

交通容量重み付き固有ベクトル中心性指標を用いた大規模道路ネットワーク接続性評価

安藤 宏恵¹・倉内 文孝²

¹正会員 東京工業大学研究員 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: ando.h.ag@m.titech.ac.jp

²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: kurauchi@gifu-u.ac.jp

安全かつ円滑な交通を確保するために、効率的かつ効果的な輸送能力をもつ道路ネットワークを整備する必要がある。これまでに、信頼性・脆弱性分析など多くの道路ネットワーク評価手法が提案されているが、前提となる需要データや事象発生確率の不確実性が課題となるものが多い。また、計算負荷の大きな手法ではネットワークの詳細度や範囲などの条件によって評価結果に違いが生じることもあり、大規模ネットワークに適用可能な安定的な評価手法は未だ確立されていない。本研究では、ネットワークの形状的な特徴から接続性を評価する交通容量重み付き固有ベクトル中心性を用いて、道路ネットワーク接続性の簡便な評価を試みる。従来の評価手法や他の中心性指標による評価結果と比較したうえで、大規模実ネットワークへの適用結果から本手法の有用性を示す。

Key Words : road network, large scale network, centrality, eigenvector centrality,

1. はじめに

人々の日常生活や社会活動・経済活動において、交通システムが果たす役割は大きく、安全かつ円滑な交通を確保するためのインフラシステムを整備することは重要である。近年、わが国では高齢化に伴う人口減少や過疎化が進行しており、鉄道などの公共交通サービスが十分ではなく交通手段が制限される地域に居住する住民は道路に依存した生活をおくらざるをえない。さらに、都市部においても地震等の災害発生直後には交通システムの混乱のなか、道路の重要性はより一層高まる¹⁾。実際、過去に発生した阪神淡路大震災や東日本大震災の発生直後には、道路沿線の構造物倒壊や路面亀裂などによる道路の不通が各地で起こり、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、都市システム上の交通機能を維持する頑健な道路ネットワークを構築することは非常に重要な課題の一つである。

今までも、頑健な道路ネットワーク構築を目指し、道路ネットワーク評価手法に関する研究は多く実施されている。それらは大きくネットワーク信頼性分析と脆弱性分析の2つに分類される。道路ネットワーク信頼性分析は一般的に、所与のリンク途絶確率のもと、予測される

システムの損失の大きさに基づいてネットワークを評価する²⁾。災害の発生確率を取り扱う指標として、リスク評価は災害や渋滞等の発生確率とその事象による被害の大きさを積として定義し、発生する事象によって本来の交通機能が十分に発揮できない状態を期待値として評価する。一方、道路ネットワーク脆弱性分析は、発生は低頻度であるが破局的な被害をもたらすような災害事象を評価するために、発生確率に依存せず事象による影響の大きさのみに基づいて評価をおこなう手法である³⁾⁴⁾。

また、従来の道路ネットワーク評価、分析手法の多くは災害発生確率やODデータ交通量等の需要データを使用しており、評価結果はそれらに大きく依存する。しかしながら、災害発生確率そのものや災害時の需要パターンを精度よく推定することは非常に難しく、さらには長期的な需要データを予測することも難しい。災害発生確率に依存しない評価をおこなう脆弱性分析においても、最短経路探索や経路列挙などの計算を必要とすることが多く、計算負荷を考慮したうえで分析対象の範囲を制限、もしくはリンク集約ネットワークを用いる必要が生じることが多い。そのため、対象とするネットワークの規模や形状が変わることによって評価結果が大きく変わってしまうという課題があげられ、正確に大規模な道路ネッ

ネットワークを評価する手法は確立されていない。安定的かつ容易に大規模道路ネットワークでの評価を可能とする手法が求められている。

このような背景を踏まえ、本研究では、需要データを必要とせず確率に依存しないネットワーク形状 (Network Topology) による道路ネットワーク評価に着目する。グラフ理論に基づく Network Topology 指標は、ネットワークを形状的なつながりの特徴から分析する手法である。Network Topology 指標の一つである中心性指標は、ネットワーク内の最も重要なリンクやノードを識別することが可能であり、様々な重要性の定義により多くの中心性指標が提案され活用されている。そのなかでも、比較的計算負荷が小さく大規模ネットワークに適用可能な手法として、固有ベクトル中心性⁹⁾による道路ネットワーク評価を試みる。固有ベクトル中心性は重要なノードと接続しているノードに隣接する場合において値が大きくなる指標であり、重要度の高いノードが相互に接続する部分はより重要と評価され、反対に重要度の低いノードが相互に接続する部分は重要ではないと評価される。また、重み付き固有ベクトル中心性は、ネットワークにおいて任意に設定した重みの影響が強い部分を特定する。この手法は、最短経路探索や経路列挙といったアルゴリズムを使用する必要がないため、ネットワーク条件に依存することなく評価が可能な指標である。

大規模道路ネットワークにおける安定的な評価の実現を目的とし、実際の道路ネットワークを用いて固有ベクトル中心性による評価を試みる。まず、従来の道路ネットワーク評価手法と比較し、固有ベクトル中心性指標の道路ネットワーク評価における有用性を確認する。さらにいくつかの中心性指標との比較により、それぞれの中心性指標に基づく評価の特性を把握し、それらの関係性を検証する。最後に、すべての道路種別を含む実ネットワークに適用した結果を分析することで、ネットワーク条件に依存しない評価を可能とすることの意義について考察する。

2. Network Topology 指標

(1) 中心性指標

本研究では、多くある Network Topology 指標のなかでも中心性指標に着目する。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である。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。代表的な中心性の定義についていくつか説明を加える。最もシンプルな定義とされる次数中心性⁹⁾は、接続するリンクの本数でそのノードの中心性が決定され

