<sup>5)</sup>は道路ネットワーク上を流れる交通需要を交通容量内で捌くことができるのかという考え方によって道路ネットワークを評価する、容量信頼性という概念を示している。さらに、Kurauchi et al.<sup>6)</sup>は、途絶したときにネットワーク容量を大幅に減少させるリンクほど重要なリンクとする容量脆弱性を提案している。これらの手法は、ネットワーク上の混雑を考慮してその性能を評価するという特徴があるものの、評価の際には OD データやリンクの途絶確率などのインプットデータが必要であり、その評価結果はそれらに大きく依存する。そのため、インプットデータに関する正確な情報の収集が難しい場合、十分な評価が保証できない可能性が生じる。これに対し、交通需要に依存しないネットワーク評価手法として、ノードもしくはリンクを対象に、2地点間が繋がっているか、全 OD ペアが移動可能であるか、全リンクが同時に走行可能であるか、幾通りの経路が移動可能であるか等の指標を用いて、ネットワークの信頼度を評価する連結信頼性が提案されている<sup>7)</sup>。この評価においても事象の発生確率 (リンクの途絶確率) を所与として評価をおこなっているため、大規模災害など発生確率が極めて低く被害が甚大である事象の影響に関しては、その影響を過小評価してしまう可能性がある。さらに、所与の確率で発生しうる事象の期待値を評価するためには、モンテカルロシミュレーションなど多数の反復計算を繰り返す必要がある。

このような背景のもと、発生確率といった確率値に依存することなく事象が発生した際の影響度のみに着目し、被害の大きさを評価する脆弱性という考え方が提案されている。Taylor et al.<sup>8)</sup>によると、脆弱性とは“ネットワークの弱さ”を測る指標であるとされており、少数のリンク途絶によりアクセシビリティが大きく低下するノードや、途絶した際に深刻なアクセシビリティの低下を引き起こすリンクをそれぞれ脆弱なノード、重要なリンクとして定義している。また、Bell<sup>9)</sup>は、走行時間を最大限増加させる邪悪な存在とそれを回避しようとするドライバーとの間のゲームの帰結として、総走行時間に大きな影響を及ぼす重要なリンクを識別する方法を提案している。さらに、Kurauchi et al.<sup>10)</sup>は、リンク途絶によって到達可能性が大きく低下するリンクを識別するための接続脆弱性分析として、ある二地点間を接続する経路のうち、共有するリンクを持たない独立な経路 (非重複経路) を数え上げることで、確率を問わず到達の可能性を評価する方法を提案している。これらの手法は、災害発生確率に関する不確実性は排除されるが、一方で最短経路探索や経

路列挙等が必要であり、膨大な計算量となることから大規模な道路ネットワークに対しての適用が難しい。また、Taylor et al.<sup>8)</sup>や Kurauchi et al.<sup>10)</sup>のようにネットワークの形状に特化した分析においては、対象とするネットワークの抽出範囲や大きさによって評価結果が異なる可能性が生じる。具体的には、ネットワークの端に近いノードほどリンク途絶等の影響を受けやすく、対象ネットワーク内では脆弱であると判断される可能性が高いものの、より広範囲なネットワーク全体の機能を考える際にその部分が本当に脆弱と明言することは難しく、安定的かつ容易に道路ネットワークを評価する手法が確立されているとはいえない。そのため、脆弱性の概念を援用しながらも、より簡易で計算負荷の小さいネットワーク評価手法の開発が求められている。

この問題に対して、大規模ネットワークにおける信頼性評価のために、複雑なネットワーク (Complex Network) やシステムを研究するためのプラットフォームである Network Science の知見を援用することが様々な提案されている。Bell et al.<sup>11)</sup>や 明光ら<sup>12)</sup>ではラプラシアン行列の第 2 最小固有値に対応する固有ベクトルによるネットワークの分割問題 (Spectral Partitioning) について取り扱い、重要なリンク群の抽出を試みている。一方、本研究では、ネットワークの形状的な特徴として、Graph Topology 指標である中心性指標に着目し、重要なノードの特定を試みることで道路ネットワークの信頼性・脆弱性評価への適用可能性について検証する。