る。ハブがネットワークの中心であるという考え方に基づく中心性指標である。近接中心性⁷⁾は自分が示すノードから他のすべてのノードまでの平均距離がどの程度短いかによって定義されるものである。距離はノード間の最短経路の距離を用いる。媒介中心性⁸⁾は、すべてのノードペアの最短経路において、対象のノードやリンクが何回含まれるかによって定義されるものである。最短経路に多く含まれるノードやリンクほど重要であるとする。そのほかにも、Page Rank 中心性⁹⁾や Katz 中心性¹⁰⁾など、中心性指標は多く存在する。本研究では、中心性指標のなかでも最短経路探索をおこなう必要がなく、隣接するノードのすべてに影響を与え、影響の伝播が表現可能である固有ベクトル中心性⁹⁾に着目する。固有ベクトル中心性は重要なノードと接続しているノードと多く隣接している場合に中心性が高くなるという指標である。そのため、中心性の高いノードが集中している部分では、相乗的により一層中心性が高くなるという特徴をもつ。道路ネットワークにおける供給機能の接続性を評価する目的において、供給能力をあらゆる特徴量のひとつである交通容量をリンクに重みづけした固有ベクトル中心性指標を用いる。これにより、道路ネットワーク上の供給機能の影響の広がり方を把握し、交通容量を考慮したネットワーク形状に基づく接続性評価へ繋ぐことを試みる。

(2) 固有ベクトル中心性⁹⁾

ここでは重み付き有向グラフにおいて活用可能な固有ベクトル中心性について紹介する。まず、ネットワークをグラフ理論により分析するため、隣接行列を用いる。隣接行列とは、ネットワーク上の接続関係を表現するものである。いま、ネットワークが $G = (\mathbf{V}, \mathbf{E}, \mathbf{w})$ で表現されるものとする。ただし、 \mathbf{V} はノードの集合、 \mathbf{E} はリンクの集合、そして \mathbf{w} は各リンクに紐付けられた重み (> 0) である。このとき、隣接行列 \mathbf{A}_G は、大きさ $|\mathbf{V}| \times |\mathbf{V}|$ であり、以下を要素に持つ行列である。

$$a_{ij} = \begin{cases} w_e & \text{if } e = (i, j) \in \mathbf{E}, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

つまり、ネットワーク上のノード u から v に向けてリンクがある場合、そのリンクに対応する重み w_e を要素に持つ。もし、重みを考慮しない場合、 $w_e = 1$ とする。無向リンクの場合、隣接行列 \mathbf{A}_G は対称行列となる。

隣接ノードが重要性の高いノードと接続しているほど中心的である基準に基づいて定義される固有ベクトル中心性を求めるには、以下の漸化式を考える。

$$\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) \quad (2)$$

ただし、

- $\mathbf{x}(t)$: 頂点 v_i の中心性 u_i を並べたベクトル
- x_i : 頂点 v_i の影響力
- t : 更新回数。

式(2)の第*i*成分を取り出すと、

$$x_i(t + 1) = \sum_{j=1}^N A_{ij}x_j(t) \quad (3)$$

式(3)を頂点*v_i*の影響力*x_i*は隣接ノードに渡る*x_j*の和であると解釈する。得られる更新値*u(t + 1)*を式(2)において*t*を1増やした右辺に代入すると*u(t + 2)*を得る。これを繰り返すと*u₁, ..., u_N*が発散してしまうため*u₁, ..., 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となる。隣接行列*A*の最大固有値を*λ**とおくと固有ベクトル中心性は式(4)のように定まる

$$Ax = \lambda^*x \quad (4)$$

ただし、

- x** : 固有ベクトル
- λ*** : 最大固有値

最大固有値*λ**に対応する固有ベクトル*x**が固有ベクトル中心性となる。上記により得られる固有ベクトル中心性をもとに道路ネットワーク評価をおこなう。評価対象とする道路ネットワークの特徴を考慮し、分析には有向グラフを用いる。

本研究では道路ネットワークの供給能力を評価するために、式(5)に示すように各リンクが持つ交通容量を重みとして設定する。これにより、ネットワーク形状に基づく接続性に加え、道路サービス供給機能の繋がりについて評価することを試みる。

$$w_e = c_e \quad (5)$$

ただし

- c_e* : リンク*e*の交通容量

3. 他指標との比較による有用性の検証

本章では固有ベクトル中心性指標の道路ネットワーク評価における有用性を検証するため、既存の道路ネットワーク評価指標による評価結果や代表的な中心性指標と比較をおこなう。計算が容易な小規模実ネットワークとして、図-1に示す岐阜県岐阜市の県道以上の道路のみを含むネットワークを用いて試算する。ノード数は177、リンク数は554（有向）である。岐阜市は中心部に岐阜駅や市役所が位置し、南部には大容量のバイパス道路である国道21号が通っている。北部は山間部が多いという特徴を持つ。図中のリンクの太さは交通容量（台/日）の大きさを示す。