### 3. 中心性指標による道路網の脆弱性評価

#### (1) 中心性の定義

中心性指標とはネットワーク上で各ノードがどれほど中心的であるのかを表す度合いであり、‘中心’の定義の仕方によって様々な定義で表される。また、リンクに重みづけをすることで重みに応じた評価が可能である。以下に本稿で用いる中心性指標について、定義と特性を解説する。

##### a) 固有ベクトル中心性

固有ベクトル中心性は、接続性の高いノードと隣接しているほど中心的であるという基準に基づいて定義されるものである。そのため、ネットワーク上で近接するノードと接続性の高いノードが集まっている一帯は中心性が高くなる。繋がりをノードとリンクで表現するグラフの最大固有値に対応する固有ベクトルを考えることで求めることができる<sup>13)</sup>。リンクの重みを考慮した際は近接するノードとの接続性の強さをリンクの重みが表しているととらえることができる。固有ベクトル中心性を求めるには以下のような漸化式を考える。

$$u(t+1) = Au(t) \quad (3.1)$$

ただし、

$A$	: 隣接行列
$u(t)$	: 頂点 $v_i$ の中心性 $u_i$ を並べたベクトル
$u_i$	: 頂点 $v_i$ の影響力
$t$	: 更新回数

式(3.1)の第 $i$ 成分を取り出すと

$$u_i(t+1) = \sum_{j=1}^N A_{ij}u_j(t) \quad (3.2)$$

式(3.2)を頂点 $v_i$ の影響力 $u_i$ は隣接点に渡る $u_j$ の和であると解釈する。得られた更新値 $u(t+1)$ を式(3.1)で $t$ を1増やした右辺に代入すると $u(t+2)$ を得る。これを繰り返せば $u_1, \dots, u_N$ が発散してしまうため $u_1, \dots, u_N$ の和が1になるように正規化をおこないながら反復をおこなう。ネットワークの中に閉じた奇数角形があるときこの反復法の収束先は隣接行列の最大固有ベクトルである。隣接行列の最大固有値を $\lambda_N$ とおくと固有ベクトル中心性は式(3.3)のように定まる。

$$\lambda_N = Au \quad (3.3)$$

##### b) 近接中心性

あるノード $v_i$ の近接中心性は自分を示すノードから他ノードまでが平均的にどれくらい近いかにによって定義される<sup>14)</sup>。定義は以下のように表すことができる。

$$\frac{N-1}{\sum_{j=1; j \neq i}^N d(v_i, v_j)} = \frac{1}{L_i} \quad (3.4)$$

$d(v_i, v_j)$ は $v_i$ から $v_j$ までの距離、 $L_i$ は $v_i$ からほかの全てのノードまでの平均距離を表している。リンクの重みを考慮した際は $d(v_i, v_j)$ が距離の代わりに重みを表すことになるため重みが大きいほど中心性は低くなる。

##### c) 次数中心性

ノード $v_i$ の次数 $k_i$ をノード $v_i$ の次数中心性と呼ぶ。ハブがネットワークの中心であるという考え方によるものである。リンクの重みを考慮した際はノードに流入するリンクの重みの総和としてあらわされる。

#### (2) 中心性の設定条件による違い

本節では中心性の定義や重みの違いがもたらす評価の違いについて示す。Sioux Falls Network<sup>15)</sup>を対象に固有ベクトル中心性および近接中心性の試算結果を図 3-1 に示す。中心性の値の大きい方から順に並べると、固有ベクトル中心性ではノード 10, 15, 16, 17, 22 となるのに対して、近接中心性では、ノード 10, 11, 16, 15, 24 となるため、中心性の定義により高く評価されるノードが異なることがわかる。これは、固有ベクトル中心性が近接しているノードの接続性を考慮するのに対し、近接中心性は全てのノードからの距離を評価するためといえる。さらに、リンクの重みとして、各中心性の特徴を考慮し、