(1) 既存の道路ネットワーク評価手法との比較

固有ベクトル中心性指標の道路ネットワーク評価における有用性を検証するために、既存の道路ネットワーク評価手法との比較をおこなう。ここでは、既存手法とし

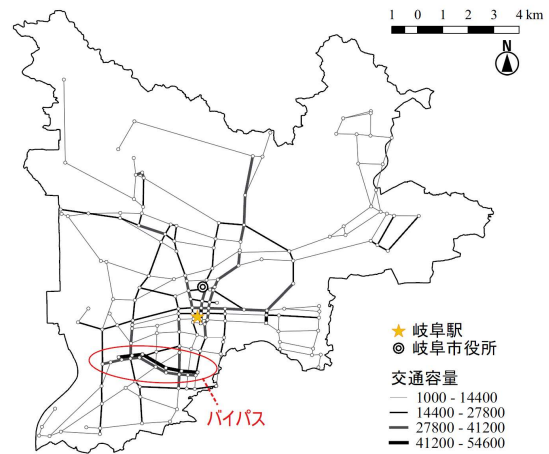


図-1 岐阜市道路ネットワーク

て接続脆弱性の一つである非重複経路数による評価²⁾を比較対象とする。固有ベクトル中心性との比較において、各ノードごとの接続性の評価とするため、あるノードから全てのノードペア間の平均非重複経路数によってそのノードの接続性を評価する。非重複経路数はノードペア間の経路数を数える必要があり、固有ベクトル中心性の指標を用いることで非重複経路数と相関の高い結果を得ることができる場合、道路ネットワーク接続性の評価として非常に有益であるといえる。

非重複経路数とは任意のノードペア間においてリンクを共有しない独立した経路の本数である。ノードペア間に*N*本の重複しない経路が存在するとき、*N - 1*本のリンクが断絶した場合においてもノードペア間の接続は確保される。以下のように重複しない経路数を最大とする線形最適化問題として定式化される。

$$\max_{N_{ij}} N_{ij} \quad (6)$$

subject to

$$\sum_{a \in out(i)} x_a = N_{ij}, \sum_{a \in in(i)} x_a = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{a \in out(j)} x_a = 0, \sum_{a \in in(j)} x_a = N_{ij} \quad (8)$$

$$\sum_{a \in out(k)} x_a = 0 - \sum_{a \in in(k)} x_a = 0 \quad (9)$$

$$\forall k \in \{k \in K, k \neq i, j\} \quad (10)$$

$$x_a = \{0, 1\} \quad (11)$$

ただし、

- N_{ij}* : ノード *ij*間の非重複経路の本数
- K** : ノードの集合
- x_a* : リンク *a*が非重複経路に含まれるならば 1, そうでなければ 0をとる二値変数
- k* : 非重複経路に含まれるノード
- in(k)* : ノード *k*に流入するリンクの集合
- out(k)* : ノード *k*から流出するリンクの集合
- K* : ネットワークに含まれるノード数

以上の線形最適化問題を解くことにより、ノードペア間でリンクを共有しない経路の数を得る。あるノード *i*の非重複経路数を用いた評価として、ノード *i*から全て

のノード間の平均非重複経路数 R_i によって接続性を評価する。

$$R_i = \frac{\sum_{j \neq i \in V} N_{ij}}{K-1} \quad (12)$$

なお、リンクを共有しない経路数が多いノードペアを多く持つノードほど接続性は高いといえる。

図-2に、岐阜市における非重複経路数の評価と固有ベクトル中心性による評価の結果を示す。ノードはそれぞれの指標値に基づき、4段階のレベルに等量で分類した。どちらの指標においても多くのリンクが相互に接続するネットワーク中央部では高い評価を示すノードが多い。また、バイパス道路付近の場所においても両指標による評価はどちらも高くなっていることがわかる。固有ベクトル中心性による評価では、レベル1に含まれるノードは岐阜駅や市役所が位置する市の中央部とバイパス道路付近に集中しており、外側に向かっていくにつれ接続性が徐々に低下する分布となっている。一方、平均非重複経路数による評価では固有ベクトル中心性と比較し上位50%に属するノードがネットワークのより広い範囲に存在する。ただし、北部の山間地においては、両指標ともに下位50%に属するノードがほとんどを占める。図-3に両指標による評価結果を散布図として示す。平均重複経路数のとる値は限定的であることが確認できる。また、固有ベクトル中心性において接続性が低く、平均非重複経路数において接続性が高く評価されるノードが存在している。しかしながら、固有ベクトル中心性の値が大きいものの、平均非重複経路数が小さいノードはみられない。これらの関係性を検証するために、順位相関による無相関検定をおこなった結果を表-1に示す。平均非重複経路数と固有ベクトル中心性の値とを比較することは難しいため、今回は順位相関を用いる。無相関検定結果より、p値が有意水準0.05より小さいため、両指標による評価には統計的に有意な相関があるといえる。また、順位相関係数も0.741であり、平均非重複経路数と固有ベクトル中心性による道路ネットワークの接続性評価には関係があることが確認できた。したがって、固有ベクトル中心性指標は道路ネットワーク評価において有用であるといえる。

(2) 代表的な中心性指標による評価結果の比較

前項では、既存の道路ネットワーク評価手法である非重複経路数に基づく接続脆弱性評価との比較により、固有ベクトル中心性指標の有用性を示した。ここでは交通容量を重みとする固有ベクトル中心性含めたいくつかの代表的な中心性指標を用いて岐阜市道路ネットワークの評価をおこなうことで、それらの指標による評価結果の違いや関係性を考察する。代表的な中心性指標として、表-2に示す次数中心性、近接中心性、媒介中心性、固有