固有ベクトル中心性には各リンク容量を、近接中心性にはリンク容量の逆数を用いて計算をおこなった(図 3-2)。重みの有無に着目すると、どちらの定義による中心性も重みを与えなかった場合はノード 10 付近のネットワーク中心部の中心性が高いと評価されたことに対し、重みを与えた場合は中心性が高いと評価される位置に変動がみられた。これは、重みを与えない場合ではすべてのリンクが等価であるため、次数の高いネットワーク中心部ほど中心性が高いと評価されるのに対し、リンク容量またはその逆数を重みとした場合には、容量が大きいリンクほど接続性やアクセス性を大きく向上させるため、容量の大きなリンクに接続されているノードの中心性が高いと評価されるためである。固有ベクトル中心性ではより左上側に大きな指標値が得られた。これは、左上部に位置するリンク容量が比較的大きいため、左上部に位置するノードほど接続性が高いと評価されるためである。一方、近接中心性については、中心部上側に高い指標値が集まった。近接中心性と固有ベクトル中心性において、指標値の高い部分に違いが出たのは、すべてのノードにアクセスしやすい中心部が高く評価される近接中心性に対し、固有ベクトル中心性では、近接しているノードの容量が大きい左上の端が評価されているためといえる。このように、中心性指標の種類や重みの設定方法により結果が変わり、それぞれの意味するところを十分考慮する必要があるといえる。

### (3) ネットワーク表記方法の検討

Graph Topology 指標の多くは中心性指標のようにノードの特徴量を表すものである。一方、道路ネットワークでは、リンクは道路区間を、ノードはそれらの結節点(交差点)を示す。そのため、ノードの特徴量は結節点の特徴量となるものの、道路ネットワーク評価においては道路区間の評価がより重要であるといえる。そのため Sioux Falls Network を対象に、ここではリンクをノードに書き換えたネットワークを作成し、リンクが示す道路区間の特徴量の算定を試みる。なお、一般的にはこのようなグラフは線グラフ (Line Graph) と呼ばれる。具体的には、まずリンクの中点にノードを置き、元のネットワークで隣接していたリンク同士を表すノードペア間にリンクを張る(図 3-3)。このような手順のもと書き換え後のネットワークを用いて中心性を試算し、その結果を書き換え前のリンクに反映する。図 3-4 に一つの例として、近接中心性の比較結果を示す。左図は書き換え前のノードベース、右図は書き換え後のリンクベースのネットワークによる試算結果であり、左図のリンクには両端ノードの近接中心性評価値の平均値を示した。例えばノード 3, 4 を結ぶリンクに着目すると、ノードベースの方が近接中心性は高い。左図によれば、このリンクの近

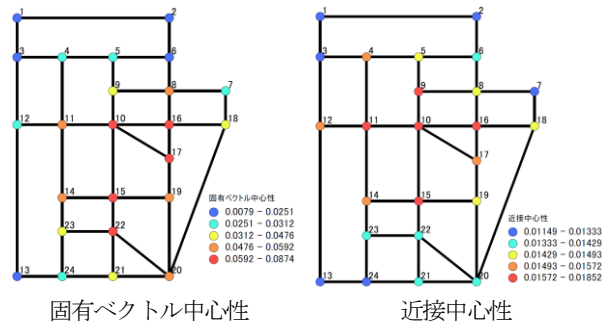


図 3-1 定義の異なる中心性の挙動比較

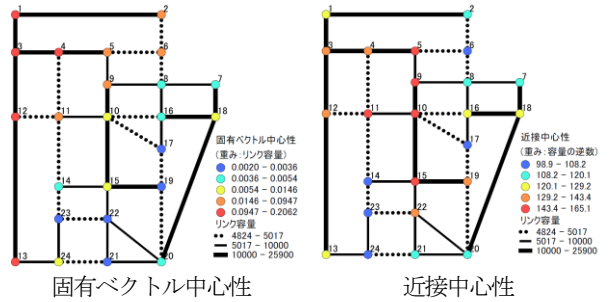


図 3-2 重みを考慮した中心性分析

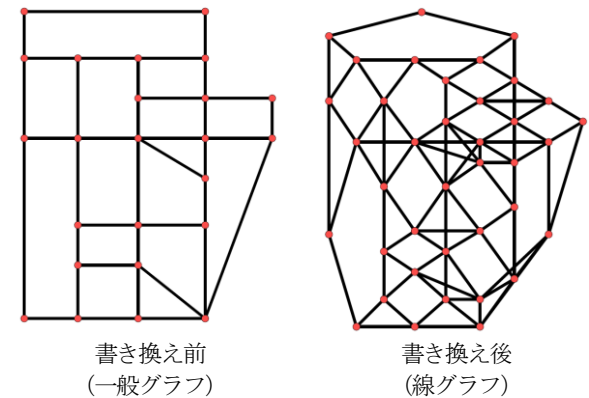


図 3-3 ネットワークの書き換え

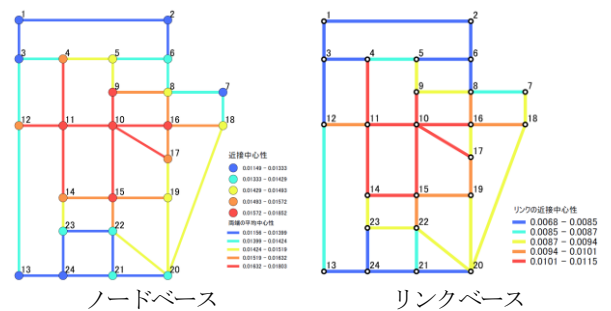


図 3-4 書き換え前後の近接中心性の比較

接中心性は高くないのに対し、ノード 4 は中心性が比較的高いため両端の平均値として評価する場合に、リンクの中心性が高くなるためである。このように、リンクを両端のノードのもつ指標によって単純に評価するだけでは不十分であり、ネットワーク表記方法を工夫することで Graph Topology 指標においてリンクによる評価が可能

となるといえる。

(4) 従来の交通工学的指標との比較

前節で示したリンクベースの中心性による評価と従来から提案されている脆弱性の評価手法との相関をみることで中心性指標の脆弱性分析への活用可能性について検討する。まず比較対象として、接続脆弱性の指標のひとつである非重複経路数に基づいたリンク重要度について解説する。

リンク重要度  $LCI_a$  は各リンクの途絶によって Kurauchi et al.<sup>10</sup>によって提案されている非重複経路数が何本減少するかによって定義され以下のように表すことができる。

$$LCI_a = \frac{\sum(1 - \frac{\text{リンク}a\text{が途絶したときの}N_{ij}}{\text{リンク}a\text{が途絶する前の}N_{ij}})}{N(N-1)} \quad (3.5)$$

ただし、 $N_{ij}$ は非重複経路本数  $N$ はノード数を表している。これによって非重複経路数の観点から見た脆弱性を各リンクベースの値として評価することができリンク途絶の影響が大きい重要なリンクを特定することができる。

a) 簡易ネットワークでの検証

図 3-5 に Sioux Falls Network においてリンク重要度を計算した結果を示す。ネットワーク外周に重要度が高いリンクが位置していることがわかる。これはネットワーク端点からの移動の際にはこれらのリンクは必ず用いられ、内部のノード同士の移動でも最も長い迂回路として非重複経路数に数えられることから、利用率が高く重要なリンクとされるためである。また、Sioux Falls Network を対象とした重み 1 の場合のリンクベースの中心性と式(3.11)に示すリンク重要度の比較をおこなった。図 3-6、図 3-7、図 3-8 は次数中心性、近接中心性、固有ベクトル中心性をリンクに対して算出したものと非重複経路数に基づいて算出したリンク重要度の値を散布図としてまとめたものである。それぞれの相関は表 3-1 のようになった。この結果よりどの中心性指標においてもリンク重要度との間に強い負の相関があることがわかった。これより中心性指標によって中心的だと定義されるリンクほど途絶した際の影響は小さく、中心的でないリンクほど脆弱なリンクだと解釈することができる。特に次数中心性において高い負の相関が得られた理由は、次数が高いノードから出発するリンクほど途絶した際に同じ発ノードを持つリンクが多いため、代替路確保がしやすいためだと考えられる。近接中心性、固有ベクトル中心性の負の相関が高い理由は中心性が高く評価されるノードほど接続性やアクセス性が高いため、近接するノードに移動しやすく、リンク途絶時に選択肢の幅を多く持つことができるためだと考えられる。