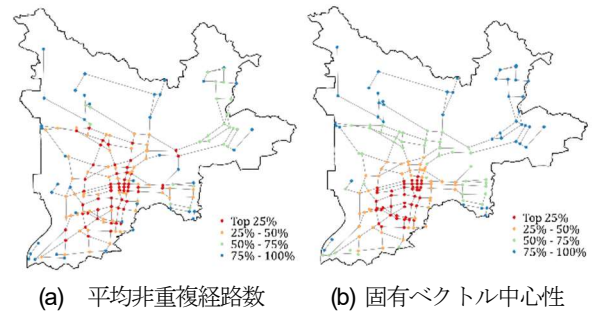


図-2 評価結果の分布

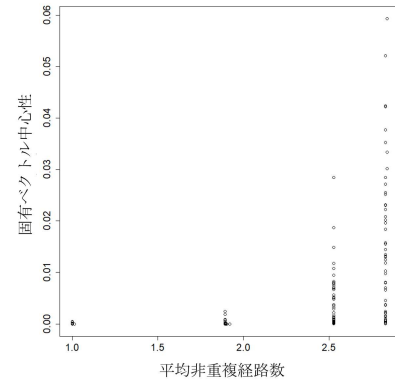


図-3 平均非重複経路数と固有ベクトル中心性の散布図

表-1 順位相関の無相関検定の結果

t 値	14.582
自由度	175
p 値	2.2e-16
相関係数	0.741

表-2 代表的な中心性指標

中心性指標	参照	定義式
次数中心性	Proctor & Loomis (1951)	$x_i = \sum_j^n a_{ij}$
近接中心性	Beauchamp (1965)	$x_i = \frac{n}{\sum_j d_{ij}}$
固有ベクトル中心性	Bonacich (1972)	$x_i = \sum_j A_{ij} x_j$
媒介中心性	Freeman (1977)	$x_i = \sum_{st} \frac{n_{st}^i}{g_{st}}$

ベクトル中心性の4つの指標を扱う。固有ベクトル中心性については、重みなしと交通容量重み付きの2種類を用いる。 x_i はノード i の中心性、 N はノード数、 d_{ij} はノード ij 間の最短経路距離、 n_{st}^i はノード i を通るノード st 間の最短経路数、 g_{st} はノード st 間の最短経路数である。

図-4にそれぞれの中心性指標を岐阜市道路ネットワークに適用した結果の分布を示す。ノードは各中心性の値に基づいて5段階のレベルに等量で分類されている。次数中心性のみ同じ値を持つノードが多く、5段階のレベルの分類が困難であるため、次数中心性の値 (1-5) そ

のものを分布上に示す。次数中心性はバイパス道路付近の評価が最も高く、他の中心性指標が市の中心部を高く評価する傾向があるなか、近隣の市町村間を接続する大容量道路を高く評価していることが特徴としてあげられる。大容量道路へ接続するための国道や県道が多く存在するため、接続しているリンクが多いほど中心性が高くなる次数中心性では、このような評価結果の分布が得られたといえる。大容量道路付近の中心性が高くなる指標としては、交通容量重み付き固有ベクトル中心性においても同じようにバイパス道路周辺のノードが高く評価されている。しかし、交通容量重み付き固有ベクトル中心性ではバイパス道路周辺のみではなく、市の中心部など他の場所においても同様に高い中心性を持つノードが存在している。

近接中心性と固有ベクトル中心性は重みなし、交通容量重み付きどちらにおいても分布傾向は類似している。中心部には高い評価を持つノードが多く存在し、山間部である北部に位置するノードのほとんどは中心性が低い。表-3に5つの指標による中心性評価の順位相関係数を示す。特に、近接中心性と交通容量重み付き固有ベクトル中心性の順位相関は0.9263と非常に高い。固有ベクトル中心性を用いることで、あるノードから全てのノード間最短距離の平均値によって定められる近接中心性による評価と同様の傾向を得ることが確認できた。固有ベクトル中心性は導出過程において最短経路探索や経路列挙の必要性がなく計算が非常に簡便でありながら、近接中心性と相関の高い評価結果を示すことが可能といえる。

媒介中心性による評価では、同じレベルに属するノードが集まるのではなく、ネットワーク上に散布している傾向がみられ、中心部以外に位置するレベル1のノードも複数存在する。媒介中心性では、全ノードペア間の最短経路上により多く存在するノードほど重要と評価される。そのため、他の中心性指標では評価が低くなると考えられる形状の特徴から簡単に分断されやすい場所が重要とみなされる。岐阜市の例では、図-4の黒丸で示すような少ないリンクとノードによって接続される部分の評価について、近接中心性や固有ベクトル中心性では低くなっているものの、媒介中心性では高く評価されていることがわかる。このように実際の道路ネットワークを用いた分析において、中心性の定義に基づく特性の違いがみられた。

本研究で分析に用いる重み付き固有ベクトル中心性について、実際の道路ネットワークに適用した際の評価の傾向を確認し、その他の中心性指標による評価との比較をおこなった。近接中心性による評価と同様の傾向を示すことに加えて、次数中心性において非常に高い中心性を持つバイパス道路周辺のノードについても高い評価をしていることがわかった。容量重み付き固有ベクトル中