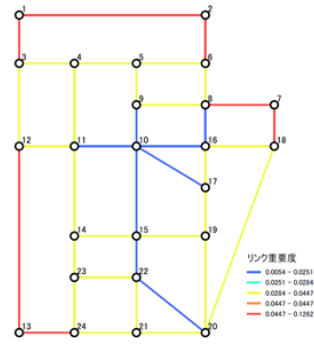


図 3-5 Sioux Falls Network のリンク重要度

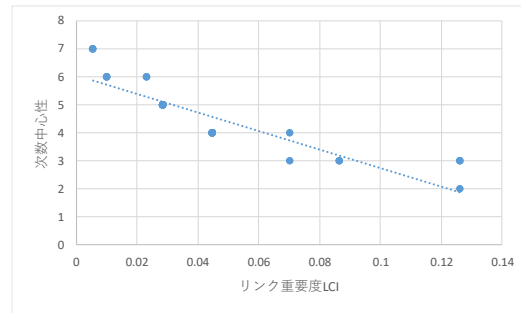


図 3-6 次数中心性とリンク重要度の相関

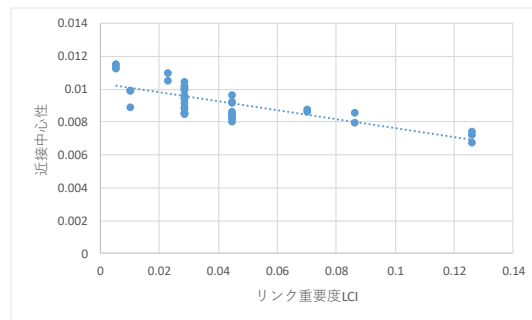


図 3-7 近接中心性とリンク重要度の相関

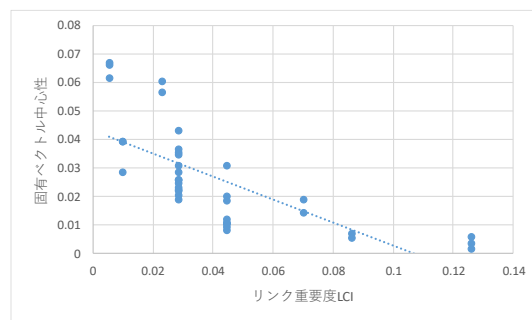


図 3-8 固有ベクトル中心性とリンク重要度の相関

表 3-1 各中心性とリンク重要度との相関係数

次数中心性	近接中心性	固有ベクトル中心性
-0.8840	-0.7704	-0.7157

3-1 各中心性とリンク重要度との相関係数

b) 安定性の検証

前項では Sioux Falls Network において中心性とリンク重

要度に負の相関関係が得られたため、中心性が低いところほど脆弱であることがわかった。しかし、Sioux Falls Network の結果はネットワーク内部の中心性が高く、重要度が低いという結果であったため、端点が過剰に脆弱だと評価されるためこのような結果となった可能性が考えられる。そのため、本項では Sioux Falls Network 以外のネットワークでも同様に安定した負の相関関係が得られるかどうか検証するため、身近なネットワークである岐阜県の道路ネットワークにおいて計算をおこなった。岐阜県のネットワークは図 3-9 に示すノード数 1,468、リンク数 2,348 のものであり、形状や大きさの異なるネットワークを対象とするため、図 3-9 に黄色く示す市郡を抽出し、試算をおこなった。表 3-2 に対象市郡における各中心性とリンク重要度の相関係数を示す。結果として、Sioux Falls Network での結果ほど強い相関関係は得られなかったものの、固有ベクトル中心性の相関係数に着目してみると全て負の相関であり、ほとんどのネットワークにおいて安定した負の相関がみられる。そのため固有ベクトル中心性を用いたネットワーク評価は脆弱性分析に有効であるといえる。岐阜県の道路ネットワークを用いたその他の中心性指標の計算において、高い相関がみられず、ネットワークによってばらついた結果となった理由として、重み 1 の中心性指標ではネットワークの密集部分が高く評価されるのに対し、リンク重要度では非重複経路数を構成しているほど高く評価されるため、分割して作成したネットワークでは端点につながるリンクがネットワーク内部に比べて優先的に高く評価される。そのため、本来脆弱であってもネットワーク内部にある部分は相対的に低く評価されると考えられる。これより、ネットワークの端点による影響を考慮した脆弱性指標との比較による分析等に関してはさらなる検証が必要である。

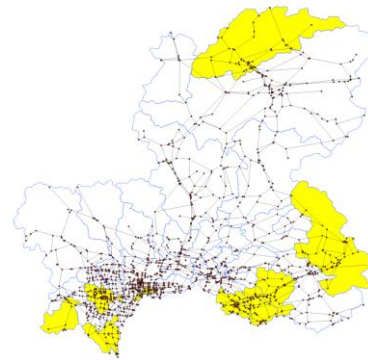


図 3-9 岐阜県の道路ネットワーク

表 3-2 各中心性とリンク重要度との相関係数

	次数中心性	近接中心性	固有ベクトル中心性
羽島郡	-0.5646	-0.6890	-0.6096
海津市	-0.6111	-0.6105	-0.7271
瑞浪市	-0.6940	-0.7297	-0.6603
多治見市	-0.3426	-0.3467	-0.4249
土岐市	-0.3428	-0.2723	-0.4369
飛騨市	-0.4829	-0.1469	-0.4749
中津川市	-0.1820	-0.1206	-0.2564
大垣市	-0.5994	-0.1612	-0.4206

#### 4. 固有ベクトル中心性による接続性評価

##### (1) ネットワーク端点の影響

本章では、前章において接続脆弱性分析への活用可能性を示した固有ベクトル中心性を用いた接続性の評価について述べる。固有ベクトル中心性は隣接するノードの次数や隣接するノードにつながるリンクの重みによって決められるため、他の中心性指標とは異なり、接続性の高いノード群を見出すことができる。そのため、道路ネットワークに適用した場合、ネットワーク形状によって接続しやすい地域同士を評価することができる。図 4-1 に岐阜県の道路ネットワークにおいて試算した固有ベクトル中心性の値をヒートマップとして示す。各ノードはセントロイドをあらわす。これより、接続性が高い都市同士やそうでない都市同士を見分けることができる。ま

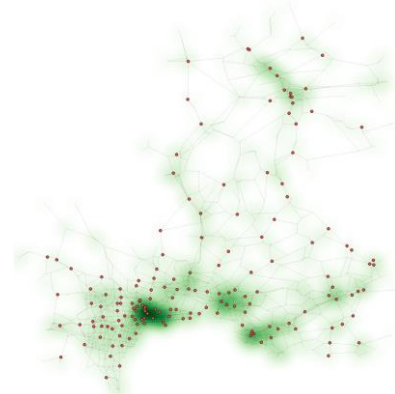


図 4-1 岐阜県の固有ベクトル中心性に基づくヒートマップ

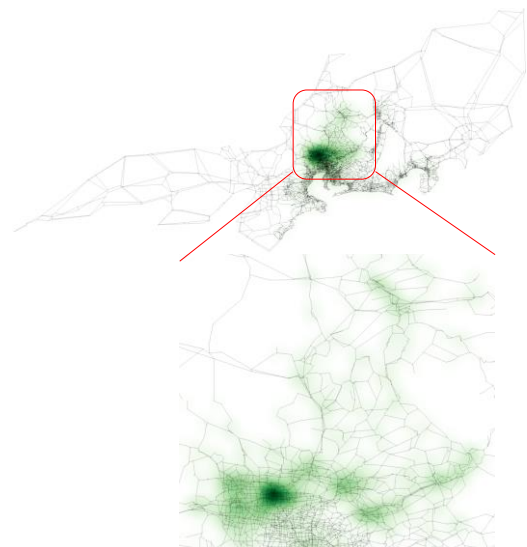


図 4-2 中部圏ネットワーク試算結果に基づくヒートマップ



た、接続性の低い部分でネットワーク分割することで脆弱性を議論することができる。図 4-2 として中部圏のネットワークに対して固有ベクトル中心性を計算したものを示す。上図が中部圏全体を示しており、下図に岐阜県にクローズアップしたものを示す。クローズアップしたヒートマップを見ると接続性の高いと評価される部分の位置関係や強さは岐阜県のみで計算した場合と、ほとんど変化がないことが確認できる。そのため、従来の評価指標の課題点であった端点の評価が本来脆弱である所より高く評価されてしまう点に関しては、端点の影響があっても安定して接続性の議論ができるため固有ベクトル中心性での評価は有意であるといえる。

## (2) 詳細ネットワークでの検証

1. 2. で示したように従来のネットワーク信頼性評価手法では複雑な道路ネットワークを扱う際に計算量が膨大になってしまう点が課題の一つとなっている。例えば、3. で比較対象として用いた非重複経路数に基づくリンク重要度  $LCL_a$  を求めるには、対象とするネットワークのノード数を  $n$  リンク数を  $m$  とすると繰り返し計算数は  $O(mn^2)$  である。そのため、詳細なネットワークを扱う際には著しく計算回数が増加してしまう。一方固有ベクトル中心性の計算は、 $n \times n$  の隣接行列の最大固有値を計算することで求まるため、ネットワークの規模が大きくなったとしても繰り返し計算の回数が著しく増加するわけではないため比較的容易に計算ができる。そのため、詳細なネットワークや規模の大きいネットワークを対象とした分析が可能である。