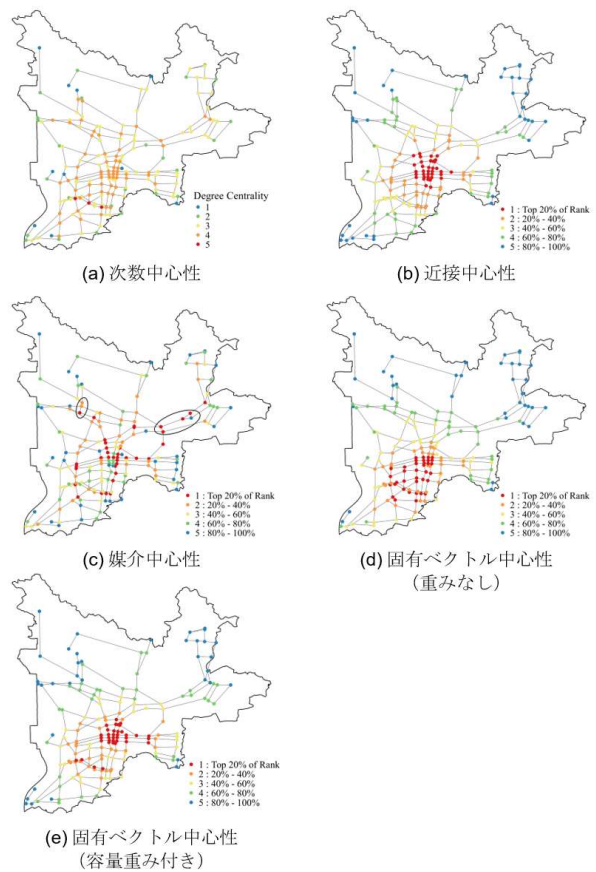


図-4 各中心性指標による評価の分布

表-3 中心性指標間の順位相関係数

順位相関係数	次数中心性	近接中心性	媒介中心性	固有ベクトル中心性 (重みなし)	固有ベクトル中心性 (容量重み付き)
次数中心性	1				
近接中心性	0.5004	1			
媒介中心性	0.5554	0.5132	1		
固有ベクトル中心性 (重みなし)	0.5717	0.7679	0.3546	1	
固有ベクトル中心性 (容量重み付き)	0.4974	0.9263	0.47646	0.8405	1

心性は最短経路探索を必要とせず大規模ネットワークへの適用が可能であるという利点を生かし、交通容量を考慮した道路ネットワーク評価をおこなうことができる指標であると考えられる。

4. 全道路ネットワークを用いた分析

前項において道路ネットワーク評価における有用性が確認された固有ベクトル中心性指標の大きな利点は、計算負荷の高い従来手法による評価が困難である大規模ネットワークへの適用可能性である。大規模ネットワークとは広範囲だけではなく詳細度の高いネットワークも対象とすることができるため、リンク集約などをおこなうことなく分析が可能となる。ここでは、容量重み付き固

有ベクトル中心性指標により市町村道を含む全道路ネットワークを用いた道路ネットワーク接続性の評価をおこない、全ての道路を対象としたネットワーク分析の重要性を示す。図-5に示す岐阜県内の高速自動車国道，一般国道，県道，市町村道の全種別の道路を含むネットワークを分析対象とする。ノード数は138,871，リンク数（有向）は399,438である。全道路ネットワークのリンク交通容量（台/日）は道路種別コードに基づき，道路構造令の道路区分によって定められる計画交通量（台/日）を用いて設定し，図-6のような構成となっている。全道路を含むネットワークを使用する場合と，そうではない場合における評価結果の違いを検証するために，同範囲かつ同様の方法で交通容量を設定した市町村道を含まない県道以上のみで構成されたネットワーク（ノード数1,460，リンク数4,578（有向））を比較対象として使用する。以下，本論文では全道路ネットワークを“詳細ネットワーク”，県道以上の道路ネットワークを“簡略ネットワーク”と呼ぶこととする。

詳細ネットワークにおいて容量重み付き固有ベクトル中心性を適用した際の中心性分布を図-5に示す。ノードは5段階のレベルに等量で分類されている。また，計算時間は57.98秒（CPU: Intel Xeon E5-1620v4@3.50GHz，メモリ:32GB，OS: Windows10, 64bit）であり非常に扱いやすい手法である。図-5では岐阜県全体では評価結果の特徴が不明瞭であるため，いくつかの市を抽出して分析，考察をおこなう。各都市の分析では，岐阜県全体を対象にした詳細ネットワークにおける容量重み付き固有ベクトル中心性の値を用いる。しかしながら，これらは詳細ネットワークにおいて正規化された中心性の値であるため，各ノードが持つ中心性は非常に小さい。各都市内の傾向を考察するため，それぞれの都市に含まれるノードのうち最小の中心性を1としたときの相対値によって評価する。以上の条件のもと，本論文では下呂市，郡上市，岐阜市の3市について詳細ネットワークと簡略ネットワークにおける容量重み付き固有ベクトル中心性による評価に基づいた分析をおこなう。3市の位置関係と地理的条件は図-7に示すように，下呂市と郡上市は山間部に位置し，岐阜市は道路の密度の高い都市部に位置する。

(1) 下呂市

下呂市は自動車専用高速道路がなく，郡上市を南北に通る東海北陸自動車道から国道256号が接続しているという道路整備状況である。図-8は，市内の中心性最小値に基づく相対値を示す。簡略ネットワークと詳細ネットワークにおける固有ベクトル中心性評価をそれぞれ三角形（橙）と円形（青）のノードに示す。簡略ネットワークにおける評価は市内の西部，南部において高い。これは，下呂市の西方面に位置する十分な容量を持つ高速道

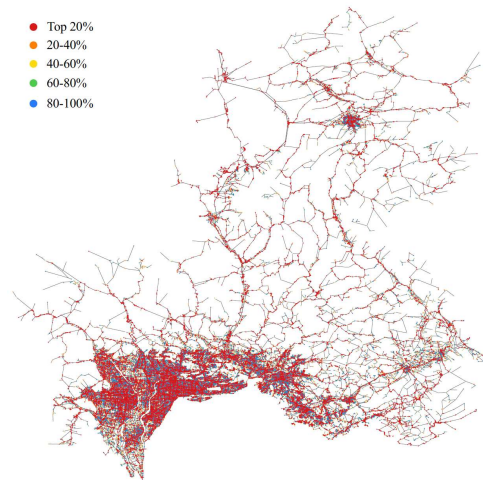


図-5 岐阜県全道路ネットワーク

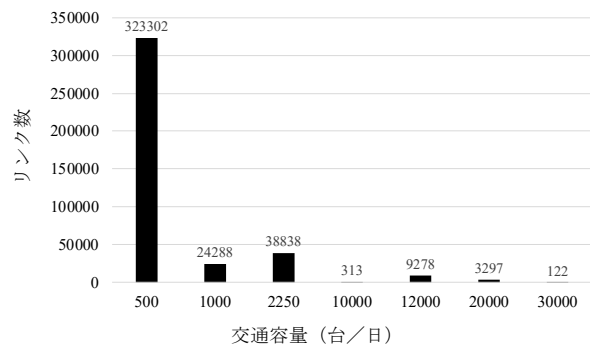


図-6 全道路ネットワークにおける交通容量

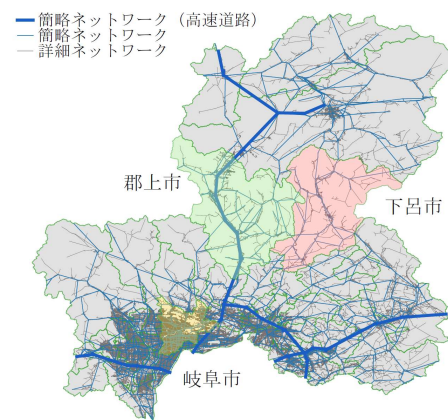


図-7 下呂市，郡上市，岐阜市の位置関係

路（東海北陸自動車道）の影響が大きいと考えられる。一方，下呂市役所が位置する市の中心部における評価は決して高くない。簡略ネットワークでは，大容量道路の影響を明確に反映することは可能であるが，それ以外の観点において小さな市町村レベルでは道路の供給機能が強く接続されている部分と弱く接続されている部分を区別することは難しいといえる。詳細ネットワークにおける固有ベクトル中心性評価では下呂市役所の北部と南部に中心性が高いエリアが存在する。さらに，簡略ネットワークでは均一的に高い中心性を持ち，接続性が強いと評価される市内西部と南部において，詳細ネットワークによる評価では強く接続されたエリアと弱く接続された

エリアの両方が存在していることがわかる。市内全体の分布状況としては、詳細ネットワークにおける中心性はどこかが特に集中的に高いといった傾向はなくまばらに分布している。大容量道路の影響のみではなく、小さな道路による影響を考慮した道路ネットワークの接続性評価をあらわしている。図-9は道路ネットワークデータと同年の500mメッシュ人口¹³⁾を示す。人口が非常に少ない市内北東部では詳細ネットワークによる接続性評価も低い。一方、市内南東部は人口が少ないものの接続性は強いと評価されている。この地域は市外の道路ネットワーク整備状況の影響が大きいと考えられる。ここで例として示した下呂市南東部は南方向に位置する中津川市に接続する国道41号が存在するため、接続性は高く評価されている。このように特定の市町村における状況を把握する場合においても、広範囲の詳細な道路ネットワークを対象として分析することで、外部地域との接続による影響を考慮した評価が可能である。

詳細ネットワークと簡略ネットワークの容量重み付き固有ベクトル中心性に基づき作成したヒートマップ図を図-10、図-11に示す。簡略ネットワークでは市内北東部以外のほとんどのエリアがほぼ均一に評価されているのに対し、詳細ネットワークでは接続性が強い部分と弱い部分が顕著に抽出されていることがわかる。下呂市市役所付近の市内中心部の接続性評価に関しては、詳細ネットワークによる分析結果より北部や南部との接続が不十分であることが示され、孤立しやすい接続性状況となっていることがわかる。また、簡略ネットワークにおいて大容量道路の影響を大きく受けている市内南西部についても、詳細ネットワークによる評価では強く接続される地域として金山地区が抽出され、そのほかのエリアでは接続性が低いという結果が得られた。以上のように、詳細ネットワークを用いることでネットワーク解像度が向上し、狭隘な道路の影響を考慮した接続性評価が可能となった結果、県道以上のネットワークを用いた分析ではあらわれなかった特徴を見出すことができた。

(2) 郡上市

郡上市においても下呂市と同様に図-12に示す市内の中心性最小値に基づく相対値によって評価をおこなう。郡上市は南北方向に東海北陸自動車道が通っているため、詳細ネットワーク、簡略ネットワークどちらの評価においても高速道路周辺に高い中心性を持つノードが存在するという傾向は同じである。しかし、詳細ネットワークにおける評価では黒い点線で囲まれた部分のいくつかのノードは高速道路周辺に位置するものの接続性評価は低い。この地域は高速道路周辺に位置するものの容量の小さい市町村道が密集しているため、このような評価になったと考えられる。簡略ネットワークではそのような市