図 4-3 に岐阜県内の市町村道も含んだより詳細な道路ネットワーク（ノード数 139,173、リンク数 203,495）に対して、前節と同様固有ベクトル中心性に基づくヒートマップを示す。岐阜市を中心とした岐阜県南部と高山市の中心性が高く評価されており、図 4-1 と比較すると中心性が高いと評価される部分は都市部に偏っている結果となった。都市部ほど市町村道の数は多いため市町村道の数の差により接続性が高くなったのだと考えられる。このように、詳細なネットワークを対象とした分析が可能であることから計算量の面においても固有ベクトル中心性での評価は有意であるといえる

## (3) 容量を考慮した固有ベクトル中心性

前節までは全てのリンクの重みを一律に定義しており、道路の特性にかかわらず等価なリンクとして扱っていた。一方、本節ではリンクの重みとして各道路の交通容量を用いることでそれぞれの道路の規模を加味した分析を試みる。図 4-4 は図 3-9 に示す岐阜県道路ネットワークに対し各道路の交通容量を重みとして固有ベクトル中心性を計算した結果であり、固有ベクトル中心性の値が上位

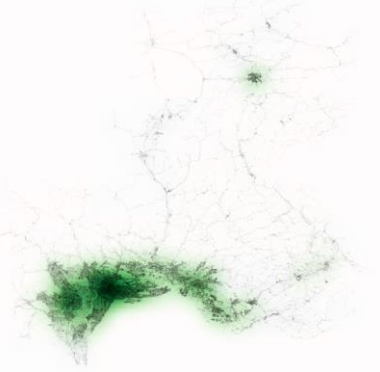


図 4-3 市道込みの固有ベクトル中心性

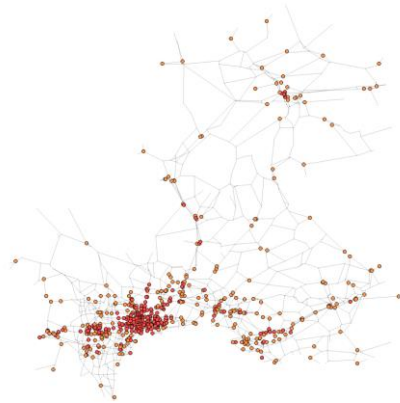


図 4-4 固有ベクトル中心性（重み：容量）

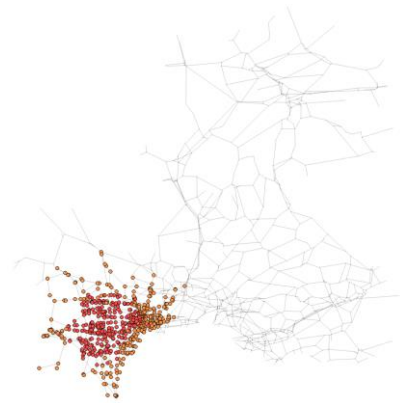


図 4-5 固有ベクトル中心性（重み：1）

20%に入るノードをを赤色で上位 40%までに入るノードを橙色で示してある。比較対象として同様の操作をすべてのリンクの重みを一律にして計算した場合の結果を図 4-5 として示す。重みが一律の場合には大垣市や岐阜市周辺に中心性が高いノードが集まっているのに対し、容量を重みとした場合には中心性が高いとされる部分は岐阜市を中心に南北、東西に広がっている。重みが一律の場合に岐阜市や大垣市周辺の中心性が高くなった理由は、すべてのリンクが等価であるため、リンクの密度の高い場所ほど接続性が高いと評価されるためだと考えられる。