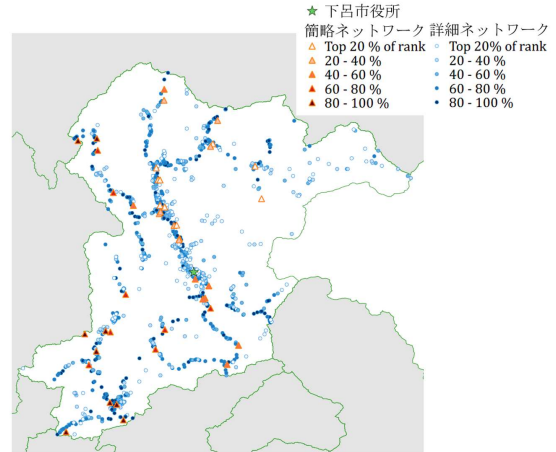


図-8 両ネットワークの固有ベクトル中心性（下呂市）

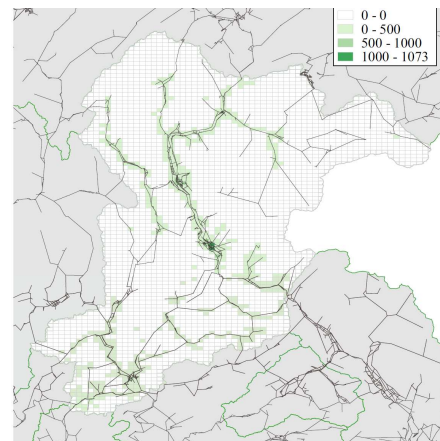


図-9 下呂市の人口分布図

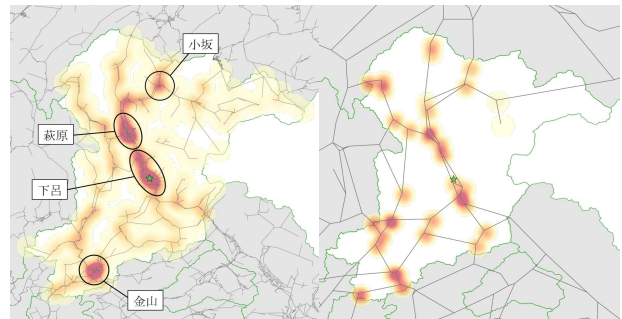


図-10 ヒートマップ（詳細） 図-11 ヒートマップ（簡略）

町村道は省略されているため、高速道路付近において接続性が低くなる地域はほとんどみられない。詳細ネットワークによる接続性評価によって、地理的な条件においては近隣に大容量道路が備わっているものの、それらに接続する道路の容量が十分に確保されていない場合、接続性が低くなる地域が存在することが示された。

郡上市内東部の山間地に着目すると、図-13、図-14に示す中心性の値に基づくヒートマップよりネットワークによる接続性評価の違いがみられた。図-14の簡略ネットワークによるヒートマップ図では市役所付近の市内中心部と高速道路付近では接続性が強く、市内東部の山間地では接続性は弱いと評価されていることがわかる。一

方、詳細ネットワークによるヒートマップ図では、同じく市内中心部と高速道路付近の接続性は強く評価されており、さらに市内東部にも接続性がやや高くなっている部分がある。山間部に含まれるほかのノードよりも接続性が強く評価されている地域には集落（明宝地区、和良地区）が存在し、特に和良地区は山間部において比較的接続性評価が高い。この地区には隣接する下呂市と接続する国道256号が通っており、国道の影響も大きいと考えられる。このように、詳細ネットワークの分析により大容量道路を含まない山間地の道路ネットワーク接続性評価が可能である。

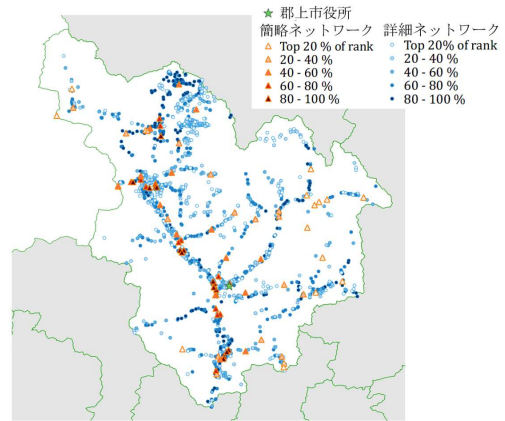


図-12 両ネットワークの固有ベクトル中心性（郡上市）

(3) 岐阜市

岐阜市は岐阜県の県庁所在地であり、これまでに接続性評価の考察をおこなった下呂市、郡上市と比較し、非常に密な道路ネットワークをもつ。岐阜市を対象とすることで、郡上市において見出された大容量道路の付近であるが容量の小さな道路が密集していることによって接続性が低く評価される事象について検証する。詳細ネットワークと簡略ネットワークにおける容量重み付き固有ベクトル中心性の評価を図-15に示す。簡略ネットワークでは市内東部の接続性が強い傾向にある。これは市外の東方向に位置する東海北陸自動車道と東海環状自動車道の大容量道路の影響が大きい。市内西部のほうは接続性が弱い傾向にあり、特に北西部の接続性評価は低い。一方、詳細ネットワークによる評価では強く接続される部分と弱く接続される部分は市内全体にまばらに分布しており、簡略ネットワークにおいてみられた傾向はあらわれていない。例えば、図-15中において黒枠で示すエリアでは、詳細ネットワークと簡略ネットワークにおける接続性評価に大きな違いがみられる。簡略ネットワークでは非常に高い接続性評価であるが、詳細ネットワークでは弱い接続性を示すノードも多く存在するエリアである。図に示す航空写真を用いて確認した結果、このエリアは農地を置く含んでおり、小さな容量の道路が多いことがわかった。このエリアのネットワーク解像度による接続性評価の違いに関する傾向は図-16、図-17に示すヒートマップ図からも非常にわかりやすい。簡略ネットワークのヒートマップにおいてみられる黒枠内の接続性評価が高くなっている特徴は、詳細ネットワークのヒートマップでは現れていない。大容量道路の近隣であり、かつ道路ネットワークが密に存在するものの十分な容量を持つ道路が存在しないため、大容量道路による接続性の強さを享受していないエリアといえる。また、詳細ネットワークにおけるヒートマップでは市内南部や西部にも高い接続性評価をもつノードがいくつか存在しており、大容量道路とは距離が離れているものの道路ネットワークの供給機能として強く接続している部分が存在するこ

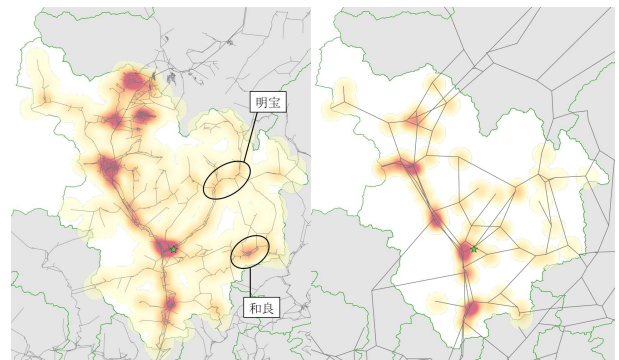


図-13 ヒートマップ（詳細） 図-14 ヒートマップ（簡略）

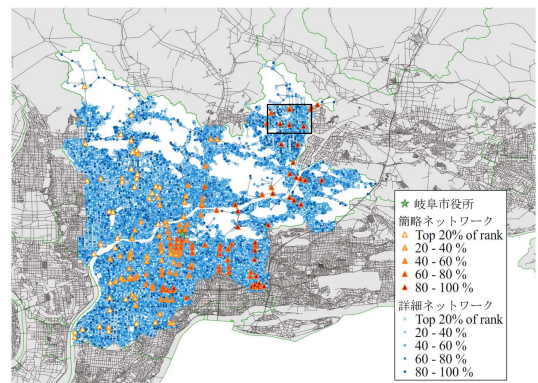


図-15 両ネットワークの固有ベクトル中心性（岐阜市）

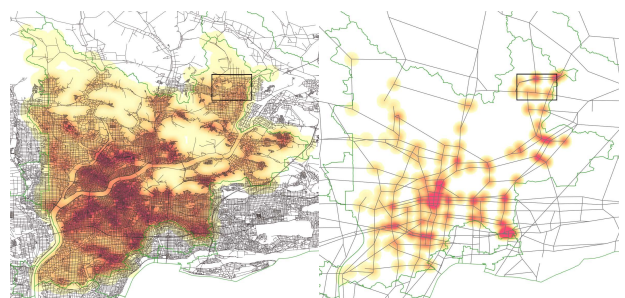


図-16 ヒートマップ（詳細） 図-17 ヒートマップ（簡略）とを示している。このような特徴はすべての道路種別を含む全道路ネットワークを広範囲に分析することにより明らかにされるものといえる。

5. おわりに

本研究では、交通容量を重みとする固有ベクトル中心指標を用いて、Network Topologyの観点から道路の供給機能に基づくネットワーク接続性を評価した。中心性指標の一つである固有ベクトル中心性指標の道路ネットワーク評価における有用性を検証するため、岐阜市の道路ネットワークを用いて接続脆弱性手法である非重複経路数による評価結果と比較をおこなった。その結果、固有ベクトル中心性指標と非重複経路数による評価には統計的に有意な相関が確認されたことから、道路ネットワーク評価手法として固有ベクトル中心性指標は有用であると結論づけられた。さらに、そのほかの代表的な中心性指標として、次数中心性、近接中心性、媒介中心性を対象にそれぞれの中心性指標による評価の特徴を整理し、それらの関係性を検証した。その結果、最短経路探索を必要としない固有ベクトル中心性が、特に近接中心性と高い相関を持つという大規模ネットワーク分析における利点が明らかになった。最後に、実際の大規模道路ネットワークとして、岐阜県全道路ネットワークに容量重み付き固有ベクトル中心性を適用し、同じく岐阜県の県道以上のみを対象としたネットワークによる評価との違いを検証した。下呂市、郡上市、岐阜市に着目し、全道路を含めた接続性評価によって明らかになった特徴について考察することで、大規模ネットワークに適用可能な評価手法の重要性を述べた。

今後の課題として、何らかの障害が発生したときのノードやリンクの欠落が接続性評価へもたらす変化状況を検証することで、障害が道路供給機能の接続性へ与える影響を明らかにすることが可能であると考えられる。容量重み付き固有ベクトル中心性を活用することで大規模道路ネットワークにおいても簡便に接続性評価が可能であることを確認できたため、あらゆる障害パターンについて繰り返し計算も容易である。この利点を活かし、供給

機能の接続性において重要な役割を果たす部分の特定を試みたい。

謝辞：本研究は、JSPS科研費JP18H01557の助成を受けて遂行された。ここで記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国際交通安全学会研究調査プロジェクト報告書, 災害時の道路交通マネジメントならびに震災に強い交通システムに関する調査 ~集集大地震を例に~, 2000.
- 2) Bell, MGH and Iida, Y, "Transportation Network Analysis", John Wiley & Sons, NY. 1997.
- 3) Berdica, K., "An introduce to road vulnerability: What has been done, is done and should be done" Transport Policy, 9(2), 117-27, 2002
- 4) D'Este, G. M., & Taylor, M. A. P., "Network vulnerability: An approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks." In M. G. H. Bell, & Y. Iida (Eds.), The network reliability of transport, 23-44, 2003.
- 5) Bonacich, P.: Factoring and Weighting Approaches to Status Scores and Clique Identification, Journal of Mathematical Sociology, 2, pp.113-20, 1972.
- 6) Proctor, C H and Loomis, C P.: Analysis of Sociometric Data, In Research methods in social relations, ed. Holland, P W and Leinhardt, S, pp.561-86, 1951.
- 7) Beauchamp, M. A.: A Improved Index of Centrality, Behavioral Science, Vol.10, Issue 2, 1965.
- 8) Freeman, L.: A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness, Sociometry, 40, 1, pp.35-41, 1977.
- 9) Brin, S. and Page, L.: Anatomy of A Large-Scale Hyper-textual Web Search Engine, Proceedings of the 7th International World Wide Web Conference. 107-117, 1998.
- 10) Katz, L.: A New Status Index Derived from Sociometric Analysis, Psychometrik, 18, 39-43, 1953.
- 11) 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.
- 12) 国勢調査, 男女別人口総数及び世帯総数, 4次メッシュ, 2006.

(2020.3.8 受付)

LARGE-SACLED ROAD NETWORK CONNECTIVITY EVALUATION BY USING CAPACITY WEIGHTED EIGENVECTOR CENTRALITY MEASURE

Hiroe ANDO, Fumitaka KURAUCHI