容量を重みとして用いた場合に中心性が高いノードが広がっている理由は、東海北陸自動車道や東海環状自動車道、国道等の容量の大きな幹線道路が連結しているノードの接続性が高く評価されたためだと考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、ネットワークの形状的な特徴量を示す Graph Topology 指標の一つである中心性指標の道路ネットワーク信頼性分析への適用可能性について検証した。はじめに、中心性指標の特性と重みによる評価の違いについてまとめ、ネットワーク表現方法の工夫により道路区間の評価が可能であることを示した。また、従来の交通工学的指標として非重複経路数の数え上げを比較対象として取り上げ、リンク重要度  $LCI_a$  との比較により固有ベクトル中心性の接続脆弱性への適用可能性を示した。つぎに、固有ベクトル中心性による接続性の評価は端点の影響が少なく、安定的な評価が可能であることを示した。また、固有ベクトル中心性は計算負荷が少なくより詳細で現実の道路網に近いネットワークを扱うことができることを示した。実ネットワークに対して重みに交通容量を用いた場合の検証をおこなうことで、幹線道路のような大きな道路の影響を加味した接続性の評価が可能であるなど、重みによるニーズに合わせた接続性の分析が可能であることがわかった。

最後に今後の課題を述べる。中心性指標による道路ネットワーク信頼性評価への適用に関する検討について、固有ベクトル中心性ではネットワーク端点の影響に左右されず安定的に接続性を評価できると示したものの、非重複経路数によるリンク重要度との比較しかおこなっておらず、現在までに提案されてきたその他の信頼性評価手法との比較やその関係性についてさらに検討を加える必要がある。さらに、固有値による分割の表す数学的意味についての考察も十分ではないため、異なるネットワーク分割法の検討といったさらなる分析が必要である。また、固有ベクトル中心性以外の中心性指標ではリンク重要度との間に相関がみられなかったため、ほかの手法を活用したさらなる検討が必要である。

## 謝辞

本研究は、JSPS 科学研究費基盤研究(B)「持続可能社会形成のための土地利用・施設・交通の多時点マルチレイヤーネットワーク解析」(18H01557, 研究代表者: 倉内文孝) の助成を受けたものである。記してここに謝意

を表す。

## 参考文献

- 1) Wasserman, S and Faust, K: Social network analysis methods and applications, Cambridge University Press, 1994
- 2) 岡田憲夫: 災害のリスク分析的見方, 土木学会土木構造物委員会, 「土と防災」講習会テキスト, pp61-78, 1985
- 3) 多々納裕一: 災害リスクの特徴とそのマネジメント戦略, 社会技術研究論文集, 1, pp141-148, 2003
- 4) 小林潔司, 横松宗太: カタストロフ・リスクと防災投資の経済評価, 土木学会論文集, No.639/IV-46, pp39-52, 2000
- 5) Chen, A, Yang, H, Lo, HK and Tang, WH: Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results, Transportation Research B, 36(3), pp225-252, 2002
- 6) Kurauchi, F, Sumalee, A, Tamura, H and Uno, N: Bilevel Programming Problem for Analyzing Capacity Vulnerability in a Transportation Network under Limited Damage, paper presented at the 3rd International Symposium on Transportation Network Reliability, 2007
- 7) Wakabayashi, H and Iida, Y: Evaluation of Reliability of Road Network for better Performance, Advanced Management and Future network Design, Application of Advanced Technologies in Transportation Engineering, pp121-125, ACE, 1991
- 8) Taylor, M, Sekhar, S and D'Este, G: Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks, Network and Spatial Economics, 6(3-4), pp267-291, 2006
- 9) Bell MGH: A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks, Transportation Research B, 34, pp533-545, 2000
- 10) Kurauchi, F, Uno, N, Sumalee, A and Seto, Y: Network Evaluation Based on Connectivity Vulnerability, Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee, pp637-649, 2009.
- 11) Bell, MGH, Kurauchi, F, Perera, S and Wong, W: Investigating transport network vulnerability by capacity weighted spectral analysis, Transportation Research Part B, 99, pp251-266, 2017.
- 12) 明光就平, 倉内文孝, 安藤宏恵: Spectral Partitioningを用いた道路ネットワークの接続性評価, 土木計画学研究・講演集, 55, CD-ROM, 2017
- 13) Bonacich, P: Factoring And Weighting Approaches To Statues Scores And Clique Identification, Journal of Mathematical Sociology, 2, pp113-120, 1972
- 14) Freeman, LC: Centrality In Social Networks Conceptual Clarification, Social Networks, 1, pp215-239, 1979
- 15) BarGera, H, Transportation Network Test Problems, <http://www.bgu.ac.il/~bargera/tnp/>, accessed 2017/4/26



## Road Network Evaluation by Graph Topological Indices

Shuhei MYOKO, Fumitaka KURAUCHI and Hiroe ANDO